Energieperspektiven

Szenarien zum zukünftigen Energiebedarf des Wohngebäudeparks Luxemburgs

Luxemburg 2010 – 2070



Energieinstitut Vorarlberg
Vallentin + Reichmann Architekten

Impressum

Energieperspektiven Luxemburg 2010 - 2070

Szenarien zum künftigen Energiebedarf des Wohngebäudeparks Luxemburgs

im Auftrag des
Ministeriums für Wirtschaft Luxemburg
Generaldirektion Energie
Luxemburg

Bearbeitung:
Energieinstitut Vorarlberg, Dornbirn (A)
Vallentin+Reichmann Architekten, München (D)

Verfasser:
Martin Ploss, Energieinstitut Vorarlberg
Tobias Hatt, Energieinstitut Vorarlberg
Rainer Vallentin, Vallentin+Reichmann
Michaela Kern, Vallentin+Reichmann

Umschlagsgestaltung:
Michael Lang, Grafiker, Erding (D)

Grafiken und Fotos: Energieinstitut Vorarlberg und
Vallentin+Reichmann Architekten
(andere Fotografen sind direkt bei den Abbildungen genannt)

Das Urheberrecht liegt bei den Autoren.

Energieinstitut Vorarlberg und Vallentin + Reichmann Architekten

Energieperspektiven Luxemburg 2010 - 2070

Szenarien zum zukünftigen Energiebedarf des Wohngebäudeparks Luxemburgs



Vorbemerkungen

Die „Energieperspektiven Luxemburg“ verfolgen das Ziel, über einen Szenarienvergleich wichtige Aussagen zur künftigen Entwicklung des Energiebedarfs des Wohngebäudeparks von Luxemburg zu machen. Nachdem es sich um ein träges System handelt, wurde der Betrachtungszeitraum mit 2010-2070 so gewählt, dass er wenigstens einer Instandsetzungs- bzw. Erneuerungsperiode entspricht.

Im einführenden Kapitel, das zugleich eine Kurzfassung der Studie darstellt, werden ausgehend vom energiepolitischen Rahmen die Ziele der Studie umrissen um anschließend die Prämissen und die Methodik in knapper Form zu erläutern. Im Rahmen dieser Kurzfassung werden bereits zentrale Ergebnisse und die Handlungsempfehlungen genannt.

Danach werden im Hauptteil der Studie die Eck- und Basisdaten erläutert, auf denen die szenariengestützte Untersuchung basiert. Nach der Beschreibung der Szenarien- und Modellbildung sowie der verwendeten Rechenverfahren werden die zentralen Ergebnisse zusammengefasst, die dann zu strategischen Fragen und Analysen überführen.
Abschließend werden in einem Sonderteil die Integration von Elektromobilität sowie deren Deckung durch den verstärkten Einsatz von PV-Anlagen in das vorhandene Modell überprüft.

Die Studie entstand in enger Kooperation zwischen dem Energieinstitut Vorarlberg in Dornbirn und Vallentin+Reichmann Architekten aus München.

Die Autoren bedanken sich bei myenergy G.I.E. für die Mitwirkung bei der Beschaffung von Daten zum Gebäudebestand sowie zu typischen und relevanten Gebäudetypen in Luxemburg.

Inhalt

1 Einführung und zentrale Ergebnisse S. 8

1.1 Zielsetzung und Eingrenzung der Studie S. 9
1.2 Prämissen und methodischer Rahmen S. 11
1.3 Szenariengestützte Untersuchung S. 14
1.4 Zentrale Ergebnisse S. 19
1.5 Handlungsempfehlungen S. 27

2 Luxemburg – Energieperspektiven S. 34

2.1 Räumliche Struktur Luxemburgs S. 34
2.2 Siedlungsentwicklung S. 34
2.3 Denkmalbestand S. 34
2.4 Übersicht über die zentralen Eck- und Basisdaten S. 36
2.5 Klimaschutzziele in Übereinstimmung mit dem 2°C-Ziel der Pariser Klimakonferenz S. 38
2.6 Kostenoptimalitätsstudien zur Bestimmung der energetischen Qualitäten im Effizienz-Szenario S. 41

3 Ausgangssituation und -zustand S. 46

3.1 Strategische Gruppen im Hinblick auf die Bewertung der Eingriffsempfindlichkeit S. 46
3.2 Einteilung des Bestands in Baualtersklassen S. 47
3.3 Bestimmung des energetischen Ausgangszustands der Gebäude S. 47
3.4 Wärme- und Stromversorgung S. 50

4 Szenarien und Modellbildung S. 52

4.1 Beschreibung der Szenarien S. 54
4.2 Bilanzierung in den Szenarien S. 55
4.3 Kohortenmodell S. 57
4.4 Szenarioabhängige Annahmen zu den energetischen Qualitäten der Baukomponenten im Kohortenmodell S. 61
4.5 Nutzungsdauern und Erneuerungszyklen S. 64
4.6 Definition der Bezugsfläche S. 66
4.7 Szenarioabhängige Modellierung der energetischen Qualitäten der Technikkomponenten im Kohortenmodell S. 66

5 Entwicklung Heizwärmebedarf 2010 - 2070 S. 80

6 Entwicklung Endenergiebedarf 2010 - 2070 S. 88

7 Entwicklung Primärenergiebedarf 2010 - 2070 S. 94

8 Entwicklung Treibhausgasemissionen 2010 - 2070 S. 96

9 Strategische Fragen und Analysen S. 100

10 Ausbau Photovoltaikerzeugung und Elektromobilität S. 102

10.1 Abschätzung des zusätzlichen Strombedarfs des Wohngebäudeparks durch das Beladen von Elektroautos S. 102
10.2 Potenzialabschätzung und Ausbauszenarien für wohngebäudeintegrierte Photovoltaik S. 106
10.3 Abschätzung des eigengenutzten PV-Stroms – unter besonderer Berücksichtigung der Elektromobilität S. 112

11 Literatur S. 119

Vorwort

Der Energiebedarf des Gebäudeparks ist eine wesentliche Einflussgröße für den Ressourcenbedarf und die Treibhausgasemissionen einer Region.

Beim Wohngebäudepark handelt es sich aufgrund der langen Nutzungsdauern der baulichen und technischen Komponenten um ein sehr träges System. Erfolge lassen sich nur durch ein beharrliches und gleichzeitig konsequentes Handeln über lange Zeiträume erzielen. Das System verhält sich wie ein Dampfer, der sein Ziel nur über einen vorausschauenden und ruhigen Kurs erreicht.

Die nun vorliegende Studie soll genau dies aufzeigen: Ihr Gegenstand ist die Abbildung des zukünftigen Energiebedarfs und der klimarelevanten Emissionen der Luxemburger Wohngebäude in vier Hauptszenarien, die unterschiedliche Herangehensweisen repräsentieren. Im Mittelpunkt der Studie steht die Identifizierung einer Langfriststrategie, in der die dafür notwendigen Einzelmaßnahmen benannt und mit ihren Qualitätsanforderungen über mehrere Jahrzehnte hinweg in ihrem zeitlichen Ablauf definiert werden. So wird der Nachweis geführt, wie die energetischen Ziele Luxemburgs und die Klimaziele der Konferenz von Paris konkret erreicht werden können.

Die Untersuchung kann ferner dazu dienen, die Akteure in Luxemburg dabei zu unterstützen, Strategien und Maßnahmen zu entwickeln, die dazu geeignet sind, langfristige Klimaschutzziele im Verbrauchssektor der Wohngebäude auf möglichst wirtschaftliche Art und Weise zu erreichen. Die gewählte Vorgehensweise – der Vergleich von vier Grund- und einem Mischzenario – ermöglicht es, unterschiedliche Strategien im Hinblick auf Ihre Wirkung – die Veränderung des Energiebedarfs und der Treibhausgasemissionen – und auf ihre Wirtschaftlichkeit zu bewerten. Die Studie ergänzt die in den Jahren 2015/2016 in einer Workshopreihe zur Weiterentwicklung der Gebäuderenovierungs-strategie gewonnenen Erkenntnisse um quantitative Wirkungsabschätzungen für verschiedene Maßnahmen. Neben der Gebäuderenovierung für Gebäude mit und ohne Restriktionen aus dem Denkmalschutz wird auch der Neubau berücksichtigt.

Die Untersuchung beruht methodisch wesentlich auf der Dissertation eines der Autoren (Vallentin 2011). Alle Annahmen und Randbedingungen wurden für die Gegebenheiten in Luxemburg festgelegt. Insbesondere wurden die Bevölkerungs- und Wohnflächenentwicklung sowie die Zusammensetzung des Gebäudeparks mit seinen typischen Bauformen, Konstruktionen und energetisch relevanten Eigenschaften der Gebäudehülle sowie das Versorgungssystemen im Modell berücksichtigt.



1 Einführung und zentrale Ergebnisse

Auf internationaler Ebene ist das im Dezember 2015 verabschiedete Pariser Klimaabkommen nach der Ratifizierung durch die erforderliche Zahl von UN-Mitgliedsstaaten in Kraft getreten. Statt der 55 notwendigen haben inzwischen 145 Staaten das Abkommen ratifiziert. Auch nach dem angekündigten Austritt der USA bleibt das Abkommen der zentrale Pfeiler der internationalen Klimapolitik. Das Abkommen sieht vor, Maßnahmen zu ergreifen, um den Anstieg der globalen Mitteltemperatur auf deutlich unter 2 Grad, möglichst auf 1,5 Grad gegenüber dem vorindustriellen Niveau zu begrenzen. Luxemburg ratifizierte das Abkommen ebenso wie die gesamte Europäische Union Ende 2016.

Auf europäischer Ebene wurden zur Konkretisierung des schon länger definierten Langfristziels einer Reduktion der Treibhausgas-Emissionen bis 2050 um 80-95% gegenüber dem Niveau von 1990 neue Zwischenziele für 2030 festgelegt. Die EU verfolgt im Rahmen ihrer Klima-und Energiepolitik bis 2030 die folgenden Hauptziele:

- Senkung der Treibhausgasemissionen um mindestens 40% gegenüber dem Stand von 1990
- Erhöhung des Anteils erneuerbarer Energieträger auf mindestens 27%
- Steigerung der Energieeffizienz um mindestens 27%

Dieser Rahmen wurde im Oktober 2014 von den EU-Staats- und Regierungschefs angenommen und baut auf dem Klima- und Energiepaket 2020 auf. Die o.g. Reduktionsziele lassen sich nicht direkt auf einzelne Länder oder Sektoren beziehen. So wurde zunächst das EU-Treibhausgas-Einsparziel für die nicht unter den Emissionshandel fallenden Verbraucher auf 30% festgelegt. Aus diesem Wert wurden in Abhängigkeit von der Wirtschaftskraft staatenspezifische Einsparziele festgelegt. Für Luxemburg liegt der Zielwert bei einer Einsparung von 40% gegenüber 1990.

Als Folge der dargestellten Konkretisierung internationaler und europäischer Ziele hat die Diskussion um den richtigen Weg zur Verwirklichung der kombinierten Energiestrategien (Effizienzsteigerung und Dekarbonisierung) in vielen Mitgliedsstaaten an politischer Bedeutung gewonnen.

In Luxemburg wie in den übrigen Mitgliedsstaaten gilt es, aufbauend auf den EU-Zielen für 2020 für alle Sektoren Mittel- und Langfriststrategien mit Zielen und Maßnahmen für den Zeitraum bis 2030 und darüber hinaus zu definieren.

Für den Gebäudebereich legt die Energieeffizienz-Richtlinie EED in Artikel 4 fest, dass die nationalen Langfriststrategien die folgenden Elemente enthalten sollen:

- Überblick über den nationalen Gebäudepark auf der Basis statistischer Daten
- Identifikation wirtschaftlicher Ansätze zur energetischen Sanierung mit Differenzierung nach Gebäudetyp (und Klimazone)
- Strategien und Maßnahmen zur Stimulierung kostenwirksamer umfassender Sanierungen einschließlich schrittweise durchgeführter Sanierungen
- Zukunftsgerichtete Perspektive, um Investitionsentscheidungen von Privatpersonen, der Bauwirtschaft und Finanzinstituten in Richtung Sanierung zu lenken
- Abschätzung der erreichbaren Einsparungen und sonstiger Vorteile

Ein erster Überblick über den nationalen Gebäudepark und eine erste Grobabschätzung der bis 2020 erreichbaren Ein-

sparungen wurde im Dritten Nationalen Energieeffizienz-Aktionsplan Luxemburg NEEAP (MdE 2014) durchgeführt, in dessen Anhang eine Gebäuderenovierungsstrategie beschrieben wird. Diese Strategie wurde im Rahmen eines Beteiligungsprozesses mit mehreren Stakeholder-Workshops in den Jahren 2015 und 2016 konkretisiert.

Als Grundlage für die Festlegung sektoraler Ziele für den Gebäudeberich können die derzeitigen Zwischenstände, Maßnahmenbeschreibungen und Wirkungsabschätzungen gemäß NEEAP (vgl. MdE 2014 und MdE 2017) herangezogen werden.

1.1 Zielsetzung und Eingrenzung der Studie

Angesichts der dargestellten Entwicklung zur Konkretisierung langfristiger Reduktionsziele verfolgt diese Studie die folgenden Aufgabenstellungen:

- Quantifizierung der Energie- und Treibhausgas-Reduktionspotenziale des Wohngebäudeparks in Luxemburg bis 2050 durch Modellierung verschiedener Entwicklungsszenarien
- Ermittlung von Grundlagen zur Beschreibung eines sektoralen Reduktionsziels für die privaten Haushalte bzw. den Wohngebäudepark bis zum Jahr 2050
- Berücksichtigung wirtschaftlicher Aspekte bei der Bewertung der verschiedenen Szenarien

Konkret sollen hierbei vor allem die folgenden Fragen beantwortet werden:

1 Welche Energieeinsparungen und Reduktionen der Treibhausgas-Emissionen können mit unterschiedlichen Strategien bis 2050 erreicht werden?
2 Welche Energieeinsparungen und Reduktionen der THG-Emissionen werden erreicht, wenn die derzeitigen energetischen Qualitäten von Neubauten und Sanierungen unverändert beibehalten werden?
3 Welche Einsparungen sind möglich, wenn die Maßgabe der Wirtschaftlichkeit der Effizienzmaßnahmen beachtet wird?
4 Welche Rolle spielen Neubau und Sanierung für das Erreichen der genannten Einsparziele?
5 Inwiefern bilden Baudenkmale und der sonstige bedingt sanierbare Bestand ein Hemmnis für die Verwirklichung einer hohen Gesamteffizienz des Wohngebäudeparks?
6 Welche Beiträge können die Verringerung des Nutzwärmebedarfs (Heizwärme-, Warmwasser- und Strombedarf), die Effizienzsteigerungen der Wärme- und Stromversorgung und der Umstieg auf emissionsärmere bzw. erneuerbare Energieträger sowie die aktive Nutzung von Solarenergie für die anvisierten Gesamteinsparungen leisten?
7 Welche kurz-, mittel- und langfristigen Maßnahmen lassen sich aus den Szenarien ableiten?
8 Wie beeinflusst die zu erwartende Umstellung des Verkehrssektors auf Elektromobilität die Energiebilanz des Gebäudeparks – welche Rolle spielt die Beladung der Elektro-PKW in Wohngebäuden und inwieweit kann die Stromerzeugung aus gebäudeintegrierten PV-Anlagen im Gebäude selbst oder für die Beladung von Elektro-PKW genutzt werden?
9 Inwieweit kann die Studie eine belastbare Grundlage für das Monitoring und die Zielerfüllung der Effizienz- Klimaschutzziele Luxemburgs für die privaten Haushalte darstellen?

Die Studie soll dazu beitragen, Entscheidungsgrundlagen zur Festlegung von Langfristzielen und Umsetzungsmaßnahmen für den Sektor der Wohngebäude zur Verfügung zu stellen. Die Untersuchung kann aber nicht auf alle Fragen, die von allgemeinem Interesse wären, eine Antwort geben. So werden z.B. eigentumsspezifische Hemmnisse, Finanzierungsfragen oder die Frage einer sozialgerechten Modernisierung des Bestandes sowie einer sozialgerechten Energiepreisbildung außen vor gelassen.



1.2 Prämissen und methodischer Rahmen

Anhand szenariobasierter Modellrechnungen wird untersucht, mit welchen energetischen Standards und Versorgungslösungen die nationalen Ziele und die Ziele der Klimakonferenz in Paris 2015 im Wohngebäudepark von Luxemburg erreicht werden können. Hierfür ist die a-priori-Erkenntnis entscheidend, dass ein derartiges Ziel nicht in der Kurzfristperspektive umsetzbar ist (vgl. Vallentin 2011, S. IV-27 und IV-155). Aufgrund der großen Trägheit handelt es sich um einen langfristigen Transformationsprozess, der alle energetisch relevanten Systeme und damit die Gebäude (Gebäudehülle mit Lüftungskonzept) und die Versorgungssysteme (Wärme- und Stromerzeugung) umfasst. Daher sind die Szenarien in einem ausreichend großen Zeitrahmen zu modellieren. Gewählt wurden hierfür 40 - 60 Jahre. Diese Zeitspanne umfasst in etwa die typischen mittleren Nutzungsdauern aller Baukomponenten. Damit ist sichergestellt, dass alle Gebäude wenigstens einen Instandsetzungszyklus durchlaufen können.

Typologische Methode

Der Untersuchung liegt eine typologische Methode zugrunde. Damit ist gemeint, dass die Komplexität des Gebäudebestands über eine noch überschaubare Anzahl von „Repräsentanten“ abgebildet wird. Diese Typen bestehen aus einem räumlichen Gebäudemodell mit zugeordneten energetischen Eigenschaften. Sie werden schließlich zu einem Modell zusammengeführt, das den gesamten Gebäudebestand des Landes Luxemburg abbildet. Dies ermöglicht einen gewissen Abstraktionsgrad, der für eine energetisch-städtebauliche Untersuchung notwendig ist. Die o.g. „Repräsentanten“ durchleben nach ihrer Errichtung abhängig von der Nutzungsdauer der Bau- und Technikkomponenten Instandsetzungs- und Erneuerungszyklen, die jeweils Anlässe für daran gekoppelte energetische Maßnahmen bilden. Die Effizienz- und Klimaschutzstrategien werden somit als fein unterscheidbare Einzelmaßnahmen nachvollziehbar. Dabei wird deren zeitliche Abfolge als langfristiger Transformationsprozess deutlich. Die energetische Qualität kann bei jedem Einzelschritt frei gewählt werden. Dies erfolgt abhängig von den spezifischen Vorgaben in den jeweiligen Szenarien.

Eine derartige Typologie kann mit unterschiedlichen Detaillierungsgraden aufgestellt werden. Betrachtet man sehr große räumliche Einheiten (z.B. Luxemburg, eine Region oder eine Stadt) sind gröbere Typologien angemessen. Dies kann z.B. eine systematisch erhobene Gebäudetypologie (IWU 2003) sein oder in Form von Siedlungsstrukturtypen erfolgen. Auf der Ebene von Dörfern oder Stadtquartieren ist es jedoch sinnvoll, die gestalterischen oder funktional prägenden bzw. energetisch relevanten Spezifika des Bestandes (z.B. speziell vorgefundene Gebäude- und Nutzungsformen, Bau- und Konstruktionsweisen) individuell zu berücksichtigen.

Im vorliegenden Fall wurde der Weg einer abstrakten Gebäudetypologie gewählt, die jedoch differenziert nach Gebäudetypen, Baualtersklassen und Eingriffsempfindlichkeiten konzipiert wurde. Hintergrund hierfür war, dass nur für eine derartige Typologie die erforderlichen Daten des Statetc zur Verfügung standen.

Eingriffsempfindlichkeit als zentrales Thema

Für jegliche Untersuchungen von Klimaschutzstrategien im Gebäudesektor ist es entscheidend, den Bestand nicht als homogene Einheit zu interpretieren, sondern in seinen baugeschichtlichen, morphologischen und bautechnischen Unterschieden zu erfassen. Nur auf einer derartigen Basis ist es möglich, die notwendigen Differenzierungen zu treffen, die für eine baukulturell verträgliche Umsetzung notwendig sind. Hierzu wurden folgende Prämissen aufgestellt, die als wesentliche Randbedingung in der Modellbildung und bei der Interpretation der Ergebnisse Berücksichtigung fanden. Zudem trägt dies dazu bei, auch die regionaltypischen Eigenheiten zu erfassen.

Einteilung des Bestands in strategische Gruppen
Der Bestand wird in sog. strategische Gruppen eingeteilt, die sich im Hinblick auf ihre baukulturelle und gestalterische Eingriffsempfindlichkeit unterscheiden (siehe Abb. 1.3):

A Baudenkmale
B Sonstiger bedingt sanierbarer Bestand
C Voll sanierbarer Bestand
D Neubau ab 2010

Die energetischen Anforderungen an die strategischen Gruppen erfolgen in abgestufter Form. Vollumfängliche Anforderungen werden nur an den Neubau gestellt. Im Bestand wird berücksichtigt, dass baukulturelle, baupraktische und wirtschaftliche Restriktionen existieren.

Sonderstellung der Baudenkmale
An Baudenkmale werden vorab keine energetischen Anforderungen gestellt und es besteht auch keine Pflicht, einen Ausgleich für die im Vergleich zum voll sanierbaren Bestand geringere Energieeffizienz zu leisten. Bauliche Maßnahmen können hier nur in enger Abstimmung mit den Denkmalschutzbehörden ausgeführt werden. Um auf der sicheren Seite zu rechnen, wurden hier energetische Verbesserungen sehr zurückhaltend festgelegt. Im Zweifel erfolgen die Einordnungen eher auf der konservativen Seite:

- Bei Baudenkmalen und im bedingt sanierbaren Bestand kommt bei schützenswerten Fassaden ein Außenwärmeschutz generell nicht in Frage.
- Im Business-as-usual- und im Effizienz-Szenario werden für diese Fälle auch keine Innendämmungen vorgesehen.
- Als verträglich ausführbare Maßnahmen an der Gebäudehülle bei Baudenkmalen und im bedingt sanierbaren Bestand kommen nur die Maßnahmen Dach- und Kellerdeckendämmung und der Austausch von Verglasungen bei Erhalt der vorhandenen Fensterrahmen in Frage.
- Aufgrund der hierbei regelmäßig auftretenden Beschränkungen (z.B. Dämmstärken, zulässiges Glasgewicht) werden die energetischen Qualitäten im bedingt sanierbaren Bestand generell geringer angenommen als im voll sanierbaren Bestand.

Einteilung des Gebäudebestandes in Baualtersgruppen
Ein weiteres Unterscheidungsmerkmal des Wohngebäudeparks stellen die unterschiedlichen Baualter der Bestandsgebäude und der künftigen Neubauten dar. Je nach dem Zeitpunkt der Ersterstellung weisen die Gebäude unterschiedliche Konstruktionen und energetische Eigenschaften auf. Zudem ergeben sich die Instandsetzungs- und Sanierungszyklen direkt aus dem Baualter und den mittleren Nutzungsdauern der jeweiligen Komponenten. Gemäß den Vorgaben der luxemburgischen Gebäudestatistik werden im Modell acht Baualtersklassen unterschieden (bis 1918, 1919 - 1945, 1946 - 1960, 1961 - 1970, 1971 - 1980, 1981 - 1990, 1991 - 2000 und 2001 - 2010), die sich vor allem im Hinblick auf das Wärmeschutzniveau voneinander unterscheiden. Hierfür wurden auch die Daten von Energieausweisen und aus Expertenbefragungen für die Modellbildung herangezogen.

Unterscheidung grundlegender Gebäudetypen
In der Wohnflächenstatistik gemäß den Differenzierungen der luxemburgischen Statistik werden fünf grundlegende Gebäudetypen abhängig von Wohnform und Größe ausgewiesen. Differenziert wird zwischen Einfamilien- (EFH), Doppel- (DH) und Reihenhäusern (RH) sowie im Geschosswohnungsbau zwischen kleinen Mehrfamilienhäusern mit 3-10 Wohneinheiten (MFH < 10) und großen Mehrfamilienhäusern ab 10 Wohneinheiten (MFH > 10).

Diese Gliederung ist auch für die energetische Betrachtung sinnvoll, weil sich diese Typen hinsichtlich des spezifischen Hüllflächenaufwands (z.B. ausgedrückt über das A/V-Verhältnis) und die typischen Dachformen, Orientierungen und Haustechniksysteme z.T. deutlich voneinander unterscheiden.



A Baudenkmal



B Bedingt sanierbarer Bestand



C Voll sanierbarer Bestand



D Neubau ab Baujahr 2010

Abbildung 1.3
Einteilung des Wohngebäudeparks in vier strategische Gruppen:
A Baudenkmale
B Bedingt sanierbarer Bestand
C Voll sanierbarer Bestand
D Neubau

Diese Gruppen unterscheiden sich vor allem im Hinblick auf die Eingriffsempfindlichkeit bei energetischen Sanierungsmaßnahmen. In den Szenarien wurden für jede dieser Gruppen differenzierte Anforderungen für die energetischen Modernisierungen im Bereich Gebäudehülle modelliert.

Kopplungsprinzip als Umsetzungsstrategie
Das sog. Kopplungsprinzip besagt, dass sich Gelegenheiten für energetische Effizienzverbesserungen immer dann ergeben, wenn ein Bauteil oder eine Technikkomponente ohnehin instand zu setzen oder zu erneuern ist. Sobald z.B. der Außenputz neu zu streichen oder auszubessern ist, kann zusätzlich eine Außendämmung aufgebracht werden. Es sind aber auch andere Anlässe denkbar, z.B. Erweiterungen und Umbauten sowie Nutzungsänderungen, die immer Eingriffe in die Bausubstanz oder die Haustechnik erfordern. **Betont werden soll an dieser Stelle, dass das Motiv der Energieeinsparung oder des Klimaschutzes für sich genommen** - mit wenigen noch zu benennenden Ausnahmen - **nicht der Auslöser für Effizienzverbesserungen sein kann und soll.**

Dafür sprechen vor allem ökonomische Gründe: In den meisten Fällen ist nur dann eine Wirtschaftlichkeit der energetischen Maßnahme gegeben. Es fallen keine zusätzlichen Rüstkosten (z.B. Baustelleneinrichtung, Gerüst) an und der Restwert der Konstruktion wird nicht vorzeitig zerstört. Es ist aufschlussreich, dass Hausbesitzer von sich aus bereits dieser ökonomischen Vernunft folgen (vgl. Frondel et al. 2006, S. 89). Anderslautende Vorschläge kommen eher von außen, z.B. die Forderung nach Erhöhung der Sanierungsrate über 2% hinaus oder die sog. „Abrissprämie“.

Mittlere Nutzungsdauern
Gemäß dem Kopplungsprinzip werden im Kohortenmodell immer dann energetische Verbesserungen durchgeführt, wenn die Nutzungszeit eines Bauteils oder einer Technikkomponente abläuft. Sie entsprechen den technischen Standzeiten und nicht den wirtschaftlichen Abschreibungszeiträumen, die i.d.R. deutlich kürzer sind. Aus der mittleren Nutzungsdauer der Komponenten lassen sich schließlich mittlere Nutzungsdauern ableiten, die bei den Baukomponenten mit 50 - 60 Jahren deutlich höher liegen als bei den Technikkomponenten, bei denen die mittlere Nutzungsdauer zwischen 15 und 25 Jahren liegt.

1.3 Szenariengestützte Untersuchung

Die Untersuchung erfolgt über ein Kohortenmodell, in dem unterschiedliche Handlungsoptionen in Form von Szenarien gegenübergestellt werden. In den Szenarien können immer nur bedingte Aussagen getroffen werden, d.h. diese sind von den gewählten Randbedingungen und Annahmen abhängig.

Szenarien erzählen eine Geschichte, indem sie denkbare künftige Entwicklungen beschreiben. Dies erfolgt zumeist in idealtypischer Form, um die Szenarien klar gegeneinander abzugrenzen. Besonderer Wert wird darauf gelegt, dass die in den Szenarien dargestellten Handlungspfade in sich konsistent und plausibel modelliert sind, um innere Widerspüche und Kombinationen von Entwicklungen, die sich ausschließen (z.B. hohe Anteile Biomasseheizungen in einem gleichzeitig wenig effizienten Gebäudepark jenseits der Verfügbarkeitsgrenze der Biomasse) zu vermeiden. Anhand der späteren Auswertung der Szenarien soll schließlich geklärt werden, mit welchen Maßnahmenkombinationen die langfristigen Ziele Luxemburgs und des internationalen Klimaschutzes erreicht werden können. Hierfür wurden vier Hauptszenarien modelliert (siehe auch Tab. 1.1).

Status-quo-Szenario
Im Status-quo-Szenario werden die energetischen Qualitäten (Neubau und Sanierung) auf dem Stand des Jahres 2010 „eingefroren“ und unverändert in der Zukunft fortgeführt. Die Mengenkomponenten (z.B. Bevölkerung, Wohnflächen) werden jedoch, wie in den anderen Szenarien auch, weiterentwickelt. Das Status-quo-Szenario dient aus methodischer Sicht als Referenz und Eichmaßstab für die erzielten Effizienzsteigerungen und die Dekarbonisierungserfolge in den anderen Szenarien.

Business-as-usual-Szenario
In diesem Szenario werden nicht nur die heute zu beobachtenden Entwicklungen weitergeführt, sondern es werden mo-

Szenario	Heizwärme / Heizung	Warmwasser	Lüftung	Haushaltsgeräte
Status quo	Spezifischer Nutzenergiebedarf, Heiz- und Stromstruktur sowie energetische Qualität auf dem Stand von 2010, Mengenkomponenten (z.B. Wohnflächen, Haushalte) jedoch wie in allen anderen Szenarien			
Business as usual	Energetische Verbesserungen orientieren sich an der bisherigen Entwicklung (z.B. Einführung RGD 2016 im Neubau, leichte Verbesserungen bei Modernisierungen), Stromerzeugung gemäß Referenzprognose (ewi/gws/prognos 2014)			
	Moderate Effizienzverbesserungen		Wärmerückgewinnung (WRG): im Bestand nur moderater Ausbau	Moderate Effizienzverbesserungen
Effizienz	Energetische Qualitäten 2020: Orientierung am Kostenoptimum in Neubau (RGD 2016) und bei Sanierung (EnerPhit-Standard); Ausstieg Ölheizungen bis 2060; Stromerzeugung gemäß Szenario "2011 A" (Nitsch et al. 2012)			
	Ab 2020: Energetisch gleichwertig mit Passivhaus	Wassersparende Armaturen, WW- Anschlüsse	Ab 2020: vermehrt Lüftungs-anlagen mit WRG auch im Bestand	Ausstattung mit effizienten Geräten und Leuchtmitteln
Effizienz Plus	Wie Effizienzszenario, Berücksichtigung von absehbaren technologischen Verbesserungen bei allen Bau-und Technik-komponenten; entspricht vermutlich dem Kostenoptimum ab 2030; Ausstieg Ölheizungen 2050; Stromerzeugung gemäß "Szenario 2013" (Nitsch 2013)			
	Hocheffiziente Heizsysteme mit stark reduzierten Verteil- und Speicherverlusten	Dusch-WW-WRG Dentrale Systeme im Geschosswohnungsbau	bis 2070: Anteil von 80 % der Lüftungen mit WRG und hocheffizienten Ventilatoren	Hocheffiziente Ausstattung bei allen Elektrogeräten und integriertes Lastmanagement

Tabelle 1.1:
Kurzcharakterisierung der vier Hauptszenarien gemäß den Hauptanwendungsfeldern Heizung, Warmwasser, Lüftung und Haushaltsgeräte.

Der Ausstieg aus den Ölheizungen bedeutet konkret, dass ca. 25 - 30 Jahre zuvor keine neue Ölheizungen mehr im Neubau und bei Instandsetzungen bzw. Erneuerungen im Bestand eingebaut werden dürfen; im Effizienz-Szenario gilt dies demnach ab spätestens 2035 und im Effizienz-Plus-Szenario spätestens ab 2025.

derate Reaktionen der Wirtschaft, Gesellschaft und Politik auf künftige Problemstellungen miteinbezogen. Die gesetzlichen Regelungen werden nur moderat verschärft. Die Stromerzeugung orientiert sich an der Referenzprognose für Strom aus Deutschland (ewi/gws/prognos 2014), in dem die aktuell in Deutschland durchgeführten und verabschiedeten Maßnahmen abgebildet sind.

Effizienz-Szenario

In diesem Zielszenario orientieren sich die modellierten energetischen Verbesserungen an dem Kostenoptimum der Lebenszykluskosten, das in entsprechenden Studien zum Wohnbau in Luxemburg detailliert ermittelt wurde. Dies betrifft sowohl die Gebäude selbst als auch die Wärmeversorgungssysteme. Die energetische Güte ist gleichwertig zum Passivhauskonzept, ohne hierbei die Kriterien im Einzelnen strikt einhalten zu müssen. Die Stromerzeugung wurde gemäß dem deutschen Szenario „2011 A“ (Nitsch et al. 2012) modelliert, das bis 2050 eine Reduktion der Klimagase um 80 % gegenüber 1990 anstrebt.

Effizienz-Plus-Szenario

Neben den Maßnahmen des Effizienz-Szenarios werden hier Technologieentwicklungen miteinbezogen, die derzeit nur in Form theoretischer Studien vorliegen oder als Prototypen bzw. Sonderlösungen realisiert sind. Die Beobachtungen der vergangenen Jahre haben gezeigt, dass diese Entwicklungen i.d.R. viel schneller und durchgreifender erfolgen, als zunächst vermutet. Daher besteht Grund zu der Annahme, dass

die hier beschriebenen Qualitäten und Neukomponenten tatsächlich in einigen Jahren zur Verfügung stehen und nach und nach wirtschaftlich eingesetzt werden können. Im Hinblick auf die Stromerzeugung wurde das „Szenario 2013“ (Nitsch 2013) verwendet, in dem ab 2020 Maßnahmen getroffen werden, die dazu führen, das Ziel einer nahezu vollständig erneuerbaren Energieversorgung Deutschlands bis 2060 zu erreichen.

Modellierung der Gebäudetypologie

Der Wohngebäudepark Luxemburgs wird über insgesamt 70 Gebäudetypen abgebildet. Diese stellen „Repräsentanten“ dar, die die individuelle Vielfalt der Einzelgebäude bestimmten Klassen und Gruppen zuordnet. Dabei werden die charakteristischen geometrischen und energetischen Eigenschaften in aussagekräftige Mittelwerte umgeformt, die dann den späteren Berechnungen zugrundeliegen:

- Der vorhandene Gebäudebestand wird nach Baualter, Eingriffsempfindlichkeit (strategische Gruppen) und Gebäudetyp (Einfamilien, Doppel- und Reihenhäuser sowie kleine und große Mehrfamilienhäuser) in Klassen eingeteilt.
- Für den Neubau werden in 10-Jahresschritten typische Ein- und Mehrfamilienhäuser modelliert.
- Die Gebäudegeometrie, Orientierung und Dachform werden variiert, um die vorhandene bauliche Vielfalt des Wohngebäudeparks angemessen darzustellen.

Kohortenmodell

Die insgesamt 70 Gebäudetypen durchlaufen im Kohortenmodell einen typischen Lebenszyklus, in dem gemäß den vorgegebenen Nutzungsdauern für alle Bau- und Technikkomponenten Instandsetzungs- und Erneuerungsmaßnahmen durchgeführt werden. Wie schon das Wort „Kohorte“ ausdrückt, wird der gesamte Wohngebäudepark innerhalb des Betrachtungszeitraums im Hinblick auf die dadurch ausgelösten Veränderungen des energetischen Zustands beobachtet bzw. modellhaft abgebildet. Ein derartiges Modell hat den Vorteil, dass die komplexe Gesamtentwicklung über einen großen Zeitraum als Aufeinanderfolge vieler individueller Einzelschritte nachvollziehbar bleibt. Damit ist es möglich, gleichzeitig die Trägheit aber auch die Dynamik des Gesamtsystems zu beschreiben. Das Modell weist ein hohes Maß an Transparenz auf, weil jeder Einzelschritt in seinen Auswirkungen auf das Gesamtsystem abgebildet wird und an jeder Stelle konkret benannt werden kann.

Energetische Qualitäten (Gebäudehülle und Lüftung)

Für die Gebäudehülle (Außenwand, Fenster, Dach, Kellerdecke) und die Lüftung werden szenarioabhängig Qualitäten definiert, die immer dann zum Zuge kommen, wenn ein Neubau oder eine entsprechende energetische Sanierungsmaßnahme bei einem der 70 Gebäudtypen ansteht. Die Anforderungen werden stufenweise vom Status-quo- über das Business-as-usual- und Effizienz- bis hin zum Effizienz-Plus-Szenario immer anspruchsvoller. Zusätzlich steigen die Qualitäten im Betrachtungszeitraum allmählich an. In Tab. 1.2 sind die entsprechenden Werte für den Ausgangszustand zusammengestellt, und in Tab. 1.3 für das Effizienz-Szenario auch die Werte für die weitere Entwicklung ab 2020. Im Effizienz-Szenario orientieren sich dabei die Werte im Altbau für das Jahr 2020 am Kostenoptimum, wie er in einer aktuellen Studie für Luxemburg (vgl. MdE 2014a) berechnet wurden (siehe hierzu genauere Erläuterung in Abschnitt 2.7).

Energetische Qualitäten (Wärme- und Stromerzeugung)

Analog wird bei der Wärmeerzeugung (z.B. Heizung, Warmwassererzeuger) und bei der Stromerzeugung (z.B. Kraftwerkspark inkl. Heizraftwerke und BHKW´s) verfahren. Es wurden szenarioabhängige Annahmen zum Energieträgermix und zur energetischen Qualität der Systeme zusammengestellt. Letztere wird über einfache Kennwerte ausgedrückt (z.B. Jahresnutzungsgrad der Strom- und Wärmeversorgung inkl. Erzeugung, Speicherung und Verteilung) und zeitabhängig variiert.

Ausgangszustand		**U-Werte Ausgangszustand 2010 in allen Szenarien [W/m²K]**							
Strategische Gruppe		Dach		Außenwand		Kellerdecke		Fenster	
Baudenkmale	EFH	1,2		1,4		0,8		2,2	
	MFH	1,6		1,8		1,0		2,2	
		bis 1980	ab 1980	bis 1980	ab 1980	bis 1980	ab 1980	bis 1980	ab 1980
Bestand	EFH	0,5 - 1,2	0,5	0,6 - 1,4	0,6	0,6 - 0,8	0,6	1,6 - 2,2	1,6
	MFH	0,6 - 1,6	0,5	0,8 - 1,8	0,6	0,7 - 1,0	0,6	1,6 - 2,2	1,6
Neubau	EFH	0,17		0,22		0,28		1,08	
	MFH	0,17		0,22		0,28		1,08	

Tabelle 1.2
Zusammenstellung der U-Werte der Hüllflächen im Ausgangszustand 2010, differenziert nach Baudenkmalen/bedingt sanierbarem Bestandsbauten, voll sanierbarem Bestand und Neubau. Zusätzlich wird zwischen Einfamilienhäusern (EFH) und Mehrfamilienhäusern (MFH) unterschieden.

Bauteil	**U-Werte Neubau inklusive Wärmebrücken-Zuschlag im Effizienz-Szenario [W/m²K]**			
	2020	**2030**	**2040**	**2050**
Wände	0,13	0,12	0,11	0,10
Dach	0,13	0,12	0,11	0,10
Kellerdecke	0,19	0,185	0,18	0,175
Fenster	0,90 (g=0,55)	0,85 (g = 0,55)	0,80 (g = 0,55)	0,75 (g = 0,50)

Bauteil	**U-Werte Sanierung inklusive Wärmebrücken-Zuschlag im Effizienz-Szenario [W/m²K]**			
	2020	**2030**	**2040**	**2050**
Wände	0,25	0,20	0,18	0,17
Dach	0,25	0,20	0,18	0,17
Kellerdecke	0,40	0,35	0,30	0,25
Fenster	1,30 (g = 0,65)	1,20 (g = 0,65)	1,10 (g = 0,60)	1,00 (g = 0,55)

Tabelle 1.3
Zusammenstellung der U-Werte der Hüllflächen im Effizienz-Szenario in 10-Jahres-Schritten 2020 - 2050. Dargestellt sind die Werte für den Neubau (oben) und für den voll sanierbaren Bestand (unten). Es wird erkennbar, wie sich die Anforderungen allmählich in Richtung geringerer U-Werte bewegen.

BAU 2020	Dach	Außenwand	Kellerdecke	Fenster
Baudenkmale	0,55	0,98	0,65	1,90
Bestand	0,40	0,55	0,55	1,50
Neubau	0,14	0,16	0,20	0,93

Effizienz-Plus 2020	Dach	Außenwand	Kellerdecke	Fenster
Baudenkmale	0,50	0,85	0,40	1,30
Bestand	0,18	0,18	0,35	1,05
Neubau	0,11	0,11	0,18	0,80

Tabelle 1.4
Zusammenstellung der U-Werte der Hüllflächen im Jahr 2020, wie sie im Neubau bzw. bei energetischen Modernisierungen im Bestand zum Einsatz kommen.
Oben: Business-as-usual-Szenario
Unten: Effizienz-Plus-Szenario

Hinweis: die U- Werte 2020 für das Effizienz-Szenario finden sich oben in Tab. 1.3

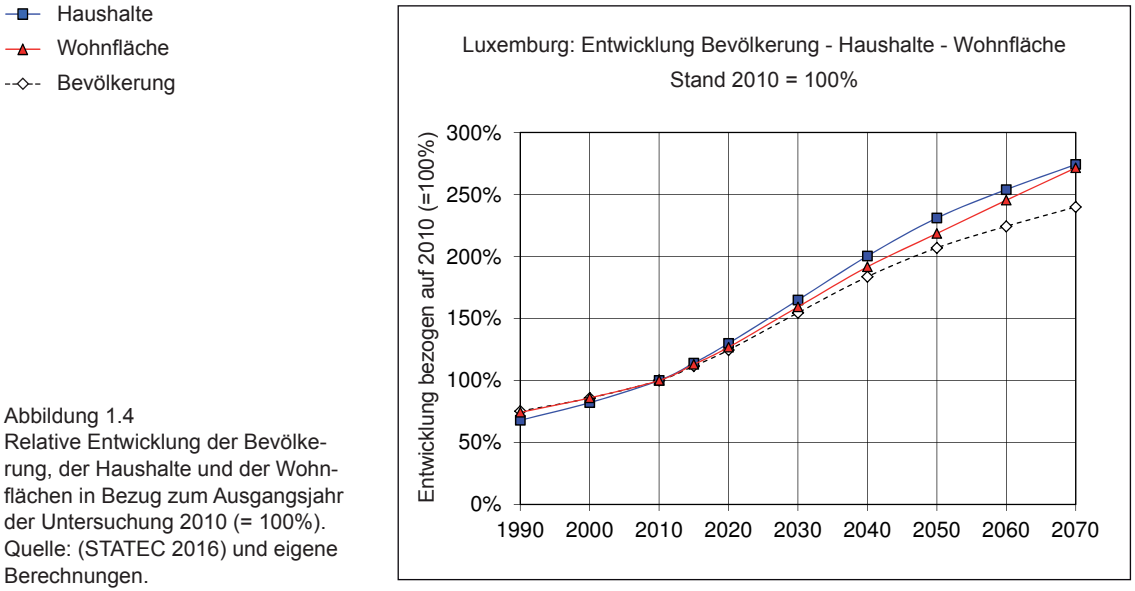


Abbildung 1.4
Relative Entwicklung der Bevölkerung, der Haushalte und der Wohnflächen in Bezug zum Ausgangsjahr der Untersuchung 2010 (= 100%). Quelle: (STATEC 2016) und eigene Berechnungen.

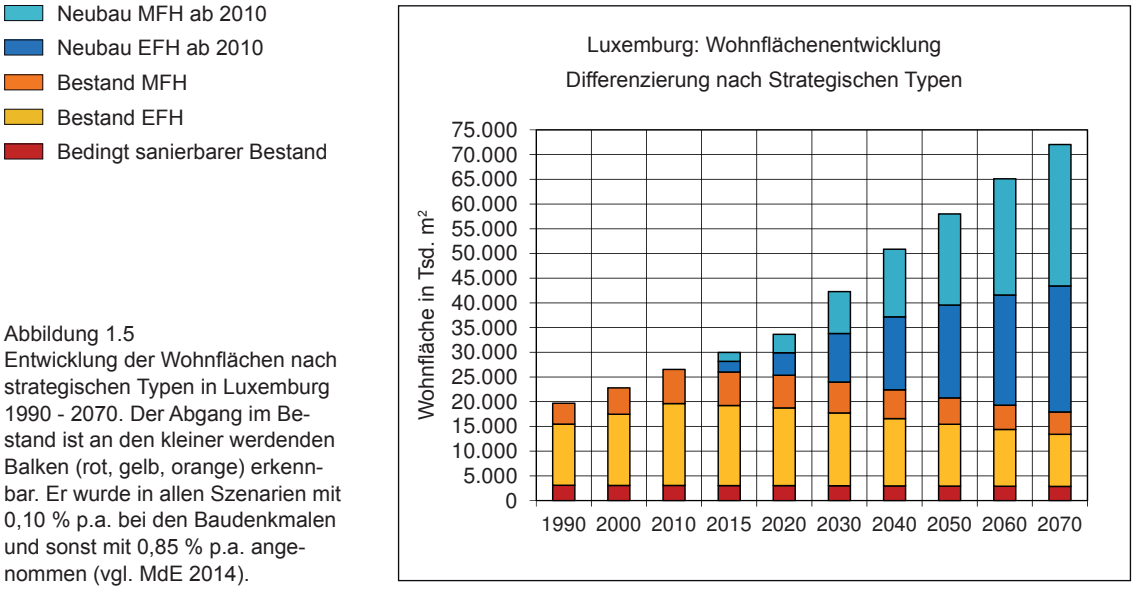


Abbildung 1.5
Entwicklung der Wohnflächen nach strategischen Typen in Luxemburg 1990 - 2070. Der Abgang im Bestand ist an den kleiner werdenden Balken (rot, gelb, orange) erkennbar. Er wurde in allen Szenarien mit 0,10 % p.a. bei den Baudenkmalen und sonst mit 0,85 % p.a. angenommen (vgl. MdE 2014).

Wichtige Eck- und Rahmendaten

Als Mengenkomponenten in den Szenarien sind vor allem die Bevölkerung, die Zahl der Haushalte und die Wohnflächen wirksam:

- Die Bevölkerung Luxemburgs wird auch weiterhin sehr dynamisch wachsen. Den Szenarien liegt die Annahme eines Bevölkerungswachstums von 567.000 im Jahr 2015 auf 1.051.255 zugrunde, dies entspricht einer Zunahme um 85%. Wählt man das Jahr 2010 mit 508.000 Einwohnern als Referenz, so entspricht die Zunahme bis 2050 einem Wachstum auf 207% des Ausgangswertes.
- Die Wohnfläche wird sogar noch etwas stärker wachsen, als die Bevölkerung. In den Szenarien wird unterstellt, dass die pro-Kopf-Wohnfläche aufgrund des anhaltenden Trends zu geringeren Bewohnerzahlen pro Wohnung bis 2050 weiterhin leicht steigt. Gegenüber dem Jahr 2010 mit knapp 27 Mio m^2 erhöht sich die Wohnfläche im Jahr 2050 auf knapp 59 Mio m^2. Dies entspricht einem Zuwachs auf 219% des Ausgangswertes.

Wie aus Abb. 1.4 ersichtlich, ergibt sich für alle drei Parameter ein stetiges Wachstum über den gesamten Betrachtungszeitraum. Gegenüber dem Stand 2010 verdoppelt sich die Bevölkerungszahl bis 2050, während die Haushalte und Wohnflächen in diesem Zeitraum sogar noch etwas mehr zunehmen. Diese Zuwächse sind bei der Auswertung der Ergebnisse jeweils mitzudenken. Sie stellen einen bedeutenden „Antrieb“ für den Energiebedarf und die resultierenden Emissionen dar.

Wegen des im europäischen Vergleich sehr starken Bevölkerungswachstums und der damit verbundenen Zunahme der Wohnflächen werden die Hauptergebnisse der Studie, z.B. der Primärenergiebedarf und die Treibhausgasemissionen nicht nur als Absolutzahlen dargestellt, sondern auch als pro-Kopf-Werte. Diese Art der Darstellung ermöglicht es auch, die in den Szenarien ermittelten Ergebnisse mit den Anforderungen zu vergleichen, die sich aus den internationalen Klimaschutz-

zielen oder anderen Bewertungssytemen ergeben, die anstelle der Nutzfläche die Person als Bezugsgröße verwenden (z.B. Konzept der 2000-Watt-Gesellschaft).

Bei der Wohnflächenentwicklung ist ein zusätzlicher Aspekt zu beachten. Durch den Abriss und die Umnutzungen von Bestandgebäuden kommt es zu einem regelmäßigen Abgang, der wie auch der zusätzliche Wohnflächenbedarf durch Neubauten gedeckt werden muss. Dies wird in Abb. 1.5 an den sinkenden Wohnflächen aller Bestandsgebäude ab dem Jahr 2010 sichtbar.

Weitere Randbedingungen und Spezifika des derzeitigen Luxemburger Wohngebäudebestandes sind (Ploss 2015):

- Obwohl der derzeitige Gebäudebestand vergleichsweise jung ist, unterliegen viele Gebäude dem Denkmalschutz. In den nächsten Jahren wird sich der Umfang dieser Gruppe noch erheblich erweitern.
- Der Anteil der Wohneinheiten in Einfamilien,- Doppel- und Reihenhäusern ist hoch, ebenso der Anteil eigengenutzter Wohneinheiten.
- Der Anteil von Mietwohnungen liegt vergleichsweise niedrig, insbesondere der soziale Wohnungsbau ist mit knapp 4% nur ein kleines Segment am Wohnungsmarkt.
- Der Anteil von Mehrfamilienhäusern im Besitz von Eigentümergemeinschaften ist hoch.
- Die durchschnittliche pro-Kopf-Wohnfläche ist mit etwa 53m^2 im internationalen Vergleich überdurchschnittlich hoch, dies vor allem deshalb, weil die durchschnittliche Bewohnerzahl pro Wohneinheit weiterhin sinkt.
- Der Anteil fossiler Energieträger beträgt im derzeitigen Wohngebäudepark etwa 89%. Der Anteil holzbeheizter Gebäuden liegt bei 1,5%, der strombeheizter Gebäude bei 2,9%. Sowohl bei holz-, als auch bei strombeheizten Gebäude finden sich die höchsten Energieverbrauchswerte in der Altersklasse vor 1919. Daher ist zu vermuten, dass die betreffenden Heizanlagen nicht mehr modernen Standards entsprechen. Sehr häufig ist dies mit weiteren baulichen bzw. technischen Mängeln dieser Wohnbauten verbunden, so dass hier typische Fälle für umfangreiche Modernisierungen vorliegen.

Eine wichtige Randbedingung ist auch, dass Luxemburg die Mindestanforderungen an Wohngebäude-Neubauten im Januar 2017 auf ein im europäischen Vergleich vorbildliches Niveau (in etwa Güte Passivhausstandard) verschärft hat (RGD 2016), nachdem Gebäude dieses Niveaus im Vorfeld zur Etablierung am Markt und zur Vorbereitung der Marktteilnehmer durch gezielte Förderprogramme unterstützt wurden.
Ebenfalls wichtig ist die Tatsache, dass die Abrissrate relativ hoch ist. Da detaillierte Angaben nicht vorliegen, wurde die Rate wie im NEEAP (MdE 2014) mit 0,85% p.a. und lediglich für die Gebäude mit Denkmalschutz mit 0,1% p.a. deutlich niedriger angenommen.

Die vergleichsweise hohe Abrissrate ist Zeichen eines hohen Siedlungsdrucks, die abgerissenen Gebäude werden meist durch höhere Gebäude ersetzt. Hohe Raten an Ersatz-Neubauten erleichtern es, Energiebedarf und Treibhausgasemissionen deutlich zu reduzieren – besonders, wenn die Anforderungen an den Neubau wie in Luxemburg ambitioniert festgelegt sind.

1.4 Zentrale Ergebnisse

Im Folgenden werden die zentralen Ergebnisse der Studie aufgeführt, die als Grundlage für die in Kapitel 1.5 zusammengefassten Handlungsempfehlungen dienen. Der Fokus liegt auf dem Vergleich zwischen den Ergebnissen der Szenarien und den Effizienzzielen der EU bzw. Luxemburgs sowie den verbindlichen Klimaschutzzielen der Klimakonferenz in Paris 2015.

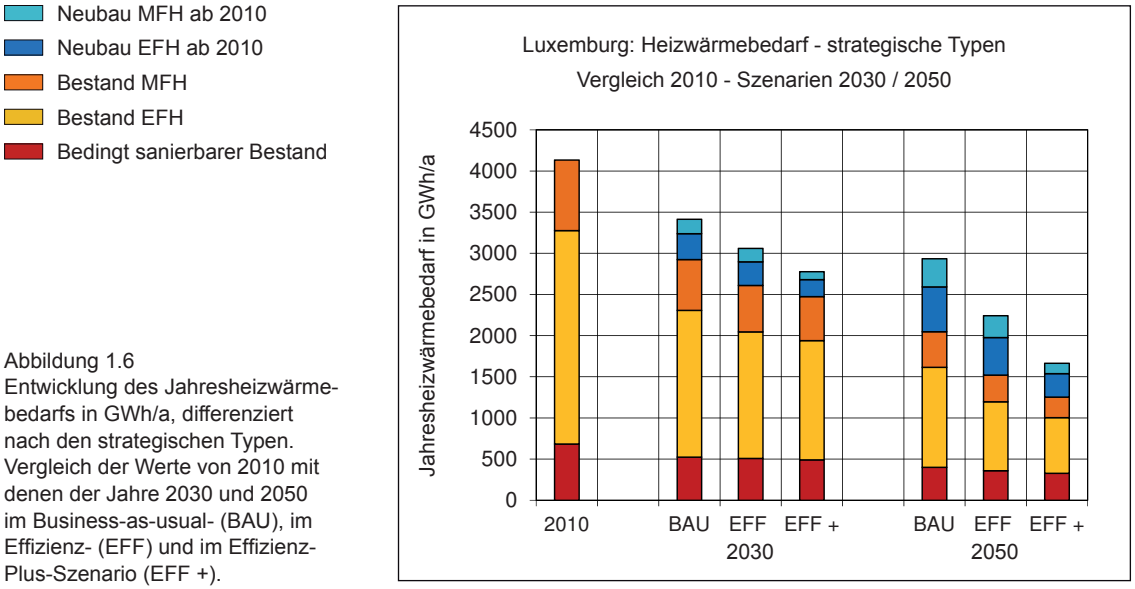


Abbildung 1.6
Entwicklung des Jahresheizwärmebedarfs in GWh/a, differenziert nach den strategischen Typen. Vergleich der Werte von 2010 mit denen der Jahre 2030 und 2050 im Business-as-usual- (BAU), im Effizienz- (EFF) und im Effizienz-Plus-Szenario (EFF +).

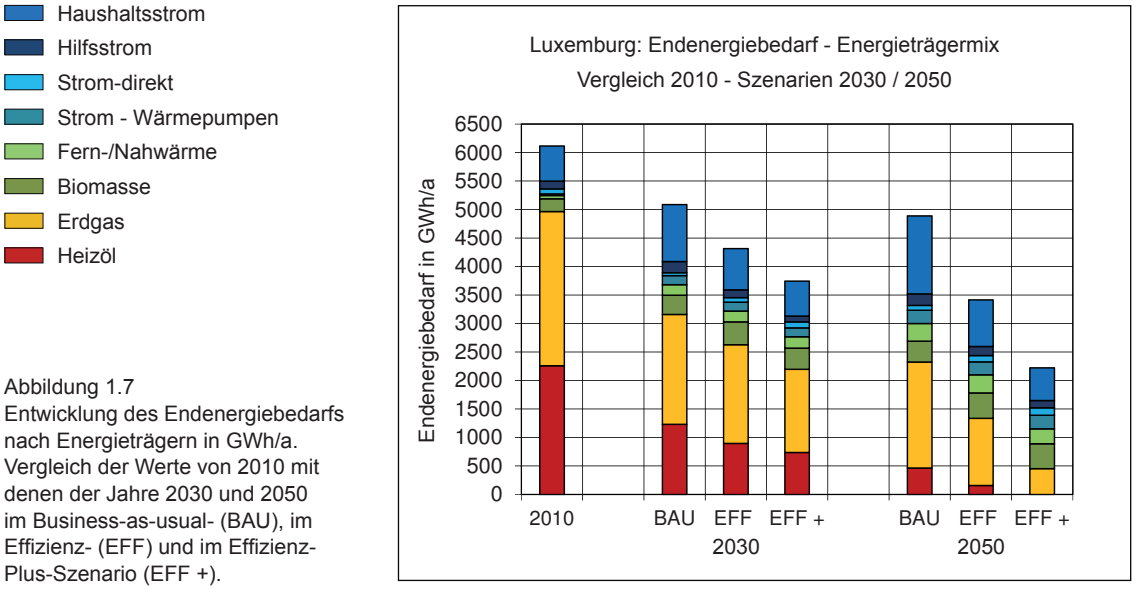


Abbildung 1.7
Entwicklung des Endenergiebedarfs nach Energieträgern in GWh/a. Vergleich der Werte von 2010 mit denen der Jahre 2030 und 2050 im Business-as-usual- (BAU), im Effizienz- (EFF) und im Effizienz-Plus-Szenario (EFF +).

Dem Aufbau der Studie entsprechend werden zunächst die Berechnungsergebnisse ohne Berücksichtigung des Strombedarfs der an Wohngebäuden beladenen Elektro-PKW und ohne Berücksichtigung der Erträge wohngebäudeintegrierter PV-Anlagen dargestellt.

Zusätzlich werden in einem eigenen Kapitel die Ergebnisse mit ausgeweiteter Bilanzierung, d.h. inkl. Strombedarf für Mobilität und inkl. PV-Stromerzeugung zusammengefasst.

Bei den Berechnungen wurde berücksichtigt, dass sich die zukünftigen Randbedingungen unter dem Einfluss des Klimawandels ändern werden. Unterstellt wurden Klimadaten nach IPCC Szenario A2, in dem die mittlere Jahrestemperatur in Luxemburg im Jahr 2050 um etwa 1K über dem Mittelwert der Jahre 2011-2015 liegt.

Entwicklung des Heizwärmebedarfs

Der Heizwärmebedarf ist der wichtigste Indikator für die thermische Qualität der Gebäudehülle und der eingesetzten Lüftungsstrategien. Da in zukünftigen, fast ausschließlich regenerativen Energieversorgungssystemen die Energiebereitstellung im Winter eine zentrale Herausforderung sein wird, wird die Bedeutung des Indikators Heizwärmebedarf steigen.

Hierbei überlagern sich zwei Effekte (siehe Abb. 1.5, 1.6): Einerseits steigen die Wohnflächen im Betrachtungszeitraum kontinuierlich an, andererseits sinkt in allen Szenarien der spezifische Jahresheizwärmebedarf des Gesamtbestandes stetig, wenn auch unterschiedlich stark. Nur mit den hohen energetischen Qualitäten, wie sie in den Effizienzszenarien zugrunde gelegt sind, gelingt eine spürbare Reduktion des gesamten Heizwärmebedarfs 2010 - 2050 von 4100 GWh/a auf 2240 bzw. 1660 GWh/a. Werden hingegen nur mittlere energetische Qualitäten eingesetzt, wie dies im Business-as-usual-Szenario (BAU) der Fall ist, wird mit 2930 GWh/a nur eine vergleichsweise geringere Minderung erreicht.

Die wesentlichen Reduktionsbeiträge werden im voll sanierbaren Bestand erzielt, während aufgrund der hohen Eingriffsempfindlichkeit der bedingt sanierbare Bestand quasi einen „Sockel“ bildet. Die Bedarfswerte der künftigen Neubauten sind von sehr großer Bedeutung. Nur so stellt der erwartete zusätzliche Wohnflächenbedarf die Effizienzstrategie nicht in Frage.

Wie der Verlauf des Gesamt-Heizwärmebedarfs zeigt, ist der Wohngebäudepark ein sehr träges System. Aufgrund der langen Nutzungsdauern der Bauteile und Haustechnikkomponenten wirken sich selbst starke Verbesserungen der energetischen Qualität wie in den Effizienz-Szenarien nur relativ langsam auf den Gesamt-Gebäudebestand aus. Diese Tatsache verdeutlicht, dass für den Gebäudesektor langfristige Orientierungs- und Zielwerte unabdingbar sind.

Entwicklung des Endenergiebedarfs

An der Entwicklung des Endenergiebedarfs kann verdeutlicht werden, wie stark die Maßnahmen zur Senkung des Heizwärmebedarfs, die Effizienzverbesserungen an den Wärmeversorgungssystemen, die Nutzung von Solarthermie und Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung, sowie die Veränderung der Heizstruktur und der Energieträgerwahl für die Wärmeversorgung wirksam werden

Ein weiteres zentrales Handlungsfeld stellen alle Stromanwendungen in den Haushalten dar, die sich aus den Teilsegmenten Haushaltsstrom (z.B. „weiße Ware, Kommunikationselektronik, Beleuchtung), Hilfsenergieeinsatz (z.B. Pumpen, Antriebe, Steuerungen), Allgemeinstrom (z.B. Aufzüge, Treppenhaus- und Tiefgaragenbeleuchtung) sowie den stromgestützten Wärmeanwendungen (Raumheizung, Warmwasserbereitung) zusammensetzen. In jedem dieser Segmente können substanzielle Effizienzsteigerungen realisiert werden, die je nach Szenario unterschiedlich modelliert wurden. Zusätzlich ist hier auch die künftige Einbindung der Elektromobilität, u.U. auch in Verbindung mit PV-Anlagen auf den Gebäuden ein Thema.

Von 1990 bis 2010 bleibt der Endenergiebedarf mit ca. 6100 GWh/a in etwa konstant. Im Status-quo-Szenario steigen die Werte anschließend stetig an. Im Business-as-usual-Szenario ergibt sich nur eine geringe Minderung der Bedarfswerte, die im Jahr 2030 bei 5090 GWh/a und im Jahr 2050 bei 4900 GWh/a zu liegen kommen. Nur in den Effizienzszenarien kann eine deutliche Reduktion der gesamten Endenergie erreicht werden. Die entsprechenden Kennwerte betragen im Effizienz-Szenario 4310 GWh/a (2030) und 3410 GWh/a (2050) sowie im Effizienz-Plus-Szenario 3740 GWh/a (2030) und 2220 GWh/a (2050).

Durch die Effizienz- und Klimaschutzziele ergeben sich langfristig Änderungen in der Energieträgerstruktur, die abhängig von den Annahmen in den Szenarien deutliche Unterschiede im Hinblick auf den Ausbau der erneuerbaren Energien aufweisen. Während sich im Business-as-usual-Szenario dieser Wandel nur etwa im bisherigen Tempo fortsetzt, ist für das Effizienz-Plus-Szenario vor dem Hintergrund der notwendigen Dekarbonisierung ein deutlich forcierter Umstieg auf erneuerbare Energien unterstellt. Am besten erkennbar wird dies am Tempo des Ausstiegs aus dem Energieträger Öl. Während im Business-as-usual-Szenario die letzten Ölkessel erst im Jahr 2070 verschwunden sind, ist dies im Effizienz-Plus-Szenario schon 20 Jahre vorher der Fall. Unterstellt man eine durchschnittliche Kessel-Lebensdauer von 25 Jahren, so werden die letzten Ölkessel im Business-as-usual-Szenario im Jahr 2045 eingebaut, im Effizienz-Plus-Szenario endet diese Frist bereits im Jahr 2025.

Entsprechend liegen die Anteile erneuerbarer Energien 2050 im Business-as-usual-Szenario bei nur etwa 33,6 %, während im Effizienz-Szenario bereits etwa 52,7 % erreicht werden. Nur im Effizienz-Plus Szenario gelingt es mit einem Anteil von ca. 68,6 % bis 2050 weit in Richtung einer Unabhängigkeit von fossilen Energieträgern vorzudringen. Dafür sind vor allem die dort erreichten Effizienzfortschritte ausschlaggebend.

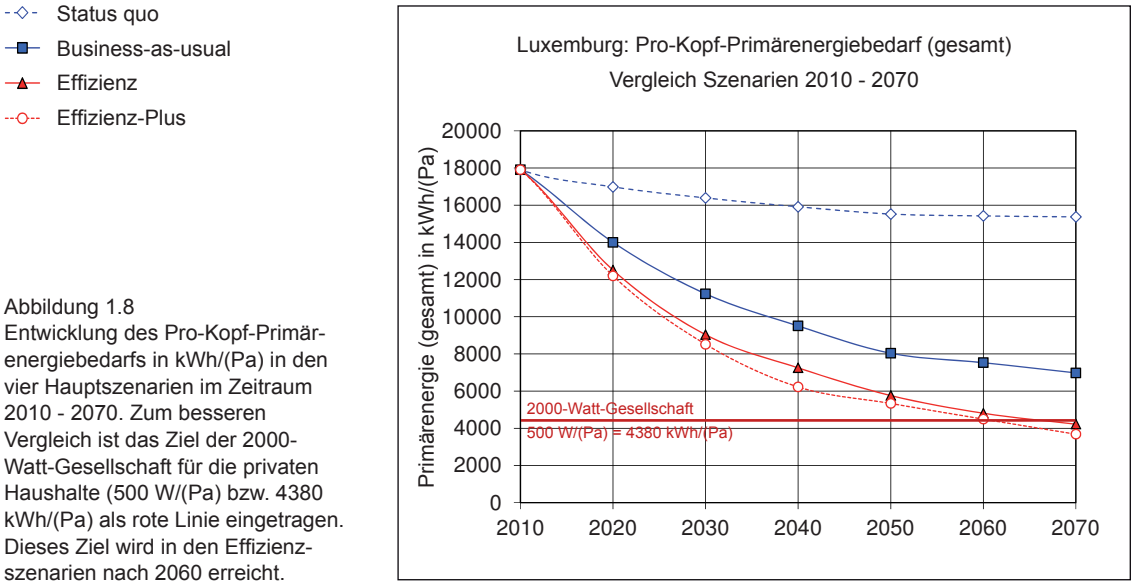


Abbildung 1.8
Entwicklung des Pro-Kopf-Primärenergiebedarfs in kWh/(Pa) in den vier Hauptszenarien im Zeitraum 2010 - 2070. Zum besseren Vergleich ist das Ziel der 2000-Watt-Gesellschaft für die privaten Haushalte (500 W/(Pa) bzw. 4380 kWh/(Pa) als rote Linie eingetragen. Dieses Ziel wird in den Effizienzszenarien nach 2060 erreicht.

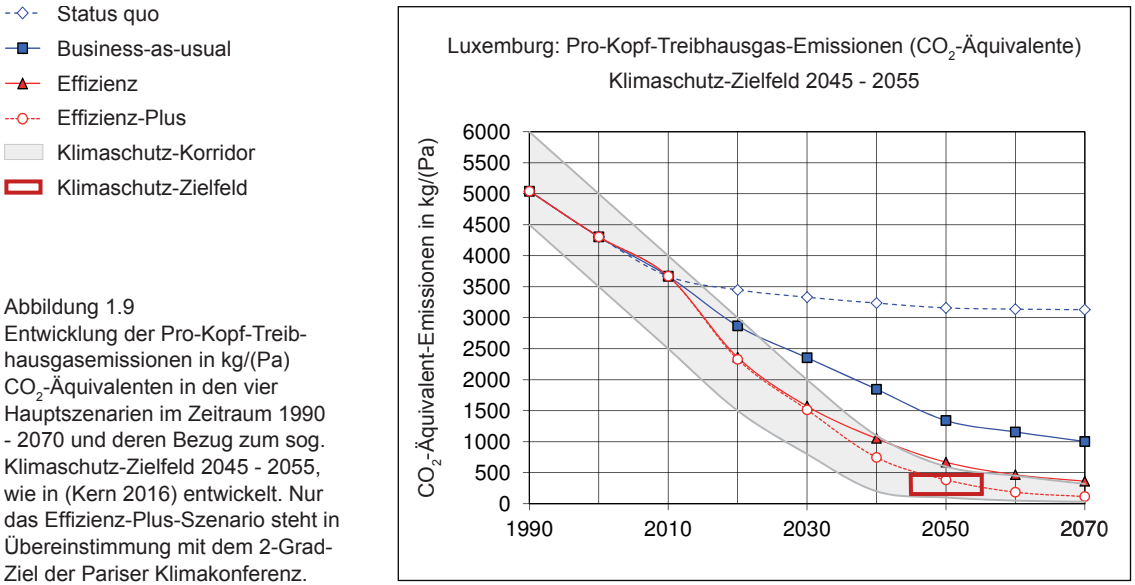


Abbildung 1.9
Entwicklung der Pro-Kopf-Treibhausgasemissionen in kg/(Pa) CO_2-Äquivalenten in den vier Hauptszenarien im Zeitraum 1990 - 2070 und deren Bezug zum sog. Klimaschutz-Zielfeld 2045 - 2055, wie in (Kern 2016) entwickelt. Nur das Effizienz-Plus-Szenario steht in Übereinstimmung mit dem 2-Grad-Ziel der Pariser Klimakonferenz.

Entwicklung des Primärenergiebedarfs

Am Primärenergiebedarf werden die gesamten Energieaufwendungen inklusive der vor- und nachgelagerten Energieketten (z.B. Exploration, Förderung, Transporte, Aufbereitung, Herstellung Kraftwerkpark bzw. Heizzentralen und Entsorgung) zusammengeführt. An den Pro-Kopf-Werten (Abb. 1.8) wird sichtbar, dass die Energieintensität des Wohngebäudeparks in allen Szenarien abnimmt, jedoch in unterschiedlichem Tempo. Interessant ist in diesem Zusammenhang der Bezug zu den Zielen der 2000-Watt-Gesellschaft, einem gut etablierten Effizienzkonzept aus der Schweiz. Ordnet man aus Gründen der Vereinfachung den privaten Haushalten ein Viertel, d.h. 500 Watt als weltweit verträgliche Dauerleistung pro Person zu, ergibt sich ein Zielwert von 4380 kWh/(Pa). Er wird im Effizienz-Plus-Szenario ziemlich exakt 2060 erreicht. Im Effizienz-Szenario kann dieses Ziel erst 2065 eingehalten werden. Im Business-as-usual-Szenario liegt dieses Ziel jedoch zeitlich in weiter Ferne.

Entwicklung der Treibhausgasemissionen

Die klimawirksamen Emissionen des Wohngebäudeparks werden ebenfalls als Pro-Kopf-Werte dargestellt, weil diese einen belastbaren Maßstab für die globalen Klimaschutzziele bilden (Abb. 1.9). In dieser Untersuchung wird daher Bezug zu einer Studie genommen, die anhand eines Vergleichs verschiedener Gerechtigkeitsmodelle die zulässigen, mit dem 2-Grad-Ziel übereinstimmenden Pro-Kopf-Emissionen als Zielfeld definiert (vgl. Kern 2016). Für die privaten Haushalte ergeben sich personenbezogene CO_2-Äquivalent-Emissionen zwischen 100 und 500 kg/(P•a). Die Güte eines Klimaschutzkonzeptes zeigt sich darin, wie die Minderungspfade in das Zielfeld „eintauchen“: Das Business-as-usual-Szenario gelangt nicht einmal in die Nähe des Zielfeldes und scheidet somit als Klimaschutzpfad aus. Nur mit den Effizienzszenarien kann der Nachweis einer mit dem 2-Grad-Ziel übereinstimmenden Entwicklung geführt werden. Ein überzeugendes Klimaschutzkonzept wird im Grunde nur im Effizienz-Plus-Szenario verwirklicht. Nur dieses taucht in das o.g. Zielfeld ein.

Vergleich der Szenarienergebnisse mit den Zielen der EU
Abschließend sollen nun die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung mit den Zielen der EU gemäß dem aktuellen Klima- und Energiepaket abgeglichen werden (Abb. 1.10).

Dabei ist zu beachten, dass der Wohngebäudepark mit dem Sektor der privaten Haushalte auf der Endenergieebene exakt übereinstimmt. Bei der Betrachtung der Primärenergie und der Treibhausgasemissionen werden in den Szenarien die Werte für die Strom- und Fernwärmeerzeugung ebenfalls den Haushalten verursachergerecht zugeordnet, während dies in den nationalen Energiebilanzen nicht der Fall ist. Damit gelingt es, den Beitrag der privaten Haushalte zur Gesamtenergiestrategie Luxemburgs besser einordnen zu können.

Die EU-Ziele gliedern sich in drei Teilbereiche, denen jeweils unterschiedliche Zielsetzungen zugeordnet sind (in Abb. 1.10 jeweils mit Pfeilen und roten Balken visualisiert):

- Das EU-Primärenergie-Ziel wurde mit - 27 % gegenüber dem Stand von 2005 festgelegt. Es wird im Business-as-usual-Szenario deutlich verfehlt, während die Effizienzszenarien es mit - 34% bzw. - 39% spürbar übererfüllen.
- Im Hinblick auf den Anteil erneuerbarer Energieträger wurde eine Marke von wenigstens 27 % beschlossen. Dieser Zielwert wird exakt vom Effizienz-Plus-Szenario erreicht. Im Effizienz-Szenario liegt dieser Wert mit 26 % nur knapp darunter, während das Business-as-usual-Szenario mit etwa 20 % schon einen deutlichen Abstand aufweist.
- Bezogen auf den Klimaschutz wurde als Zielsetzung eine Reduktion der CO_2-Äquivalent-Emissionen um 40 % gegenüber dem Stand 2005 festgelegt. Beide Effizienzszenarien können diese Anforderung mit - 46% bzw. - 48% gut einhalten. Hingegen fällt im Business-as-usual-Szenario die Treibhausgasreduktion mit nur 15 % viel zu gering aus. Vergleicht man hierzu die vorausgegangene Bewertung gemäß der Methodik über das zulässige Globalbudget und die daraus abgeleiteten Zielfelder, die mit dem 2-Grad-Ziel in Übereinstimmung stehen, wird deutlich, dass die Ziel setzung der EU im Hinblick auf den Klimaschutz nicht streng genug gewählt wurde.

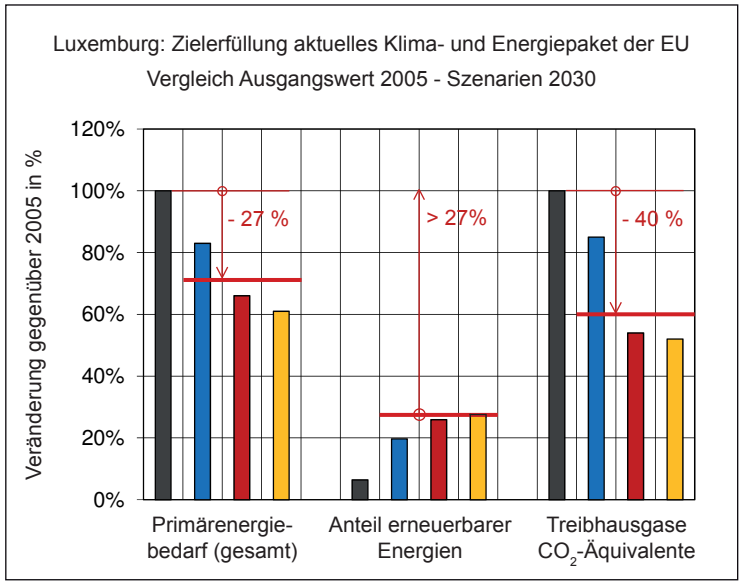


Abbildung 1.10
Zielerfüllung der Szenarien in Bezug auf das aktuelle EU Klima- und Energiepaket für den Zeitraum 2005 - 2030. Die Ziele sind im Diagramm als rote Linien eingetragen.

Ergebnisse der separaten Teilstudie zu PV-Ausbau und Elektromobilität (Kapitel 10)
In den bisher dargestellten Berechnungsergebnissen wurden bedarfsseitig die Energieanwendungen Heizung, Warmwasser, Hilfs- und Haushaltsstrom berücksichtigt. Die Erträge gebäudeintegrierter PV-Anlagen wurden nicht mitbilanziert, da sie vereinfachend als dezentraler Teil der allgemeinen Stromerzeugung angesehen werden – unterstellt wurde also eine Volleinspeisung ins Stromnetz.

Da absehbar ist, dass in Zukunft in immer mehr Fällen PV-Erträge im Gebäude direkt genutzt und somit der Netzbezug reduziert wird, wurde in einem zweiten Teil die Bilanzgrenze in zweierlei Hinsicht ausgeweitet: Bedarfsseitig wird zusätzlich zu

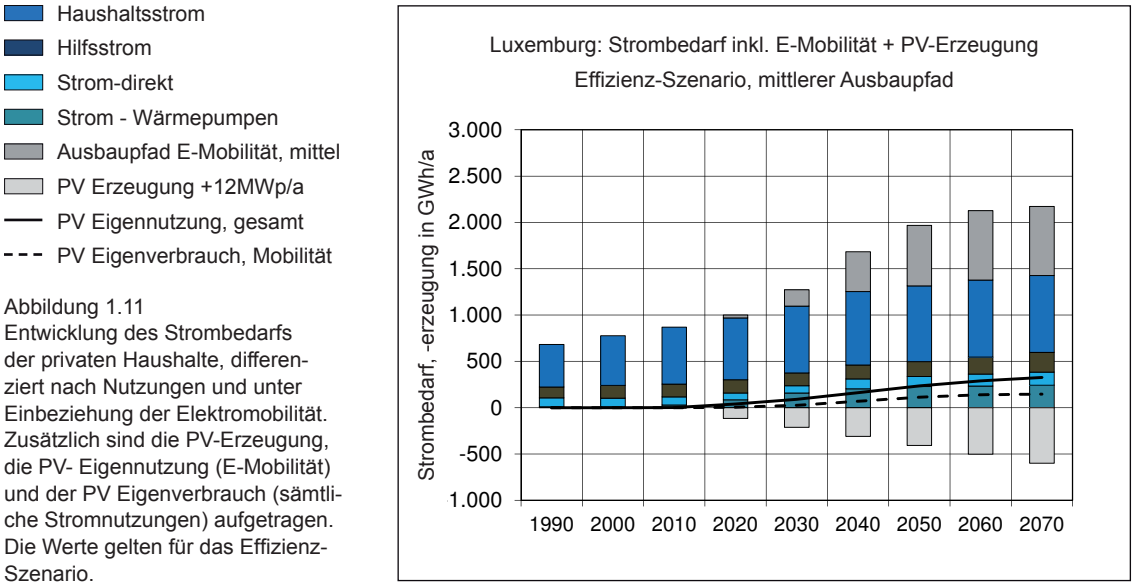


Abbildung 1.11
Entwicklung des Strombedarfs der privaten Haushalte, differenziert nach Nutzungen und unter Einbeziehung der Elektromobilität. Zusätzlich sind die PV-Erzeugung, die PV- Eigennutzung (E-Mobilität) und der PV Eigenverbrauch (sämtliche Stromnutzungen) aufgetragen. Die Werte gelten für das Effizienz-Szenario.

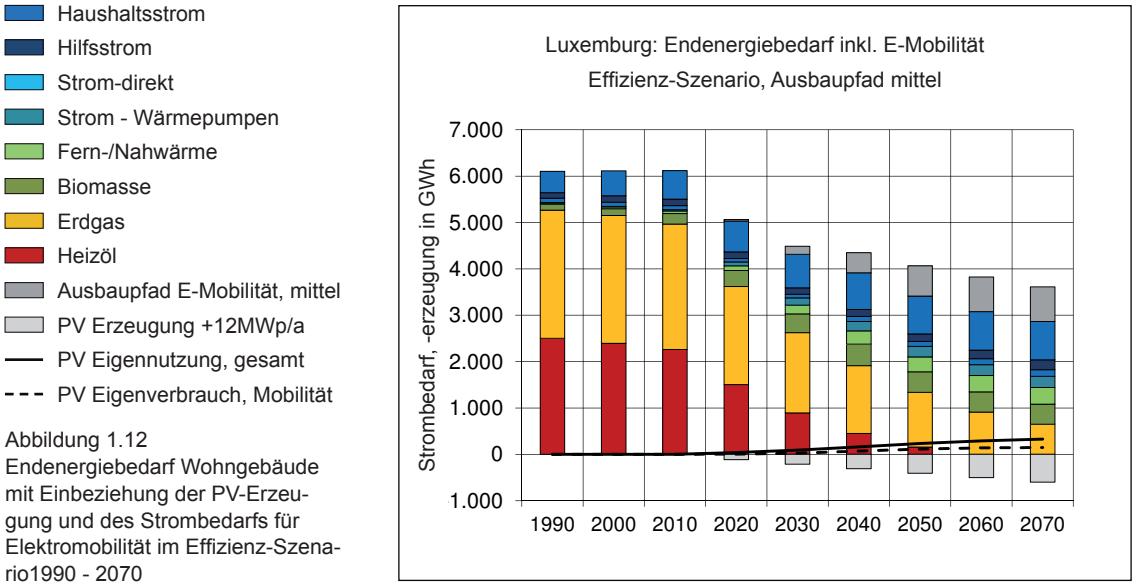


Abbildung 1.12
Endenergiebedarf Wohngebäude mit Einbeziehung der PV-Erzeugung und des Strombedarfs für Elektromobilität im Effizienz-Szenario1990 - 2070

den o.g. Anwendungsarten der Strombedarf für Elektroautos mit bilanziert, die in oder an Wohngebäuden beladen werden. Erzeugungsseitig wird zusätzlich die Stromerzeugung gebäudeintegrierter PV-Anlagen berücksichtigt. Bei der Gesamt-Erzeugung der PV-Systeme wird zwischen einem eigengenutzten Anteil (für Heizung, Warmwasser, Hilfs- und Haushaltsstrom sowie für E-Mobilität) und einem ins Netz eingespeisten Anteil unterschieden. Die zusätzlichen Berechnungen wurden exemplarisch für das Effizienz-Szenario durchgeführt.

Da gerade zur Modellierung des Strombedarfs durch Beladung von Elektro-PKW in/an Wohngebäuden sehr viele Annahmen getroffen werden müssen, wurden die Berechnungen mit erweiterter Bilanzgrenze separat durchgeführt und werden nachfolgend auch separat dargestellt. Wegen der zum Teil großen Schwankungsbreiten in den Annahmen sind die nachfolgenden Ergebnisse zum Strombedarf durch Beladung von Elektro-PKW an Wohngebäuden und zur Eigennutzung von PV-Strom nur als grobe Abschätzungen zu verstehen.

In Abbildung 1.11 ist der Strombedarf für alle Anwendungen inkl. dem Beladen von Elektro-PKW und der Erzeugung von PV-Strom im Effizienz-Szenario gegenübergestellt. Der Bedarf an anderen Energieträgern ist nicht berücksichtigt. Abgebildet ist als oberster Säulenabschnitt der Strombedarf für die Beladung von Elektro-PKW für den mittleren Elektromobilitäts-Ausbaupfad an Wohngebäuden. In diesem Pfad ist für 2020 ein Anteil von 4% Elektroautos im Jahr 2020, von 20% im Jahr 2030 und von 70% im Jahr 2050 unterstellt. Wie zu erkennen, liegt der zusätzliche Strombedarf auch im Jahr 2050 bei dem unterstellten Anteil von Ladungen am Wohngebäude (75% im Jahr 2020, sinkend auf 54% im Jahr 2050) deutlich unter dem Haushaltsstrombedarf.

Im negativen Bereich ist die Gesamt-Erzeugung der gebäudeintegrierten PV-Anlagen aufgeführt. Unterstellt ist ein stetiger Ausbau von 12 MWp pro Jahr, dies entspricht in etwa der

doppelten Ausbauleistung im Mittel der Jahre 2013 bis 2016. Es wird deutlich, dass die Gesamt-Erzeugung der PV-Anlagen auch im Jahr 2050 noch unter der notwendigen Strommenge zum Beladen der Elektro-PKW liegt, jedoch dann deutlich höher, als der Bedarf für Wärmepumpen.

In Abbildung 1.11 wird zusätzlich dargestellt, wie hoch der Eigennutzungsanteil des PV-Stroms für die Anwendungen Heizung, Warmwasser, Hilfs- und Haushaltsstrom ist und wie viel PV-Strom zusätzlich für die Beladung von Elektro-PKW genutzt werden kann. Die gestrichelte Linie beschreibt den Anteil des PV-Stroms, der für die Anwendungen Heizung, Warmwasser,- Hilfs- und Haushaltsstrom genutzt werden kann. Der Bereich zwischen der durchgezogenen und der gestrichelten Linie kennzeichnet den Teil des PV-Stroms, der zusätzlich für Beladung von Elektro-PKW genutzt werden kann. Es ist gut erkennen, dass durch die Nutzung von Elektro-PKW der Anteil des eigennutzbaren PV-Stroms deutlich ansteigt. Allerdings kann der eigengenutzte PV-Strom auch inkl. Beladung von Elektro-PKW nur einen relativ geringen Anteil des Gesamtstromverbrauchs decken. Noch geringer fällt der Anteil des eigengenutzten Stroms aus, wenn nicht nur die durch Strom gedeckten Anteile des Gesamt-Energieverbrauchs des Gebäudeparks dargestellt werden, sondern für alle Energieträger (Abb. 1.12).

Nachdem das Effizienz-Szenario aus Klimaschutzsicht nicht vollumfänglich mit den Anforderungen des 2-Grad-Ziels übereinstimmt, wurden die Kalkulationen zusätzlich für das Effizienz-Plus-Szenario durchgeführt, das gerade im Bereich der Stromnutzungen von einer viel höheren Stromeffizienz in den Wohngebäuden ausgeht (Abb. 1.13 und 1.14). Der durch PV-Erzeugung an Wohngebäuden erzielbare Anteil steigt dadurch sowohl aus Perspektive der Gesamtbilanz, als auch im Hinblick auf den eigengenutzten Anteil spürbar an. Daher ist es auch aus der Perspektive PV-Erzeugung und Elektromobilität empfehlenswert ab etwa 2030 die Gesamtanforderungen am Niveau des Effizienz-Plus-Szenarios auszurichten.

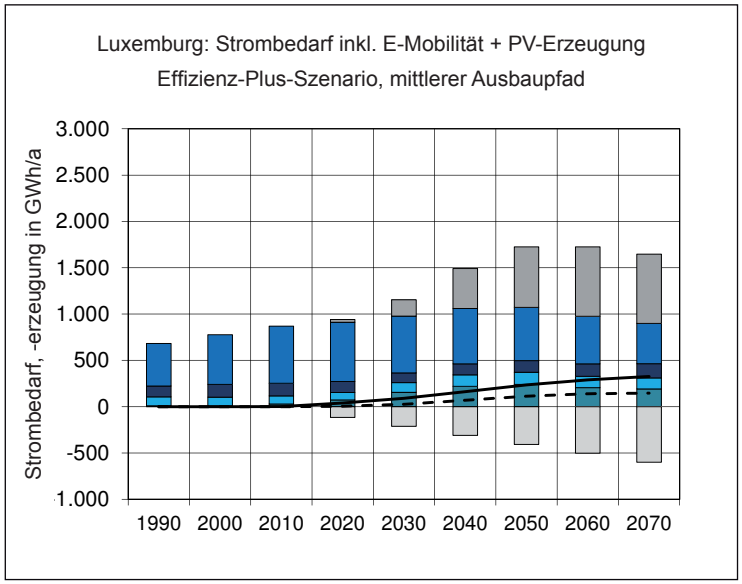


Abbildung 1.13
Entwicklung des Strombedarfs der privaten Haushalte, differenziert nach Nutzungen und unter Einbeziehung der Elektromobilität. Zusätzlich sind die PV-Erzeugung, die PV- Eigennutzung (E-Mobilität) und der PV Eigenverbrauch (sämtliche Stromnutzungen) aufgetragen. Die Werte gelten für das Effizienz-Plus-Szenario.

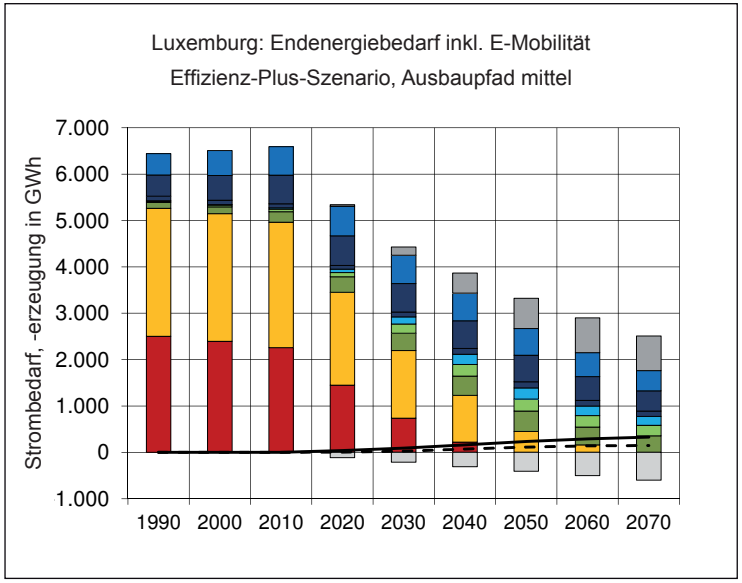


Abbildung 1.14
Endenergiebedarf Wohngebäude mit Einbeziehung der PV-Erzeugung und des Strombedarfs für Elektromobilität 1990 - 2070 im Effizienz-Plus-Szenario.

Handlungsfeld	Kurzbeschreibung der Effizienz-/Klimaschutzmaßnahmen (Nutzenergie)	Kurzbeschreibung der Effizienz-/Klimaschutzmaßnahmen (Versorgungssysteme)
Raumwärme	Neubau ab 2020: gemäß Kostenoptimum Bestand ab 2020: energetische Sanierung mit Passivhauskomponenten (z.B. EnerPhit-Standard) - Hochwärmegedämmte Hüllkonstruktionen - Passivhausfenster - Luftdichte und wärmebrückenfreie Konstruktionen - Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung	- Zurückdrängen von Heizsystemen mit fossilen Energieträgern (Heizöl, Erdgas) - Ausbau von Heizsystemen mit erneuerbaren Energieträgern (z.B. Wärmepumpen, Biomasse) - Wirkungsgradsteigerungen bei allen Heizsystemen (Reduzierung der Energieverluste bei Wärmeerzeugung, -speicherung und -verteilung) - Ausbau Kraft-Wärme-Kopplung (ab 2030: EE-Methan) - Zurückdrängen direktelektrischer Heizungen
Warmwasser	- Einsatz wassersparender Armaturen und Geräte - Einsatz von Geräten mit Warmwasseranschluss - Duschwasser-Wärmerückgewinnung	wie: Raumwärme
Stromanwendungen	- Ausstattung mit stromeffizienten Haushaltsgeräten und sonstigen Elektrogeräten in den Haushalten - Stromsparende Kochherde (bzw. Kochen mit Gas) - Stromsparende Beleuchtung - Reduzierung von stand-by und Stillstandsverlusten - Lastmanagement (Geräte, Elektromobilität) - Reduzierung des Hilfsstromeinsatzes (Pumpen, Antriebe, Ventilatoren, Steuerungen)	- Zurückfahren der Stromerzeugung mit fossilen Energierträgern (Kohle, Heizöl) - Kraft-Wärme-Kopplung (ab 2030: EE-Methan) - Ausbau der Stromerzeugung mit erneuerbaren Energieträgern (z.B. Wind- und Wasserkraft, Biomasse, Solarstrom und Erzeugung von EE-Methan) - Wirkungsgradsteigerungen bei der Stromerzeugung im gesamten Kraftwerkspark und bei der Stromverteilung

Tabelle 1.5: Kurzübersicht über die wesentlichen Effizienz- und Klimaschutzstrategien in den beiden Effizienzszenarien nach Handlungsfeldern.

1.5 Handlungsempfehlungen

Die Ergebnisse der Untersuchungen können nun im Hinblick auf die Ziele Luxemburgs, der EU und der Pariser Klimakonferenz als Handlungsempfehlungen dargelegt werden.

In einer Kurzübersicht (siehe Tab. 1.5) sind die wichtigsten Einzelstrategien der Effizienzszenarien für die Handlungsfelder Raumwärme/Lüftung, Warmwasser und Stromanwendungen zusammengestellt. Dabei wird zwischen der Nutzenergieebene und den Versorgungssystemen unterschieden. Für die Gesamtstrategie ist es entscheidend, die Einzelmaßnahmen sinnvoll miteinander zu verbinden und dabei die jeweils wirtschaftlich günstigen Kombinationen auszuwählen. Diese Art des Vorgehens wurde z.B. bei der Kostenoptimalitätsstudie (MdE 2014a) systematisch angewendet. In zwei zusammenfassenden Darstellungen wurden nun abschließend die Zielerfüllung der Szenarien im Hinblick auf die Pariser Klimaschutzziele (Abb. 1.9) und auf das aktuelle Klima- und Energiepaket der Europäischen Union (Abb. 1.10) aufgezeigt.

Die Effizienz- und Klimaschutzziele Luxemburgs können unter den Randbedingungen der Effizienzszenarien nahezu vollumfänglich nachgewiesen werden. In der ersten Phase 2020-2030 ist es durchaus vertretbar, zunächst dem Effizienz-Szenario zu folgen um erst nach 2030 auf die etwas strengeren Anforderungen im Effizienz-Plus-Szenario zu wechseln. Anhand der jüngsten Kostenentwicklungen kann geschlossen werden, dass bis dahin die energetischen Qualitäten des Effizienz-Plus-Szenarios das Kostenoptimum darstellen. Unter den Bedingungen des Business-as-usual-Szenarios werden hingegen diese Ziele deutlich verfehlt. Im Teilbereich der Stromeffizienz besteht noch ein großer Handlungsbedarf. Perspektivisch wird die Bedeutung dieses Handlungsfeldes eher zunehmen, weil der Strombedarf in den Effizienzszenarien durch das starke Absinken des Raumwärmebedarfs anteilig an Bedeutung gewinnt. Zu beachten ist hier auch die Kopplung mit anderen Sektoren, z.B. Mobilität und die künftigen Anforderungen an die Strombereitstellung (z.B. saisonale Speicher zur Überbrückung der Winterlücke, Lastmanagement).

„UND“ - anstelle „ODER“-Strategien

Zentrales Ergebnis der Untersuchung ist, dass es darauf ankommt, die **Effizienz- und Klimaschutzstrategien nicht gegeneinander auszuspielen, sondern sinnvoll miteinander zu kombinieren**. Der entscheidende Aspekt ist die Qualität der energetischen Maßnahmen im Sinne des Mottos „Wenn schon – denn schon“: Immer dann, wenn sich eine Gelegenheit bietet, sollte anstelle von Reparaturen oder Erneuerungen ohne energetische Verbesserung („Pinselsanierung“) oder Energiemaßnahmen mit nur mittlerer Qualität (z.B. Niedrigenergiekomponenten), eine hohe Qualität (z.B. Einsatz Passivhauskomponenten) ausgeführt werden. Neben einem zukunftsweisenden Wärmeschutz sind hier der Einsatz von hochwertigen Fenstern mit Dreifach-Wärmeschutzverglasung und der Einbau von Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung bzw. thermischen Solar- oder Photovoltaikanlagen sowie die Ausstattung der Gebäude mit stromeffizienten Geräten und Beleuchtung notwendig. Das hängt u.a. auch damit zusammen, dass die Gelegenheiten für die jeweils wirtschaftlichen Maßnahmen ein eher knappes Gut darstellen. Werden sie nicht genutzt, werden die Maßnahmen auf eine spätere Generation mit doppelter Problemlage verschoben: Einerseits würden die Verbrauchswerte und Emissionen dann auf einem zu hohen Niveau liegen, mit entsprechend hohen Energiekosten je Wohnung, andererseits werden spätere Generationen zu unwirtschaftlichen Maßnahmen gezwungen, wenn sie 40 oder 50 Jahre später doch noch auf eine hohe Qualität im Sinne der Effizienzszenarien wechseln wollen.

Das Dilemma der mittleren Qualität

Werden im Bestand, wie dies im Business-as-usual-Szenario der Fall ist, nur mittlere Qualitäten (d.h. in etwa auf dem Niveau heutiger Niedrigenergiehäuser) eingesetzt, so produziert man ein „Dilemma der mittleren Qualität". Die damit im Neubau und bei energetischen Modernisierungen erzielbare Senkung des Heizwärmebedarfs reicht nicht aus, um die Effizienz- und Klimaschutzziele Luxemburgs bzw. die des internationalen Klimaschutzes zu erreichen. Aufgrund der großen Trägkeit des Wohngebäudeparks als energetisches System wird dieses Problem jedoch zu spät, d.h. erst ab 2030/40 erkennbar, um dann ggf. noch vernünftig gegensteuern zu können.

Wegen der langen Nutzungsdauern von 30 - 80 Jahren stellen die mittleren Qualitäten in erster Linie verpasste Gelegenheiten dar, die so schnell nicht wiederkehren. In zweiter Linie stellt sich darüber hinaus ein sog. „Lock-in-Effekt" ein. Denn auch nach 20, 40 oder 60 Jahren kann keine Wirtschaftlichkeit für energetische Verbesserungen von mittlerer auf hohe Qualität (z.B. Erhöhung Wärmeschutz einer Außenwand von einem U-Wert von 0,25 W/m^2K auf 0,15 W/m^2K) erwartet werden. Das liegt an dem abnehmenden Grenznutzen der Maßnahmen (z.B. Dämmstärken – Wärmedurchgang) und daran, dass die Energiepreise nicht beliebig ansteigen werden (z.B. Deckelung künftiger Energiepreise auf dem heutigen Niveau erneuerbarer Energiesysteme).

Nicht zuletzt bleiben die mittleren Qualitäten oftmals hinter dem wirtschaftlichen Optimum zurück, d.h. bei einer Ausführung mit hohen Qualität wären weitere Gewinne im Hinblick auf die Lebenszykluskosten möglich gewesen. Keinesfalls zielführend ist hingegen das zeitliche Vorziehen von Maßnahmen, der vorzeitige Abriss von Bestandgebäuden und deren Ersatz mit einem Neubau („Abrissprämie") oder eine Erhöhung der Sanierungsrate über die übliche Erneuerungsrate von 1,5 - 2,0 % hinaus. Diese Vorschläge stehen im Widerspruch zum Kopplungsprinzip, verursachen hohe Rüstkosten und zerstören in letzter Konsequenz den Restwert der betreffenden Konstruktionen.

Handlungsempfehlungen in Kurzform

Die konkreten Handlungsempfehlungen können in Kurzform folgendermaßen zusammengefasst werden:

- Im Neubau und bei energetischen Sanierungen sollte künftig die Gebäudehülle in Passivhausqualität ausgeführt werden. Diese entspricht dem Kostenoptimum hinsichtlich der Lebenszykluskosten.
- Auch im Bestand sind künftig Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung und zunehmend auch thermische Solar- oder Photovoltaikanlagen vorzusehen.
- Stromeffizienzsteigerungen bei allen Elektroanwendungen.
- Langfristiger Ausstieg aus den fossilen Heizsystemen.
- Weitgehend erneuerbare Stromerzeugung, auch unter den erschwerten künftigen Bedingungen (zusätzliche Anwendungen wie Elektromobilität, saisonale Speicherung).

Spezialfall: Einsatz von Innendämmungen

Der Einsatz von Innendämmungen stellt im eingriffsempfindlichen Bestand aus Gründen der Effizienzverbesserung und des Klimaschutzes **keine** entscheidende Maßnahme dar. Innendämmungen sind jedoch u.U. aus anderen Gründen sinnvoll: Sie sind dann empfehlenswert, wenn denkmalverträglich ausführbar und keine Platzprobleme oder bauphysikalische Hemmnisse ihren Einsatz erschweren oder verhindern. Sie können dann einen wichtigen Beitrag zur Steigerung der Behaglichkeit und des Werterhalts sowie zur Energiekostensenkung leisten. Der Einsatz von Innendämmungen erfordert immer besondere Sorgfalt bei der Auswahl der Systeme und der Ausbildung der Anschlüsse. Weil das Feuchteverhalten der neuen Konstruktion ganz entscheidend von den verbleibenden Bauteilen abhängt, deren Beurteilung große Fachkunde erfordert, ist i.d.R. die Einschaltung eines Bauphysikers unverzichtbar.

Fazit in Form von konkreten Handlungsempfehlungen

Wie die Ergebnisse der Studie zeigen, können Endenergiebedarf und Treibhausgasemissionen des Luxemburgischen Wohngebäudeparks trotz eines sehr starken Zuwachses an Bevölkerung und Wohnfläche bis 2050 so weit reduziert werden, dass der Energiebedarf des Wohngebäudeparks der Erreichung langfristiger internationaler, europäischer und nationaler Ziele (z.B. Klima- und Energieplan der EU bzw. 2-Grad-Ziel des Pariser Klimaabkommens) nicht im Wege steht.

Es wird daher empfohlen, die Schritte zur weiteren Reduktion des Endenergiebedarfs und der THG-Emissionen bis etwa 2025/30 am Effizienz-Szenario und ab 2025/30 am Effizienz-Plus-Szenario auszurichten. Dies ist deshalb möglich, da diese Szenarien Maßnahmen beschreiben, die sich am heutigen Kostenoptimum orientieren (Effizienz-Szenario) bzw. an Maßnahmenkombinationen, für die Zeit nach 2025 bis 2030 angenommen werden kann, dass sie dem zukünftigen Kostenoptimum entsprechen.

Wie die detaillierte Analyse der Ergebnisse der Szenarienberechnungen zeigt, können die notwendigen Reduktionen nicht durch Anstrengungen in einzelnen Teilbereichen (z.B. nur durch Verbrauchsreduktion oder nur durch den Umstieg auf erneuerbare Energieträger) erreicht werden, sondern nur durch ein abgestimmtes Gesamtkonzept, in dem die im Effizienz-Szenario und im Effizienz-Plus-Szenario zu Grunde gelegten Maßnahmen Schritt für Schritt umgesetzt werden.

Auf der Grundlage der Szenarienberechnungen ergeben sich die folgenden Handlungsempfehlungen für die verschiedenen den Energiebedarf und die THG-Emissionen beeinflussenden Handlungsfelder:

1. Reduktion des Energiebedarfs im Neubau

Der Anteil der zukünftigen Neubauten an Endenergiebedarf und THG-Emissionen fällt im Effizienz-Szenario und im Effizienz-Plus-Szenario trotz des sehr starken Bevölkerungs- und Wohnflächenzuwachses relativ gering aus, weil für diese Szenarien die ambitionierten Anforderungen des aktuellen gesetzlichen Standards (RGD 2016) hinterlegt sind. Dies bedeutet, dass im Modell alle Neubauten ab 2020 stark reduzierte Heizwärmebedarfe aufweisen, weil sie neben einer sehr guten Dämmqualität über Komfortlüftungen mit Wärmerückgewinnung verfügen. Ohne die Umsetzung dieses Anforderungsniveaus seit dem 1. Januar 2017 wäre die Reduktion des Gesamt-Endenergiebedarfs und der THG-Emissionen bei Verdopplung der Bevölkerung schlicht unmöglich. Mit der Umsetzung des (RGD 2016) ist für den Neubaubereich die entscheidende Weichenstellung bereits erfolgt. Dies, das sei hier angemerkt, ist bislang nur in sehr wenigen europäischen Staaten der Fall.

Daraus ergeben sich folgende konkrete Handlungsempfehlungen im Neubau:

- Die Grenzwerte des RGD 2016 beschreiben eine sehr gute Qualität der Gebäudehülle und sind nur in Gebäuden mit Wärmerückgewinnung erreichbar. Es wird empfohlen, die Anforderungen etwa 2025 zu überprüfen und ggf. minimal zu verschärfen, wenn die Kostenentwicklung bei wichtigen Komponenten (Fenster, Dämmsysteme, Komfortlüftungen mit Wärmerückgewinnung) das Wirtschaftlichkeitsoptimum weiter in Richtung höherer Qualitäten verschoben hat.
- Weitere Verbesserungen der Neubauten sind – ausgehend vom erreichten Stand bei Gebäudehülle und Lüftung– eher bei der Erhöhung der Effizienz einzelner Wärmeversorgungssysteme, bei der Auswahl emissionsarmer Energieträger (siehe Punkt 4), sowie bei der Einbindung von Thermie- und PV-Anlagen (siehe Punkte 6 und 8) zu erwarten. Dementsprechend können die Anforderungen an den Pri-

märenergiebedarf tendenziell früher verschärft werden, als die an die Qualität der Hülle.
- Da die Eigennutzung der Erträge gebäudeintegrierter PV-Systeme eine zunehmende Rolle spielen wird, sollte geprüft werden, die Bilanzgrenze um den Haushaltsstrombedarf zu erweitern und die Nutzung von PV-Strom für die Beladung von PKW ebenfalls zu berücksichtigen.
- Spätestens nach der Einführung von smart-metern sollten die Erfassung der realen Energieverbräuche und deren anonymisierte Auswertung eine stärkere Rolle spielen. Nur so können die Fortschritte bei der Reduktion des Gesamtenergiebedarfs des Gebäudebereichs verfolgt und ggf. beeinflusst werden.

2. Reduktion des Energiebedarfs bei der Modernisierung des Gebäudebestands

Der Erfolg der Bemühungen zur Reduktion des Gesamt-Energiebedarfs und der THG-Emissionen wird sich – nachdem die notwendigen Qualitäten im Neubau bereits eingeführt wurden – in der Gebäudesanierung entscheiden. Der bei Weitem wichtigste strategische Typ ist aufgrund des hohen Anteils an der Gesamtfläche und der hohen spezifischen Bedarfswerte das Einfamilienhaus. Die am Kostenoptimum orientierten Annahmen zur mittleren energetischen Qualität der Sanierung im Effizienz- und im Effizienz-Plus-Szenario führen sowohl für die Einfamilienhäuser als auch für die übrigen strategischen Typen zu einer im Vergleich zum BAU-Szenario weit stärkeren Verringerung des Heizwärmebedarfs.

Folgende Handlungsempfehlungen sind für eine Reduzierung des Energiebedarfs und der Treibhausgasemissionen entscheidend:
- Einführung strengerer Anforderungswerte für die energetische Sanierung von Wohngebäuden sowohl auf der Ebene von Einzelbauteilen, als auch bezüglich des Heizwärmebedarfs. Orientierung am zeitlichen Verlauf der im Effizienz-Szenario und im Effizienz-Plus-Szenario hinterlegten U-Werte und Heizwärmebedarfs-Werte.
- Weiterführung der Förderung für die energetische Sanierung bei erhöhter Progression für höchste Qualitäten und erhöhten Zusatzanreizen für Gesamtsanierungen, in denen alle Bauteile energetisch auf höchstes Niveau saniert werden.

3. Erhöhung der Sanierungsrate und des Anteils der (energetischen) Gesamtsanierungen

Die zentrale Herausforderung bei der Umsetzung der Klimaschutzziele im Wohngebäudebereich ist die Steigerung der Sanierungsrate und die Erhöhung des Anteils von (energetischen) Gesamtsanierungen. Für alle vier Szenarien wurde eine über alle Bauteile der Gebäudehülle gewichtete Sanierungsrate von 1,5 bis 2% angenommen. Diese orientiert sich an den technischen Lebensdauern der Bauteile: für die energetische Sanierung wird angenommen, dass sie stets in Kombination mit ohnehin notwendigen Maßnahmen am Ende der technischen Lebensdauer der Bauteile kombiniert wird.

Auch wenn exakte Zahlen zur derzeitigen Sanierungsrate nicht verfügbar sind, kann davon ausgegangen werden, dass bislang weit weniger Gebäude energetisch saniert werden, als für die o.g. gewichtete Sanierungsrate notwendig wäre. Die Ursachen für die bislang geringe Anzahl an Sanierungen wurden 2015/2016 in einem vom Wirtschaftsministerium initiierten Beteiligungsprozess in einer Workshop-Reihe und zusätzlichen Untersuchungen analysiert. Als Resultat des Beteiligungsprozesses wurde auch ein Maßnahmenplan erarbeitet.

Als Handlungsempfehlungen lassen sich benennen:
- Umsetzung der im Prozess zur Weiterentwicklung der Gebäuderenovierungsstrategie beschriebenen Maßnahmen zur Beseitigung von baukulturellen, rechtlichen und finanziellen Hemmnissen sowie zur Erhöhung der Akzeptanz bei Hausbesitzern und bei den Akteuren der Baubranche.

- Damit diese Aktivitäten tatsächlich eine bauliche Umsetzung mit den erforderlichen hohen Qualitäten münden ist eine Kombination von Informationsangeboten, Anreizen (Steuererleichterungen, Finanzierungshilfen, Förderungen) und gesetzlichen Anforderungen wahrscheinlich am zielführendsten.

4. Beschleunigung der Dekarbonisierung der Wärmeversorgungssysteme im Neubau

Wie die Status-Quo-Analyse auf Grundlage der verfügbaren statistischen Daten zeigt, ist die Wärmeversorgungsstruktur des Luxemburgischen Wohngebäudebestandes von einem sehr hohen Anteil an fossil beheizten Gebäuden geprägt. Dies gilt vor allem für den Gebäudebestand, der zu etwa 90% mit Heizöl, Erdgas und Kohle beheizt wird, aber in abgeschwächtem Maße auch für den Neubau der vergangenen Jahre, in dem noch immer hohe Anteile an fossilen Energieträgern genutzt werden – zunehmend in Form von Erdgas anstelle von Heizöl.

Im Effizienz-Szenario und im Effizienz-Plus-Szenario wird eine Beschleunigung der Dekarbonisierung der Wärmeversorgung aller Gebäude unterstellt. Am deutlichsten wird dies beim Zeitpunkt des Ausstiegs aus dem Energieträger Öl: In den beiden Szenarien wird unterstellt, dass die letzten Ölkessel in etwa in den Jahren 2020 bis 2035 eingebaut werden. Wie die Beispiele Dänemarks und Niederösterreichs zeigen, ist dies für den Neubau ohne größere Probleme durch Verbote durchführbar. Hieraus ergeben sich folgende Handlungsempfehlungen:

- Orientierung am Effizienz-Szenario und dem Effizienz-Plus-Szenario, was die zeitliche Entwicklung der Energieträgerstruktur angeht.
- Verbot des Einbaus neuer Ölkessel zwischen dem Jahr 2020 und spätestens 2035. Im Neubau ist ein relativ kurzfristiges Verbot zwischen 2020 bis 2025 möglich.
- Frühzeitige Ankündigung und Begründung des Verbots.
- Schaffung von Anreizen zur Steigerung der Anteile der regenerativen Energieträger (Wärmepumpen- und Biomasse heizungen v.a. für Einfamilienhäuser) und erneuerbar gestützte Fernwärme zu Lasten des Energieträgers Erdgas.
- Die Anreize können entweder tariflicher Struktur sein (generelle CO_2-Abgabe, Pauschal-Aufschlag für Gas) oder in Form von Förderungen für CO_2-arme Wärmeversorgungssysteme gewährt werden.

5. Beschleunigung der Dekarbonisierung der Wärmeversorgungssysteme im Gebäudebestand

Während die Dekarbonisierung der Wärmeversorgungsstruktur im Neubau relativ problemlos und kurzfristig möglich ist, ist dies für den Gebäudebestand (und die Sanierung) schwieriger. Es wird daher vorgeschlagen, in der Sanierung mit etwas längeren Übergangsfristen für den Ausstieg aus dem Öl zu arbeiten.

Die Handlungsempfehlungen sind ähnlich wie im Neubau, unterscheiden sich jedoch im Detail:

- Orientierung an den Effizienzszenarien bezüglich der zeitlichen Entwicklung des Energieträgerstruktur.
- Verbot des Einbaus neuer Ölkessel zwischen dem Jahr 2020 und spätestens 2035. Im Bestand bzw. in der Gebäudesanierung erscheint ein Einbauverbot für neue Ölkessel zwischen 2025 und 2035 möglich.
- Frühzeitige Ankündigung und Begründung des Verbots.
- Öffentlichkeitsarbeit zur Forcierung des freiwilligen Ausstiegs aus dem Ölheizungen schon vor dem Verbot und Darstellung der nicht-fossilen Alternativen nach Lage im Siedlungsraum des Gebäudes und verfügbaren Alternativen (Umstieg auf erneuerbare Fernwärme in Gebieten, in denen dies aufgrund einer auch zukünftig hohen Wärmedichte wirtschaftlich ist, Umstieg auf Biomasse vor allem in

Einfamilienhäusern im ländlichen Raum, Umstieg auf Sole-, Wasser- oder Luft-Wärmepumpen, wo genügend Entzugsleistung zur Verfügung steht und wo keine Lärm-Probleme entstehen, ggf. Umstieg auf Gas-BHKW, wo keine Möglichkeit außer der Versorgung über Gas besteht).

- Schaffung von Anreizen zur Steigerung der Anteile der regenerativen Energieträger (Wärmepumpen)Strom, Biomasse (v.A. für EFH) und erneuerbare Fernwärme zu Lasten des Energieträgers Erdgas. Für Erdgas ggf. Anreize für BHKW-Lösungen, wo keine anderen Energieträger verfügbar sind; die Anreize können entweder tariflicher Struktur sein (generelle CO_2-Abgabe, Pauschal-Aufschlag für Gas) oder in Form von Förderungen für CO_2-arme Wärme versorgungssysteme gewährt werden.

6. Ausbau der Solarthermie

Durch die Kostendegression von PV-Anlagen sind thermische Solaranlagen unter Druck geraten. Da sie weiterhin eine wichtige Rolle zur Reduktion des Wärmebedarfs für Warmwasser und Heizung spielen, sollte der Ausbau weiter forciert werden.

Die zugehörige Handlungsempfehlung lautet:

- Förderung von thermischen Solaranlagen zur Warmwasserbereitung und Heizungsunterstützung als Alternative und/oder Ergänzung von PV-Anlagen.

7. Senkung des Haushaltsstrombedarfs und allen anderen Elektroanwendungen in und an Wohngebäuden

Bei weiterhin sinkendem Energiebedarf für Heizung und Warmwasser steigt die relative Bedeutung des Haushaltsstrombedarfs. Soll der Endenergiebedarf des Wohngebäudeparks bzw. des Sektors der privaten Haushalte gesenkt werden, so spielt die Reduktion des Strombedarfs für Haushaltsgeräte, Beleuchtung, Kommunikationselektronik, Hilfsaggregate und Aufzüge usw. eine maßgebliche Rolle.

Dazu können folgende Handlungsempfehlungen formuliert werden:

- Erweiterung der Bilanzgrenze in den Energiepassberechnungen um den Haushaltsstrom zur Verdeutlichung der Einsparpotenziale (auch aus bilanztechnischen Gründen, z.B. zur Entwicklung belastbarer Kühlstrategien)
- Verknüpfung möglicher Förderungen für energieeffiziente Gebäude und PV-Anlagen mit Anforderungen zur Beschränkung des Haushaltsstrombedarfs.
- Förderung des Einsatzes stromeffizienter Haushaltsgeräte und Beleuchtung, auch aus sozialen Gründen (z.B. um die Betriebs- und Nebenkosten in Sozialwohnungen zu begrenzen), beispielsweise durch Umtauschaktionen für alte Elektrogeräte in Zusammenarbeit mit Stromversorgern, Elektrogeräte-Händlern etc. („Verschrottungsprämie“) unabhängig von Sanierungsmaßnahmen an Gebäuden.
- Förderungen für besonders effiziente Technologien im Bereich Hilfsstromeinsatz (Pumpen, Steuerungen, Standby) und Allgemeinstrom (Beleuchtung Tiefgaragen und Treppenhäuser, Aufzüge).
- Forschung in Kooperation mit entsprechenden Firmen und Herstellern aus Luxemburg im Bereich Lastmagement und Kopplung von Stromeffizienz mit Eigennutzung, Speicherung und anderen Sektoren (z.B. Elektromobilität).
- Ein besonderes Augenmerk ist auf die Hilfsstrom- und Kleinanwendungen (Pumpen, Steuerungen, Ventilatoren, Stand-by-Verluste, Kleingeräte, Kommunikationselektronik) zu richten, weil diese, als zumeist neue Anwendungen, den Strombedarf ansteigen lassen. Hier ist zu überlegen, welche Mischung von Anforderungen und Anreizen sinnvoll wäre, um diesen Anstieg deutlich zu begrenzen.
- Förderung von speziellen Beratungsangeboten im Zuge der Planung von Neubauten und umfassenden Sanierungen. Das Ziel hierbei ist, die Synergien zwischen Stromeffizienz, thermischer Behaglichkeit und erneuerbaren Energien sowie Elektromobilität aufzuzeigen und in ein projektbezogenes Stromeffizienzkonzept zu überführen.

8. PV am Gebäude und Sektorenkopplung mit Mobilität

Wie in Kapitel 10 dargestellt kann in energiesparenden Gebäuden mit hocheffizienten Haushaltsgeräten die PV-Erzeugung am Gebäude eine maßgebliche Rolle im Energiekonzept spielen, zumal, wenn die Eigenverbrauchsrate durch das Beladen von Elektro-PKW am Gebäude gesteigert wird.

Aus dieser Erkenntnis ergeben sich folgende Handlungsempfehlungen:

- Erweiterung der Bilanzgrenze in den Energieausweisberechnungen um die Erträge gebäudeintegrierter PV-Erträge, die dann jedoch realitätsnah zu bestimmen sind.
- Schaffung von Anreizen zur Nutzung der großen, zusammenhängenden auf Ein- und Mehrfamilienhäusern vorhandenen Dachflächen.
- Ermöglichung von Mieterstrom-Modellen in Mehrfamilienhäusern und Bewerbung dieser Modelle bei großen Immobilienentwicklern.
- Einführung von Vorgaben zur Berücksichtigung der notwendigen Leistung zum Beladen von Elektro-PKW in Mehrfamilienhäusern/Tiefgaragen und ggf. auch in Einfamilienhäusern/Garagen.
- Schnelle Umsetzung der in der nächsten Aktualisierung der EPBD geplanten Verpflichtung zur Leerverrohrung für das Laden von Elektro-PKW in den Tiefgaragen von Mehrfamilienhäusern. Ggf. darüber hinausgehend Vorgaben zu Art und Umfang der in Mehrfamilienhäusern zu realisierenden Ladeinfrastruktur und/oder Vorrüstung mit entsprechenden Anschlusswerten, Zählern und Messeinrichtungen.

9. Umbau des Stromversorgungssystems (außerhalb von Gebäuden)

Der Vollständigkeit halber sei daran erinnert, dass in beiden Effizienzszenarien eine weitreichende Dekarbonisierung der Stromproduktion bis 2050 unterstellt ist. Da Luxemburg vermutlich auch in Zukunft auf Stromimporte, z.B. aus Deutschland angewiesen sein wird, ist dieser Teil des Gesamtkonzepts zur Reduktion der Treibhausgasemissionen des Wohngebäudesektors im Gegensatz zu allen bisher aufgezählten Teilen nur teilweise in Luxemburg beeinflussbar. Interessant ist hierbei vor allem das Effizienz-Plus-Szenario, in dem im Zuge der Transformation des Energiesystems in Richtung einer vollständig erneuerbaren Energieversorgung ein starker Ausbau der stromgestützten Wärmeversorgung und Mobilität zugrundegelegt ist.

Als hier nur sehr allgemein formulierbare Handlungsempfehlungen können genannt werden:

- Ausschöpfung der in Luxemburg vorhandenen Potenziale zur Nutzung erneuerbarer Energien zur Stromerzeugung.
- Ergänzung und Ausbau der bereits vorhandenen Speicherstruktur (Pumpspeicher, Batterien, Gebäude als Wärme speicher, Power-to-gas-Technologie).
- Ggf. Investitionen in regenerative Stromerzeugungsanlagen im benachbarten Ausland.

2 Luxemburg – Energieperspektiven

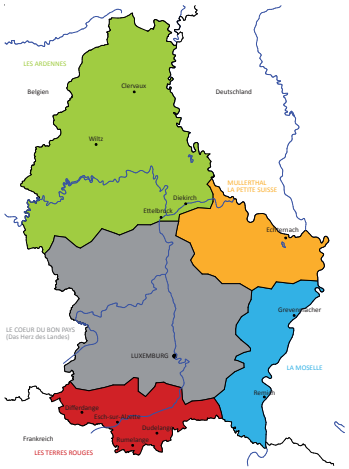


Abbildung 2.1
Luxemburg und seine Regionen

2.1 Räumliche Struktur

Das Großherzogtum Luxemburg liegt im Westen Mitteleuropas und grenzt an Belgien, Deutschland und Frankreich. Das Land erstreckt sich auf einer Fläche von 2.586 Quadratkilometern und ist damit vor Malta (316km²) das zweitkleinste Land der EU.

Trotz seiner geringen Fläche sind die Regionen Luxemburgs sehr vielfältig (siehe Abb. 2.1): Luxemburg Stadt und ihr Umgriff bilden als das Herz des Landes sowohl das kulturelle als auch das wirtschaftliche Zentrum (grau). Das Land der roten Erde (rot) im Süden bindet die ehemals wichtigste wirtschaftliche Kraft des Landes, nämlich die Stahl- und Kohleindustrie in modernes Wirtschafts- und Universitätsleben ein. Im Osten befinden sich das von Weinbergen geprägte Moselgebiet (blau), sowie die Region Mullerthal (gelb), welches aufgrund seiner Landschaft auch als kleine Schweiz bezeichnet wird. Die im Norden gelegenen Ardennen sind geprägt von Naturparks. Dieses Gebiet ist bisher am wenigsten dicht besiedelt.

Luxemburg ist es gelungen, sich zu einer der wachstumsstärksten Wirtschaften der EU zu entwickeln und das Bruttoinlandsprodukt pro Kopf auf das doppelte des EU-Durchschnittes anzuheben. Seine wirtschaftliche Kraft gewann das Land durch die Stahlindustrie, welche allerdings 1987 vom Bankensektor als Hauptbeschäftigungszweig abgelöst wurde. Seither hat sich Luxemburg zum siebtgrößten Finanzplatz der Welt entwickelt und wurde zusätzlich zu einem der wichtigsten europäischen Entscheidungszentren.
Luxemburg ist eines der reichsten Länder der Europäischen Union, mit der Folge, dass sowohl die Löhne als auch die Preise für Grundstücke und Mieten sehr hoch sind.

2.2 Siedlungsentwicklung

Sowohl das hohe Bruttoinlandsprodukt, als auch die geografische Lage, ziehen viele Menschen nach Luxemburg, um dort zu leben oder auch nur um dort zu arbeiten (Grenzgänger). Diese Entwicklungen spielen eine wichtige Rolle für die Zukunft des Landes. Durch einen hohen Bevölkerungszuwachs wird auch der Gebäudepark Luxemburgs deutlich an Umfang zunehmen. Neben der Neuschaffung von Wohnungen werden Arbeitsplätze, Ausbildungsstätten, öffentliche Einrichtungen etc. benötigt, womit sich auch das Erscheinungsbild Luxemburgs erheblich wandeln wird. Stetiges Bevölkerungswachstum erhöht den Druck gerade in den bisher sehr dicht besiedelten Bereichen. In Abb. 2.2 wird der Aufbau der Untersuchung zur Ausgangssituation und der künftigen Entwicklung des Wohngebäudepark Luxemburgs dargestellt. Ausgangspunkt ist die Bevölkerungsentwicklung. Über die Betrachtung der Haushaltsgrößen und der bisherigen Wohnflächenentwicklung wird abgeschätzt, wie sich die spezifische Wohnfläche pro Person künftig entwickeln wird. In einem weiteren Schritt erfolgt die Einschätzung der Neubau- und Ersatzbauentwicklung, wobei letztere von der Abgangsrate durch Abriss, Nutzungsänderungen usw. beeinflusst wird. Dann erst kann das Neubauvolumen und die Bestandsentwicklung, jeweils getennt für alle Baualtersklassen, bestimmt werden.

2.3 Denkmalbestand

Aufgrund des sich dynamisch entwickelnden Wohnungsmarkts steigen die Grundstückspreise und Mieten überproportional an. Von diesen Verwertungsinteressen sind auch die denkmalgeschützten Gebäude betroffen. Zum Teil äußert sich dies als Veränderungswünsche am geschützten Bestand selbst,

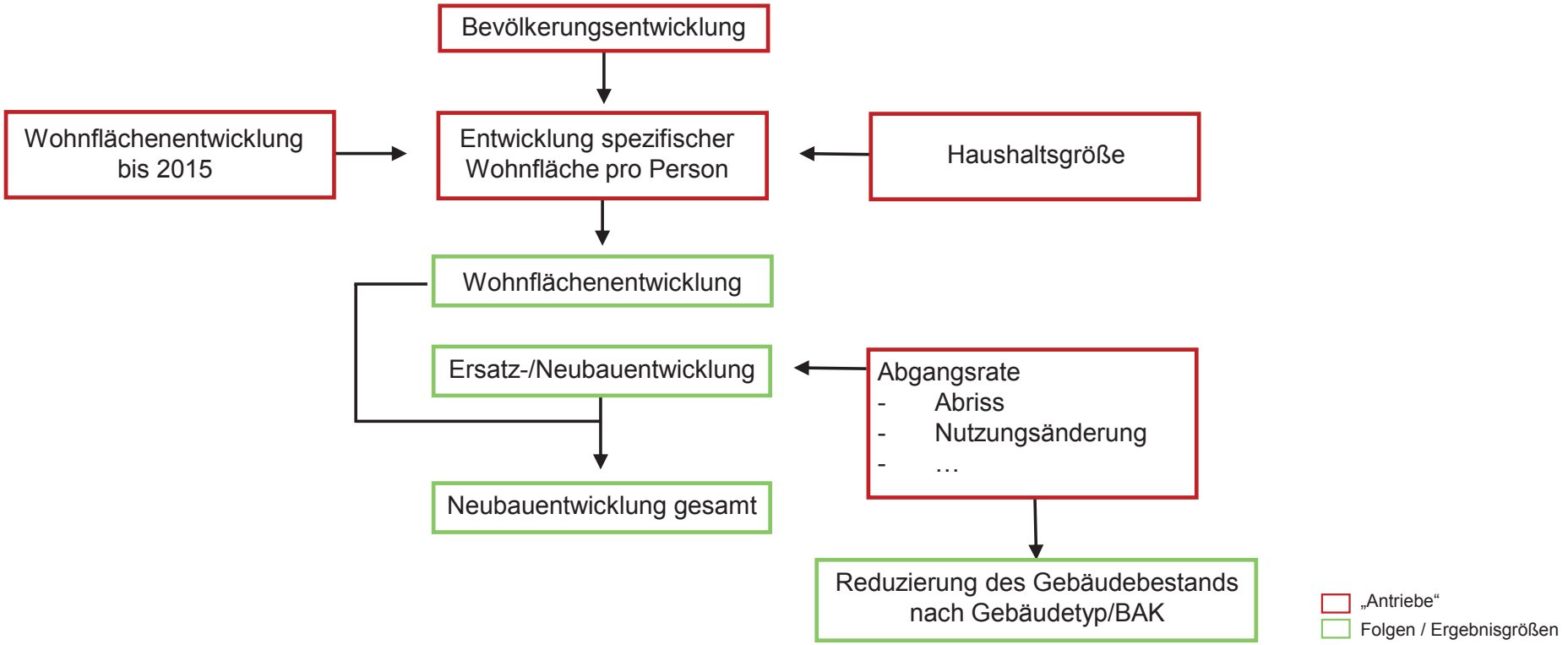


Abbildung 2.2
Schema zur Erläuterung des Vorgehens zur Ermittlung der Wohnflächenentwicklung.
Eigene Darstellung.

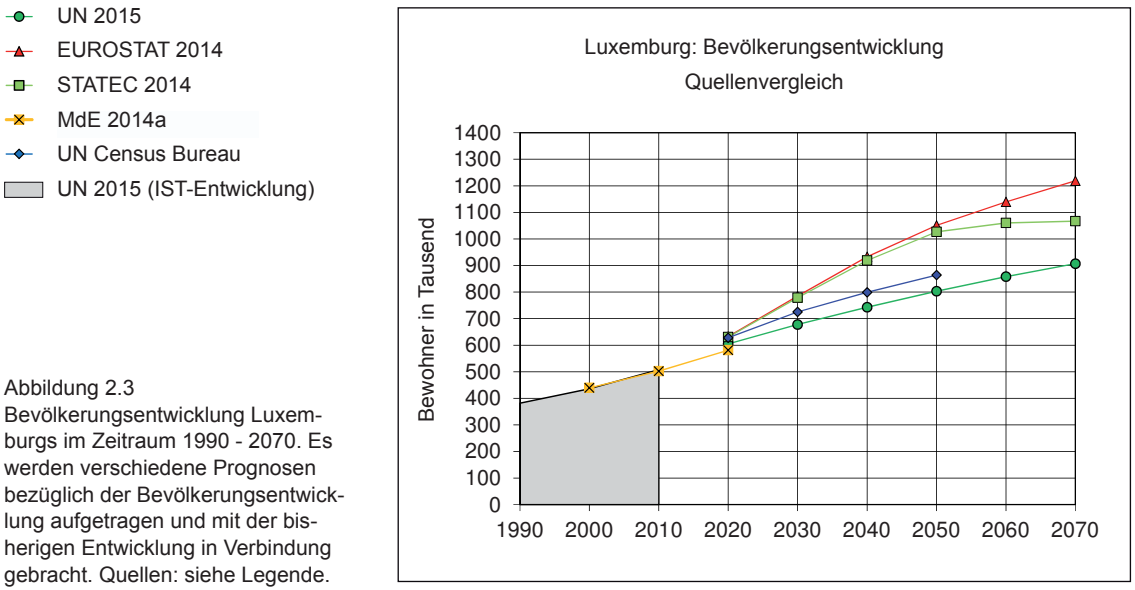


Abbildung 2.3
Bevölkerungsentwicklung Luxemburgs im Zeitraum 1990 - 2070. Es werden verschiedene Prognosen bezüglich der Bevölkerungsentwicklung aufgetragen und mit der bisherigen Entwicklung in Verbindung gebracht. Quellen: siehe Legende.

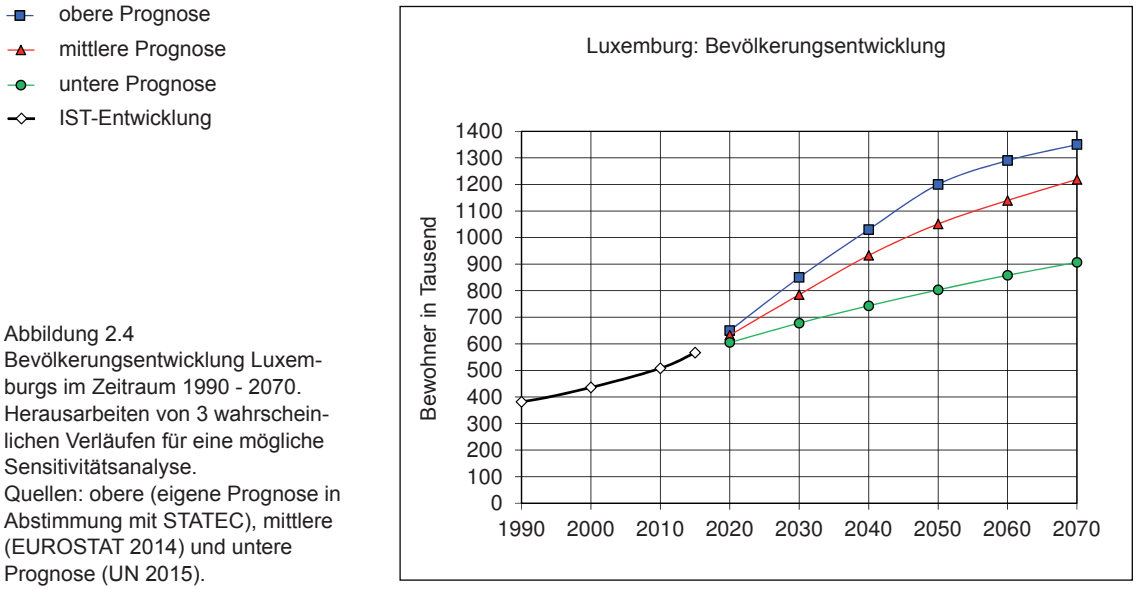


Abbildung 2.4
Bevölkerungsentwicklung Luxemburgs im Zeitraum 1990 - 2070. Herausarbeiten von 3 wahrscheinlichen Verläufen für eine mögliche Sensitivitätsanalyse.
Quellen: obere (eigene Prognose in Abstimmung mit STATEC), mittlere (EUROSTAT 2014) und untere Prognose (UN 2015).

noch häufiger aber am weiteren Umgriff (z.B. Ensembleschutz, Nachbargebäude).
Auf kommunaler Ebene sind augenblicklich rund 5.000 Gebäude geschützt. Diese umfassen ebenfalls fast alle 770 national geschützten Wohnbauten, welche jährlich um ca. 30 Gebäude erweitert werden. Bei den geschützten Gebäuden handelt es sich überwiegend um kleinere Gebäude, die nur eine oder zwei Wohneinheiten beinhalten.

Der schützenswerte Bestand wird folgendermaßen in die Baualtersklassen eingeordnet: 80% der Gebäude wurden bereits vor 1919 errichtet, 15% fallen in die Jahre zwischen den Weltkriegen (1919-1945), 5% wurden 1946-1960 erbaut und von den neueren Gebäuden, die nach 1960 entstanden sind, wurde bisher eine Villa national geschützt. (Denkmalschutzbehörde Luxemburg).

Anhand von Listen der schützenswerten Gebäude, die vom Denkmalamt und den Gemeinden erstellt wurden, sollen auf kommunal geschützter Ebene in den kommenden Jahren insgesamt 27.000 Gebäude unter Denkmalschutz gestellt werden.

2.4 Übersicht über die zentralen Eck- und Basisdaten

In das Kohortenmodell sind bestimmte Mengenkomponenten zu integrieren, die als „Antriebe“ für die Gesamtentwicklung eine wesentliche Rolle spielen. Daher sind diese möglichst sorgfältig zu bestimmen oder es ist alternativ über Sensitivitätsstudien zu prüfen, inwieweit die hier getroffenen Annahmen einen kritischen Einfluss auf das Gesamtergebnis haben.

Bereits von 2000 bis 2013 ist die luxemburgische Bevölkerung um 23% gewachsen, wohingegen der durchschnittliche Anstieg in den EU-28 Ländern nur 5% betrug. Das ist vor allem auf Einwanderer aus anderen europäischen Ländern zurückzuführen. Seit 1970 ist der Anteil der ausländischen Bevölke-

rung auf das Vierfache angestiegen, so dass im Jahr 2016 ein Anteil von 46,7% ermittelt werden konnte.

Es wird erwartet, dass diese Entwicklung sich auch in den folgenden Jahren und Dekaden fortsetzen wird. In den Prognosen wird ausgehend von der aktuellen Bevölkerung (2015: 567.000) von einem starken Bevölkerungswachstum ausgegangen, das bis 2050 in etwa zu einer Verdopplung führen wird. Um die künftige Bevölkerungsentwicklung Luxemburgs grob abschätzen zu können, wurden zunächst einmal die Ergebnisse aus allen verfügbaren Quellen einander gegenübergestellt (siehe Abb. 2.3).

Die aktuellen Prognosen des statistischen Landesamtes (STATEC 2016) gehen davon aus, dass die obere Bevölkerungsentwicklung derzeit die wahrscheinlichere Variante ist. In einem nächsten Schritt wurden daher die Szenarien, die in den Quellen die obere und untere Grenze darstellen (EUROSTAT 2014; UN 2015) ausgewählt und durch eine weitere Entwicklung ergänzt, die einen noch höheren Bevölkerungszuwachs zugrunde legt (vgl. Abb. 2.4). Dies dient u.a. dem Zweck einer späteren Sensitivitätsanalyse. Dies weil die Bevölkerung eine kritische Größe für die folgenden Berechnungen zur Gesamtentwicklung des Wohngebäudeparks und seinem Energiebedarf darstellt.

Zusätzlich zur Bevölkerungsentwicklung sind die Wohnflächenentwicklungen zu betrachten, denn die bewohnten Nutzflächen sind eine entscheidende Größe für den Energiebedarf des Wohngebäudeparks. In Abbildung 2.5 sind die relativen Entwicklungen von Bevölkerung, Haushalten und Wohnflächen mit dem Bezugsjahr 2010 (=100%) zusammen geführt. Es zeigt sich, dass die jeweiligen Entwicklungen relativ ausgeglichen verlaufen. Dies beruht hauptsächlich auf der Annahme, dass der Zuzug überwiegend in städtischen Regionen und Verdichtungsräumen (z.B. Luxemburg Stadt, Süd-Luxemburg) stattfinden wird. Durch den zu erwartenden Druck

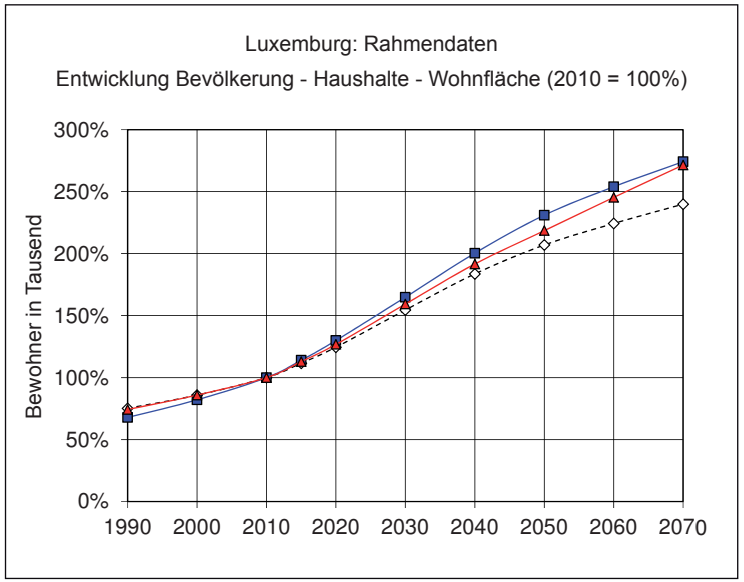


Abbildung 2.5
Relative Entwicklung der Bevölkerung, der Haushalte und der Wohnflächen in Bezug zum Ausgangsjahr der Untersuchung 2010 (= 100%). Quelle: (STATEC 2016)

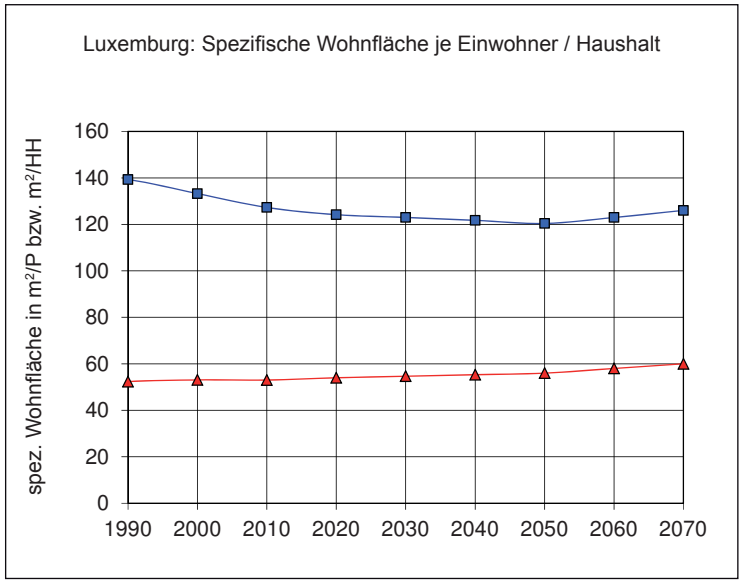


Abbildung 2.6
Entwicklung der spezifischen Wohnfläche pro Haushalt (blau) und pro Person (rot), als Grundlage für die Bestimmung der gesamten Wohnfläche im Betrachtungszeitraum. Quelle: Eigene Berechnungen und Abschätzungen auf der Grundlage von (STATEC 2016)

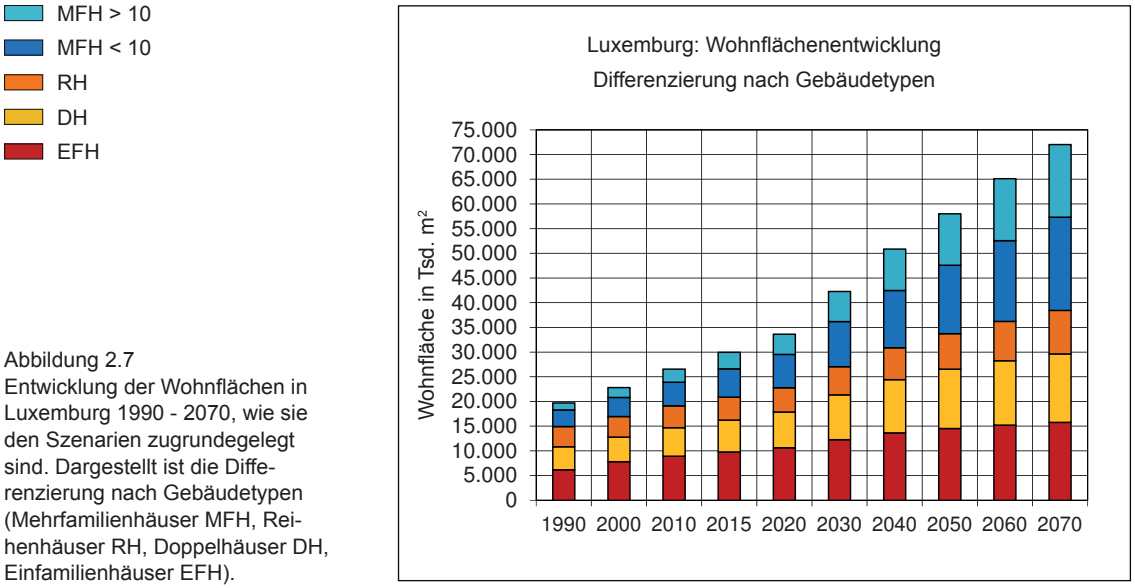


Abbildung 2.7
Entwicklung der Wohnflächen in Luxemburg 1990 - 2070, wie sie den Szenarien zugrundegelegt sind. Dargestellt ist die Differenzierung nach Gebäudetypen (Mehrfamilienhäuser MFH, Reihenhäuser RH, Doppelhäuser DH, Einfamilienhäuser EFH).

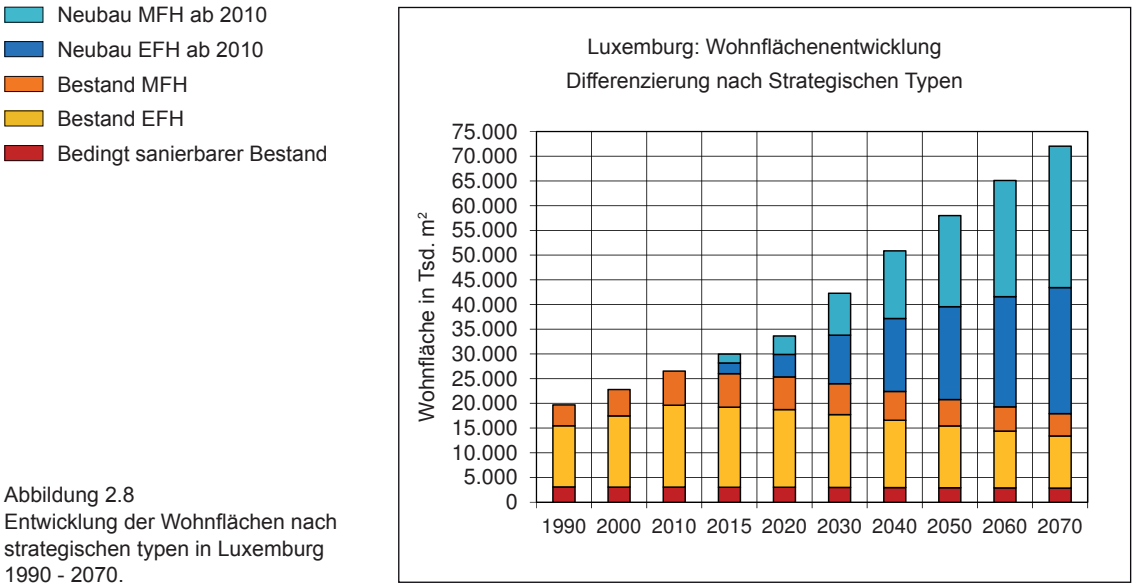


Abbildung 2.8
Entwicklung der Wohnflächen nach strategischen typen in Luxemburg 1990 - 2070.

auf den Wohnungsmarkt wird geschlossen, dass der Anstieg der spezifischen Wohnfläche pro Person weniger stark steigen wird als in der Vergangenheit, auch deshalb weil diese Kenngröße sich im Vergleich zu Nachbarländern ohnehin auf einem hohen Niveau befindet. Die Wohnfläche pro Haushalt sinkt aufgrund sinkender Personenzahlen pro Haushalt ab. Während die durchschnittliche Haushaltsgröße im Jahr 1990 noch 2,66 Personen und im Jahr 2010 etwa 2,40 Personen betrug, wird diese bis 2050 nur noch bei 2,15 Personen liegen. (vgl. Abb. 2.6)
Bei einer Darstellung, in der die Gebäudetypen unterschieden sind (Abb. 2.7) erkennt man, dass im Betrachtungszeitraum alle Gebäudetypen Zuwächse erfahren. Besonders stark sind diese bei den Einfamilien- und den kleinen Mehrfamilienhäusern. In Zukunft wird auch ein stärkerer Anstieg in größeren Mehrfamilienhäusern erwartet.

In der differenzierten Darstellung der Wohnflächen nach strategischen Typen (Abb. 2.8) wird sichtbar, dass im gesamten Betrachtungszeitraum ein Abgang bei den heutigen Bestandsgebäuden stattfindet. Die Abgangsrate wurde in den Szenarien konstant mit 0,10% pro Jahr für die denkmalgeschützten und mit 0,85% pro Jahr (NEEAP) für die restlichen Bestandsgebäude angenommen. Der Neubau umfasst somit den steigenden Bedarf und die Ersatzbauten für Wohnungen, die abgerissen oder umgenutzt werden.

2.5 Klimaschutzziele in Übereinstimmung mit dem 2°C-Ziel der Pariser Klimakonferenz

In diesem Kapitel wird erläutert, dass es unterschiedliche Ansätze gibt, aus dem 2°C-Klimaschutzziel die maximal zulässigen globalen Treibhausgasemissionen zu berechnen und diese in nationale Budgets sowie in pro-Kopf-emissionen umzurechnen. Die Ausführungen werden am Beispiel Deutschlands dargestellt, die Prinzipien sind jedoch auf andere industrialisierte Staaten übertragbar.

- Sofern man die Wahrscheinlichkeit, das 2°C-Ziel zu überschreiten, auf 30% begrenzen möchte, müssen die globalen CO_2-Emissionen 2050 gegenüber dem Stand von 1990 halbiert werden (vgl. Meinshausen et al. 2009). Folgt man dem Ansatz von Verringerung und Konvergenz mit Bezugsjahr 2050 (C&C 2050) bedeutet dies, dass die Pro-Kopf-Emissionen sich bis 2050 angleichen sollten und nicht höher als ca. 1,25 t/P*a liegen sollten.
- Nochmals strengere Anforderungen stellt der sog. Budgetansatz des wissenschaftlichen Beitrats der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU 2009). Hier werden zunächst die aus Klimaschutzgründen maximal zulässigen CO_2-Emissionen im Zeitraum 2010 - 2050 über eine Multi-Szenarien-Analyse eingegrenzt. Sofern die Wahrscheinlichkeit, das 2°C-Ziel zu überschreiten nicht höher als 25 % betragen soll, dürfen in diesem Zeitraum global maximal noch 1000 Gt Kohlendioxid emittiert werden.
- Die Verteilung auf Ländergruppen und Nationalstaaten können nach verschiedenen Prinzipien vorgenommen werden. Wählt man hierbei den für die Industriestaaten moderateren Ansatz der „Zukunftsverantwortung“ müssten in Deutschland die CO_2-Emissionen im Zeitraum 2010 - 2050 auf höchstens 9 Mrd. t begrenzt werden. Wählt man hingegen die Option „Historische Verantwortung“ wäre das Budget für Deutschland bzw. Luxemburg bereits heute vollständig aufgebraucht (vgl. WBGU 2009, S. 2 ff).

In Tabelle 2.1 werden die Konsequenzen der unterschiedlichen Ansätze zur Begründung von Klimaschutzzielen exemplarisch für Deutschland und den Sektor der privaten Haushalte vergleichend gegenübergestellt. Auf dieser Basis ist es möglich, analog einen ähnlich belastbaren Vorschlag zu den Klimaschutzzielen Luxemburgs insgesamt und für den Sektor der privaten Haushalte im Speziellen zu formulieren, der auf der Basis der aktuellen wissenschaftlichen Diskussion basiert. Dabei sind unterschiedliche Betrachtungsweisen möglich:

Kriterium	Kurzbeschreibung	Klimaschutzziel Deutschland	Klimaschutzziel private Haushalte Deutschland
Nationales Klimaschutzziel 2050 (vgl. [Energiekonzept 2010]	Reduktion der nationalen CO2-Emissionen im Jahr 2050 auf 80% im Vergleich zum Stand 1990. Diese Zielsetzung wurde in [Vallentin 2011] zugrundegelegt.	CO2-Emissionen 2050: < 200 Mio t/a	CO2-Emissionen 2050: < 50 Mio t/a (< 650 kg/P*a) (< 13 kg/m^2_{EBF}*a)
2°C - Ziel: Bezug: Pro-Kopf-Emissionen 2050 (vgl. [Meinshausen et al. 2009]	Halbierung der globalen CO2-Emissionen 2050 gegenüber dem Stand 1990; Angleichung der Pro-Kopf-Emissionen im Jahr 2050 gemäß dem Modell von Verringerung und Konvergenz mit Bezugsjahr 2050 (C&C 2050).	Pro-Kopf-CO2-Emissionen 2050 < 1,25 t/P*a	CO2-Emissionen 2050: < 312 kg/P*a (< 6,5 kg/m^2_{EBF}*a)
2°C - Ziel: Budgetansatz mit Begrenzung der kumulierten CO2-Emissionen 2000 – 2050 (vgl. [WBGU 2009])	Begrenzung der globalen CO2-Emissionen im Zeitraum 2000 – 2050 auf ein Niveau, bei dem die Wahrscheinlichkeit des 2°C-Ziel zu überschreiten nicht höher als 25% zu liegen kommt auf < 1000 Gt; Verteilung des Budgets auf Nationalstaaten gemäß dem Ansatz „Zukunftsverantwortung“ (vgl. [WBGU 2009], S. 28).	Kumulierte CO2-Emissionen 2010 – 2050: < 9000 Mio t	Kumulierte CO2-Emissionen 2010 - 2050: < 2500 Mio t (durchschnittliche Jahresbudgets 2010 – 2050: 800 kg/P*a bzw. 16 kg kg/m^2_{EBF}*a)

- Das Klimaschutzziel sollte in Bezug auf die Pro-Kopf-Emissionen 2050 gewählt werden. Ein Wert um 1,25 t/P*a kann nach derzeitigen Stand der Wissenschaft als kompatibel mit dem 2°C-Ziel angesehen werden (vgl. Meinshausen et al. 2009).
- Für den Sektor der privaten Haushalte ergibt sich – unter der Annahme eines Anteils von auch künftig 25 % der Gesamtemissionen – für das Jahr 2050 ein CO_2-Grenzwert von 312 kg/P*a und ein nutzflächenbezogener Grenzwert von etwa 6,5 kg/m²a.
- Grundlage ist ein Globalbudget von kleiner gleich 1000 Gt, bei dem die Wahrscheinlichkeit, das 2-Grad-Ziel zu über schreiten, kleiner gleich 25 % beträgt.

Tabelle 2.1
Begründung von Klimaschutzzielen für Deutschland und den Sektor den privaten Haushalte für das Jahr 2050 nach verschiedenen Ansätzen. Die Angaben in der letzten Spalte beruhen auf einer angenommenen Bevölkerung Deutschlands im Jahr 2050 von 75 Mio und einer spezifischen Wohnfläche pro Person von 50 m². Berechnung unter Verwendung der Daten aus: (Energiekonzept 2010), S. 5; (Meinshausen et al. 2009) sowie (WBGU 2009), S. 2 ff. und 27 f.. Quelle und nähere Erläuterungen: (Vallentin 2012, S. 60 ff.).

Klimaschutzstandards: zu unterschreitende Grenzwerte für die Zeitperiode 2010 - 2020					
Bezugsgröße: Energiebezugsfläche (m²)		Neubau	Bestand		
			voll sanierbar	bedingt sanierbar	
				mit Innendämmung	ohne Innendämmung
Heizwärme-Kennwert	kWh/m²a	**15**	**35**	**70**	**100**
Primärenergie-Kennwert (nicht erneuerbar)	kWh/m²a	**100**	**120**	**170**	**220**
Global-Warming-Potential (CO_2-Äquivalent-Emissionen)	kg/m²a	**25**	**30**	**40**	**50**
Bezugsgröße: Person (P)					
Heizwärme-Kennwert	kWh/P*a	**750**	**1750**	**3500**	**5000**
Primärenergie-Kennwert (nicht erneuerbar)	kWh/P*a	**5000**	**6000**	**8500**	**11000**
Global-Warming-Potential (CO_2-Äquivalent-Emissionen)	kg/P*a	**1250**	**1500**	**2000**	**2500**

Tabelle 2.2
Zu unterschreitende Grenzwerte der Klimaschutzstandards in der Zeitperiode 2010 - 2020. Die Kennwerte zur nicht-erneuerbaren Primärenergie und zum Global-Warming-Potential beziehen alle Energiedienstleistungen der privaten Haushalte mit ein (Raumwärme, Lüften, Warmwasser, sämtliche Stromanwendungen).
Oben: Grenzwerte pro Quadratmeter Energiebezugsfläche (= beheizte Wohnfläche);
Unten: Grenzwerte pro Person.
Quelle: (Vallentin, 2011, S. V-20).

Klimaschutzpfade

Im Mittelpunkt der energetischen Betrachtung steht die Frage, wie die Effizienzziele Luxemburgs in Verbindung mit den Klimaschutzielen gelingen kann. Welche Strategien führen zum Erfolg und welche Vorschläge sind trotz vordergründiger Plausibilität kontraproduktiv für den Klimaschutz? Obwohl hier in Luxemburg ein breiter Konsens über die generelle Zielsetzung existiert, ist weit weniger klar, wie hoch der Beitrag zum Klimaschutz in den einzelnen Sektoren oder Handlungsfeldern ausfallen kann und soll. Noch weniger wurde bislang betrachtet, wie die Klimaschutzziele in kleineren räumlichen Einheiten – mit ihren ort- und stadtspezifischen Besonderheiten – konkret gefasst werden können. Es interessiert nicht alleine die Frage, wie ein Klimaschutzziel formuliert werden könnte, sondern auch, wie der Weg dorthin ausgestaltet werden kann. Nur dann kann man im engeren Sinne von Klimaschutzpfaden sprechen.

Klimaschutzstandards

Als Klimaschutzstandards werden energetische Standards im Wohnungsbau definiert, die in Übereinstimmung mit den langfristigen Klimaschutzzielen stehen (vgl. Vallentin 2011, S. V-19 ff.). Es wird eine Unterscheidung in vier verschiedene strategische Gruppen vorgenommen (siehe Tab. 2.2):

- An neu erstellte Gebäude werden die strengsten Anforderungen gestellt, weil im Neubau keine prinzipiellen Einschränkungen hinsichtlich der Umsetzung des energetischen Konzepts geltend gemacht werden können. Sie entsprechen in etwa dem Passivhausstandard.
- Im voll sanierbaren Bestand können i.d.R. alle energetischen Maßnahmen vollumfänglich umgesetzt werden; einige Anschlüsse (z.B. Sockel, Balkone) lassen sich jedoch nur mit unverhältnismäßigem Aufwand auf Neubauniveau verbessern. Daher sind hier die Anforderungen geringer als im Neubau. Die typischen Qualitäten entsprechen denen von Passivhauskomponenten (siehe Tabelle 2.3). Dies ist auch dadurch gerechtfertigt, dass in der Bausubstanz Herstellungsenergie gebunden ist, die für eine weitere Nutzungsperiode zur Verfügung steht.
- Nochmals geringere Anforderungsniveaus werden im bedingt sanierbaren Bestand gesetzt. Abhängig von der Eingriffsempfindlichkeit können hier bestimmte Maßnahmen nicht oder nur in abgewandelter Form ausgeführt werden.
- Zusätzlich unterschieden wird hier zwischen Gebäuden, bei denen sich eine Innendämmung als baukulturell verträglich erweist, und Gebäuden, bei denen auch eine Innendämmung nicht in Frage kommt. In der überwiegenden Zahl der Fälle sind davon Fassaden betroffen. Dies kann aber auch weitere Bauteile, wie z.B. Fenster, Decken- und Dachkonstruktionen umfassen.

2.6 Kostenoptimalitätsstudien zur Bestimmung der energetischen Qualitäten im Effizienz-Szenario

Energetische Vorgaben werden sich nur dann dauerhaft am Markt durchsetzen, wenn sie – zumindest unter Inanspruchnahme von Fördergeldern – wirtschaftlich umsetzbar sind.
Die Annahmen für die mittlere energetische Gebäudequalität im Effizienz-Szenario wurde daher in Anlehnung an die Luxemburgische Kostenoptimalitätsstudie (MdE 2014a) festgelegt.

In dieser Studie wurde nach den Maßgaben der Richtlinie 2010/31 EU (European Commission 2010), ergänzt durch Verordnung 244/2012 (European Commission 2012) untersucht, bei welchen Energieniveaus sich in einem Betrachtungszeitraum von 30 Jahren für Neubau und Sanierung die niedrigsten Globalkosten für Investition, Energie und Wartung ergeben.

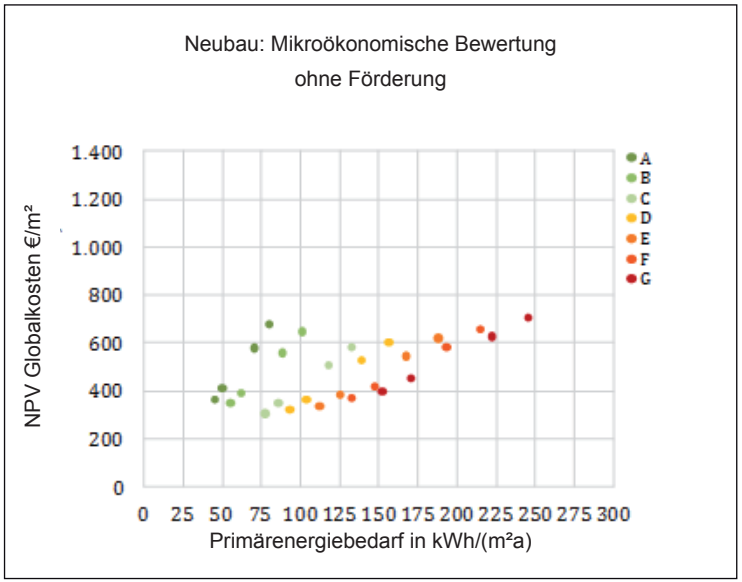
Kostenoptimum im Neubau
Für den Neubau zeigt die Kostenoptimalitätsstudie, dass die niedrigsten Globalkosten ohne Förderungen auftreten, wenn die Gebäudeeffizienz in etwa Klasse C entspricht. Da die Kostenoptima sehr flach ausfallen, liegen die Globalkosten von Gebäuden der Klasse A nur geringfügig über dem Optimum. Unter Berücksichtigung der Förderung (vor 2017) liegt das Kostenoptimum bei Klasse A.

Da im neuen RGD 2016 für den Neubau eine Gebäudequalität eingeführt wurde, die in etwa der Klasse A/A entspricht, wird auf eine weitere Analyse der Kostenoptimalität verzichtet.

Stattdessen werden in Tabelle 2.4, S. 45 die U-Wert-Ensembles der Neubauten, die im Kohortenmodell in den Effizienzszenarien für das Jahr 2020 beschrieben sind mit den U-Werten verglichen, die in der Luxemburgischen Kostenoptimalitätsstudie für die Klasse A verwendet wurden.

Klimaschutzstandards: Anforderungen gemäß Bauteil-/Komponentenverfahren (Teilsanierungen)			
Bauteil / Technikkomponenten	Voll sanierbarer Bestand	Bedingt sanierbarer Bestand	
		mit Innendämmung	ohne
U- Wert Aussenwand	< 0,15 W/m²K	< 0,30 W/m²K*	k.A.
U-Wert Dach / oberste Geschoßdecke	< 0,15 W/m²K	< 0,15 W/m²K	< 0,15 W/m²K
U-Wert Kellerdecke	< 0,30 W/m²K**	< 0,30 W/m²K**	< 0,30 W/m²K**
U-Wert Fenster (eingebaut)	< 0,85 W/m²K	< 0,85 W/m²K	< 0,85 W/m²K
Wärmebereitstellungsgrad der Lüftungsanlage	> 0,75	> 0,75	> 0,75
Heizsystem (Raumwärme / Warmwasserbereitung)	- Gesamtaufwandszahl < 1,15 - Einsatz erneuerbarer Energien - geringer Hilfsstromeinsatz	wie links	wie links
Strombedarf in den Haushalten Endenergiekennwert	< 15 kWh/m²a	< 15 kWh/m²a	< 15 kWh/m

Tabelle 2.3
Anforderungen der Klimaschutzstandards bei schrittweiser energetischer Modernisierung im Bestand gemäß dem Bauteil-/Komponentenverfahren. Hier werden Anforderungen an die einzelnen Bauteile und Technikkomponenten gestellt, die jeweils energetisch verbessert werden sollen. An Baudenkmale werden prinzipiell keine Anforderungen gestellt. Die dort denkmalverträglichen Maßnahmen sollten jedoch ebenfalls in hoher Qualität ausgeführt werden. Dazu sind die in der Spalte “Bedingt sanierbarer Bestand” genannten Werte als Orientierungshilfe geeignet.
Quelle: (Vallentin 2011, S. V-22).



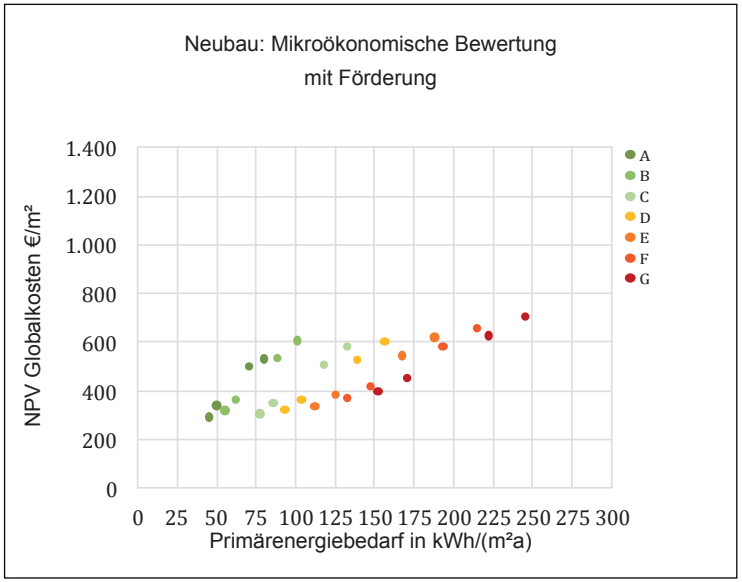


Abbildung 2.9 a, b
Kostenoptima für Wohngebäude
Neubau – ohne und mit Subventionen. Quelle: (MdE 2014 a).

Die U-Werte im Effizienz-Szenario für den Neubau 2020 sind insgesamt etwas höher gewählt als die in der Kostenoptimalitätsstudie Luxemburg verwendeten Werte. Das Anforderungsniveau des Effizienz-Szenarios liegt damit sehr nah am Kostenoptimum.

Kostenoptimum bei der Bestandssanierung
Für die Sanierung zeigt die Luxemburgische Kostenoptimalitätsstudie ebenfalls sehr flach ausgeprägte Kostenoptima. Je nach eingesetztem Energieträger liegt das Optimum ohne Förderung bei den Klassen C oder B, bei Gas bei Klasse D. Unter Anrechnung der Subventionen liegt das Optimum je nach Gebäudetyp bei den Klassen A oder B.

Die Kostenoptimalitätsstudie zeigt, dass der politische Gestaltungsspielraum sehr groß ist: Da die Globalkosten der Effizienzklassen A bis D nur geringfügig voneinander abweichen, können die ambitionierten Klassen A und B schon mit maßvollen Förderanreizen zum wirtschaftlichsten Effizienzniveau werden.

Die U-Werte des Effizienz-Szenarios für die Bestandssanierung für 2020 liegen in etwa bei den Werten, die in der Kostenoptimalitätsstudie für die Klasse C verwendet wurden (siehe Tab. 2.5, S. 45). Das Szenario C liegt damit auf jedem Fall – auch für Gebäude die keine Subventionen erreichen – nahe am Kostenoptimum.

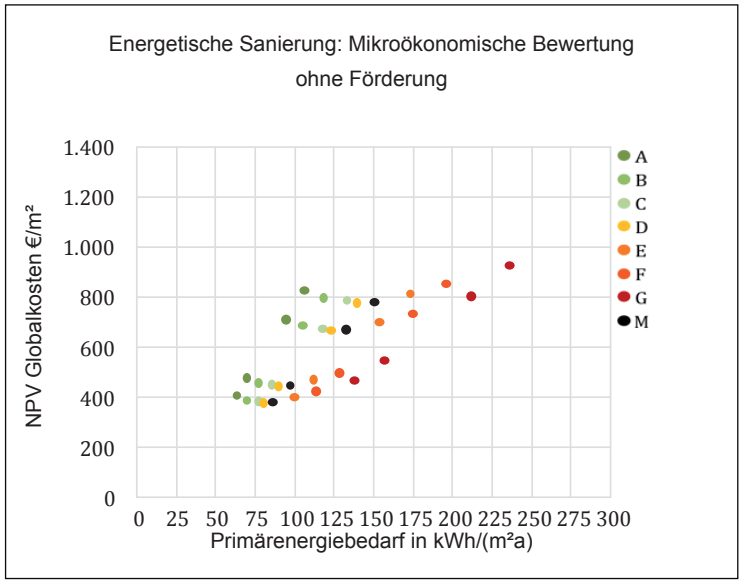
Vergleich mit Kostenoptimalitätsstudien für Vorarlberg (Neubau) und Deutschland (Modernisierung im Bestand)
Für das Vorarlberger Modellvorhaben KliNaWo (EIV 2016) wurden für ein typisches Mehrfamilienhaus in Vorarlberg 60.000 Ausführungsvarianten geplant, ausgeschrieben und Angebotspreise ermittelt. Dabei wurden neben der Bauweise (Massiv-, Misch- und Holzbauweise) unterschiedliche energetische Qualitäten der Hülle und des Lüftungskonzeptes sowie verschiedene Wärmeversorgungsvarianten miteinander kombiniert. Zu-

sätzlich wurden alle Varianten einmal mit und einmal ohne Förderung gerechnet. In Abb. 2.10 sind die Ergebnisse zusammengeführt, indem für jede Variante die Lebenszykluskosten über 50 Jahre dem Primärenergiekennwert (gemäß der österreichischen Norm OIB-RL-6 2011) gegenübergestellt sind. Die obere Punktewolke umfasst alle Fälle ohne Förderung. Die untere Punktewolke stellt die Varianten dar, die die Energiekriterien für gemeinnützigen Wohnungsbau erfüllen und damit die Anforderungen der Vorarlberger Wohnbauförderung (WFB) einhalten. Es ist gut zu erkennen, dass die Kostenoptima sehr flach ausfallen, d.h. das Energieniveau hat einen eher geringen Einfluss auf die Lebenszykluskosten. Das ist darin begründet, dass den kapitalisierten Mehrkosten für höhere Standards in etwa gleich hohe Einsparungen bei den Energiekosten gegenüberstehen. Gleichwohl liegen die optimalen Kombinationen (als rote Punktreihe dargestellt) im Bereich sehr niedriger Primärenergiekennwerte. Der kostenoptimale Primärenergiebedarf liegt bei etwa 58 bis 80 kWh/m^2_{BGF}a und damit weniger als der Hälfte des im Nationalen Plan Österreichs für 2021 vorgesehenen Grenzwerts von 160 kWh/m^2_{BGF}a. Bei den Varianten ohne Förderungen verschiebt sich der kostenoptimale Bereich etwas nach oben und das Optimum ist noch flacher ausgebildet.

Das kostenoptimale Energieniveau im Neubau kann nach den Auswertungen des Projekts KliNaWo wie folgt beschrieben werden:

- Das Kostenoptimum des Heizwärmebedarfs entspricht Gebäuden, die eine Hülle mit Passivhaus-Qualität aufweisen.
- Das Kostenoptimum des Primärenergiebedarfs liegt bei Werten, die ziemlich genau dem neuen Neubaustandard Luxemburgs gemäß RGD 2016 entsprechen.

Analog zur Vorgehensweise im Projekt KliNaWo wurde das Kostenoptimum auch für die Sanierung bestimmt (vgl. Ploss 2017).



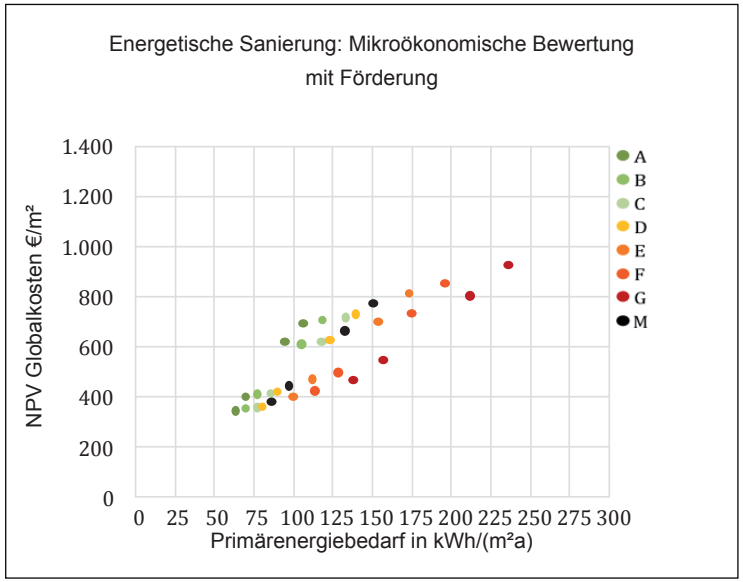


Abbildung 2.10 a, b
Kostenoptima für Wohngebäude Neubau – ohne und mit Subventionen. Quelle: (MdE 2014a)

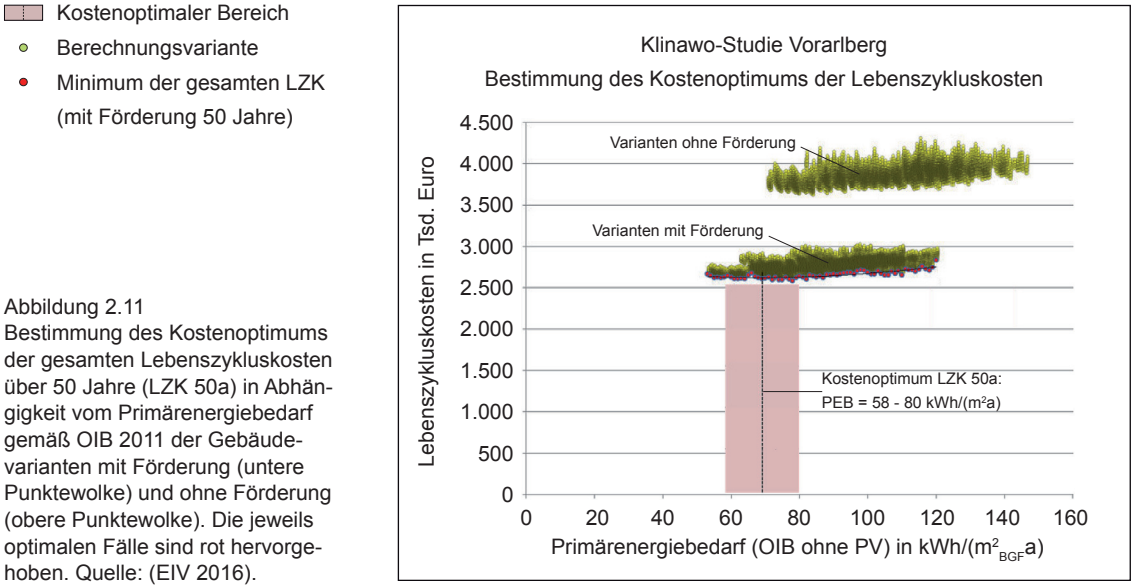


Abbildung 2.11
Bestimmung des Kostenoptimums der gesamten Lebenszykluskosten über 50 Jahre (LZK 50a) in Abhängigkeit vom Primärenergiebedarf gemäß OIB 2011 der Gebäudevarianten mit Förderung (untere Punktewolke) und ohne Förderung (obere Punktewolke). Die jeweils optimalen Fälle sind rot hervorgehoben. Quelle: (EIV 2016).

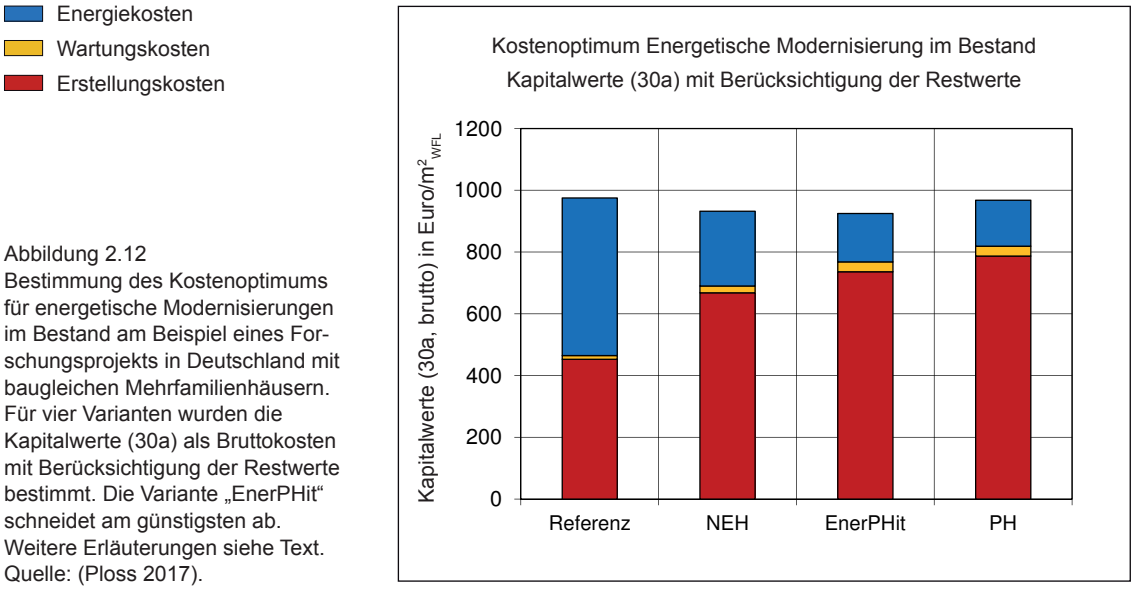


Abbildung 2.12
Bestimmung des Kostenoptimums für energetische Modernisierungen im Bestand am Beispiel eines Forschungsprojekts in Deutschland mit baugleichen Mehrfamilienhäusern. Für vier Varianten wurden die Kapitalwerte (30a) als Bruttokosten mit Berücksichtigung der Restwerte bestimmt. Die Variante „EnerPHit“ schneidet am günstigsten ab. Weitere Erläuterungen siehe Text. Quelle: (Ploss 2017).

Abbildung 2.12 zeigt die Kapitalwerte für Finanzierung, Wartung und Energie für vier Varianten des untersuchten Mehrfamilienhauses:

- Variante „Referenz“ entspricht dem unsanierten Gebäude.
- Variante „NEH“ entspricht einer Sanierung auf das Niveau eines Niedrigenergiehauses.
- Variante „EnerPhit“ entspricht einer Sanierung mit passivhaustypischen U-Werten der Gebäudehülle, jedoch einigen sanierungstypisch verbleibenden Wärmebrücken und einer gegenüber einem Passivhaus etwas schlechteren Luftdichtigkeit.
- Variante „PH“ entspricht einem Gebäude, das trotz der Hemmnisse im Bestand das Passivhausniveau erreicht.

Auch im Fall der energetischen Modernisierung ist das Optimum sehr flach ausgeprägt. Die niedrigsten Lebenszykluskosten treten in der Variante „EnerPHit“ auf. Diese hat passivhaustypische U-Werte zwischen 0,13 W/m²K (Dach) und 0,22 W/m²K (Kellerdecke).

Es handelt sich bei dem Untersuchungsobjekt um ein kompaktes Gebäude mit sehr einfacher Geometrie, das nicht die typischen Luxemburger Fälle repräsentiert. Zudem gelten die Kostenkennwerte der Wirtschaftlichkeitsberechnungen für Deutschland und können somit nicht direkt auf Luxemburg übertragen werden.
Im Effizienz-Szenario wurden die U-Werte daher für 2020 bewusst etwas schlechter festgelegt, damit die mittleren Fälle mit ungünstiger Geometrie und den für Luxemburg bestandstypischen Hemmnissen erfasst werden. Sie liegen zwischen 0,25 W/m²K für das Dach und 0,40 W/m²K für die Kellerdecke (siehe Tabelle 2.5, 3. Zeile). Im Effizienz-Plus-Szenario wurden demgegenüber mit 0,18 W/m²K für das Dach und 0,15 W/m²K für die Kellerecken deutlich niedrigere Werte gewählt, die in etwa den Werten der deutschen Studie entsprechen (siehe Tabelle 2.5, 4. Zeile).

Vergleich der U-Wert-Ensembles - Neubau

	U_{DA}	U_{AW}	U_{KD}	U_{FE} / g-Wert	WB-Zuschlag	n_{50}
	[W/m²K]					[-]
Effizienz-Szenario, Neubau 2020	0,13	0,13	0,19	0,90/0,55	0,00	1,30
Effizienz-Plus-Szenario, Neubau 2020	0,11	0,11	0,18	0,80/0,55	0,00	0,55
KostOpti Lux, Klasse A	0,10	0,12	0,15	0,78	0,01	0,60

Tabelle 2.4
Vergleich der U-Wert Ensembles der Effizienzszenarien für 2020 mit den Werten der Kostenoptimalitäts-studie für Klasse A
Quelle: (MdE 2014a).

Vergleich der U-Wert-Ensembles - Bestandssanierung

	U_{DA}	U_{AW}	U_{KD}	U_{FE} / g-Wert	WB-Zuschlag	n_{50}
	[W/m²K]					[-]
Effizienz-Szenario, Bestand 2020	0,25	0,25	0,40	1,30/0,65	0,00	1,30
Effizienz-Plus-Szenario, Bestand 2020	0,18	0,18	0,35	1,05/0,55	0,00	1,30
KostOpti Lux, Klasse A	0,10	0,12	0,15	0,78	0,01	0,60
Kost Opti Lux, Klasse B	0,13	0,17	0,22	0,92	0,03	1,00
Kost Opti Lux, Klasse C	0,17	0,23	0,28	1,12	0,05	2,00

Tabelle 2.5
Vergleich der U-Wert Ensembles der Effizienzszenarien für die Bestandssanierung 2020 mit den Werten der Kostenoptimalitätsstu-die für die Klassen A, B, C.
Quelle: (MdE 2014a).

3 Ausgangssituation und -zustand

Die Erfassung und Dokumentation von Ausgangssituation und -zustand des Luxemburger Wohngebäudebestandes ist einerseits wesentlicher Bestandteil der Studie und stellt zugleich eine unverzichtbare Vorarbeit für die späteren szenarienbasierten Modellrechnungen dar. Im Mittelpunkt stehen hierbei die städtebaulichen und siedlungsstrukturellen Merkmale sowie die Gebäudegeometrie und die baulich-energetischen Eigenschaften der Gebäude. Weiter ist die Versorgungsstruktur zu erheben. Auf dieser Basis können die Energiekennwerte der Gebäude anhand von Bedarfsberechnungen bestimmt werden. Eine weitere für die Aufgabenstellung zentrale Erhebung betrifft die Klassifizierung der Eingriffsempfindlichkeit der vorhandenen Bausubstanz.

3.1 Strategische Gruppen im Hinblick auf die Bewertung der Eingriffsempfindlichkeit

Eine denkmal- und gestaltverträgliche Durchführung von energetischen Maßnahmen an Gebäuden muss die Empfindlichkeit der Bausubstanz gegenüber den jeweiligen Eingriffen mitberücksichtigen. Beispielsweise existieren ganz offensichtlich Fälle, bei denen ein Außenwärmeschutz nicht in Frage kommt. Aufgabe verantwortungsvoller Hausbesitzer, Architekten und Ausführender kann hier nur sein, sich schützend vor die entsprechenden Bauteile zu stellen und alternative Lösungsansätze zu suchen – bis hin zum Verzicht auf jegliche Energieeffizienzmaßnahmen.

Zur Bestimmung der verträglichen Ausführbarkeit von Energieeffizienzmaßnahmen im Bestand ist es notwendig, jedes Gebäude für sich in Augenschein zu nehmen und sinnvolle Bewertungs- und Abgrenzungskriterien zu entwickeln. Für die Modellbildung des gesamten Wohngebäudeparks Luxemburgs werden auf einer ersten, stark vereinfachenden Stufe drei strategische Gruppen unterschieden:

Denkmalgeschützter Bestand
Energieeffizienzmaßnahmen können nur in Abstimmung mit den Denkmalschutzbehörden ausgeführt werden. Bestandserhalt und Sicherung des ursprünglichen Erscheinungsbildes haben Vorrang. Welche Effizienzmaßnahmen verträglich ausgeführt werden können, ist in jedem Einzelfall genau zu prüfen.

Bedingt sanierbarer Bestand
Diese Fälle umfassen alle Bestandsbauten, bei denen aus baukulturellen Gründen bestimmte Energieverbesserungsmaßnahmen (z.B. Außendämmungen, Fensteraustausch, Einzellüftungsgeräte an der Fassade) nicht ausgeführt werden können. Auch hier kann die Klärung der Verträglichkeit bzw. Ausführbarkeit nur im Einzelfall entschieden werden.

Voll sanierbarer Bestand
Hier lassen sich alle Energieeffizienzmaßnahmen aus baukultureller Sicht vollumfänglich ausführen. Dies erfordert jedoch bei jedem Einzelfall auch in gestalterischer Hinsicht besondere Sensibilität. Energieeffizienz ist keine Entschuldigung für entstellende Eingriffe. Weitere Hemmnisse können Platzmangel oder nachbarrechtliche Belange darstellen.

Neubau ab 2010
Im Neubau liegen im Regelfall keine Einschränkungen hinsichtlich der Durchführbarkeit von Effizienztechnologien oder bei der Integration von Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung oder von erneuerbaren Heizsystemen vor.

3.2 Einteilung des Bestands in Baualtersklassen

Die Bildung einer Gebäudetypologie beruht ganz wesentlich auf der Einteilung des Gebäudebestands in Baualtersklassen (BAK). Aus drei Gründen ist das Baualter ein Schlüsselmerkmal für die energetischen Untersuchungen: Erstens lassen sich so in erster Näherung die energetischen Eigenschaften der Gebäudehülle (z.B. U-Werte von Außenwänden, Dächern, Kellerdecken, Fenstern) bestimmen. Dahinter steht die Beobachtung, dass die Baukonstruktionen von bestimmten Bauepochen in dieser Hinsicht relativ einheitlich sind. Zweitens ist die Kenntnis des Baujahres wichtig, weil dieses den Ausgangspunkt für die Bestimmung der allfälligen Instandsetzungs- und Erneuerungszyklen darstellt. Dies ist für die energetische Untersuchung elementar, weil im Berechnungsmodell die Zeitpunkte für die energetischen Modernisierungsmaßnahmen aus ökonomischen Gründen immer mit ohnehin anstehenden Instandsetzungen und Erneuerungen zusammenfallen.

Dieses „Kopplungsprinzip“ wird im nächsten Unterabschnitt näher begründet und erläutert. Drittens enthalten zeitlich homogene Bestände mit Siedlungscharakter immer auch das Potenzial für weitergehende städtebauliche Maßnahmen in Kombination mit energetischen Modernisierungen, wie Nachverdichtungen – beispielsweise in Form von Dachgeschossausbau, Aufstockungen und Schallschutzbebauungen und sonstigen Ergänzungsbauten – oder eine Umgestaltung des Wohnumfelds. In Luxemburg, das haben unsere Begehungen gezeigt, sind derartige Potenziale an mehreren Stellen erkennbar vorhanden.
Die Einteilung in Baualtersklassen folgt der Klassifizierung in den verfügbaren Statistiken zu Anzahl, Art und Fläche der Gebäudetypen:

- BAK 1 (bis 1919)
- BAK 2 (1920 - 1944)
- BAK 3 (1945 - 1960)
- BAK 4 (1961- 1970)
- BAK 5 (1971 - 1980)
- BAK 6 (1981 - 1990)
- BAK 7 (1991 - 2000)
- BAK 8 (2001 - 2010)

Die ersten gesetzlichen Anforderungen an die thermische Qualität der Gebäudehülle wurden in der WSV 1995 (Wärmeschutzverordnung) verankert. Die ersten gesetzlichen Anforderungen an Hülle und Wärmeversorgungssystem wurden im RGD von 2008 als Umsetzung der EPBD definiert (European Commission 2010). Eine Verschärfung des RGD trat Anfang 2017 in Kraft. Für die Dekaden, in denen diese gesetzlichen Änderungen in Kraft traten, also BAK 7, 8 und 9 wurden gemittelte Werte angenommen (z.B. mittlerer U-Wert vor Einführung WSV und mittlerer U-Wert nach Einführung WSV.

3.3 Bestimmung des energetischen Ausgangszustands der Gebäude

Die realitätsnahe Bestimmung der Ausgangssituation und des Ausgangszustandes ist eine wichtige Grundvoraussetzung für alle zukunftsorientierten energetischen Untersuchungen. Hierbei stellen sich eine Reihe von Fragen, die die aktuelle Diskussion, wie sich die Ziele der Pariser Klimakonferenz im Wohngebäudebestand umsetzen lassen, im Kern betreffen. Dazu zählen:

- Wie hoch ist der Energieverbrauch der Bestandsgebäude?
- Welche Rolle spielen hierbei die Besonderheiten des Einzelfalls?
- Lassen sich systematische Zusammenhänge identifizieren, die es ermöglichen, im Hinblick auf Baualter, Nutzungs- und Gebäudeart sowie Hauptkonstruktionen homogene Gebäude in einer Typologie zusammenzuführen?
- Welche Rechenansätze zur Bestimmung der Heizwärme-, Endenergie- und Primärenergiebilanz sowie zur Bestim-

mung der Treibhausgasemissionen ermöglichen es, die Verbrauchswerte realitätsnah abzubilden?
- Wie lassen sich verlässliche Nutzungsrandbedingungen bestimmen?

Die Beantwortung dieser Fragen ist wichtig, wenn es um die Bewertung von Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz und die Verfolgung der langfristigen Klimaschutzziele im Gebäudebestand geht. Benötigt wird eine verlässliche Basis, um die Wirksamkeit, die Kosten sowie die Wirtschaftlichkeit dieser Maßnahmen zuverlässig abzuschätzen.

Heute übliche Berechnungsverfahren führen in der Praxis häufig zu unrealistisch hohen Bedarfsabschätzungen und damit zu Überschätzungen der Einsparpotenziale (vgl. Schröder et al. 2011). Bildlich gesprochen wird der Gebäudebestand „systematisch schlechtgerechnet“. Auf der Basis von unrichtigen Rechenwerten für Ausgangs- und Sanierungszustand kann keine belastbare Wirtschaftlichkeitsberechnung erfolgen. Ebenso gilt, dass sofern bereits der Ausgangszustand unzutreffend bestimmt ist, auch die künftigen Sanierungsschritte nicht realitätsnah abgebildet werden. Derartig methodisch fragwürdige Rechenansätze sind für die hier vorgesehene Untersuchung nicht geeignet.

Andererseits existieren im deutschsprachigen Raum eine Reihe systematischer Untersuchungen und daraus entwickelter Rechenverfahren, die es ermöglichen die Verbrauchswerte von Neubauten und Bestandgebäuden hinreichend genau zu berechnen. Sie basieren auf Rechenansätze der internationalen Norm ISO 13790. Entscheidend ist ferner, dass die Nutzungs- und Klimarandbedingungen sorgfältig und realitätsnah bestimmt werden. Beispiele hierfür sind das Berechnungsverfahren des Instituts für Wohnen und Umwelt (LEG Energiepass Heizung-Warmwasser) und das Passivhaus-Projektierungs-Paket (PHPP). Entscheidend für ihre Eignung ist, dass die Rechenansätze über Messungen und dynamischen Simulationen validiert wurden. Für die Bestimmung der Bedarfswerte wird in dieser Studie ein einfaches stationäres Jahresbilanzverfahren verwendet, das sich eng an die beiden der o.g. Rechenverfahren anlehnt. Es wird im folgenden Abschnitt genauer vorgestellt.

Teil- und Vollbeheizung
Als nutzungsspezifischer Aspekt spielt im un- und teilsanierten Bestand die räumliche und zeitliche Teilbeheizung der Wohnungen eine große Rolle. Häufig werden von den Bewohnern nur die Küchen, Ess- und Wohnzimmer vollständig beheizt, während bestimmte Zimmer bzw. Raumgruppen nur zeitweise oder gar nicht geheizt werden. Dadurch befindet sich die durchschnittliche Raumtemperatur der gesamten Wohnung deutlich unter der Normtemperatur von 20 °C, die bei Bedarfsberechnungen verwendet wird. Typischerweise liegen diese dann im Bereich zwischen 17 und 19 °C, fallweise sogar noch niedriger. Berücksichtigt man diesen Aspekt nicht bei den Berechnungen, sind die Heizenergie-Verbrauchswerte systematisch niedriger als die Heizenergie-Bedarfswerte.

Zusätzlich finden sich in umfangreicheren Beständen auch immer gewisse Anteile von Leerständen oder temporären Nutzungen (z.B. Ferienwohnungen), die ebenfalls zu geringeren Verbräuchen führen. Der gegenteilige Effekt zeigt sich, sobald diese Bestandbauten wenigstens auf Niedrigenergiestandardniveau modernisiert werden. Dann realisieren die Bewohner, wie auch in heutigen Neubauten, höhere Temperaturniveaus von 20 - 24 °C (typischer Mittelwert: 21°C) indem sie von Teil- auf Vollbeheizung übergehen.

Lüftungsverhalten und Außenluftwechsel
Ein weiterer stark nutzungsabhängiger energetischer Parameter ist der Außenluftwechsel. Dieser setzt sich aus dem Fugen- und dem Fernsterluftwechsel zusammen. Messungen in bewohnten Häusern zeigen neben den starken Unterschieden zwischen einzelnen Nutzern, die in „Viel-, Mittel- und Wenig-

Kennwerte der Gebäudetypen des Bestandes im Ausgangszustand 2010						U-Werte in W/m²K)				g-Wert
Kürzel	BAK	strategischer Typ	Z	WE	EBF [m²]	Dach	Wand	Kellerdecke	Fenster	Fenster
10_EFH_A	bis 1919	Bed_sanierbar	2,0	1,0	168,0	1,80	1,60	1,10	2,60	0,75
11_EFH_B	1920 - 1945	Bestand_bis_2010_EFH	2,0	1,0	156,0	1,40	1,20	0,80	2,30	0,75
12_EFH_C	1946 - 1960	Bestand_bis_2010_EFH	2,0	1,0	156,0	1,20	1,00	1,00	2,30	0,75
13_EFH_D	1961 - 1970	Bestand_bis_2010_EFH	2,0	1,0	160,0	0,80	1,10	1,00	2,00	0,65
14_EFH_E	1971 - 1980	Bestand_bis_2010_EFH	2,0	1,0	168,0	0,60	0,60	0,80	2,00	0,65
15_EFH_F	1981 - 1990	Bestand_bis_2010_EFH	2,0	1,0	180,0	0,50	0,60	0,60	2,00	0,65
16_EFH_G	1991 - 2000	Bestand_bis_2010_EFH	2,0	1,0	187,0	0,40	0,45	0,50	1,80	0,65
17_EFH_H	2001 -2010	Bestand_bis_2010_EFH	2,0	1,0	200,0	0,30	0,35	0,40	1,50	0,65
24_DH_A	bis 1919	Bed_sanierbar	2,0	1,1	166,1	1,80	1,40	1,10	2,60	0,75
25_DH_B	1920 - 1945	Bestand_bis_2010_EFH	2,0	1,1	157,3	1,40	1,20	0,80	2,30	0,75
26_DH_C	1946 - 1960	Bestand_bis_2010_EFH	2,0	1,1	155,1	1,20	1,20	1,00	2,30	0,75
27_DH_D	1961 - 1970	Bestand_bis_2010_EFH	2,0	1,1	158,4	0,80	1,10	1,00	2,00	0,65
28_DH_E	1971 - 1980	Bestand_bis_2010_EFH	2,0	1,0	148,0	0,60	1,00	0,80	2,00	0,65
29_DH_F	1981 - 1990	Bestand_bis_2010_EFH	2,0	1,1	170,5	0,50	0,90	0,60	2,00	0,65
30_DH_G	1991 - 2000	Bestand_bis_2010_EFH	2,0	1,1	176,0	0,40	0,45	0,50	1,80	0,65
31_DH_H	2001 -2010	Bestand_bis_2010_EFH	2,0	1,1	190,3	0,30	0,35	0,40	1,50	0,65
38_RH_A	bis 1919	Bed_sanierbar	2,0	1,1	149,6	1,80	1,60	1,10	2,60	0,75
39_RH_B	1920 - 1945	Bestand_bis_2010_EFH	2,0	1,1	146,3	1,40	1,40	0,80	2,30	0,75
40_RH_C	1946 - 1960	Bestand_bis_2010_EFH	2,0	1,1	146,3	1,20	1,30	1,00	2,30	0,75
41_RH_D	1961 - 1970	Bestand_bis_2010_EFH	2,0	1,1	147,4	0,80	1,10	1,00	2,00	0,65
42_RH_E	1971 - 1980	Bestand_bis_2010_EFH	2,0	1,1	148,5	0,60	0,80	0,80	2,00	0,65
43_RH_F	1981 - 1990	Bestand_bis_2010_EFH	3,0	1,1	155,1	0,50	0,60	0,60	2,00	0,65
44_RH_G	1991 - 2000	Bestand_bis_2010_EFH	3,0	1,1	159,5	0,40	0,50	0,50	1,80	0,65
45_RH_H	2001 -2010	Bestand_bis_2010_EFH	2,0	1,1	169,4	0,30	0,35	0,40	1,50	0,65
52_MFH<10_A	bis 1919	Bed_sanierbar	2,0	3,1	235,6	1,80	1,40	1,10	2,60	0,75
53_MFH<10_B	1920 - 1945	Bestand_bis_2010_MFH	2,0	3,1	238,7	1,40	1,20	0,80	2,30	0,75
54_MFH<10_C	1946 - 1960	Bestand_bis_2010_MFH	2,0	4,0	316,0	0,80	1,00	1,00	2,30	0,75
55_MFH<10_D	1961 - 1970	Bestand_bis_2010_MFH	2,0	4,8	398,4	0,80	1,10	1,00	2,00	0,65
56_MFH<10_E	1971 - 1980	Bestand_bis_2010_MFH	3,0	4,8	403,2	0,60	0,90	0,80	2,00	0,65
57_MFH<10_F	1981 - 1990	Bestand_bis_2010_MFH	3,0	4,8	403,2	0,50	0,60	0,60	2,00	0,65
58_MFH<10_G	1991 - 2000	Bestand_bis_2010_MFH	2,0	4,8	398,4	0,40	0,50	0,50	1,80	0,65
59_MFH<10_H	2001 -2010	Bestand_bis_2010_MFH	2,0	4,9	436,1	0,30	0,35	0,40	1,50	0,65
66_MFH>10_A	bis 1919	Bed_sanierbar	3,0	11,0	847,0	1,80	1,60	1,10	2,60	0,75
67_MFH>10_B	1920 - 1945	Bestand_bis_2010_MFH	4,0	11,0	858,0	1,40	1,20	0,80	2,30	0,75
68_MFH>10_C	1946 - 1960	Bestand_bis_2010_MFH	3,0	11,0	880,0	1,20	1,20	1,00	2,30	0,75
69_MFH>10_D	1961 - 1970	Bestand_bis_2010_MFH	4,0	12,0	996,0	0,80	1,00	1,00	2,00	0,65
70_MFH>10_E	1971 - 1980	Bestand_bis_2010_MFH	4,0	12,0	1020,0	0,60	1,00	0,80	2,00	0,65
71_MFH>10_F	1981 - 1990	Bestand_bis_2010_MFH	5,0	12,0	1008,0	0,50	0,70	0,60	2,00	0,65
72_MFH>10_G	1991 - 2000	Bestand_bis_2010_MFH	5,0	13,0	1079,0	0,40	0,50	0,50	1,80	0,65
73_MFH>10_H	2001 -2010	Bestand_bis_2010_MFH	4,0	12,0	1068,0	0,30	0,35	0,40	1,50	0,65

Tabelle 3.1
Auflistung aller Bestandstypen der Gebäudetypologie mit Angabe der Baualtersklasse, Geschosszahl (Z), der Anzahl der Wohneinheiten (WE), der Energiebezugsfläche (EBF), und den U-Werten der Außenbauteile (Dach, Wand, Kellerdecke, Fenster) sowie dem g-Wert der Fenster. Die Werte beziehen sich auf den Ausgangszustand im Jahr 2010.

lüfter“ (vgl. Reiß/Erhorn/Ohl 2001) eingeteilt werden können, auch eine starke jahreszeitliche Abhängigkeit des Außenluftwechsels. Während im Sommer und in den Übergangszeiten viel gelüftet wird, sinken die Luftwechselraten bei Fensterlüftung im Kernwinter stark ab. Dies führt einerseits häufig zu ungenügender Luftqualität in Wohnungen, Klassenzimmern und anderen Hauptnutzungsräumen. Andererseits liegen dadurch die Lüftungswärmeverluste in Bestandsgebäuden häufig deutlich unter den Bedarfswerten, die unter Zugrundelegung von Standardnutzungskennwerten berechnet wurden und die sich aus guten Gründen an einem hygienisch ausreichenden Luftwechsel orientieren. Diese Frage wird im folgenden Kapitel nochmals aufgegriffen, wenn es um die Bestimmung des Rechenwertes für den energetisch wirksamen Luftwechsel im Kohortenmodell geht.

Letzte umfangreiche Sanierung

In den meisten Fällen stimmen die Zustände der vorgefundenen Gebäude nicht mehr mit dem ursprünglichen Zustand überein. Selbst bei denkmalgeschützten Gebäuden sind in der Vergangenheit bestimmte Instandsetzungs- und Erneuerungsmaßnahmen durchgeführt worden, allerdings nur in wenigen Fällen auch in Kombination mit energetischen Maßnahmen. Von den voll sanierbaren Gebäuden haben bereits einige umfangreichere energetische Sanierungen hinter sich, die jedoch nicht immer eine zukunftsweisende Qualität aufweisen. In den anderen Fällen sind die bislang ausgeführten energetischen Maßnahmen am Gebäude auf Teilschritte beschränkt, die oftmals wenig systematisch ausgeführt worden sind. Typisch hierfür sind beispielsweise:

- Teildämmung bestimmter Fassadenbereiche (z.B. Brandwände).
- Austausch von einzelnen Fenstern und Verglasungen mit unterschiedlichen energetischen Qualitäten.
- Speziell bei Flachdachsanierungen und Dachausbauten wurden regelmäßig Dachdämmungen ausgeführt.

Soweit möglich, wurden die bisher bereits durchgeführten Sanierungen bei der Bestimmung der Ausgangswerte, die in Tabelle 3.1 für jeden Gebäudetyp dokumentiert ist, berücksichtigt. Dies erfolgte über eine Auswertung von Energieausweisen, die Befragung von Experten und Vor-Ort-Begehungen. Jedoch wird hier darauf hingewiesen, dass die genannten Werte gewisse Unsicherheiten beinhalten. Im Laufe des Betrachtungszeitraums, d.h. nach einigen Instandsetzungs- und Erneuerungszyklen im Bestand, spielen diese Fehler eine immer geringere Rolle bei der Bestimmung der Heizwärme-Kennwerte. Sie geraten, bildlich gesprochen, immer mehr „in Vergessenheit“.

3.4 Wärme- und Stromversorgung

Die Struktur der Wärmeversorgung des Wohngebäudeparks wurde anhand der verfügbaren statistischen Daten in Abhängigkeit vom strategischen Gebäudetyp modelliert (siehe Kapitel 4.7). Dabei wurde besonderer Wert auf eine sorgfältige Modellierung des Ausgangszustands gelegt. Das derzeitige System ist durch einen vergleichsweise hohen Anteil von ca. 90% an fossilen Energieträgern geprägt.

Das Stromversorgungssystem wurde in den Szenarien nicht für Luxemburg getrennt, sondern als gemeinsames System mit Deutschland modelliert. Aufgrund des hohen Anteils an Stromimporten (Deutschland, Belgien und Frankreich) erscheint diese Vorgehensweise als gerechtfertigt (nähere Begründung siehe Kapitel 4.7). Für Deutschland existieren darüberhinaus eine Vielzahl von Energie-Langfristszenarien, aus denen sich die künftige Entwicklung der Stromversorgung bestimmen lässt. Hierbei ist von besonderer Bedeutung, dass sich gerade hier aus den sonstigen Vorgaben in jedem Szenario erhebliche Unterschiede zwischen den Szenarien ergeben, die ebenfalls in Kapitel 4.7 genauer beschrieben sind.


Scène Café
Diekirch

4 Szenarien und Modellbildung

Die zentrale Untersuchungsfrage der Studie lautet, wie die energetischen Zielsetzungen Luxemburgs in der kurz-, mittel- und langfristigen Perspektive erreicht werden können und welche Maßnahmen im Sektor der privaten Haushalte zu treffen sind. Hierbei wird nur die Betriebsenergie (Heizen, Lüften, Warmwasser und sämtliche Stromanwendungen in den Wohngebäuden) betrachtet. Eine derartige Fragstellung lässt sich nicht direkt beantworten, sondern erfordert das Durchspielen verschiedener Handlungsstrategien, z.B. mit Hilfe von Modellen und Szenarien. In diesen werden die wesentlichen dynamischen Veränderungen, ausgehend von heute zu beobachtenden Entwicklungen, über verhältnismäßig lange Zeiträume von mehreren Jahrzehnten abgebildet.

Szenarien stellen komplexe „Wenn-Dann"-Aussagen dar. Dabei können unterschiedliche Motivationen oder Zielsetzungen zu Tragen kommen. Zunächst ist es wichtig, Szenarien von Prophezeihungen oder Prognosen zu unterscheiden, die entweder unbedingte Aussagen enthalten oder Vorhersagen mit (behaupteter) hoher Eintrittswahrscheinlichkeit aufstellen. Szenarien hingegen können immer nur bedingte Aussagen treffen, d.h., sie sind an die getroffenen Randbedingungen und Annahmen gebunden und haben nicht den Anspruch, dass die beschriebenen Entwicklungen auch tatsächlich so eintreffen werden. Szenarien haben vielmehr das Ziel aufzuzeigen, welchen Einfluss bestimmte Entscheidungen oder Handlungsoptionen auf die künftige Entwicklung eines Systems oder einer Gesellschaft haben können. Aus methodischen Gründen werden häufig mehrere Szenarien entwickelt. Dabei werden prinzipielle Handlungspfade in Bezug auf gesellschaftliche und politische Entscheidungsoptionen und deren Konsequenzen gegenübergestellt. Je nach Aufgabenstellung, Motivation oder Zielsetzung lassen sich verschiedene Typen von Szenarien unterscheiden (siehe Abb. 4.1):

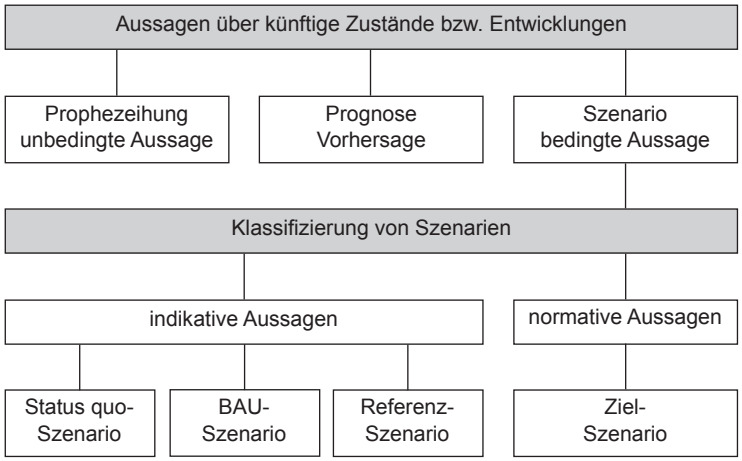


Abbildung 4.1
Abgrenzung zwischen Prophezeihung, Prognose und Szenario. Klassifizierung von Szenarien nach Art und Weise der beabsichtigten Aussagen. Inhalt und Darstellung wurden in Anlehnung an (ewi/prognos 2005 S. 2) leicht abgewandelt.

- In Referenz- bzw. Business-as-usual-(BAU)-Szenarien werden langfristige Entwicklungstrends mit wahrscheinlichen Reaktionen von Wirtschaft, Gesellschaft und Politik auf heute bereits übersehbare künftige Problemstellungen und Herausforderungen verknüpft. Beispielsweise werden energiepolitische Weichenstellungen wie die Förderungen und der bisher erfolgte Ausbau der erneuerbaren Energieversorgungen oder die bisherige Klimaschutzpolitik miteinbezogen.
- Im Gegensatz dazu wird in Zielszenarien versucht das Augenmerk auf normative Aussagen zu richten, d.h., sie orientieren sich an übergeordneten Zielen, die als allgemein wünschenswert gelten und versuchen herauszuarbeiten, unter welchen Randbedingungen und mit welchen Mitteln diese Ziele ereicht werden können.

Kurzbezeichnung Szenario	Raumwärme - Heizung	Warmwasserbereitung	Lüftung	Haushaltsgeräte / Beleuchtung
„BUSINESS - AS - USUAL“	Effizienzverbesserungen (Nutzenergiebedarf, energetische Qualität der Komponenten) orientieren sich an heute absehbaren Tendenzen (Neubau: RGD 2016; Altbau: leichte Verbesserung bei Dämmqualitäten), Technologieentwicklungen bei Geräten und Haustechnik wie in der Vergangenheit zu beobachten; Stromversorgung gemäß Referenzszenario und Trendanalyse (ewi/gws/prognos 2014).			
	Moderate Effizienzsteigerungen bei Altbausanuierung; Umsetzung RGD 2016 im Neubau	Dezentrale Systeme werden nach und nach durch zentrale ersetzt	Ab 2017: Lüftung mit Wärmerückgewinnung wird Standard, im Bestand setzen sich diese nur allmählich durch.	Moderate Effizienzverbesserungen, wie in der Vergangenheit zu beobachten
„EFFIZIENZ“	Die energetischen Qualitäten der Bau- und Technikkomponenten orientieren sich am Kostenoptimum im Neubau (RGD 2016 im Neubau) bzw. dem Kostenoptimum bei energetischen Sanierungen im Bestand (EnerPhit-Standard). Bei Erneuerungen von Technikkomponenten (Haustechnik, Haushaltsgeräte, Beleuchtung) werden Altgeräte durch energieeffiziente Geräte ersetzt. Der Ausstieg aus Ölheizungen wird bis 2060 vollzogen. Die Stromerzeugung erfolgt gemäß dem „Langfristszenario 2011 A“ (Nitsch et al. 2012).			
	Ab 2020: Neubau gleichwertig wie Passivhaus-Standard; Energetische Modernisierungen mit Passivhauskomponenten	Einsatz wassersparender Armaturen; WW-Anschlüsse für Waschmaschinen und Geschirrspüler Hochwertige Dämmung Leitungen	Ab 2020: vermehrt Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung auch bei Modernisierungen im Bestand	Ausstattung und Erneuerung von Geräten/Beleuchtung mit stromeffizienten Geräten (Bestgeräte)
„EFFIZIENZ - PLUS“	Nochmals gesteigerte Energieeffizienz durch heute absehbare technologische Weiterentwicklungen, insbesondere bei Bauteilen (Hüllkonstruktionen Hochleistungsfenster, Vorgefertigte wärmebrückenfreie Anschlusskomponenten) und Technikkomponenten (Wärmepumpensysteme, Pumpen und sonstige Hilfsaggregate, Lüftungsanlagen, Haushaltsgeräte); Stromerzeugung gemäß dem „Szenario 2013“ (Nitsch 2013).			
	Gegenüber Effizienz-Szenario nochmals verbesserte Qualitäten: - Hüllkonstruktionen (Dämmqualitäten, Vakuumdämmung, u.ä.) - Wärmebrückenfreie Anschlüsse - Verbesserte Passivhausfenster - Effizientere Wärmepumpen	Besonders wassersparende Armaturen und Haushaltsgeräte Abwasser-Wärmerückgewinnung (z.B. Duschwasser)	Entwicklung von hochwertigen Lüftungsanlagen mit höherer Stromeffizienz, verbesserter Dichtigkeit und Gerätedämmung. Luftqualitätsgesteuerte Volumenregelung.	Technologische Weiterentwicklungen bei Hauptverbrauchern im Haushalt (Kühlgeräte, Waschmaschinen, Trockner, Geschirrspüler) durch den Einsatz von Steuerelektronik, Wärmepumpen und Vakuumdämmungen

Tabelle 4.1: Kurzübersicht zu den wesentlichen Randbedingungen und Annahmen in den Szenarien. Quelle: abgeändert nach (Vallentin 2011, S. IV-3).

4.1 Beschreibung der Szenarien

Szenarien erzählen eine Geschichte, indem sie versuchen, künftige Entwicklungen zu beschreiben. Das hier betrachtete System ist der Wohngebäudepark Luxemburgs und sein künftig zu erwartender Energiebedarf sowie die dadurch verursachten Treibhausgasemissionen. Geklärt werden soll, mit welchen Maßnahmen, Standards und Strategien die langfristigen Ziele bis 2050 erreicht werden können. Um diese Frage beantworten zu können, wurden vier Hauptszenarien gebildet (siehe Tab. 4.1):

Status-quo-Szenario
Das Status-quo-Szenario hat eine methodische Funktion als Vergleichsmaßstab. Die energetischen Qualitäten des Jahres 2010 werden hier unverändert in die Zukunft fortgeführt, d.h. es wird angenommen, dass danach keine technologischen Veränderungen stattfinden. Im Gegensatz dazu werden die Mengenkomponenten (z.B. Bevölkerung, Wohnflächen) wie in den anderen Szenarien weiterentwickelt. Dadurch wird es möglich, die Effizienzsteigerungen und Dekarbonisierungserfolge der anderen Szenarien zu quantifizieren. Damit dient das Status-quo-Szenario quasi als Eichmaßstab und Referenz für die erreichten Energie- und Emissionsminderungen.

Business-as-usual-Szenario
Das Business-as-usual-Szenario beschreibt eine Strategie des „Weiter wie bisher“. Im Neubau heißt dies die vollumfängliche Umsetzung der RGD 2016, die künftig sehr hohe Effizienzanforderungen zum Standard erhebt. Bei energetischen Modernisierungen werden zunächst nur die in der Vergangenheit üblichen Baukomponenten eingesetzt. Nur zögerlich kommen bessere Qualitäten zum Zuge. Die energetischen Kennwerte der sanierten Bauteile und Lüftungskonzepte entsprechen damit erst auf längere Sicht in etwa Niedrigenergiequalität. Die Wärme- und Stromversorgung im Business-as-usual-Szenario bleibt auch nach 2020/30 wegen der weiterhin hohen Bedarfswerte noch länger auf fossile Energieträger gestützt. Im Hinblick auf die Struktur der Wärmeversorgung werden die beobachteten Trends der letzten Jahre unverändert fortgesetzt. Die Struktur der Stromerzeugung entspricht dem Referenz-Szenario und der Trendanalyse (ewi/gws/prognos 2014) für die Stromerzeugung in Deutschland. Darin sind die aktuell durchgeführten bzw. die bereits beschlossenen Maßnahmen sowie die sich daraus ableitbaren Trends der künftigen Entwicklung im deutschen Kraftwerkspark abgebildet.

Effizienz-Szenario
Im Effizienz-Szenario wird eine andere Zukunft beschrieben, in der die energetischen Maßnahmen auf die langfristigen Effizienz- und Klimaschutzziele Luxemburgs ausgerichtet sind. Im Neubau sind aufgrund der Einführung des hochwertigen Standards der RGD 2016 durch regelmäßige Fortschreibungen nur noch geringere Verbesserungen erzielbar. Hingegen kommen bei Modernisierungen im Bestand und den zugehörigen Versorgungslösungen deutlich bessere Qualitäten als im Business-as-usual-Szenario zum Einsatz, die sich langfristig an denen des Neubaus orientieren. Hier weisen die gebäudebezogenen Komponenten (Außenwände, Fenster, Dächer, Kellerdecken, Lüftungskonzepte, Elektrogeräte) eine hohe Qualität auf, z.B. Passivhauskomponenten, ohne die Kriterien des Passivhausstandards im Einzelnen einhalten zu müssen. Im Altbau erfolgt der Einsatz von Effizienzmaßnahmen (z.B. Aussenwärmeschutz) nur dort, wo dies unter Denkmalschutzaspekten verträglich ist. Wegen des geringeren Wärme- und Strombedarfs der Gebäude kann der Anteil der erneuerbaren Energieträger im Vergleich zum Business-as-usual-Szenario deutlich gesteigert werden. Dies hat mittel- bis langfristig direkte Auswirkungen auf die Struktur der Wärmeversorgung, die einen Ausstieg aus den fossilen Brennstoffen im Zeitraum von 2050 - 2060 in greifbare Nähe rücken. Die Stromerzeugung wurde gemäß dem „Szenario 2011 A“ (Nitsch et al. 2012) modelliert. Dieses orientiert sich an dem Ziel einer Reduktion der Treibhausgasemissionen um 80 % gegenüber 1990. Dafür ist es

notwendig bis 2050 den Anteil erneuerbarer Energien bei der Stromerzeugung auf ca. 85 % ausgehend vom derzeitiger Anteil von ca. 32 % zu steigern.

Effizienz-Plus-Szenario
Dieses explorative Szenario versucht abzuschätzen, wie die Auswirkungen von künftigen, bereits heute absehbaren, technologischen Weiterentwicklungen bei den bau- und haustechnischen Systemen auf die Effizienz- und Klimaschutzstrategien sein könnten. Im Effizienz-Plus-Szenario werden darüberhinaus bei Modernisierungen im Bestand dann Innendämmungen eingesetzt, wenn ein Außenwärmeschutz nicht in Frage kommt. Sie werden immer dann ausgeführt, wenn ohnehin eine Fenstererneuerung ansteht. Zusätzlich kommen ab 2020/30 im Neubau und bei allen energetischen Modernisierungen gegenüber dem Effizienz-Szenario nochmals deutlich verbesserte Technologien bei Fenstern, Dämmsystemen und Lüftungsanlagen zum Einsatz. Zusätzlich werden ab 2020/30 die Gebäude konsequent mit Elektrogeräten mit besonders hoher Stromeffizienz ausgestattet. Es wird erwartet, dass diese höheren Qualitäten bis dahin dem Kostenoptimum entsprechen und von daher auch wirtschaftlich sinnvoll einsetzbar sind. Dahinter steht die Beobachtung, dass die technologischen Entwicklungen im Bereich der Effizienzmaßnahmen und bei den regenerativen Energiesystemen i.d.R. viel schneller und durchgreifender erfolgen, als zunächst vermutet. Dies hat auch Auswirkungen auf die Struktur der Wärmeversorgungen, weil durch den, gegenüber dem Effizienz-Szenario nochmals geringeren Wärmebedarf, auch die Anteile regenerativ gestützter Wärmeversorgungen steigen kann. Im Hinblick auf die Stromerzeugung folgt das Effizienz-Plus-Szenario den Vorgaben des „Szenario 2013“ (Nitsch 2013). Dieses orientiert sich an dem Ziel einer Reduktion der Treibhausgasemissionen um 95 % gegenüber 1990. Dafür ist die Transformation des gegenwärtigen Energiesystems zu einer nahezu vollständig erneuerbaren Energieversorgung notwendig. Das beinhaltet dann auch eine Speicherstruktur in Form des Einstiegs in die Wasserstoffwirtschaft bzw. die Erzeugung relevanter Mengen erneuerbaren Methans in die Gasnetze bzw. bereits vorhandene Gaskavernen.

Genauere Angaben zur Stromerzeugung und der KWK-Produktion in den Szenarien finden sich am Ende des Kapitels in Abschnitt 4.7.

4.2. Bilanzierung in den Szenarien

In der Übersichtsdarstellung Abbildung 4.2 sind die wesentlichen Bilanzgrößen und deren gegenseitigen Abhängigkeiten zusammengestellt:

- Der Heizwärmebedarf Q_H wird anhand der Bilanz der Wärmeströme innerhalb der Bilanzgrenze der Gebäudehülle (in Abb. 4.2 gestrichelt dargestellt) bestimmt. Die Wärmeverluste bestehen aus der Summe der Transmissions- und Lüftungswärmeverluste. Die Wärmegewinne setzen sich aus den passiv-solaren und den internen Wärmegewinnen zusammen. Genauere Angaben zu den einzelnen Berechnungsschritten der in dieser Arbeit verwendeten stationären Bilanzverfahren (LEG Energiepass Heizung und Warmwasser) und (PHPP 2007), die sich an der internationalen Norm ISO 13790 orientieren, finden sich in den entsprechenden Handbüchern und in (Vallentin 2011, S. IV- 6 ff.; VI-46 ff. und VI-60).
- Der Heizenergiebedarf $Q_{E,H}$ setzt sich aus dem Heizwärmebedarf und den Verlusten des Heizungssystem zusammen. Letztere beinhalten die Speicher-, Verteil- und Übergabeverluste sowie die Verluste der Wärmeerzeugung.
- Analog wird der Energiebedarf für Warmwasser $Q_{E,TW}$ aus dem Nutzwärmebedarf für Warmwasser, den Speicher-, und Verteilverlusten sowie den Verlusten der Wärmeerzeugung bestimmt.
- Anders als in den in Luxemburg üblichen Bilanzverfahren (z.B. RGD 2016) werden alle Stromnutzungen in den Gebäuden berücksichtigt. Für die Szenarien ist dies zwin-

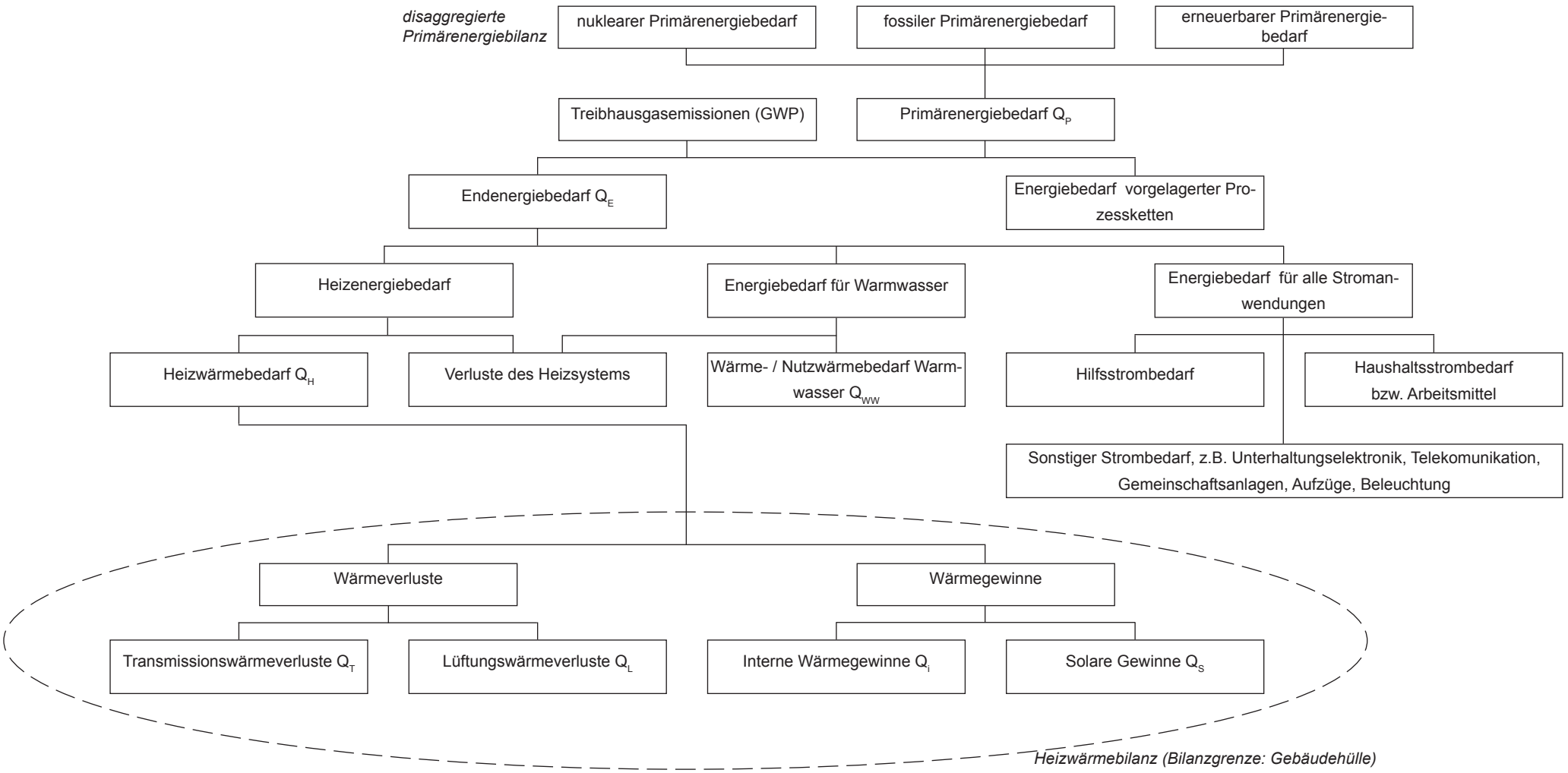


Abbildung 4.2: Systematik der Energiebilanzierung in den Unteruchungen. Bei der Primärenergiebilanz wird nur der nicht erneuerbare Teil (fossil, nuklear) ausgewiesen.
Quelle: (Vallentin 2011, S. IV-5).

gend, weil ansonsten der Energiebedarfs des Sektors der privaten Haushalte nur unvollständig wiedergegeben werden würde. Die Stromanwendungen umfassen den Hilfsstromeinsatz in der Haustechnik (z.B. Ventilatoren, Pumpen, Regelung), den Haushaltsstrombedarf (z.B. Kochen, Waschen, Trocknen, Kühlgeräte) und alle sonstigen Stromanwendungen (z.B. Beleuchtung, Telekommunikation, Unterhaltungselektronik, Aufzüge und sonstige Gemeinschaftsanlagen).

- Aus der Summe von Heizenergie-, Warmwasser- und Strombedarf wird der Endenergiebedarf Q_E berechnet. Diese Größe entspricht genau dem Energieinhalt (z.B. Heizwert) der eingesetzten Energieträger, wie sie sich über Zähler oder die Lieferungen frei Haus ablesen bzw. bestimmen lassen.
- Der Primärenergiebedarf bezieht darüberhinaus alle Vorketten eines Energieträgers mit ein, d.h. es wird zusätzlich der Energieaufwand für Exploration, Förderung, Transport, Umwandlungen und Lieferung frei Haus aufaddiert. Üblicherweise geschieht dies über Primärenergiefaktoren. Hierbei wird abhängig vom eingesetzten Energieträger der Primärenergieaufwand je Endenergieeinheit ausgewiesen.
- Die Treibhausgasemissionen werden ähnlich wie die Primärenergie über endenergiebezogene Emissionsfaktoren bestimmt, die angeben wie groß die CO_2-Äquivalent-Emissionen je Endenergieeinheit sind. Dabei werden neben Kohlendioxid auch die anderen treibhauswirksamen Gase zu einer Wirkungsgröße, dem sog. „Global Warming Potential“ (GWP), zusammengeführt.

Durch die Systematik der Energiebilanzierung sind die Bilanzgrenzen und damit auch der Betrachtungsrahmen der Szenarien festgelegt.

4.3 Kohortenmodell

Die denkbaren Entwicklungen im Luxemburger Wohngebäudepark 2010 - 2070 werden in einem Kohortenmodell dargestellt. Dort durchlebt jeder Repräsentant eines Gebäudetyps einen Lebenszyklus, d.h., es werden in vorgegebenen Zeitabständen Erneuerungs- und Ersatzmaßnahmen durchgeführt. Diese Zyklen sind von der mittleren Nutzungsdauer der entsprechenden Komponenten bzw. Bauteile abhängig (siehe Tab. 4.6, S. 65). Wie schon das Wort „Kohorte“ ausdrückt, wird eine größere Gruppe von repräsentativen Hausgruppen bzw. Gebäuden über den gesamten Betrachtungszeitraum im Hinblick auf die Veränderungen des energetischen Zustands gleichzeitig beobachtet bzw. modellhaft abgebildet. Dieses Modell hat den Vorteil, dass die Gesamtentwicklung über einen großen Zeitraum als Folge vieler individueller Einzelschritte nachvollziehbar bleibt. Damit ist es möglich, gleichzeitig die Trägheit aber auch die Dynamik des Gesamtsystems abzubilden. Das Modell weist ein hohes Maß an Transparenz auf, weil jeder Einzelschritt in seinen Auswirkungen auf das Gesamtsystem abgebildet wird. Dadurch kann vermieden werden, dass im Modell schwierig kontrollierbare, pauschale Annahmen getroffen werden müssen. Damit werden die energetischen Konsequenzen nachvollziehbar, die mit der Wahl verschiedener energetischer Qualitäten bei Sanierungs- bzw. Neubaumaßnahmen verbunden sind.

Gemäß dem Kopplungsprinzip wird davon ausgegangen, dass energetische Verbesserungen im Bestand immer in Kombination mit einer ohnehin anstehenden Maßnahme ausgeführt werden. Sobald beispielsweise der Anstrich oder der Außenputz einer Fassade erneuert wird, kann zusätzlich eine Außendämmung (z.B. in Form eines Wärmedämmverbundsystems) angebracht werden. Dies erhöht die Wirtschaftlichkeit der energetischen Maßnahmen erheblich und entspricht darüber hinaus dem zu beobachtenden Verhalten von Hausbesitzern und Wohnungseigentümern (vgl. Frondel et al. 2006, S. 89).

Das hier verwendete Kohortenmodell besteht aus insgesamt 70 Gebäudetypen. Dabei wurde die Systematik der deutschen Gebäudetypologie, wie sie in (IWU 2003) hergeleitet und dokumentiert ist, als Vorlage verwendet und auch für die künftigen Neubauten weitergeführt:

- Der heute vorhandene Gebäudebestand wird nach Baualter und Wohnform in Klassen eingeteilt.
- Die Abgrenzungen zwischen den Baualtersklassen orientieren sich an historischen Einschnitten, den Zeitpunkten statistischer Erhebungen und der Einführung neuer wärmetechnischer Vorschriften.
- Um verschiedene Gebäudegrößen abzubilden, wird zwischen Einfamilien-, Doppel-, Reihenhäusern sowie verschieden großen Mehrfamilienhäusern differenziert.
- Die Hüllgeometrien der Gebäudegruppen sowie die energetischen Eigenschaften der Bau- und Technikkomponenten wurden anhand von Planunterlagen und Informationen, die bei Vor-Ort-Begehungen erhoben wurden, bestimmt.
- Beim Neubau werden für jede Dekade neue Gebäudetypen modelliert. Damit kann die Einführung neuer Energiestandards und die technologische Weiterentwicklung von Bau- und Haustechnik berücksichtigt werden.

Die Bestimmung des Jahresheizwärmebedarfs im Kohortenmodell erfolgt über vollständige Energiebilanzen gem. (LEG Energiepass Heizung und Warmwasser) bzw. gem. (PHPP). Diese werden im Zeitabstand von 5 Jahren für alle 70 Gebäudetypen aufgestellt. Folgende Parameter fließen in die Berechnungen ein:

- Die Außenabmessungen der Hüllflächen, die das beheizte Volumen umschließen,
- Die U-Werte der opaken Hüllflächen,
- Die Fenster werden orientierungsabhängig mit ihren Flächen, U_W-Werten im eingebauten Zustand und den g-Werten der Verglasung erfasst.
- Für Verschattung, Rahmenanteil, Verschmutzung und nichtsenkrechten Strahlungseinfall wurde ein pauschaler Abminderungsfaktor von 0,49 angesetzt.
- Die energetische Güte des Lüftungskonzeptes (inklusive Einfluss der Luftdichtigkeit) wird über den resultierenden energetisch wirksamen Luftwechsel $n_{L,eff}$ abgebildet.

Außenluftwechsel bei Fensterlüftung

In Bestandsgebäuden erfolgt der Luftwechsel über Infiltration durch Leckagen in der Gebäudehülle und durch die Fensterlüftung der Bewohner. Hierbei stellt der Fensterluftwechsel eine stark nutzerabhängige Größe dar. Messungen in bewohnten Häusern zeigen, dass der Luftwechsel eine starke jahreszeitliche Abhängigkeit hat und speziell im Kernwinter sehr geringe Werte annehmen kann. Die Fensteröffnungszeiten sinken dann auf Werte zwischen 0,03 - 0,2 h^{-1} ab (Reiß/ Erhorn/ Ohl 2001). Die gemessenen Mittelwerte für Außenluftwechsel während der Heizperiode in sanierten Bestandsgebäuden liegen bei Fensterlüftung durch die Bewohner zwischen 0,18 und 0,33 h^{-1}. Wurden bei der energetischen Modernisierung Lüftungsanlagen eingebaut, lagen die Luftwechselraten hingegen bei 0,48 h^{-1}. In allen Fällen wurden die Gebäude luftdicht ausgebildet. Der geringe Außenluftwechsel bei Fensterlüftung weist auf eine schlechte Innenluftqualität hin (Kah et al. 2005).

Der gewünschte Luftwechsel über Fenster, Abluftanlage oder Komfortlüftung mit Wärmerückgewinnung wurde in allen Szenarien am hygienischen Bedarf orientiert mit 0,3h^{-1} angenommen.

Der zusätzliche Luftwechsel durch Infiltration wurde durch einen nach Gebäudetyp und Baujahr differenzierten Zuschlag berücksichtigt, so dass sich für Gebäude ohne Wärmerückgewinnung Gesamt-Luftwechselraten zwischen 0,32 und 0,39 h^{-1} ergeben.

Für Gebäude mit Wärmerückgewinnung ergeben sich niedrigere Werte des effektiven energetisch wirksamen luftwechselns n_L. Die Annahmen für die verschiedenen Szenarien sind in den Tabellen 4.4, 4.5 und 4.6 beschrieben.

Die angegebenen Werte bezeichnen Mittelwerte der jeweili-

gen strategischen Typen, hängen also neben der gewünschten Luftwechselrate von 0,3h^{-1} und dem nach Gebäudetyp und Baualter differenzierten zusätzlichen Infiltrationsverlust auch vom Anteil der Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung im jeweiligen strategischen Gebäudetyp ab.

Nutzungs- und Klimaparameter

In der Heizwärmebilanz tauchen weitere Parameter auf, die die Nutzungsbedingungen widerspiegeln. Dazu zählen die Höhe der spezifischen internen Gewinne q_i, die Gradtagszahl G_t, die Anzahl der Heiztage, die Heizgrenztemperatur und der Reduktionsfaktor für Nachtabsenkung r_{NA}. Diese Kenngrößen sind teilweise abhängig vom energetischen Standard der Gebäude. Zur Bestimmung der exakten Werte für die Berechnungen im Kohortenmodell wurde daher für die Wohnbauten eine Klassifizierung nach der energetischen Qualität vorgenommen (siehe Tab. 4.2).

Die spezifischen internen Gewinne wurden generell niedriger als in den Rechenverfahren des Luxemburger Energiepasses angesetzt. Die heute gültigen Werte können zudem künftig durch geringere Belegungen und die Ausstattung der Gebäude mit stromeffizienten Geräten noch weiter abnehmen. Eine Nachtabsenkung hat vor allem in schlecht oder gering gedämmten Gebäuden eine verbrauchsmindernde Wirkung. Der entsprechende Reduktionsfaktor steigt mit Verbesserung der Standards immer mehr gegen 1,0 an.

Im Kohortenmodell wird durch spezielle Rechenansätze, die im Folgenden näher erläutet werden, berücksichtigt, dass im unsanierten Bestand die mittleren Raumtemperaturen aufgrund von Teilbeheizung (z.B. der Schlafräume) niedriger liegen. Der Einfluss der Teilbeheizung auf die Klimarandbedingungen ist durchaus komplex und nicht bis ins Einzelne erforscht. Denn dadurch ändern sich sowohl die mittlere Innentemperatur, die Heizgrenztemperatur, damit auch die Länge der Heizperiode und somit auch das solare Strahlungsangebot. Probeläufe zeigen jedoch, dass selbst mit Anwendung von Korrekturfaktoren die berechneten Bedarfswerte im Bestand deutlich höher liegen können als die gemessenen Verbrauchswerte. Neben der Teilbeheizung der Wohnungen sind offensichtlich weitere verbrauchsmindernde Effekte, z.B. aufgrund vorhandener Möbel an den Außenwänden, Dämmtapeten und geringeren Wärmebrücken bei Holzdeckenanschlüssen u.a. vorhanden; über einen Vergleich von berechneten Bedarfswerten mit gemessenen Verbrauchswerten wurde daher in (IWU 2003a, S. 2) ein empirischer „Nutzungsfaktor“ hergeleitet. Dieser berücksichtigt andererseits bei Niedrigenergie- und Passivhäusern deren Vollbeheizung und die dort regelmäßig vorhandenen höheren mittleren Raumtemperaturen im Winter von 21 - 22 °C.

Diese Randbedingungen führen in der Tendenz zu höheren Bedarfswerten als die klassische Berechnung ohne Nutzungsfaktor. Der Nutzungsfaktor variiert zwischen Werten von 0,85 (unsanierte Altbauten) und 1,1 (Passivhäuser) und wird im Kohortenmodell bei der Berechnung der Heizwärmebilanzen berücksichtigt.

Energetischer Standard	Luftwechsel mit/ohne LA* in h^{-1}	Spez. interne Gewinne in W/m²	Gradtagszahl in kKh/a	Heizgrenztemperatur in °C	Reduktonsfaktor Nachtabsenkung
Wohngebäude:					
Unsanierter Bestand	ca. 0,39	2,5 / 3,2***	63 - 70	15	0,92
Teilsanierter Bestand	ca. 0,38	2,5 / 3,2***	65 - 70	12 - 14	0,92
Bestand ab 1980	ca. 0,37	2,5 / 3,2***	65 - 75	12 - 14	0,95
Niedrigenergie(-sanierung)	ca. 0,35 / 0,35**	1,8 / 2,3***	75 - 80	11 - 13	0,98
Passivhaus(-sanierung)	ca. 0,07 - 0,13*	1,1 / 1,5***	80 - 83	10	1,00

Tabelle 4.2
Zusammenstellung der gewählten Kennwerte zu den Nutzungs- und Klimarandbedingungen bei der Berechnung der Heizwärmebilanz im Kohortenmodell. Quellen: Eigene Berechnungen unter Verwendung der Daten in (IWU 2012) und (Vallentin 2011, S. IV-17).

* Werte für Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung
** Werte für Abluftanlagen
*** Werte für Einfamilienhäuser/ Mehrfamilienhäuser, siehe auch exakte Werte in Abbildung 4.4.

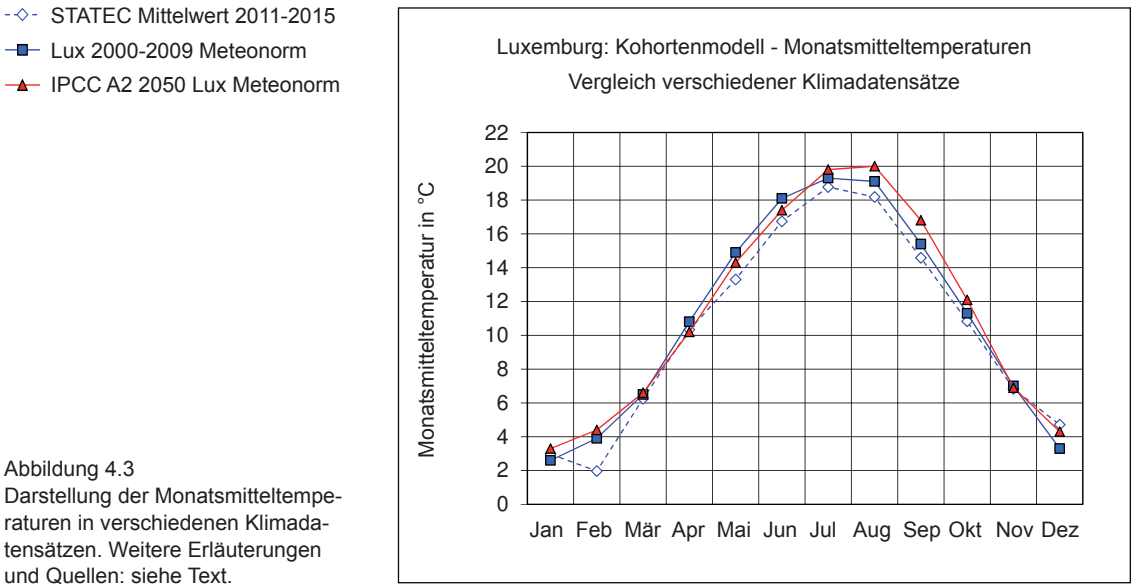


Abbildung 4.3
Darstellung der Monatsmitteltemperaturen in verschiedenen Klimadatensätzen. Weitere Erläuterungen und Quellen: siehe Text.

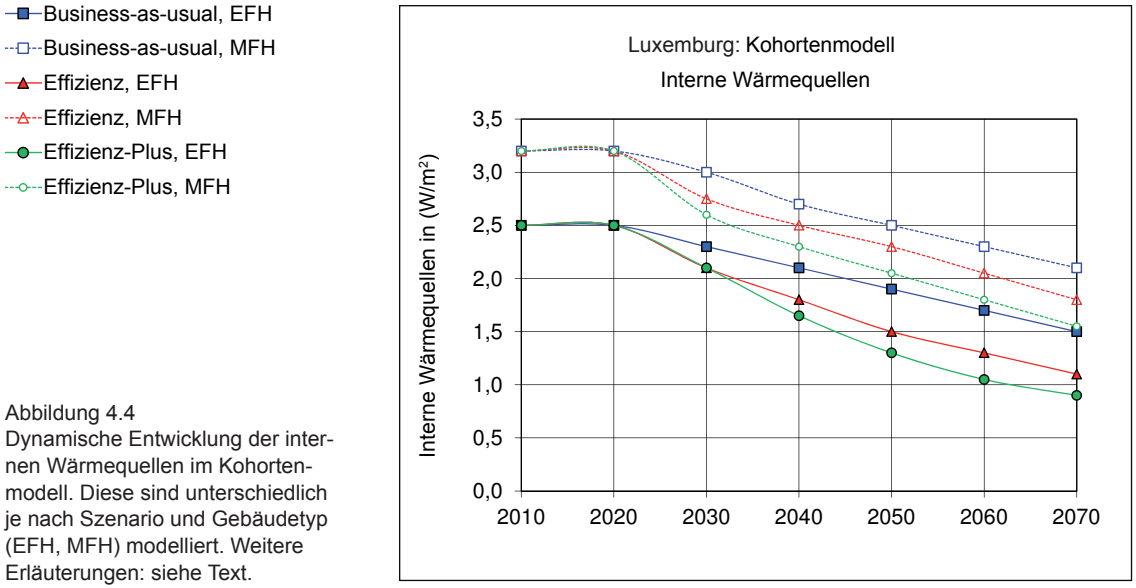


Abbildung 4.4
Dynamische Entwicklung der internen Wärmequellen im Kohortenmodell. Diese sind unterschiedlich je nach Szenario und Gebäudetyp (EFH, MFH) modelliert. Weitere Erläuterungen: siehe Text.

Er ist wie folgt definiert:

$f_{Nutzung} = 0{,}5 + 2 / (3 + 0{,}6\ h)$

Dabei ist h der temperatur- und nutzflächenbezogene Wärmeverlust, mit:

$h = (H_T + H_V)/A_{EB}$ (in W/m²K)

mit:
H_T: temperaturbezogener Transmissionswärmeverlust (in W/K)
H_V: temperaturbezogener Lüftungswärmeverlust (in W/K)
A_{EB}: Energiebezugsfläche = beheizte Wohnfläche (in m²)

Mit dem Nutzungsfaktor können die unterschiedlichen Komfortniveaus, die sich abhängig vom Dämmstandard in den Wohngebäuden realisieren lassen, berücksichtigt werden. Bei energetischen Modernisierungen wird demnach zunächst ein Teil der Effizienzauswirkungen durch verbesserten Komfort kompensiert. Dieser sog. „Reboundeffekt“ lässt sich anhand der Verbrauchswerte im Vergleich zwischen un- und vollsanierten Gebäuden nachweisen. Andere Studien zu Verbrauchswerten großer Wohngebäudebestände kommen zu ähnlichen Ergebnissen (vgl. Schröder et al. 2012).

In den Berechnungen zum Heizwärmebedarf wurde zudem eine Anpassung an den zu erwartenden Klimawandel vorgenommen. Dieser fällt vermutlich regional unterschiedlich aus. In den bisherigen Klimabeobachtungen und bei den Auswertungen von Klimamodellen war ein Trend erkennbar, dass die langfristig zu erwartenden Temperaturerhöhungen im Alpenraum größer ausfallen als im europäischen Flachland. Im Kohortenmodell wurde eine Anpassung gemäß einem Testreferenzjahr vorgenommen, dass sich am IPCC-Szenario A2 für den Standort Luxemburg-Stadt für das Jahr 2050 orientiert. Hierbei ist ein spürbarer Einfluss auf die Monatsmitteltemperaturen zu erkennen. Die Berücksichtigung des zu erwartenden

Klimawandels im Kohortenmodell erfolgt über einen Anpassungsfaktor für die Heizgradstunden, der einen linearen Verlauf zwischen den Jahren 2010 und 2050 aufweist.

Für die Bestimmung der internen Wärmequellen wurde ein differenziertes Modell entwickelt, in dem einerseits die Abhängigkeit vom Strombedarf als auch von der typischen Belegung in den Wohngebäuden berücksichtigt wird. Weil die Stromeffizienz vor allem von den Randbedingungen in den Szenarien abhängen und die Belegung vor allem vom Gebäudetyp ergeben sich insgesamt sechs Verläufe für die internen Wärmequellen (siehe Abb. 4.4). Vor allem in den Effizienzszenarien sinken diese Werte deutlich ab (bis hinunter zu Werten zwischen 0,9 - 1,8 W/m^2. Dies deckt sich mit Erfahrungen der Autoren in Passivhäusern, in denen bei sehr effizienter Stromausstattung und geringer Belegung die Verbrauchswerte für Raumwärme spürbar höher liegen, als in baugleichen Passivhäusern mit üblicher Stromeffizienz und normaler Belegung.

In Tabelle 4.3 finden sich knappe Angaben zum solaren Strahlungsangebot auf verglaste Flächen. Als Standort hierfür wurde, wie auch für die Monatsmitteltemperturen, Luxemburg-Stadt gewählt.

Ein zwar nur in geringem Ausmaß klimaabhängiger Faktor ist der Reduktionsfaktor von normal beheizten Wohnräumen zum Erdreich bzw. zu unbeheizten Kellern. Dieser wurde pauschal mit 0,5 gewählt. Hier spielt künftig u.U. eine Rolle, dass Kellerräume zunehmend in die thermische Hülle integriert werden. Dies führt einerseits zu eine spürbaren Vergrößerung der Energiebezugsfläche (man könnte diese Räume, wie im (PHPP) vorgeschlagen mit einem Faktor von 0,6 anrechnen) und andererseits zu geringeren Wärmeverlusten der erdgeschossigen Wohnräume zu den Kellerbereichen. Dieser Punkt wurde jedoch im Kohortenmodell nicht weiter verfolgt, weil er sowohl im Ausgangszustand als auch im künftigen Verlauf nur schwer abschätzbar ist.

4.4 Szenarioabhängige Annahmen zu den energetischen Qualitäten der Baukomponenten im Kohortenmodell.

Die energetischen Qualitäten der baulichen und technischen Komponenten stellen wichtige Parameter der Energiebilanz zur Bestimmung des Heizwärmebedarfs dar.

Während die energetisch-technischen Qualitäten der Komponenten aller Bestandsgebäude im Jahr 2010 (Ausgangszustand), abhängig vom Baualter, Gebäudetyp und sonstigen Eigenschaften variieren (siehe Tab. 3.1, S. 49), werden für die anstehenden Sanierungsmaßnahmen und künftigen Neubauten in den Szenarien festgelegte Standards bzw. Qualitäten vorgegeben. Aus Gründen der Übersichtlichkeit gelten diese für alle gleichartigen Fälle. Im Betrachtungszeitraum werden die Anforderungen an die energetischen Qualitäten nach und nach erhöht, so dass sich ein dynamischer Verlauf der Anforderungsniveaus bei den energetischen Qualitäten in den nächsten Dekaden ergibt. Für die Hüllflächen (Außenwände, Dächer, Decken bzw. Bodenplatten zum Keller oder Erdreich) werden pauschale mittlere U-Werte in Ansatz gebracht, die bereits alle Anschlussdetails und Wärmebrücken mitenthalten. Daher sind die genannten U-Werte nicht mit denen des ungestörten Bauteils gleichzusetzen. Bei den Fenstern wird der gesamte U_W-Wert des Fensters im eingebauten Zustand eingesetzt sowie der g-Wert der Verglasungen.

Bei Sanierungen wird zwischen den ohne Einschränkungen sanierbaren und den bedingt sanierbaren Altbauten sowie Baudenkmalen unterschieden. Die möglichen Dämmqualitäten sind für den bedingt sanierbaren Bestand deutlich geringer angesetzt als für den voll sanierbaren (siehe Werte in Klammern in den oberen Tabellenteilen der Tabellen 4.4, 4.5 und 4.6). Das trifft insbesondere auf die Außenwände zu, die bei diesen Wohnbauten aus denkmalpflegerischen oder gestalterischen Gründen, falls überhaupt, nur mit Innendämmungen versehen

Solarstrahlung auf Fensterflächen (Standort: Luxemburg-Stadt)	
Süd:	336 kWh/(m^{2}a)
Ost/West:	188 kWh/(m^{2}a)
Nord:	87 kWh/(m^{2}a)
Horizontal:	285 kWh/(m^{2}a)

Tabelle 4.3
Angebot an Solarstrahlung auf Fensterflächen während der Heizperiode für den Standort Luxemburg-Stadt. Quelle: (PHPP-V9).

Business-as-usual-Szenario: energetische Qualitäten Sanierungsmaßnahmen im Bestand (Werte in Klammern: bedingt sanierbarer Bestand)					
Komponente / Jahr	2010 - 2019	2020 - 2029	2030 - 2039	2040 - 2049	ab 2050
Außenwände (U-Wert)	0,57 (-)	0,52 (-)	0,47 (-)	0,43 (-)	0,40 (-)
Dach (U-Wert)	0,45 (0,57)	0,36 (0,53)	0,31 (0,51)	0,20 (0,49)	0,25 (0,45)
Kellerdecke (U-Wert)	0,57 (0,67)	0,53 (0,63)	0,51 (0,61)	0,49 (0,59)	0,45 (0,55)
Fenster (U-Wert)	1,55 (1,95)	1,45 (1,85)	1,35 (1,75)	1,27 (1,65)	1,20 (1,55)
Fenster (g-Wert)	0,65 (0,66)	0,65 (0,60)	0,65 (0,57)	0,63 (0,55)	0,60 (0,50)
Lüftung (n_L - Wert)	0,39 (0,39)	0,37 (0,39)	0,36 (0,39)	0,35 (0,39)	0,33 (0,39)
Business-as-usual-Szenario: energetische Qualitäten Neubauten (Werte in Klammern: Mehrfamilienhäuser > 2 WE)					
Komponente / Jahr	2010 - 2019	2020 - 2029	2030 - 2039	2040 - 2049	ab 2050
Außenwände (U-Wert)	0,19 (0,19)	0,16 (0,16)	0,16 (0,16)	0,15 (0,15)	0,145 (0,145)
Dach (U-Wert)	0,155 (0,155)	0,14 (0,14)	0,135 (0,135)	0,13 (0,13)	0,12 (0,12)
Kellerdecke (U-Wert)	0,24 (0,24)	0,20 (0,20)	0,20 (0,20)	0,19 (0,19)	0,18 (0,18)
Fenster (U_W-Wert)	1,0 (1,0)	0,93 (0,93)	0,93 (0,93)	0,91 (0,91)	0,85 (0,85)
Fenster (g-Wert)	0,57 (0,57)	0,57 (0,57)	0,55 (0,55)	0,55 (0,55)	0,52 (0,52)
Lüftung (n_L - Wert)	0,21* (0,21*)	0,19 (0,19)	0,17 (0,17)	0,17 (0,17)	0,16 (0,16)

* Der angegebene Wert entspricht einem Mittelwert für die Periode 2010-2019 für die Gebäude mit und ohne WRG.

Tabelle 4.4
Angaben zur energetischen Qualität der baulich-technischen Komponenten der Wohngebäude im Business-as-usual-Szenario. Im oberen Teil der Tabelle sind die Kennwerte für die Sanierungsmaßnahmen im Bestand zusammengestellt. Hierbei ist zu beachten, dass diese jeweils nur für anstehende Erneuerungsmaßnahmen gelten. Gemäß dem Kopplungsprinzip bleibt die energetische Qualität von baulich-technischen Komponenten im Modell solange unverändert erhalten, bis nach Ablauf der Nutzungsdauer eine Erneuerung ansteht. Erst dann kann eine bessere Qualität zum Zuge kommen. Im unteren Teil der Tabelle sind die Kennwerte für künftige Neubauten genannt.

Die Angaben zu den U-Werten von Aussenwänden, Dächern, Kellerdecken erfolgen in W/m²K. Die Angabe des U-Wertes der Fenster bezieht sich auf den Gesamt-U_W-Wert des Fensters in W/m²K im eingebauten Zustand. Die energetische Güte des Lüftungskonzeptes wird über den Kennwert des effektiven energetisch wirksamen Luftwechsels n_L in 1/h charakterisiert.

werden können. Diese kommen ohnehin nur im Effizienz-Plus-Szenario zum Einsatz. Auch für die anderen Bauteile wurden geringere energetische Qualitäten angenommen, um die vorhersehbaren Restriktionen und bautechnischen Schwierigkeiten der energetischen Sanierung unter denkmalpflegerischen Auflagen abzubilden. Diese betreffen beispielsweise die Fenster und die Lüftungskonzepte.

Im Business-as-usual-Szenario (siehe Tabelle 4.4) orientieren sich die energetischen Qualitäten für Bau- und Technikkomponenten an den heute bereits erkennbaren Entwicklungen und Trends.

Im Effizienz-Szenario (siehe Tabelle 4.5) werden hingegen ab 2020 konsequent effizientere Komponenten und Baustandards zugrundegelegt. Im Neubau ist dies bereits durch die Einführung des gesetztlichen Standards (RGD 2016) vollzogen. Im Bestand ist jedoch die derzeitige mittlere Modernisierungspraxis von diesen energetischen Qualitäten weit entfernt. Daher ist hier auch im Effizienz-Szenario eine längere Übergangsphase vorgesehen. Das gilt speziell für die Lüftungskonzepte, bei denen hier noch längere Zeit auch Abluftanlagen möglich sind. Die energetischen Sanierungen werden im Bereich der Hülle ab ca. 2020/30 mit Passivhauskomponenten durchgeführt. Auch die energetische Qualität der Passivhauskomponenten wird am Ende des Betrachtungszeitraums durch technologische Entwicklungen gegenüber heute weiter verbessert sein, was sich dann auch für den Neubau positiv auswirkt.

Im Effizienz-Plus-Szenario kommen ab 2020/30 technologische Weiterentwicklungen zum Einsatz, die sich heute noch im Erprobungsstadium befinden oder wenigstens theoretisch untersucht sind (siehe Tab. 4.6):

- Im Vergleich zum Effizienz-Szenario kommen bessere Dämmqualitäten bei allen Außenbauteilen zum Einsatz. Dabei wird davon ausgegangen, dass sowohl bei den konventionellen Dämmstoffen technologische Weiterentwick-

lungen stattfinden als auch für spezielle Anwendungen verstärkt neue Dämmmaterialien (z.B. Vakuumdämm-Paneele) zur Verfügung stehen. Sollten die Energiepreise künftig wieder steigen, könnten diese Komponenten ab ca. 2020/30 durchaus wirtschaftlich interessant werden.

- Bei der konstruktiven Bewältigung typischer Wärmebrücken kommen verstärkt kostengünstige Standardprodukte zum Einsatz, die z.B. statisch hochfeste Verbindungen mit einem sehr guten Wärmeschutz kombinieren.
- Die Fenster stellen auch im Passivhaus weiterhin die thermisch schwächsten Bauteile mit den größten flächenbezogenen Wärmeverlusten dar. Technologische Weiterentwicklungen (Rahmen, Rahmenbreite, Verglasungen, Glasrandverbund) sind von besonderer strategischer Bedeutung für die Weiterentwicklung des Passivhauskonzeptes. Diese Entwicklungen sind bereits in vollem Gange.
  Eine spezielle Rolle spielen hierbei die geometrische und thermische Optimierung des Fensterrahmens und seiner Einbausituation sowie leichte und evtl. künftig kostengünstige Vakuumverglasungen. Somit erscheinen ab 2030 Fenster-U-Gesamt-Werte im eingebauten Zustand von 0,5 W/m²K durchaus erreichbar zu sein. Die heute verfügbaren marktbesten Fenster erreichen bereits Werte um 0,60 – 0,65 W/m²K. Die Entwicklungen bei Fenstern und Verglasungen sind darüberhinaus von größter Bedeutung für ihren Einsatz im Denkmalbestand, weil hier besonders hohe Anforderungen an Gewicht, Integrationsfähigkeit in alte Fensterkonstruktionen bzw. die Rekonstruktion alter Rahmenprofile gestellt werden.
- Auch bei Lüftungsanlagen sind weitere energetische Optimierungen absehbar, die zunächst vor allem die Elektroeffizienz der Lüftungsgeräte betreffen. Diese Verbesserungen werden bei der Berechnung des Hilfsstromeinsatzes berücksichtigt. In die Berechnung des Jahresheizwärmebedarfs fließt als Einflussgröße der energetisch wirksame Luftwechsel ein. Dieser wird durch den mittleren Anlagenluftwechsel, den Wärmebereitstellungsgrad der Wärme-

Effizienz-Szenario: energetische Qualitäten Sanierungsmaßnahmen im Bestand
(Werte in Klammern: bedingt sanierbarer Bestand)

Komponente / Jahr	2010 - 2019	2020 - 2029	2030 - 2039	2040 - 2049	ab 2050
Außenwände (U-Wert)	0,45 (0,97)	0,22 (0,90)	0,19 (0,80)	0,18 (0,70)	0,16 (0,60)
Dach (U-Wert)	0,37 (0,57)	0,22 (0,52)	0,19 (0,47)	0,17 (0,42)	0,16 (0,35)
Kellerdecke (U-Wert)	0,50 (0,625)	0,37 (0,52)	0,32 (0,47)	0,27 (0,42)	0,22 (0,35)
Fenster (U-Wert)	1,45 (1,75)	1,25 (1,45)	1,15 (1,35)	1,05 (1,25)	0,95 (1,10)
Fenster (g-Wert)	0,65 (0,68)	0,65 (0,62)	0,62 (0,57)	0,57 (0,55)	0,55 (0,51)
Lüftung (n_L - Wert)	0,39 (0,39)	0,37 (0,39)	0,34 (0,38)	0,32 (0,38)	0,30 (0,37)

Effizienz-Szenario: energetische Qualitäten Neubauten
(Werte in Klammern: Mehrfamilienhäuser > 2 WE)

Komponente / Jahr	2010 - 2019	2020 - 2029	2030 - 2039	2040 - 2049	ab 2050
Außenwände (U-Wert)	0,17 (0,18)	0,13 (0,14)	0,12 (0,13)	0,11 (0,12)	0,095 (0,11)
Dach (U-Wert)	0,15 (0,15)	0,13 (0,13)	0,12 (0,12)	0,11 (0,11)	0,095 (0,095)
Kellerdecke (U-Wert)	0,23 (0,23)	0,19 (0,19)	0,18 (0,18)	0,18 (0,18)	0,17 (0,17)
Fenster (U-Wert)	0,99 (1,04)	0,88 (0,93)	0,83 (0,83)	0,78 (0,78)	0,70 (0,70)
Fenster (g-Wert)	0,55 (0,55)	0,55 (0,55)	0,55 (0,55)	0,53 (0,53)	0,50 (0,50)
Lüftung (n_L - Wert)	0,20* (0,20*)	0,16 (0,16)	0,14 (0,14)	0,13 (0,13)	0,12 (0,12)

* Der angegebene Wert entspricht einem Mittelwert für die Periode 2010-2019 für die Gebäude mit und ohne WRG.

Tabelle 4.5
Angaben zur energetischen Qualität der baulich-technischen Komponenten der Wohngebäude im Effizienz-Szenario. Im oberen Teil der Tabelle sind die Kennwerte für die Sanierungsmaßnahmen im Bestand zusammengestellt. Hierbei ist zu beachten, dass diese jeweils nur für anstehende Erneuerungsmaßnahmen gelten. Gemäß dem Kopplungsprinzip bleibt nämlich die energetische Qualität von baulich-technischen Komponenten im Modell solange unverändert erhalten, bis nach Ablauf der Nutzungsdauer eine Erneuerung ansteht. Erst dann kann eine bessere Qualität zum Zuge kommen. Im unteren Teil der Tabelle sind die Kennwerte für künftige Neubauten genannt.

Die Angaben zu den U-Werten von Aussenwänden, Dächern, Kellerdecken erfolgen in W/m²K. Die Angabe des U-Wertes der Fenster bezieht sich auf den Gesamt-U_W-Wert des Fensters in W/m²K im eingebauten Zustand. Die energetische Güte des Lüftungskonzeptes wird über den Kennwert des effektiven energetisch wirksamen Luftwechsels n_L in 1/h charakterisiert.

Effizienz-Plus-Szenario: energetische Qualitäten Sanierungsmaßnahmen im Bestand (Werte in Klammern: bedingt sanierbarer Bestand)					
Komponente / Jahr	2010 - 2019	2020 - 2029	2030 - 2039	2040 - 2049	ab 2050
Außenwände (U-Wert)	0,39 (0,92)	0,17 (0,80)	0,15 (0,70)	0,14 (0,60)	0,13 (0,45)
Dach (U-Wert)	0,34 (0,55)	0,17 (0,48)	0,15 (0,43)	0,14 (0,38)	0,13 (0,30)
Kellerdecke (U-Wert)	0,47 (0,55)	0,31 (0,38)	0,26 (0,33)	0,24 (0,28)	0,21 (0,22)
Fenster (U-Wert)	1,32 (1,65)	0,97 (1,20)	0,85 (1,05)	0,78 (0,95)	0,70 (0,85)
Fenster (g-Wert)	0,60 (0,68)	0,55 (0,63)	0,55 (0,60)	0,55 (0,60)	0,58 (0,56)
Lüftung (n_L - Wert)	0,38 (0,39)	0,36 (0,38)	0,30 (0,37)	0,25 (0,36)	0,22 (0,36)
Effizienz-Plus-Szenario: energetische Qualitäten Neubauten (Werte in Klammern: Mehrfamilienhäuser > 2 WE)					
Komponente / Jahr	2010 - 2019	2020 - 2029	2030 - 2039	2040 - 2049	ab 2050
Außenwände (U-Wert)	0,165 (0,17)	0,105 (0,115)	0,095 (0,105)	0,085 (0,095)	0,75 (0,83)
Dach (U-Wert)	0,14 (0,14)	0,105 (0,105)	0,095 (0,095)	0,085 (0,085)	0,75 (0,75)
Kellerdecke (U-Wert)	0,23 (0,23)	0,175 (0,175)	0,17 (0,17)	0,16 (0,16)	0,155 (0,155)
Fenster (U-Wert)	0,94 (0,94)	0,75 (0,75)	0,675 (0,675)	0,625 (0,625)	0,55 (0,55)
Fenster (g-Wert)	0,55 (0,55)	0,55 (0,55)	0,55 (0,55)	0,575 (0,55)	0,60 (0,60)
Lüftung (n_L - Wert)	0,13* (0,13*)	0,10 (0,10)	0,07 (0,07)	0,06 (0,07)	0,06 (0,06)

* Der angegebene Wert entspricht einem Mittelwert für die Periode 2010-2019 für die Gebäude mit und ohne WRG.

Tabelle 4.6
Angaben zur energetischen Qualität der baulich-technischen Komponenten der Wohngebäude im Effizienz-Plus-Szenario. Im oberen Teil der Tabelle sind die Kennwerte für die Sanierungsmaßnahmen im Bestand zusammengestellt. Hierbei ist zu beachten, dass diese jeweils nur für anstehende Erneuerungsmaßnahmen gelten. Gemäß dem Kopplungsprinzip bleibt nämlich die energetische Qualität von baulich-technischen Komponenten im Modell solange unverändert erhalten, bis nach Ablauf der Nutzungsdauer eine Erneuerung ansteht. Erst dann kann eine bessere Qualität zum Zuge kommen. Im unteren Teil der Tabelle sind die Kennwerte für künftige Neubauten genannt.

Die Angaben zu den U-Werten von Aussenwänden, Dächern, Kellerdecken erfolgen in W/m²K. Die Angabe des U-Wertes der Fenster bezieht sich auf den Gesamt-U_W-Wert des Fensters in W/m²K im eingebauten Zustand. Die energetische Güte des Lüftungskonzeptes wird über den Kennwert des effektiven energetisch wirksamen Luftwechsels n_L in 1/h charakterisiert. Im Vergleich zu den anderen Szenarien wurde eine deutlich höhere mittlere Effizienz und eine verbesserte Luftdichtheit der Hülle angenommen.

rückgewinnung und den Infiltrationsluftwechsel bestimmt. Verbesserungen sind bei allen der drei genannten Größen möglich. Der Anlagenluftwechsel lässt sich z.B. durch eine luftqualitätgesteuerte Volumenregelung oder eine Kaskadenlüftung reduzieren. Auch die künftig zu erwartende geringere mittlere Belegungsdichte führt in Zukunft zu kleineren mittleren Anlagenluftwechseln. Die energtische Qualität von Wärmetauscher, Gerätegehäuse und bei der Dämmung von Lüftungsleitungen kann gegenüber dem heute Üblichen deutlich verbessert werden.

- Nicht zuletzt spielt die Luftdichtigkeit der Gebäudehülle energetisch und bauphysikalisch eine wichtige Rolle. Mit heute vorhandenen Dichtkonzepten und -mitteln lassen sich im Neubau bei konsequenter Anwendung gegenüber dem geforderten Passivhaus-Grenzwert von $n_{50} = 0{,}6\ h^{-1}$ regelmäßig deutlich günstigere Drucktest-Kennwerte um $0{,}4 - 0{,}2\ h^{-1}$ erzielen.

Die energetischen Kennwerte zu den Einzelkomponenten im Effizienz-Plus-Szenario sind in Tabelle 4.6 zusammengestellt. Die Spannbreite der energetischen Qualitäten in den verschiedenen Szenarien umfasst das gesamte Spektrum der heute verfügbaren bautechnischen Komponenten und markttypischen Produkte. Spekulative Annahmen zu künftig vorstellbaren bzw. wünschenswerten Technologien wurden jedoch selbst in dem explorativen Effizienz-Plus-Szenario bewusst vermieden.

4.5 Nutzungsdauern und Erneuerungszyklen

Die mittlere Nutzungsdauer der baulichen und technischen Komponenten ist ein wichtiger Parameter im Kohortenmodell, denn darüber werden die Erneuerungszyklen von Bauteilen und Technikkomponenten festgelegt, die dann Auslöser für daran gekoppelte energetische Maßnahmen sind. Diese Zyklen sollten möglichst realistisch bestimmt werden. Werden die

Nutzungsdauern zu kurz gewählt, werden die Möglichkeiten für eine energetische Sanierung zu optimistisch eingeschätzt. Im umgekehrten Fall ergibt sich eine zu pessimistische Einschätzung.

In der Literatur finden sich erheblich voneinander abweichende Angaben zur mittleren Nutzungsdauer von Bau- und Technikkomponenten. Hintergrund sind u.a. unterschiedliche Motivationen und Bewertungen. So werden die Nutzungsdauern bei Wirtschaftlichkeitsberechnungen i.d.R. deutlich geringer angesetzt, als die tatsächliche Haltbarkeit der Konstruktionen beträgt. Sie orientieren sich häufig an in der Wirtschaft üblichen Abschreibungszeiträumen. Dadurch werden jedoch an sich wirtschaftlich tragfähige Lösungen „schlechtgerechnet" und u.U. verhindert. Es existieren nur wenige empirische Untersuchungen zu Nutzungsdauern. In (Kleemann et al. 2000, S. 11) werden Renovierungszyklen von 30 - 60 Jahren genannt und eine Untersuchung von 1260 Wohneinheiten im Ruhrgebiet angeführt, für die ein mittlerer Renovierungszyklus von 53 Jahren ermittelt wurde. Vollsanierungen stellen jedoch nicht den Regelfall im Sanierungsgeschehen dar. Baukomponenten werden dann ersetzt oder erneuert, wenn deren Nutzungsdauer abgelaufen ist – und das ist davon abhängig, um welches Bauteil, um welche Konstruktionsart oder welche Technikkomponente es sich handelt. Daher werden Nutzungsdauern sinnvollerweise differenziert nach Bauteil oder Komponente ausgewiesen.

In Tabelle 4.7 sind die im Kohortenmodell verwendeten Nutzungsdauern ausgewiesen. Diese wurden in Anlehnung an (Kleemann et al. 2000) im oberen Bereich der in der Literatur genannten Werte gewählt, weil die Bauteile und Komponenten tatsächlich langlebiger sind, als häufig theoretisch angenommen wird und sich daraus längere Erneuerungszyklen ergeben (s.o.). Dies ist von Bedeutung, damit die Berechnungen im Kohortenmodell nicht auf zu optimistischen Annahmen bzgl. Erneuerungsraten und Sanierungseffizienzen beruhen. Die Nut-

Bauteil / Komponente	**Mittlere Nutzungsdauer [a]**	**Sanierungsrate**
Baukomponenten		
Außenwände (Putz / sonstige Bekleidungen / Dämmung)	50	2,0%
Anstriche / Beschichtungen	5 - 10	10,0 - 20,0%
Dach (Steildachaufbau)	50	2,0%
Dach (Flachdachaufbau)	30	3,3%
Kellerdecke (zugänglich)	40	2,5%
Kellerdecke (Bodenaufbau)	80	1,25%
Kellerwände und Bodenplatten	80 - 120	1,0%
Fenster	40	2,5%
Tragkonstruktionen	80 - 120	1,0%
Mittlere Nutzungsdauer (Baukomponenten)	50 - 60	1,5 - 2,0%
Technikkomponenten		
Haustechnik - Heizsystem	20	5,0%
Haustechnik - Wärmeverteilung	50	2,0%
Lüftungstechnik (Gerät)	20 - 25	4,0 - 5,0%
Lüftungsverteilung (Kanalnetz)	50	2,0%
Elektroinstallationen	30 - 50	2,0 - 3,5%
Beleuchtung	5 - 10	10,0 - 20,0%
Haushaltsgeräte	10 - 20	5,0 - 10,0%
Unterhaltungselektronik	5-10	10,0 - 20,0%
Computer u.ä.	5-10	10,0 - 20,0%
Mittlere Nutzungsdauer (Technikkomponenten)	15 - 25	4,0 - 6,5%

Tabelle 4.7:
Mittlere Nutzungsdauer und daraus abgeleitete Sanierungsrate für die energetisch relevanten Bau- und Technikkomponenten. Die Angabe erfolgt für die technische Standzeit (= tatsächliche Lebensdauer) und nicht als wirtschaftlicher Abschreibungszeitraum. Quelle: (Vallentin 2011, S. IV-19 und Ergänzungen).

Gesamt-Jahresanlagennutzungsgrade (Erzeugung, Speicherung, Verteilung)								
	Strom dir.	WP Sole	WP Luft	FW	Öl	Gas	Biomasse	Biomasse dez.
Effizienz-Szenario								
2020 Heizung	0,98	2,90	2,70	0,86	0,87	0,93	0,74	0,65
2020 Warmwasser	0,92	2,10	1,80	0,71	0,72	0,80	0,55	0,40
2050 Heizung	0,98	3,20	3,00	0,89	0,93	0,99	0,80	0,65
2050 Warmwasser	0,93	2,40	1,80	0,76	0,79	0,88	0,62	0,40
Effizienz-Plus-Szenario								
2020 Heizung	0,98	3,20	3,00	0,86	0,87	0,93	0,74	0,65
2020 Warmwasser	0,92	2,40	2,20	0,71	0,72	0,80	0,55	0,40
2050 Heizung	0,98	4,18	3,98	0,89	0,93	0,99	0,80	0,65
2050 Warmwasser	0,93	3,40	3,30	0,76	0,79	0,88	0,62	0,40

Tabelle 4.8
Entwicklung der Jahresnutzungsgrade im Effizienz- und im Effizienz-Plus-Szenario für Heizung und Warmwasser in den Jahren 2020 und 2050.

zungsdauern von tragenden Hauptkonstruktionen liegen bei 80 Jahren und mehr. Auch die sonstigen baulichen Komponenten sind mit 30 - 50 Jahren Nutzungsdauer als langlebig einzustufen. Technische Anlagen wie Heizung und Lüftungsgeräte weisen mit 25 - 30 Jahren bereits deutlich kürzere Erneuerungszyklen auf. Mit 5 - 20 Jahren sind Ausstattungsgegenstände und Elektrogeräte am kurzlebigsten.

Der Erstellungszeitpunkt der Gebäudetypen bildet jeweils den Ausgangspunkt für die Erneuerungszyklen. Diese werden im Kohortenmodell in 5-Jahres-Schritten modelliert, wobei die energetischen Kennwerte der betreffenden Bauteile bzw. Technikkomponenten - je nach Sanierungstiefe und Qualität entsprechend den Vorgaben in den Szenarien - angenommen werden.

Wie in Tab. 4.7 dargestellt, lassen sich die Nutzungsdauern über ihren Kehrwert in komponentenabhängige Sanierungsraten umrechnen. Bündelt man hier Maßnahmenpakete, so ergeben sich daraus realistische Sanierungszyklen. Denn man kann pauschal annehmen, dass es nicht im Interesse der Hauseigentümer liegt, alle 5 Jahre Einzelmaßnahmen mit ihren typischen Störpotenzialen auszuführen. Auffällig ist, dass die mittlere Sanierungsrate im Bereich der Technikkomponenten mit 4,0 - 6,5 % deutlich höher liegt, als im Bereich der Bauteile mit 1,5 - 2,0 %. Bei der Gebäudetechnik können somit neue Qualitäten und Konzepte deutlich schneller den Bestand durchdringen, als dies bei der Gebäudekonstruktion der Fall ist.

4.6 Definition der Bezugsfläche

Bei der Bestimmung der spezifischen Kennwerte wird die tatsächlich vorhandene Nutzfläche verwendet. Bei der sog. Energiebezugsfläche A_{EB} werden nur die Nutzflächen innerhalb der thermischen Hülle angerechnet, z.B. die beheizte Wohnfläche (nicht jedoch Balkone, gedeckte Terrassen, Loggien oder Abstellräume ect. außerhalb der Gebäudehülle). Die Energiebezugsfläche wurde über die Außenmaße der Gebäudetypen und die Geschosszahl ermittelt. Die so ermittelten Geschossflächen GF wurden über pauschale Umrechnungsfaktoren in die Energiebezugsfläche umgerechnet. Diese Faktoren (ausgedrückt als Verhältnis A_{EB}/GF) liegen je nach Gebäudetyp zwischen 0,70 und 0,80.

4.7 Szenarioabhängige Modellierung der energetischen Qualitäten der Technikkomponenten im Kohortenmodell

Analog zu den Bauteilen wird bei den haustechnischen Komponenten (z.B. Heizung, Warmwassererzeuger, Lüftung) verfahren. Es wurden szenarioabhängige Annahmen zur energetischen Qualität der Systeme zusammengestellt. Diese werden in einfachen Kennwerten ausgedrückt (z.B. energieäquivalenter Luftwechsel des Lüftungskonzeptes bzw. Jahresnutzungsgrad der Wärmeversorgung inkl. Erzeugung, Speicherung und

Verteilung) und zeitabhängig variiert. Für die Bestimmung des nutzerabhängigen Warmwasser- und Strombedarfs wird auf die Kennwerte anderer Szenarienstudien zurückgegriffen, und ein Abgleich mit Studien bzw. Daten, die auf Luxemburg bezogen sind, vorgenommen (siehe Tab. 4.9).

Modellierung der Wärmeversorgungssysteme

Die energetische Qualität der Wärmeversorgungssysteme (Heizung/Warmwasser) wird im Rechenmodell durch ihre Gesamt-Jahresanlagennutzungsgrade für Erzeugung, Speicherung und Verteilung abgebildet. Diese wurden anhand von Literaturwerten und Ergebnissen aus Messprojekten hergeleitet (vgl. Vallentin 2011, S. IV-34 f. und IV-42 f.), (Peper/Feist 2008), (Peper 2009) und (Miara 2011). Während die Werte für brennstoffbetriebene Wärmeversorgungssysteme und direktelektrische Systeme in den einzelnen Szenarien nicht differenziert wurden, wurden die Gesamt-Jahresanlagennutzungsgrade der Wärmepumpensysteme im Effizienz-Plus-Szenario höher als im Effizienz-Szenario festgelegt, weil hier noch sehr weitgehende Technologieverbesserungen möglich sind (z.B. Direktverdampfer-Wärmepumpen).

Um die in Zukunft zu erwartenden technischen Weiterentwicklungen zu berücksichtigen, wurden die Systemeffizienzen nach Baujahren differenziert. Tabelle 4.8 zeigt exemplarisch die Werte für das Effizienz- und das Effizienz-Plus-Szenario jeweils für die Jahre 2020 und 2050. Im Jahr 2020 wurden für die Nutzungsgrade in den Effizienzszenarien (EFF und EFF-Plus) für alle Systeme außer Wärmepumpen identische Werte angenommen. Für Wärmepumpen wurden im Effizienz-Plus-Szenario hingegen um 0,3 höhere Gesamt-Jahresanlagennutzungsgrade angesetzt.

Für 2050 wurden in beiden Szenarien geringfügige Verbesserungen bei der Anlageneffizienz angenommen. Sie liegen zwischen 0,03 und 0,06. Bei den Wärmepumpen wurden für 2050 im Effizienz-Szenario und im Effizienz-Plus-Szenario jedoch

Quelle	Art der Information
Auswertung Energieausweisregister Ministére de l´Economie	Verteilung Heizsysteme im Gebäudepark
Statec B1501 Conditions 1960-2001	Verteilung im Gebäudepark
Statec B1507 Private households living	Verteilung im Gebäudepark
Statec RP2011-Nombre de logements par type	Verteilung im Gebäudepark
NEEAP (Excel), Ministére de l´Economie	Verteilung im Gebäudepark
Fraunhofer-ISI, KWK-Studie 2016	Anteil Fernwärme
Statec A4302 Final energy consumption 2000-2014	Endenergieverbrauch nach Energieträgern
Statec A4402 Net heat production 2000 - 2014	Endenergieerzeugung nach Nutzung und Energieträgern
Dissertation Rainer Vallentin	Jahresnutzungsgrade Heizsysteme

Tabelle 4.9
Kurzübersicht über die Quellen, die für die Modellierung der Wärmeversorgung im Kohortenmodell im Gebäudebestand herangezogen wurde. Die Kohleheizungen wurden im Kohortenmodell nicht berpücksichtigt, da deren Anteil 1990 bei 3% lag und sie 2001 nahezu aus dem Bestand verschwunden sind.

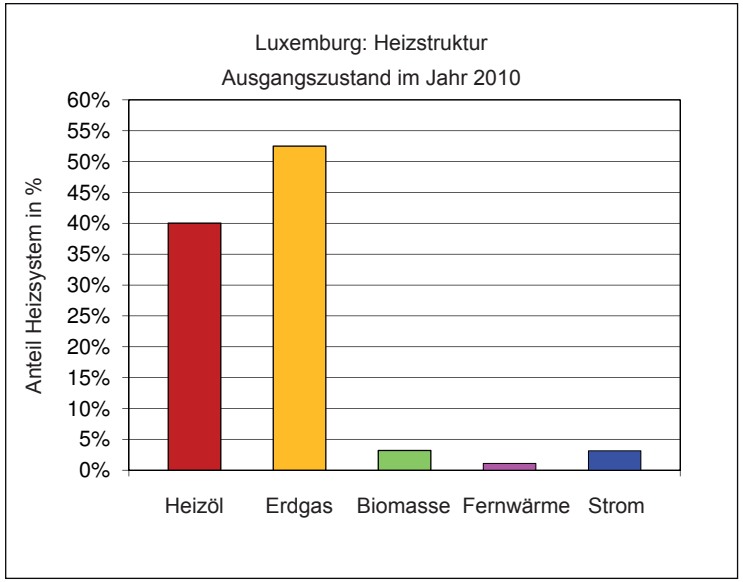


Abbildung 4.5
Ausgangszustand der Heizstruktur Luxemburgs im Jahr 2010. Bei den stromgestützten Systemen sind auch Wärmepumpen mit enthalten.

deutliche Verbesserungen der mittleren Jahresnutzungsgrade gegenüber den Werten für 2020 modelliert.

Zum Vergleich der Rechenmethodik wurden die im Kohortenmodell für das Effizienz-Szenario für das Jahr 2020 hinterlegten Jahresnutzungsgrade mit Werten verglichen, die nach dem Verfahren des Luxemburger Energiepasses mit dem Programm LESOSAI ermittelt wurden. Am Beispiel eines Einfamilienhauses mit einem Heizwärmebedarf von etwa 27 kWh/(m^2a) und eines Mehrfamilienhauses mit einem Heizwärmebedarf von etwa 21 kWh/(m^2a) wurden die Wirkungsgrade der folgenden Wärmeversorgungssysteme für Raumheizung und Warmwasserbereitung verglichen:

- Direktelektrische Beheizung
- Wärmepumpensysteme (Sole und Luft)
- Fernwärmeversorgung
- Öl-Zentralheizung
- Gas-Zentralheizung und
- Holz-Zentralheizung

Wie aus Tab. 4.10 zu erkennen, stimmen die Werte im Mittel von Raumheizung und Warmwasser für alle Systeme außer bei den Wärmepumpensystemen sehr gut überein. Die Abweichungen zwischen den im Kohortenmodell verwendeten Werten und den Berechnungsergebnissen aus LESOSAI gemäß Energiepassverfahren Luxemburg liegen im Bereich zwischen Null und acht Prozent.

Hingegen sind die Jahresnutzungsgrade für die Wärmepumpen nach den Annahmen des Kohortenmodells im Mittel für Heizung und Warmwasser sehr deutlich niedriger, als der nach LESOSAI ausgewiesene Wert. Während der Mittelwert (EFH/MFH, Sole/Luft, Heizung/Warmwasser) im Kohortenmodell bei 250% liegt, weist LESOSAI einen Wert von 326% aus. Es wurde entschieden, die Werte im Kohortenmodell so zu belassen, da sie nach eingehender Analyse von Feldtests als repräsentativer für den Durchschnitt der installierten Wärmepumpensysteme angesehen werden dürfen, als die deutlich höheren Werte nach LESOSAI. Wichtig für diese Einschätzung ist, dass im Kohortenmodell der Jahresnutzungsgrad des Heizsystems alle Verluste des Systems abbildet, wie Erzeugung, Speicherung, Verteilung und Wärmeübergabe. Zur Ermittlung der im Kohortenmodell verwendeten Werte für die Erzeuger-Effizienzen von Wärmepumpen wurden auf die Ergebnisse des Projekts „Wärmepumpeneffizienz“ des Fraunhofer Instituts für solare Energiesysteme zurückgegriffen. In diesem Projekt wurden die Effizienzen von 56 Sole-Wärmepumpen und 18 Luft-Wärmepumpen in einem Feldtest untersucht (Miara 2011). In Abbildung 4.6 sind die Mittelwerte der gemessenen Jahresarbeitszahlen für je verschieden gewählte Bilanzgrenzen aufgezeigt.

Die mittleren Jahresarbeitszahlen der messtechnisch untersuchten Erdreich-Wärmepumpen lagen in den drei vermessenen Jahren zwischen 4,19 und 3,75. Bei den Außenluft-Wärmepumpen liegen diese Werte mit 3,17 bis 2,74 deutlich niedriger. Nur der jeweils niedrigste Wert bildet alle Verluste des Wärmepumpensystems im engeren Sinne ab. Es fehlen jedoch dann immer noch die Speicher- und Verteil- sowie Übergabeverluste, um den Jahresnutzungsgrad zu bestimmen. Obwohl die im Feldtest des ISE bestimmten Messdaten bereits 7-10 Jahre alt sind, können sie auch heute noch als repräsentativ für die mittlere Erzeugereffizienz von Wärmepumpensystemen gelten, weil hier gegenläufige Effekte zwischen Verbesserung der Arbeitszahl und dem Wärmebedarf des Gebäudes auftreten.

Die Wärmeverluste energetisch hochwertig sanierter Gebäude wurden in zwei Messprojekten des Passivhaus-Instituts Darmstadt untersucht [Peper/Feist 2008], [Peper 2009]. In beiden Fällen treten Verluste für Wärmespeicherung und -verteilung zwischen 5 bis 10 kWh/(m^2a) für Heizung und Warmwasser auf. Auf dieser Grundlage können nun die im Feldtest des Fraunhofer-ISE bestimmten Arbeitszahlen und die in den Messprojekten des Passivhaus-Instituts bestimmten Speicher- und Ver-

Vergleich Jahresnutzungsgrade der Heizsysteme: Kohortenmodell versus Rechenmethode für die Energieausweise Luxemburgs							
		Strom, direkt	Wärmepumpen	Fernwärme	Öl-zentral	Gas-zentral	Holz-zentral
Kohortenmodell	Heizung	98,0%	290,0%	86,0%	87,0%	93,0%	74,0%
	Warmwasser	92,0%	210,0%	71,0%	72,0%	80,0%	55,0%
	Gesamt	**95,0%**	**250,0%**	**78,5%**	**79,5%**	**86,5%**	**64,5%**
LESOAI	Heizung	100,0%	387,8%	91,2%	93,0%	93,0%	66,6%
	Warmwasser	90,9%	265,4%	70,5%	71,6%	67,0%	54,3%
	Gesamt	**95,5%**	**326,6%**	**80,8%**	**82,3%**	**80,0%**	**60,5%**
	Abweichung	**-0,5%**	**-30,6%**	**-2,9%**	**-3,5%**	**7,5%**	**6,2%**

Tabelle 4.10
Vergleich der Rechenwerte zu den jahresnutzungsgraden verschiedener Heizsysteme. Oben sind die Werte, die sich gemäß dem Kohortenmodell ergeben aufgeführt. Unten finden sich die Werte, die mit dem Programm LESOAI unter Anwendung Rechenmethodik der Energieausweise ergeben. Die Abweichungen sind bis auf die Wärmepumpen gering. Für letztere sind somit weitergehende Betrachtungen notwendig. Weitere Erläuterungen: siehe Text.

teilverluste zu dem Jahresnutzungsgrad für Erdreich(Sole)- und Außenluft-Wärmepumpen zusammengeführt werden (siehe Tab. 4.11).

Treten in einem energetisch hochwertigen Gebäude die in den Messungen des PHI ermittelten Speicher- und Verteilverluste auf, und liegt die Effizienz der Erzeuger Sole-WP und Erdreich-WP im Bereich des Mittelwertes aus den Feldtests des ISE, so resultiert für die Erdreich-Sole-Wärmepumpe ein Jahresnutzungsgrad von 2,82 und für die Außenluft-Wärmepumpe ein Wert von 1,8. Angesichts dieser dann gegenüber den Annahmen in den Luxemburger Energiepässen deutlich geringen Werte, orientieren sich die Jahresnutzunggrade der Wärmepumpensysteme im Kohortenmodell an den geringeren Werten gemäß (Vallentin 2011, S. IV-34 f. und 42 f.).

In den Szenarien setzen sich die in der Vergangeheit zu beobachtenden Trends fort. Jedoch unterscheiden sich die Szenarien im Hinblick auf den Zeitpunkt des Ausstiegs aus den fossilen Heizsystemen. Bei den Ölheizungen erfolgt dies im Business-as-usual-Szenario bis 2070, im Effizienz-Szenario bis

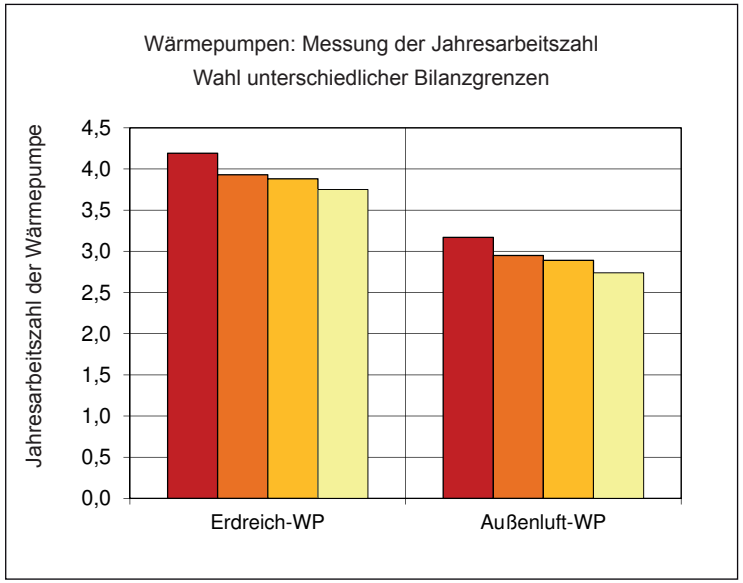


Abbildung 4.6
Messwerte der Jahresarbeitszahlen von Wärmepumpen bei unterschiedlichen Bilanzgrenzen (Miara et al. 2011)

Tabelle 4.11
Ermittlung der Jahresnutzungsgraden für typische Erdreich-Sole- und für Außenluft-Wärmepumpen. Berücksichtigt sind alle Verluste des Systems. Weitere Erläuterungen: siehe Text.

Abschätzung des Gesamt-Jahresnutzungsgrades (eta-Jahr) von Luft- und Sole-Wärmepumpen								
	Nutzwärme	Speicher- und Verteilverluste	Wärmebedarf	Wärmebedarf (Heiz + WW)	Typ WP	AZ WP	Endenergie	eta (Jahr)
Heizung	20 kWh/(m²a)	5 kWh/(m²a)	25 kWh/(m²a)	48 kWh/(m²a)	**Sole**	3,88	12,4 kWh/(m²a)	2,82
Warmwasser	15 kWh/(m²a)	8 kWh/(m²a)	23 kWh/(m²a)					
Heizung	20 kWh/(m²a)	5 kWh/(m²a)	25 kWh/(m²a)	48 kWh/(m²a)	**Luft**	2,89	16,6 kWh/(m²a)	1,80
Warmwasser	15 kWh/(m²a)	8 kWh/(m²a)	23 kWh/(m²a)					

2060 und im Effizienz-Plus-Szenario bis 2045.
Geht man von einer mittleren Lebensdauer eines Ölkessels von 25 Jahren aus, bedeutet dies, dass je nach Szenario ein Einbauverbot für neue Ölkessel im Jahr 2045, 2035 oder 2020 ausgesprochen werden müsste. Die aktuellen Entwicklungen zeigen zwar, dass Ölheizungen auch ohne Einbauverbote allmählich aus dem Bestand verschwinden werden. Falls die Dekarbonisierung aus Klimaschutz-Gründen jedoch schneller erfolgen soll, wie dies gemäß den Zielen des Pariser Klimaschutz-Abkommens geboten wäre, sind zusätzliche Anreize zu den gesetzlichen Regelungen bzw. zur Erleichterung von Umrüstungen auf andere Energieträger oder das Verbot von Neuinstallationen im Neubau oder nach Heizkesseltausch erforderlich. Diese Notwendigkeit ergibt sich bereits im Effizienz- aber noch stärker im Effizienz-Plus-Szenario.

Im Effizienz-Plus-Szenario wird zudem ein Ausstieg von Erdgasheizungen bis 2070 angenommen. Im Neubau und in der Sanierung werden Wärmepumpenheizungen (WP), wie in der Vergangenheit zu beobachten, weiter zunehmen bis auch hier eine Sättigung erreicht wird. Biomasseheizungen werden, was ihren Endenergieeinsatz insgesamt betrifft, in etwa auf dem jetzigen Niveau gehalten. Was die versorgten Wohnflächen angeht, können hier szenarienabhängig Zuwächse generiert werden. Im Business-as-usual-Szenario können wegen der hohen Bedarfswerte im Bestand nur ein geringer Ausbau realisiert werden. Anders sieht es im Effizienz- und Effizienz-Plus-Szenario aus. Die Anteile steigen hier von 3,2 % im Jahr 2010 auf 11,4% bzw. 15,1% im Jahr 2050 an. Fernwärme wird in allen Szenarien noch etwas ausgebaut, vor allem bei den Mehrfamilienhäusern im Bestand. In den Effizienzszenarien ist hier eine wirtschaftlicher Versorgung von einer ausreichend hohen Wärmedichte des Versorgungsgebiets abhängig.

Direktelektrische Wärmeversorgungen bleiben in ihrem Umfang nahezu konstant; dies unter der Annahme, dass vor allem im Bestand dezentrale elektrische Warmwasserbereitungen vorhanden sind, die häufig auch nach Sanierungen dort verbleiben. Neue Anwendungen ergeben sich im Neubau bei Einzelzapfstellen bzw. in ansonsten sehr effizienten Gebäuden.

Modellierung des Warmwasserbedarfs
Bei den Warmwasseranwendungen sind gegenläufige Tendenzen vorhanden, die einerseits verbrauchserhöhend sind (z.B. steigende Komforansprüche, hygienische Anforderungen) und andererseits verbrauchsmindernd sind (z.B. wassersparende Armaturen, Duschwasser-Wärmerückgewinnung).

Für den Nutzenergiebedarf der Warmwasseranwendungen in den privaten Haushalten wurden die Angaben aus (Vallentin 2011, S. IV-44) übernommen und an die verfügbaren Verbrauchsdaten von Projekten in Luxemburg angepasst, welche

deutlich unter den o.g. Kennwerten liegen. Entsprechend wurden die szenarioabhängigen Entwicklungen nach unten korrigiert. Die so ermittelten Werte sind in Abbildung 4.7 dargestellt.

Modellierung des Strombedarfs in den Szenarien

Die Stromanwendungen in den Gebäuden stellen ein wichtiges Handlungsfeld für die Effizienz- und Klimaschutzstrategien dar. Während im Effizienz-Szenario die Gebäude ab 2020 konsequent mit besonders stromeffizienten Haushaltsgeräten, Beleuchtung und Arbeitsmitteln usw. ausgestattet werden, findet im Business-as-usual-Szenario nur eine zurückhaltende Verbesserung der Stomeffizienz statt. Weil jedoch dort gleichzeitig eine bedeutende Ausweitung der Stromanwendungen stattfindet, werden die gerätebezogenen Effizienzverbesserungen teilweise bzw. weitgehend aufgezehrt (sog. Rebound-Effekt).

Im Effizienz-Plus-Szenario werden ab 2020/30 nochmals verbesserte Geräte und Technologien zum Standard. Dies betrifft das gesamte Feld der Elektrogeräte, Beleuchtung, Kommunikationselektronik und Allgemeinstromanwendungen (z.B. TG-Beleuchtung, Aufzüge) in und an den Wohngebäuden. Eine genauere Darstellung zum Thema findet sich in (Vallentin 2011, S. IV-52 ff.). In dieser Untersuchung wird eine Halbierung des Haushaltsstrombedarfs bis 2030-2040 für machbar eingestuft, weil dies bereits heute mit den effizientesten Ausstattungen umsetzbar ist.

Für den Strombedarf der privaten Haushalte existieren Verbrauchsdaten zu Luxemburg aus den Jahren 1990 - 2014, allerdings ohne Differenzierung zwischen Haushaltsstrom, Hilfsstrom und Strom für Wärmeerzeugung (vgl. Statec 2015). Diese liegen im Gegensatz zu den Warmwasseranwendungen höher als die entsprechenden Vergleichswerte in Deutschland.

Von diesen Werten wurde der Anteil für Hilfsstrom und Strom zur Wärmeerzeugung abgezogen und daraus der Ausgangs-

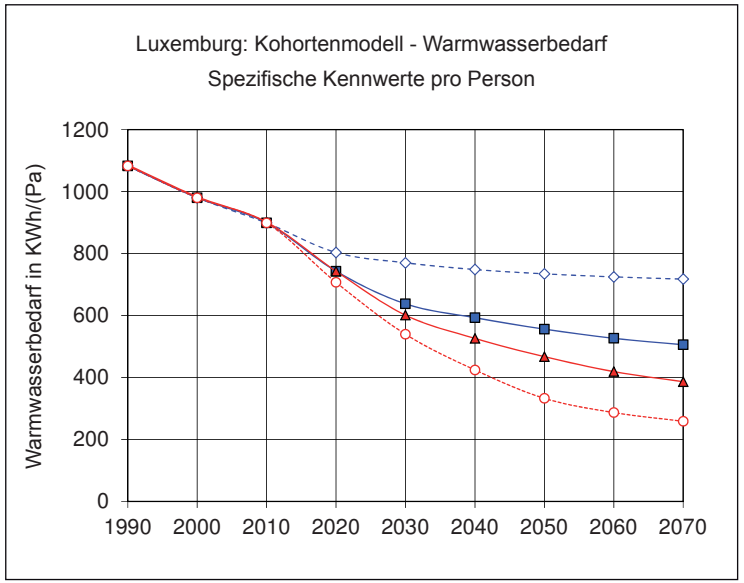


Abbildung 4.7
Szenarioabhängige Modellierung des Nutzenergiebedarfs pro Person für alle Warmwasseranwendungen in den Haushalten. Angabe der Werte in kWh/(Pa).

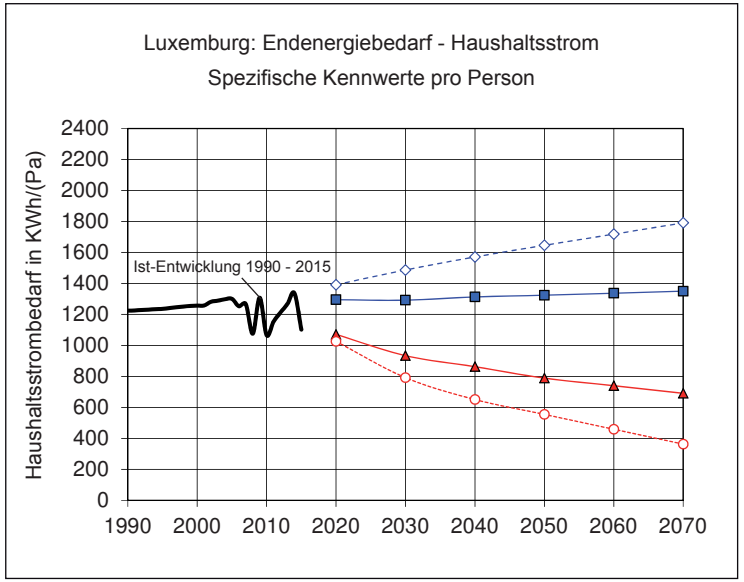


Abbildung 4.8
Szenarioabhängige Modellierung des Endenergiebedarfs pro Person für den Haushaltsstrom. Angabe der Werte in kWh/(Pa).

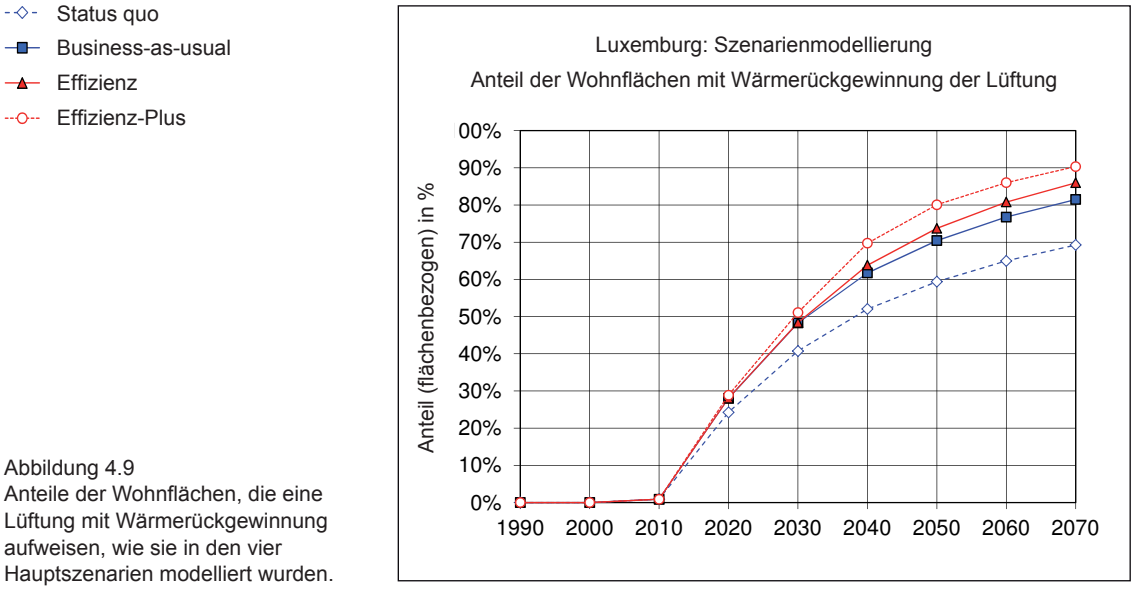


Abbildung 4.9
Anteile der Wohnflächen, die eine Lüftung mit Wärmerückgewinnung aufweisen, wie sie in den vier Hauptszenarien modelliert wurden.

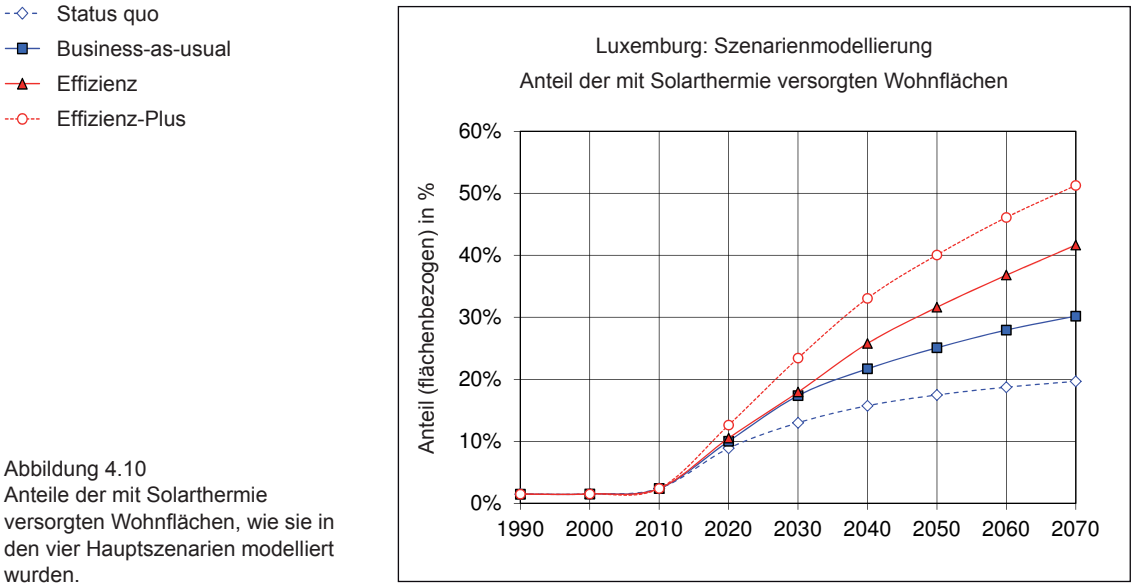


Abbildung 4.10
Anteile der mit Solarthermie versorgten Wohnflächen, wie sie in den vier Hauptszenarien modelliert wurden.

wert für 2010 in Höhe von ca. 1200 kWh/(Pa) bestimmt. Danach wurden die Kennwerte aus (Vallentin 2011, S. IV-59) entsprechend angepasst und weiterentwickelt. Die Ist-Entwicklung und die szenarioabhängigen Kennwerte für die Berechnungen im Kohortenmodell sind in Abbildung 4.8 zusammengestellt.

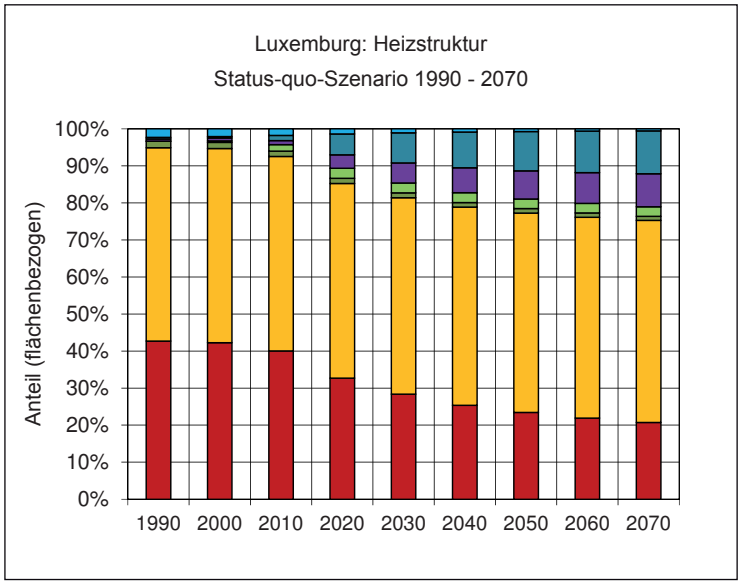
Modellierung der Lüftungs- und Solaranlagen

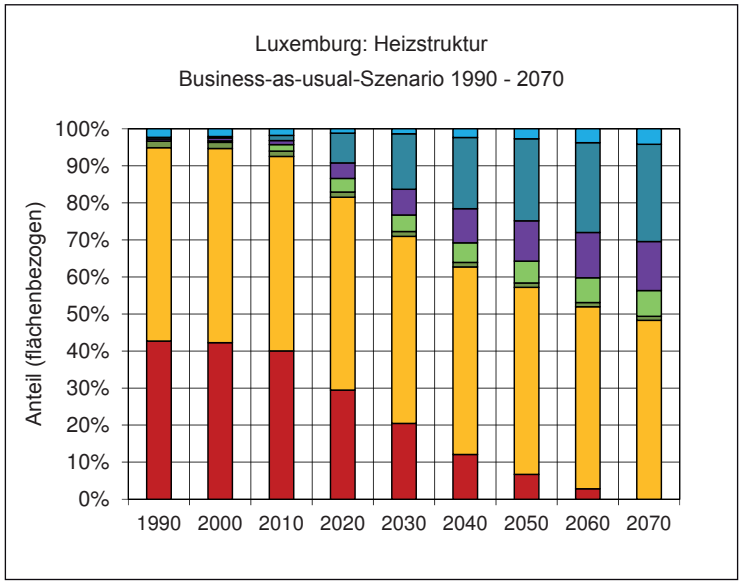
Die Anteile der Wohnflächen, die über eine Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung verfügen, steigt in allen Szenarien deutlich an, wenn auch mit gewissen Unterschieden, die vor allem den Wohngebäudebestand betreffen (Abb. 4.9). Im Neubau ist seit 2017 der Einbau von Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung durch die Anforderungen der gesetzlichen Anforderungen (RGD 2016) bereits weitehend vorgegeben. In den Effizienzszenarien werden nach 2020/2030 dann auch bei energetischen Modernisierungen immer mehr Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung eingebaut, während dies im Business-as-usual-Szenario weiterhin nur schleppend erfolgt.

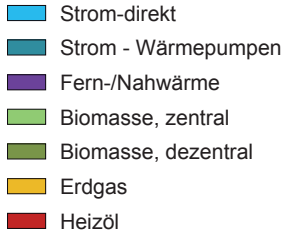
Bei den thermischen Solaranlagen erfolgt in allen Szenarien ein stetiger Ausbau, der jedoch in den Effizienzszenarien deutlich umfassender erfolgt (siehe Abb. 4.10). Zu beachten ist hier, dass sich die Photovoltaik gegenüber der Solarthermie zunehmend als Konkurrenztechnologie etabliert hat. Dies spielt dann später, bei der Ermittlung der Potenziale der Photovoltiakerzeugung (Kapitel 10) eine Rolle.

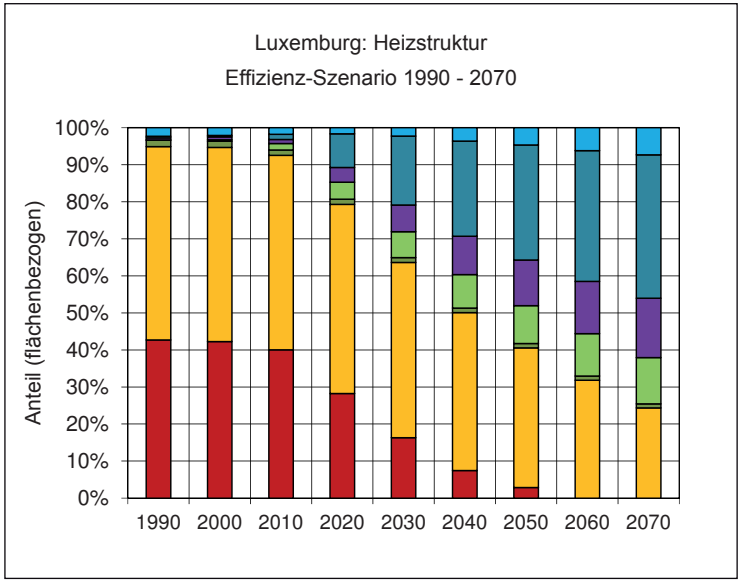
Szenarioabhängige Modellierung der Heizstruktur

Auch die Anteile der Versorgungssysteme und der Energieträger der Wärmeversorgung werden in jedem Szenario individuell festgelegt. Sie unterliegen zudem Veränderungen über die Zeit. Für den Ausgangszustand der Heizstruktur wurden die vorhandenen Angaben der Energieausweisregister oder statische Daten zu den Versorgungssystemen der Wohngebäude aus den Jahren 2005 - 2015 herangezogen (siehe Tab. 4.9). In Abbildung 4.11 wird deutlich sichtbar, welch ausgeprägte Dynamik bereits in der jüngsten Vergangenheit wirksam war. Auf-









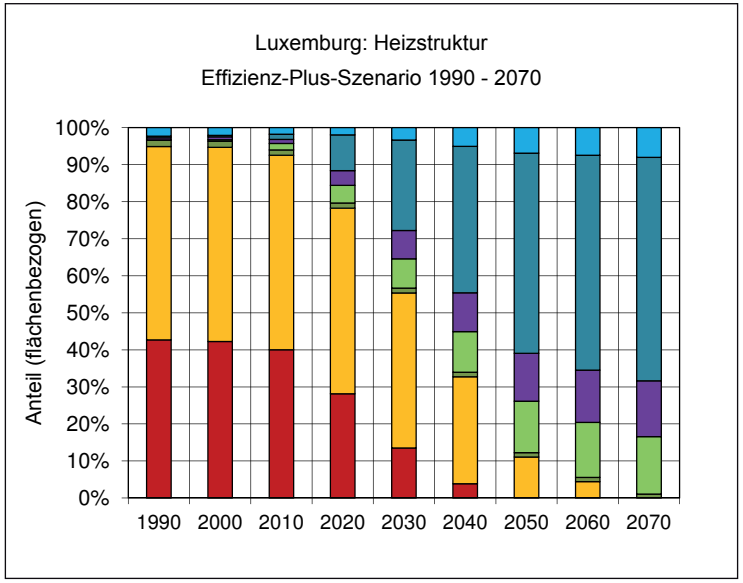


Abbildung 4.11
Darstellung der Heizstruktur des Wohngebäudeparks in Luxemburg 1990 - 2070, wie sie in den vier Hauptszenarien modelliert wurde. Die Anteile beziehen sich auf die versorgte Wohnfläche des jeweiligen Heizsystems.

fällig ist hierbei vor allem der Rückgang der Ölheizungen und der gleichzeitige Anstieg der mit Wärmepumpen versorgten Wohngebäude. Die Szenarien unterscheiden sich vor allem darin, in welchem Tempo der Ausstieg aus den fossil gestützten Systemen erfolgt. Hiervon hängt u.a. der Erfolg der Klimaschutzstrategien ab. Am konsequentesten erfolgt dies im Effizienz-Plus-Szenario, am zurückhaltendsten im Business-as-usual-Szenario, in dem auch im Jahr 2050 noch fast 60 % der Wohnflächen fossil versorgt werden.

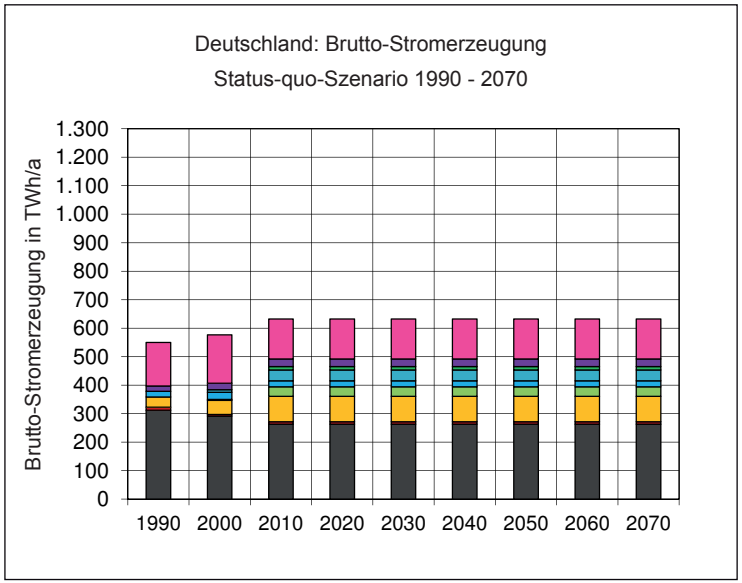
Für die Wärmeversorgungen werden unterschiedliche Heizysteme in den Szenarien mit ihrem jährlichen Gesamtnutzungsgraden abgebildet. Diese ändern sich im Betrachtungszeitraum hin zu immer effizienteren Systemen. In den Effizienzszenarien findet dies schneller und durchgreifender statt als im Business-as-usual-Szenario. Hierbei wird zwischen der Raumwärme- und der Trinkwarmwasserbereitstellung unterschieden.

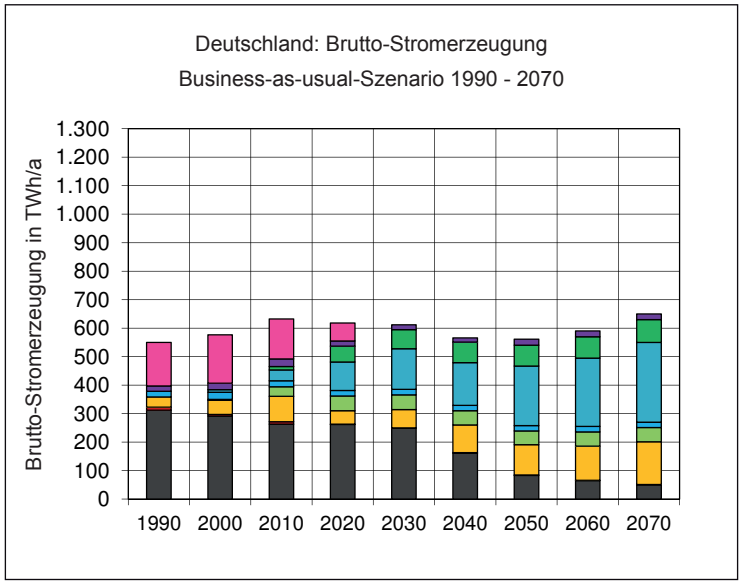
Szenarioabhängige Modellierung der Stromerzeugung
Die Modellierung der Stromerzeugung erfolgt in den Szenarien nicht für Luxemburg sondern für Deutschland, weil nur hierzu belastbare Untersuchungen existieren, die eine Zeitperspektive bis 2050 bzw. 2060 aufweisen. Nachdem die luxemburger Stromversorgung relativ stark auf Stromimporte aus Deutschland und Belgien (und in geringerem Maße aus Frankreich) gestützt ist, und dies wahrscheinlich auch in Zukunft der Fall sein wird, erscheint dieses Vorgehen gerechtfertigt.

Für das Kohortenmodell wurden folgende Szenarien herangezogen:

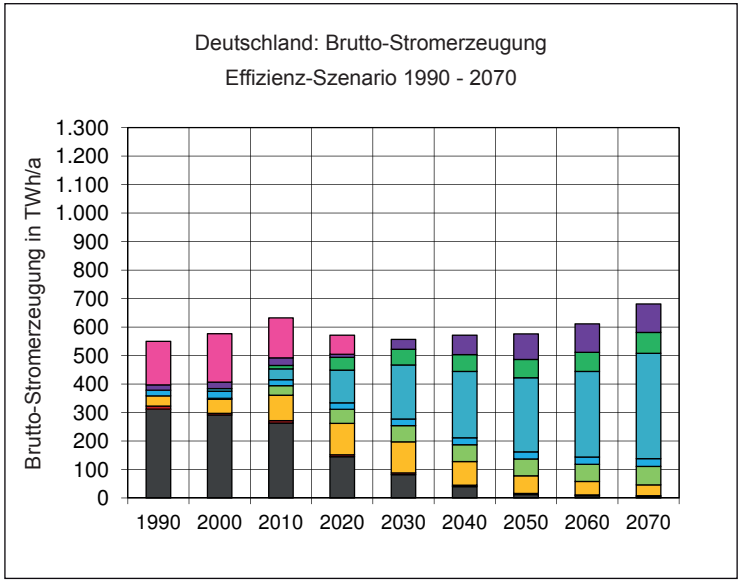
- Im Business-as-usual-Szenario wird die Stromerzeugung gemäß der Referenzprognose und dem Trendszenario der Studie „Entwicklung der Energiemärkte - Energiereferenzprognose“ (ewi/gws/prognos 2014) modelliert. Hier wird die bisherige Entwicklung des Kraftwerkparks und die bekannten politischen Beschlüsse zur Energiewende und zum Atomenergieausstieg abgebildet und gemäß den daraus ableitbaren Trend fortgeführt.
- Im Effizienz-Szenario wird das „Szenario 2011 A“ der Untersuchung „Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global“ (Nitsch et al. 2012) herangezogen. Dieses verfolgt das Ziel, die Treibhausgasemissionen Deutschlands gegenüber dem Stand 1990 bis 2050 um ca. 80 % zu reduzieren. Die gesamte Bruttostromerzeugung bleibt bis 2050 in etwa auf dem Niveau von 2015 (585 TWh/a) erhalten, ob wohl hier in relevantem Ausmaß neue Stromnutzungen hin zukommen (z.B. Wärmepumpen, Mobilität). Deren Bedarf wird durch Effizienzsteigerungen an anderen Stellen kompensiert.
- Im Effizienz-Plus-Szenario wird das „Szenario 2013“, das eine Weiterentwicklung des zuvor genannten Leitszenarios 2011 darstellt, zugrundegelegt (vgl. Nitsch 2013). In diesem Szenario wird bis 2060 eine nahezu vollständig er neuerbare Energieversorgung modelliert, wodurch die Treibhausgasemissionen bis 2050 um 86 % und bis 2060 um 94 % gegenüber dem Stand von 1990 reduziert werden können.

In Abbildung 4.12 ist die Bruttostromerzeugung für alle vier Hauptszenarien gegenübergestellt. In allen Szenarien ist der Atomenergieausstieg, wie politisch beschlossen, bis 2022 vollzogen. Übergangsweise steigt dadurch der Anteil der fossilen Stromerzeugung an. In allen Szenarien (mit Ausnahme des Status-quo-Szenarios, dass nur eine modellstrategische Funktion hat) steigt danach der Anteil der erneuerbaren Stromerzeugung an. Nur in den Effizienzszenarien gelingt dies so durchgreifend, dass ein Ausstieg aus der Kohleverstromung gelingt.









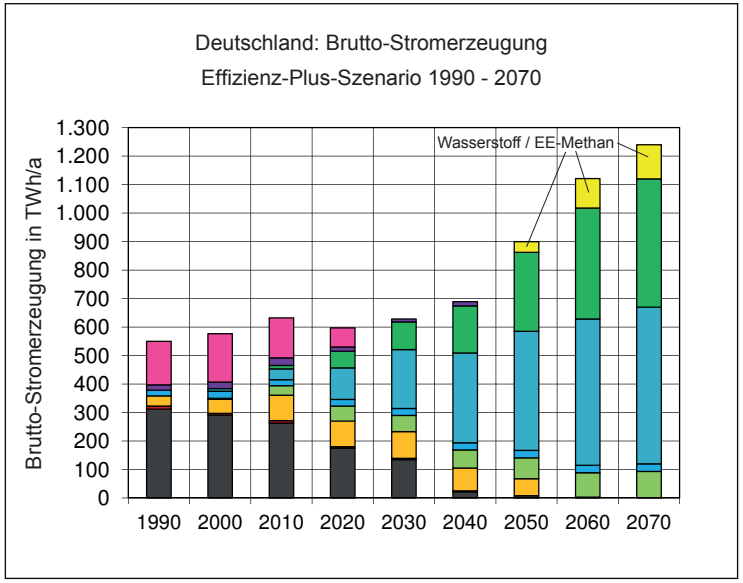


Abbildung 4.12
Darstellung der Bruttostromerzeugung des Kraftwerkparks in Deutschland 1990 - 2070, wie sie in den vier Hauptszenarien modelliert wurde. Im Effizienz-Plus-Szenario sind ab 2050 relevante Anteile aus erneuerbarem Wasserstoff bzw. Methan als saisonaler Speicher an der Stromerzeugung beteiligt (hellgelb dargestellt). Angabe der Werte in TWh/a.

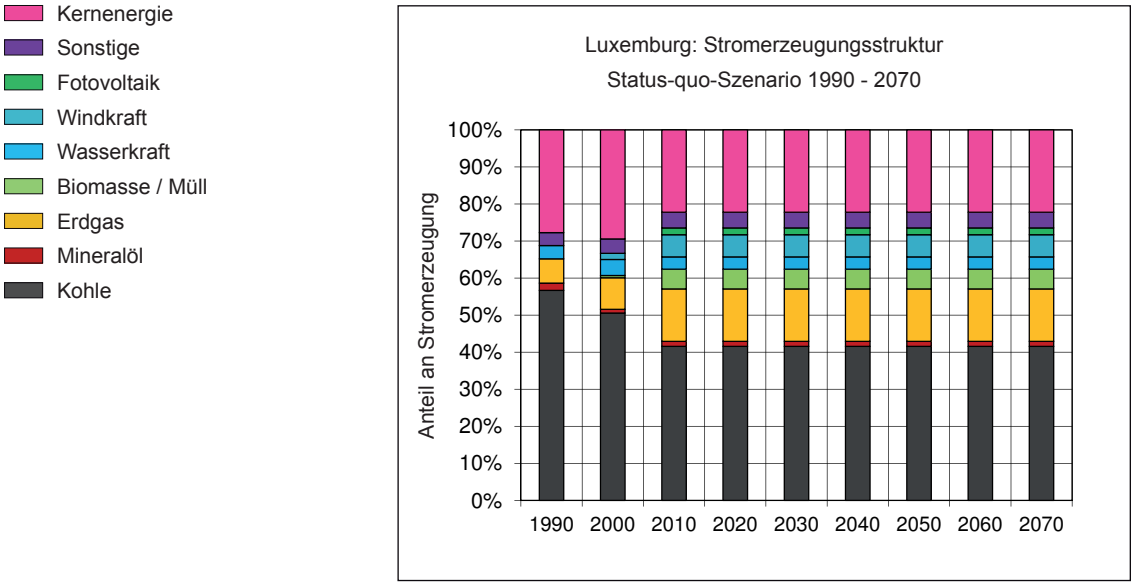
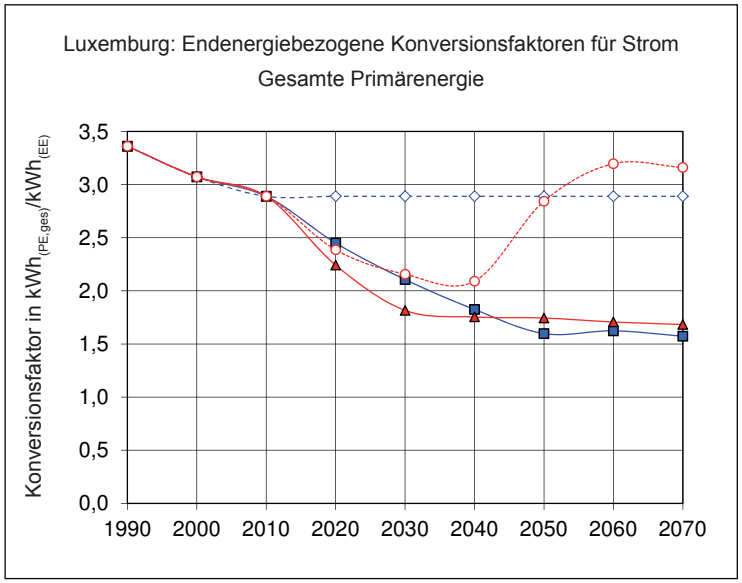
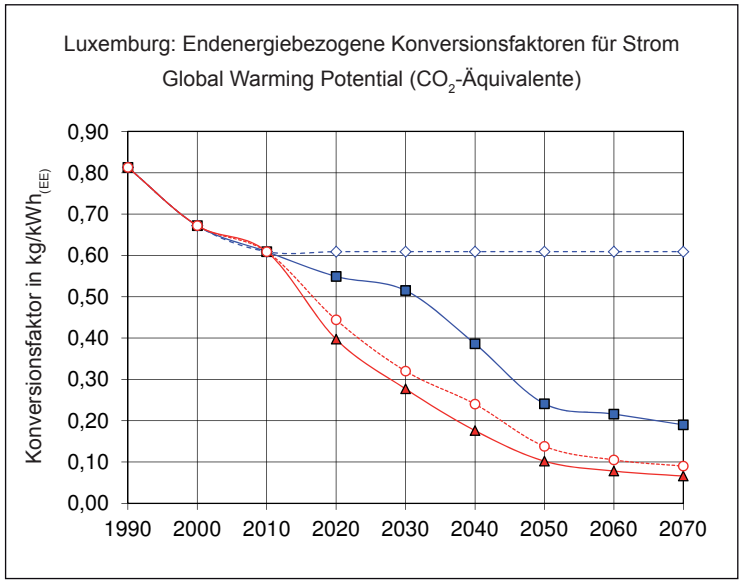


Abbildung 4.13
Struktur der Stromerzeugung Deutschlands im Zeitraum 1990 - 2070, wie sie den vier Hauptszenarien auch für Luxemburg zugrundegelegt wurde. Die Anteile verstehen sich als Strombezug der Haushalte frei Steckdose. Die Entwicklung bis 2010 wurde gemäß den Angaben der Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen (AGEB 2017) zusammengestellt. Die weitere Entwicklung bis 2050/60 folgt verschiedenen Szenarien, die im Text näher erläutert sind. Die Entwicklung bis 2070 wurde von den Autoren modelliert.





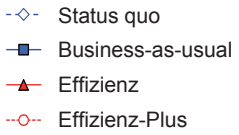
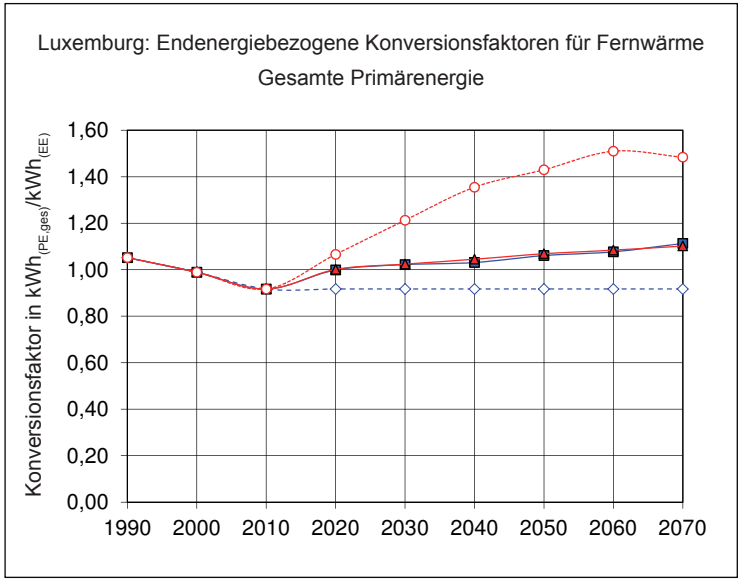
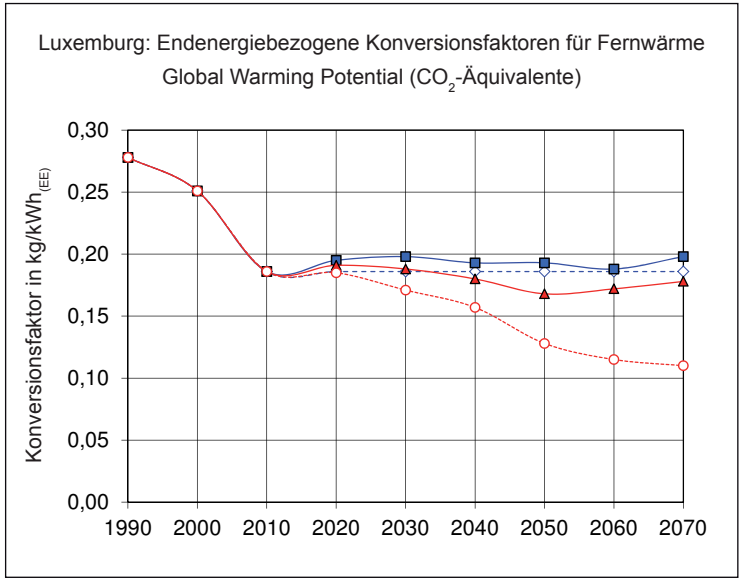


Abbildung 4.14
Entwicklung der endenergiebezogenen Konversionsfaktoren für Netzstrom, basierend auf der Stromerzeugungsstruktur in Abb. 4.12 und der Konversionsfaktoren für die eingesetzten Energieträger gemäß (Vallentin 2011, S. IV-88 und IV-90).





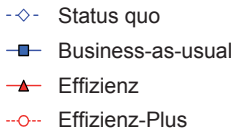


Abbildung 4.15
Entwicklung der endenergiebezogenen Konversionsfaktoren für Fernwärme, basierend auf der Fernwärmeerzeugungsstruktur gemäß (Klobasa et al. 2016), eigenen Berechnungen und Konversionsfaktoren für die eingesetzten Energieträger gemäß (Vallentin 2011, S. IV-88 und IV-90). Weitere Erläuterungen: siehe Text

Sowohl im Business-as-usual-Szenario, als auch im Effizienz-Szenario bleibt das Niveau der Bruttostromerzeugung nach 2015 in etwa konstant. Gänzlich anders verhält es sich im Effizienz-Plus-Szenario. Durch die nahezu vollständig erneuerbare Energieversorgung müssen dort künftig sehr viele der derzeit brennstoffgestützten Systeme (Strom, Wärme, Verkehr) durch stromgestützte Systeme ersetzt werden. Das führt zu einem starken Anstieg der Stromnachfrage in allen Sektoren. Hinzu kommt das Problem der saisonalen Speicherung (vor allem zur Überbrückung der Winterlücke), wodurch der Strombedarf nochmals ansteigt. Ab 2050 sind daher im Effizienz-Plus-Szenario zunehmend relevante Anteile von rückverstromten Wasserstoff oder Methan enthalten, die zuvor aus Stromüberschüssen (vor allem im Sommer) erzeugt und danach zwischengespeichert wurden. In Abbildung 4.12 sind diese als hellgelbe Balkenanteile gekennzeichnet.

Die Struktur der Stromerzeugung ist in Abbildung 4.13 dargestellt. Auch hier zeigen sich die zuvor beschriebenen Unterschiede zwischen den Szenarien, insbesondere was den Ausstieg aus der fossilen Stromerzeugung angeht.

In Abbildung 4.14 sind abschließend die endenergiebezogenen Konversionsfaktoren zur Bestimmung des Primärenergiebedarfs (Primärenergiefaktoren für die gesamte Primärenergie) und die strombedingten Treibhausgasemissionen (CO_2-Äquivalente) zusammengestellt. Besonders auffällig ist der starke Anstieg des Primärenergieaufwandes im Effizienz-Plus-Szenarios, der aufzeigt, dass ein vollständig erneuerbares Energiesystem (auch aufgrund von Verlagerungseffekten) eine gegenüber heute deutlich aufwändigere Stromerzeugung bedingt.

Modellierung der KWK-Produktion (Fernwärme)

Die Modellierung der Kraft-Wärme-Kopplungs-Produktion (KWK) basiert für den Zeitraum 2005 - 2013 auf Daten des luxemburgischen Wirtschaftsministeriums (Klobasa 2017), der zugehörigen Studie Bewertung des Potenzials für den Einsatz der hocheffizienten KWK (Klobasa et al. 2016) sowie Angaben in weiteren Berichten, die Angaben zur bisherigen bzw. künftigen Entwicklung der KWK-Produktion in Luxemburg enthalten.

Die Modellierung der weiteren Entwicklung wurde szenarioabhängig nach folgenden Gesichtspunkten vorgenommen:

- Im Business-as-usual-Szenario wird die KWK-Produktion gegenüber dem momentanen Stand noch etwas weiter ausgebaut während gleichzeitig der erneuerbare Anteil stetig zunimmt.
- Im Effizienz-Szenario wird der Anteil der Biomasse-KWK gegenüber dem Business-as-usual-Szenario deutlich gesteigert. Ab 2050 geht die KWK-Produktion almählich zurück, um dem dann deutlich geringeren spezifischen Wärmebedarf des Gebäudeparks, der über Wärmenetze versorgt wird, gerecht zu werden.
- Im Effizienz-Plus-Szenario geht die KWK-Produktion auf grund des geringeren Wärmebedarfs der Gebäude gegenüber dem Effizienz-Szenario ab 2040 nochmals weiter zurück. Der Brennstoffeinsatz der biomassegestützten Produktion bleibt jedoch identisch mit dem Effizienz-Szenario, d.h. der Anteil der gasgestützten Produktion geht dadurch noch mehr zurück. In diesem explorativen Szenario erfolgt ab 2020/30 allmählich der Einstieg in die Erzeugung von erneuerbarem Methan als Speichermedium bzw. ein entsprechender Bezug über Importe aus dem Gasnetz.

Das Methan wird aus Überschusstrom (z.B. Windkraft, Photovoltaik) über Elektrolyse und Umwandlung von Wasserstoff in Methan über die Zuführung von Kohlendioxid gewonnen. Das so erzeugte Gas kann problemlos im Gasnetz und in Gaskavernen gespeichert werden. Es wird davon ausgegangen, dass entsprechend der Stromerzeugung im Effizienz-Plus-Szenario, diese Speicherstruktur ganz oder teilweise im Ausland (speziell Deutschland) aufgebaut wird (siehe auch Abb. 9.1). Der An-

teil im Netzgas beträgt dort ausgehend von 5 % im Jahr 2030 bis 2050 bereits 50 %. Weil es sich dabei um einen aufwändigen Prozess handelt, ist es sinnvoll, die Rückverstromung in Heizkraftwerken bzw. BHKW´s (anstelle in reinen Gaskraftwerken) vorzunehmen, damit der Gesamtwirkungsgrad (Erzeugung, Speicherung, Rückverstromung) nicht zu stark abnimmt. Die gasgestützte KWK-Produktion ist aus dieser Perspektive von besonderer strategischer Bedeutung, weil sie erzeugerseitig die für diese Speichertechnologie vorteilhafteste Umwandlungsoption darstellt.

Die Zuordnung des Brennstoffeinsatzes erfolgt mit der sog. Finnischen Methode. Dabei wird der primärenergetische Vorteil der gekoppelten Erzeugung zeitabhängig mit Referenzprozessen für die getrennte Produktion von Wärme und Strom abgeglichen. Dieser Vorteil wird dann zunächst dem KWK-Prozess als Ganzes und dann anteilig dem erzeugten Strom und der erzeugten Wärme zugeordnet. In Abbildung 4.14 sind die so ermittelten Primärenergie-Gesamt- sowie die GWP(CO_2-Äquivalent)-Faktoren für die drei Szenarien abgebildet.

Modellierung der Photovoltaikerzeugung

Einen Sonderfall, der seperat vom sonstigen Kohortenmodell betrachtet wurde, stellt die Photovoltaikerzeugung auf Wohngebäuden dar.

Einerseits ist die Solarstromerzeugung bereits im Stromerzeugungsmodell enthalten – und dort als Netzstrom abgebildet. Andererseits ergeben sich durch die Eigennutzung in Wohngebäuden Synergieeffekte, die künftig von strategischem Interesse sein können. Sie wurden im Kohortenmodell deshalb nicht mit abgebildet, weil sie von einer ganzen Reihe von Annahmen abhängen, die nicht mit hinreichender Genauigkeit modelliert werden konnten bzw. die außerhalb des Bilanzrahmens der Studie liegen.

Dazu zählen:

- In welchem Umfang kommen bei Gebäuden mit PV-Anlagen stromgestützte Wärmeversorgungen (Wärmepumpen, Direktsysteme) zum Einsatz?
- Soll die PV-Anlage zusammen mit anderen erneuerbaren Energiesystemen (z.B. BHKW, Kleinwindanlage, thermische Solaranlage, Holzheizung) eingesetzt werden?
- Können mehrere PV-Anlagen im Sinne von Arealnetzen zusammengeschlossen werden, z.B. um eine höhere Eigennutzung zu erzielen?
- Wird in Verbindung mit der PV-Anlage ein Speichersystem installiert (evt. auch zu einem späteren Zeitpunkt)?
- Soll die PV-Anlage auch für Elektromobilität mit genutzt werden?

Diese Fragestellungen und eine Herleitung der Potenziale der Photovoltaikerzeugung werden in Kapitel 10 ausführlich behandelt. Dort wird vor allem zusätzlich betrachtet, in welchem Umfang die auf den Dächern der Wohngebäude installierten Photovoltaikanlagen einen Beitrag zur Deckung des Strombedarfes der Elektromobilität leisten kann.

5 Entwicklung Heizwärmebedarf 2010 - 2070

Auf der Basis des zuvor dokumentierten Kohortenmodells können nun die Ergebnisse zum Wärmebedarf des Wohngebäudeparks in Luxemburg differenziert nach strategischen Gruppen ausgewertet werden. Zunächst wird hier nur der Nutzwärmebedarf für Raumheizung betrachtet. Im nächsten Abschnitt werden dann auch die Heizsysteme miteinbezogen und der Endenergiebedarf für Raumwärme bestimmt. Für den spezifischen Heizwärmebedarf werden die Nutzflächen in Form der Energiebezugsfläche A_{EB} (hier definiert als die beheizte Wohnfläche) als Bezugsgröße verwendet. Der mittlere Heizwärme-Kennwert ist eine Schlüsselgröße für die Energieeffizienz der privaten Haushalte beim Heizbedarf, indem er die energetische Qualität des Wohngebäudeparks zum jeweiligen Zeitpunkt kennzeichnet.

Der Jahresheizwärmebedarf wird für jeden der 70 Gebäudetypen in 5-Jahres-Schritten in Form einer vollständigen Heizwärmebilanz bestimmt. Dabei wird bei jedem Zeitschritt geprüft, ob und welche Erneuerungs- bzw. Sanierungsmaßnahmen anstehen und in welcher energetischen Qualität diese, gemäß den Vorgaben des jeweiligen Szenarios, auszuführen sind. Die Angaben zu den Hausgruppen und den Randbedingungen der energetischen Berechnungen sind in Abschnitt 4 erläutert.

Im Hinblick auf den spezifischen Jahresheizwärmebedarf findet in allen Szenarien ein in etwa lineares Absinken der Werte statt, wenn auch mit unterschiedlicher Geschwindigkeit (siehe Abb. 5.1). Dafür verantwortlich sind einerseits die Effizienzverbesserungen bei allen Gebäudekomponenten sowie den Lüftungskonzepten, die gleichermaßen Neubauten und energetische Modernisierungen im Bestand betreffen, andererseits haben auch die umfassenden Neubauaktivitäten einen Einfluss auf den spezifischen Jahresheizwärmebedarf, weil die Kennwerte im Neubau deutlich unter denen im Bestand liegen. Der Neubau hat nicht alleine die Aufgabe, den steigenden Bedarf nach Wohnflächen zu decken, sondern dient auch als Ersatz für die Wohnungen und Wohnhäuser, die allmählich aus dem Bestand verschwinden, weil sie abgerissen oder anderweitig genutzt werden.

Die Entwicklung startet 1990 mit einem Ausgangswert von 184 kWh/m²a und geht 2010 auf 156 kWh/m²a zurück. Im Business-as-usual-Szenario lassen sich die mittleren Heizwärmebedarfe bis 2050 auf 73 kWh/m²a verringern. Im Effizienz-Szenario sinken sie auf etwa 55 kWh/m²a und im Effizienz-Plus-Szenario liegen sie mit nur 43 kWh/m²a nochmals deutlich tiefer. Die genannten Zahlen verstehen sich immer als Mittelwerte des gesamten Wohngebäudeparks.

Betrachtet man hingegen den gesamten Jahresheizwärmebedarf, so zeigt sich ein anderes Bild (siehe Abb. 5.2). Hier überlagern sich zwei Effekte, nämlich der deutliche Zuwachs an Wohnflächen über den gesamten Betrachtungszeitraum und die gleichzeitig sinkenden spezifischen Kennwerte je Nutzfläche. Im Status-quo-Szenario steigen die Bedarfswerte von 3740 GWh/a im Jahr 1990 bis 2030 auf etwa 4290 GWh/a an und verbleiben auch danach auf hohem Niveau. Im Business-as-usual-Szenario wird bereits eine deutliche Minderung erzielt. Im Jahr 2050 liegt der Bedarf dann bei knapp 2930 GWh/a. Erst unter den Randbedingungen der Effizienz-Szenarien ergeben sich mittel- und langfristig noch weitergehende Reduktionen. Der Heizwärmebedarf im Jahr 2030 beträgt dort 3060 GWh/a und kann bis 2050 auf ca. 2240 GWh/a verringert werden, was etwa 54 % des Bedarfs im Jahr 2010 entspricht. Im Effizienz-Plus-Szenario wird mit 2780 GWh/a im Jahr 2030 bzw. 1660 GWh/a im Jahr 2050 nochmals deutlich weniger

Heizwärme benötigt. Der Bedarf von 2050 entspricht dann nur noch 40% des Ausgangswertes von 2010. Die hier aufgezeigten Entwicklungen setzen sich auch nach dem Jahr 2050 in ähnlichem Tempo weiter fort.

Eine differenzierte Analyse gemäß strategischen Typen (siehe Abb. 5.3.a+b sowie 5.4.a+b) zeigt auf, dass die größten Reduktionspotentiale im voll sanierbaren Bestand liegen. Die Bedarfswerte dieser zwei Gruppen betragen ausgehend vom Jahr 2010 mit 3450 TWh/a (100%) dann im Jahr 2050 im Business-as-usual-Szenario 1650 TWh/a (47,8%), im Effizienz-Szenario 1160 TWh/a (33,6 %) und im Effizienz-Plus-Szenario 930 TWh/a (27,0%). Hingegen können im bedingt sanierbaren Bestand aufgrund der hohen Eingriffsempfindlichkeit nur geringe Effizienzverbesserungen erzielt werden. Der Neubau seit 2010 spielt ebenfalls eine Rolle für den Gesamterfolg. Im Business-as-usual Szenario entfallen im Jahr 2050 ca. 890 TWh/a auf die Neubauaktivitäten seit 2010 während dieser Wert im Effizienz-Szenario ca. 720 TWh/a und im Effizienz-Plus-Szenario sogar nur ca. 410 TWh/a beträgt. Hier zeigt sich, dass der Neubau im Grunde den „Bestand von morgen“ darstellt und wegen des starken Wohnflächenzuwachses mit von strategischer Bedeutung für den Gesamterfolg ist.

Die Auswertung des spezifischen jährlichen Heizwärmebedarfs nach strategischen Typen (Abb. 5.5 a+b sowie 5.6 a+b) zeigt auf, dass die spezifischen Bedarfswerte der Baudenkmale sowie des sonstigen bedingt sanierbaren Bestandes immer deutlich über denen der beiden anderen Gruppen liegen. Der Neubau nach 2010 wiederum weist durchgehend günstigere Heizwärme-Kennwerte auf, als der umfassend sanierbare Bestand, weil der Altbau nur Schritt für Schritt erneuert werden kann und viele Anschlüsse aufweist, die nicht wärmebrückenfrei ausgeführt werden können sowie weitere Umsetzungshindernisse (z.B. nachbarrechtliche Probleme, Platzbedarf) bestehen. Auch die Integration der haustechnischen Anlagen ist im Bestand bedeutend schwieriger als im Neubau.

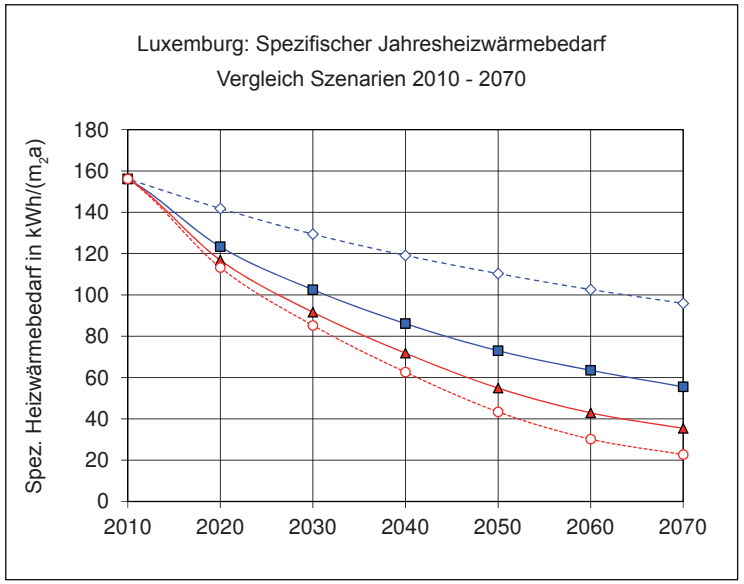


Abbildung 5.1
Entwicklung des spezifischen Jahresheizwärmebedarfs in kWh/m²a in den vier Hauptszenarien im Zeitraum 2010 - 2070.

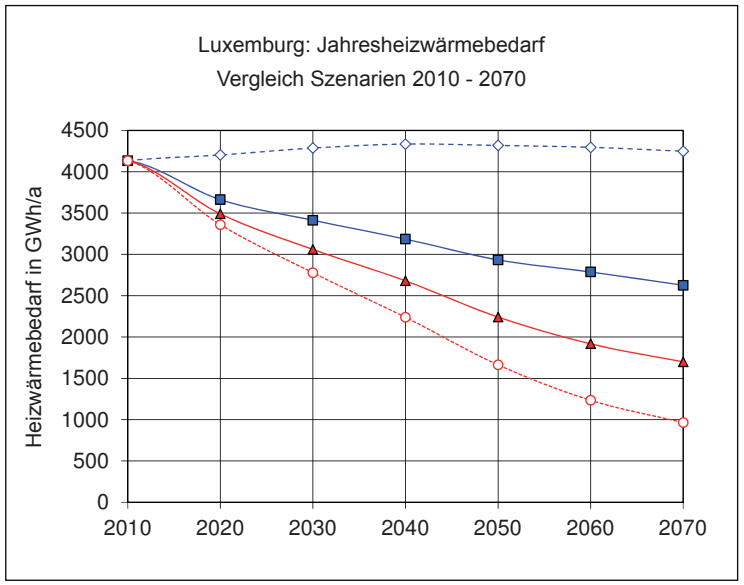
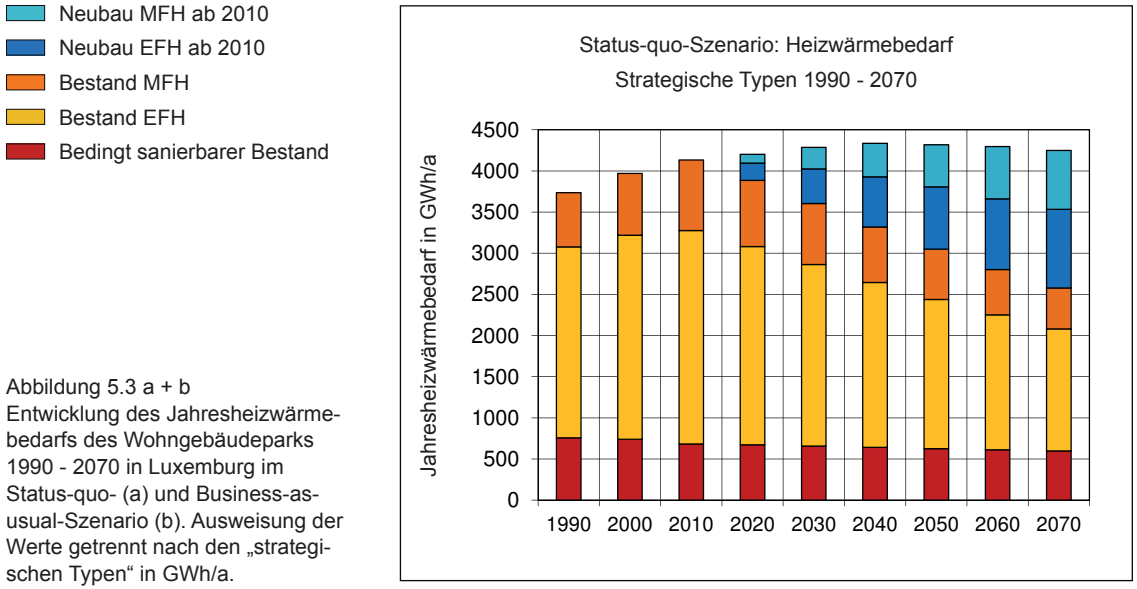


Abbildung 5.2
Entwicklung des Jahresheizwärmebedarfs in GWh/a in den vier Hauptszenarien im Zeitraum 2010 - 2070.



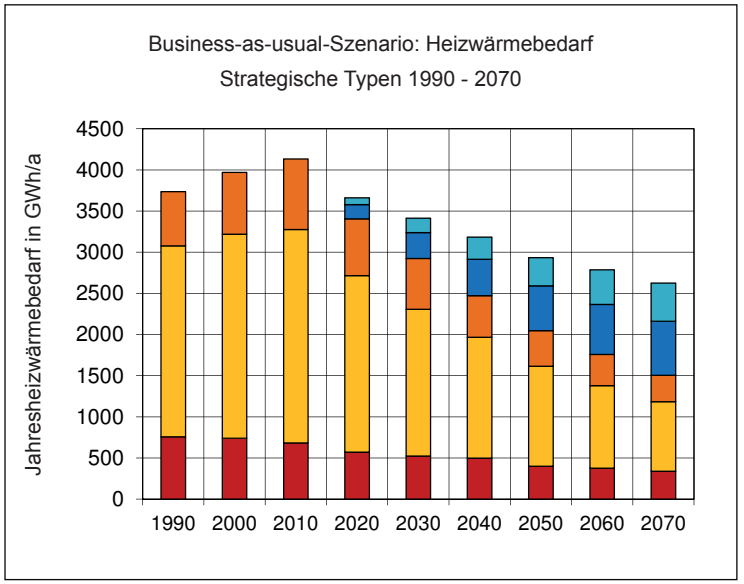
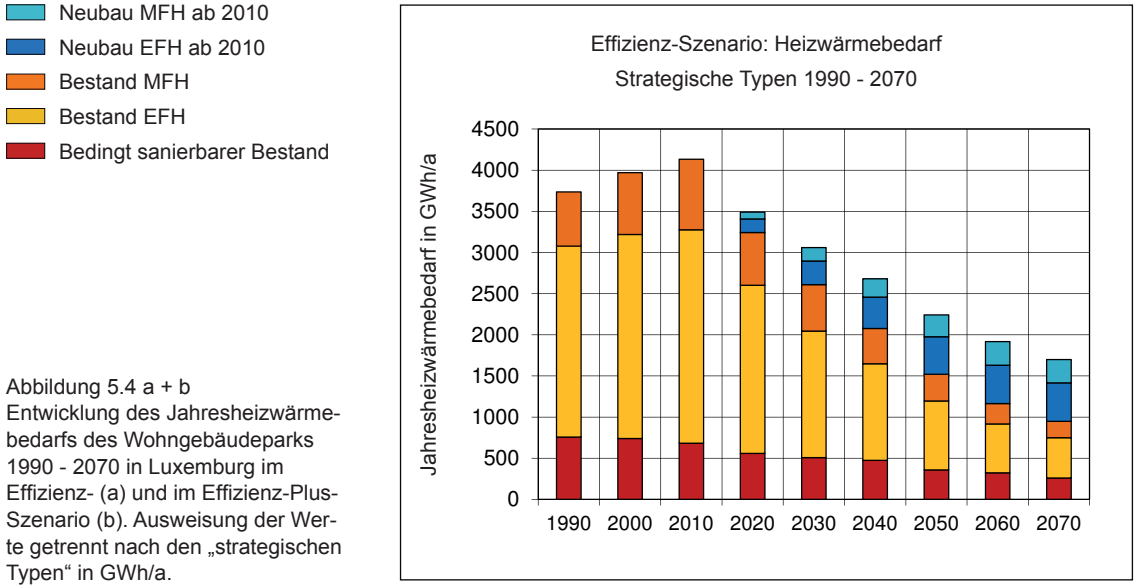


Abbildung 5.3 a + b
Entwicklung des Jahresheizwärmebedarfs des Wohngebäudeparks 1990 - 2070 in Luxemburg im Status-quo- (a) und Business-as-usual-Szenario (b). Ausweisung der Werte getrennt nach den „strategischen Typen“ in GWh/a.



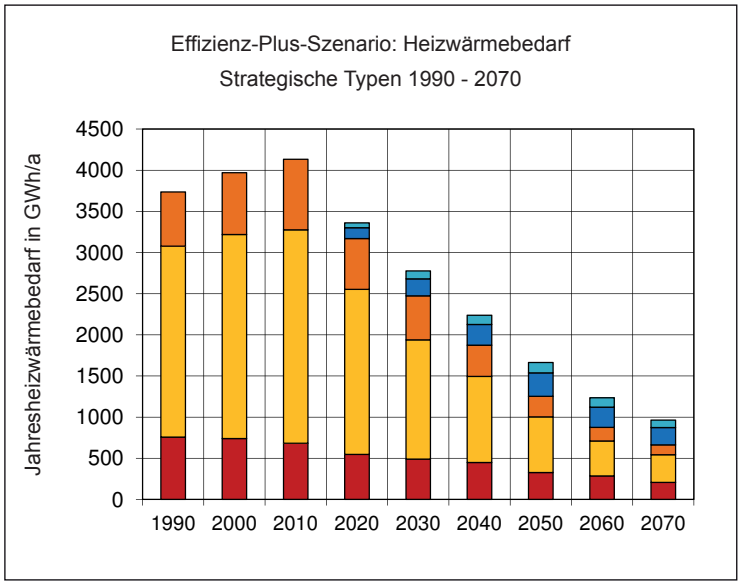
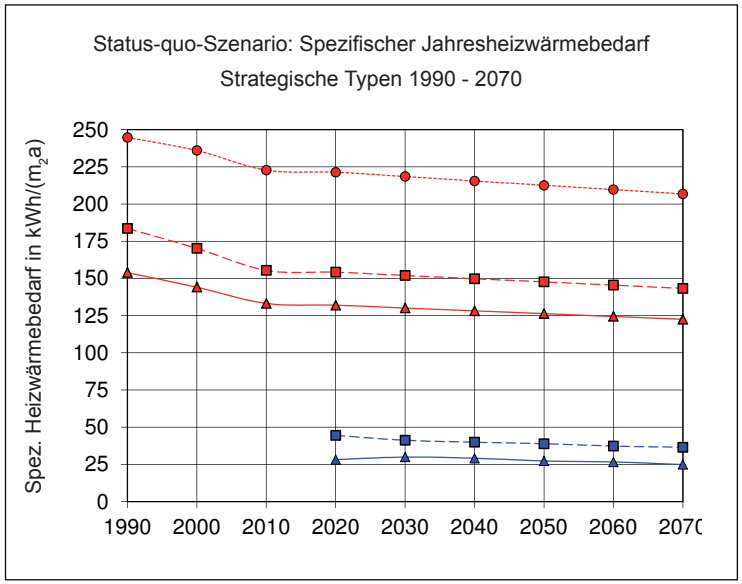
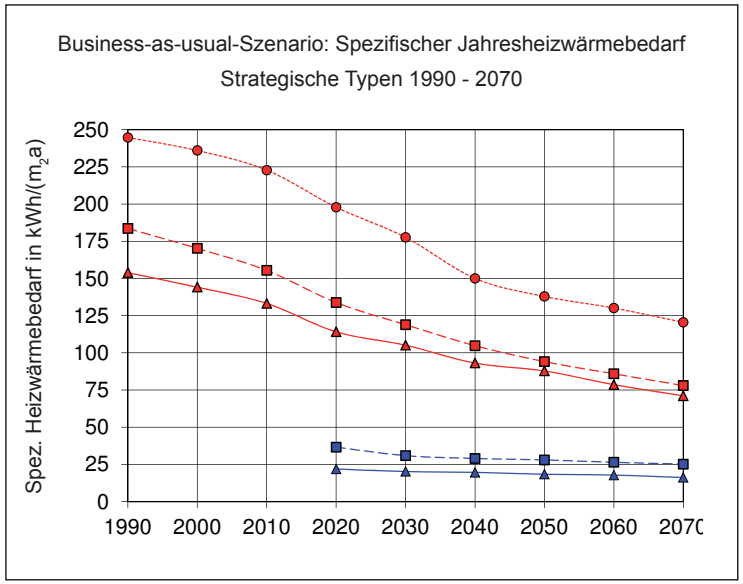


Abbildung 5.4 a + b
Entwicklung des Jahresheizwärmebedarfs des Wohngebäudeparks 1990 - 2070 in Luxemburg im Effizienz- (a) und im Effizienz-Plus-Szenario (b). Ausweisung der Werte getrennt nach den „strategischen Typen“ in GWh/a.





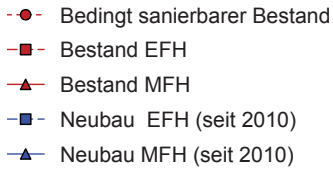
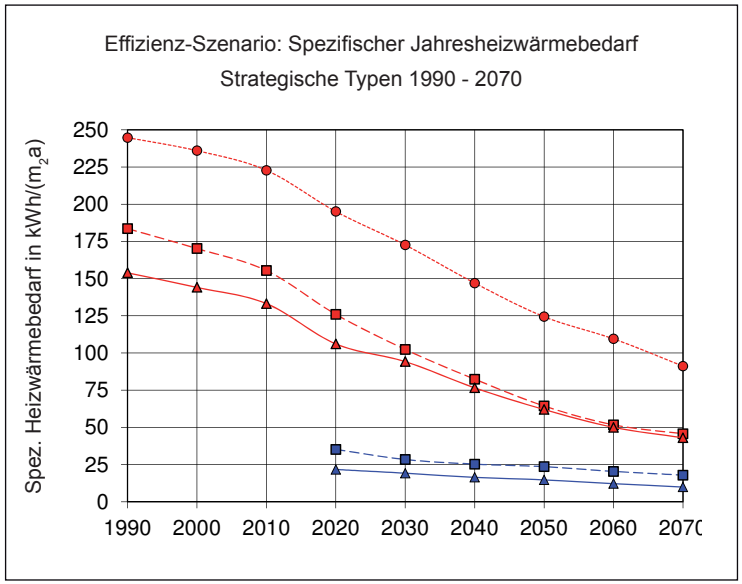
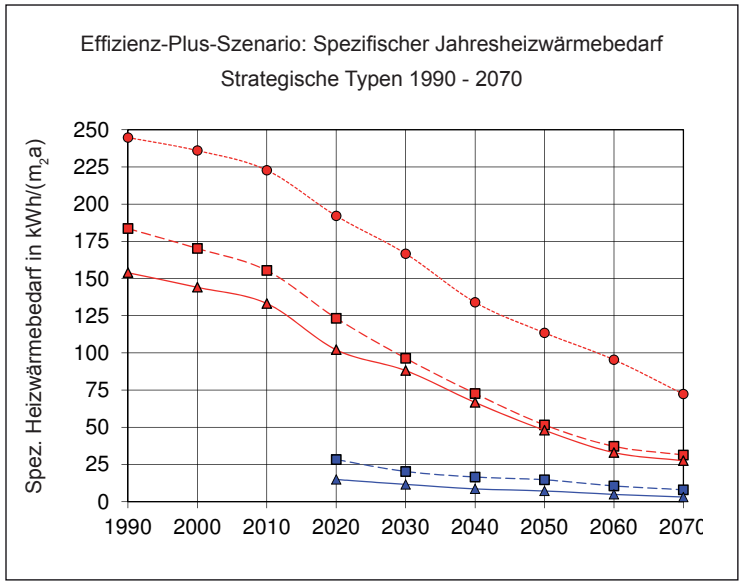


Abbildung 5.5 a + b
Entwicklung des spezifischen Jahresheizwärmebedarfs des Wohngebäudeparks 1990 - 2070 in Luxemburg im Status-quo- (a) und im Business-as-usual-Szenario (b). Ausweisung der Werte getrennt nach den „strategischen Typen“ in kWh/(m²a).





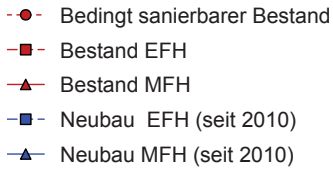


Abbildung 5.6 a + b
Entwicklung des spezifischen Jahresheizwärmebedarfs des Wohngebäudeparks 1990 - 2070 in Luxemburg im Effizienz-Szenario (a) und im Effizienz-Plus-Szenario (b). Ausweisung der Werte getrennt nach den „strategischen Typen“ in kWh/(m²a).

Der entscheidende Unterschied besteht jedoch in den eingesetzten energetischen Qualitäten der verschiedenen Szenarien. Während im Status-quo- (Abb. 5.5.a) und im Business-as-usual-Szenario (Abb. 5.5.b) nur geringe Verbesserungen erreicht werden können, zeigt sich im Effizienz-Szenario (Abb. 5.6.a) ab 2020 der Erfolg der Dämm- und Lüftungsstrategien in deutlich absinkenden spezifischen Heizwärme-Kennwerten. Zu beachten ist hierbei, dass im Effizienz-Szenario bei den Baudenkmalen und im bedingt sanierbaren Bestand vorerst keine Innendämmungen zum Einsatz kommen.
Dies erfolgt erst im Effizienz-Plus-Szenario (Abb. 5.6.b), in dem neben Innendämmungen zusätzlich technologisch besonders hochwertige Komponenten zum Einsatz kommen, deren Effizienz gegenüber heutigen Standards deutlich verbessert ist (hocheffiziente Wärmepumpen, Vakuumdämmung). Dadurch kann nach 2040 auch in den eingriffsempfindlichen Beständen eine spürbare Reduktion des spezifischen Jahresheizwärmebedarfs erreicht werden. Auch in den anderen strategischen Gruppen ergeben sich durchgängig geringere spezifische Bedarfswerte für Heizwärme als im Effizienz-Szenario.

Abschließend werden die Ergebnisse zum Heizwärmebedarf als Absolutwerte in GWh/a in detaillierter Form für jede der 70 Gebäudetypen abgebildet. Durch die hier gewählte Darstellung in Abb. 5.7 - 5.9 wird deutlich, dass sich der Heizwärmebedarf als Summe der Einzelbeiträge aller Gebäudetypen zusammensetzt, die jeweils individuellen Veränderungen unterliegen: Im Bestand lassen sich die Absolutwerte in jedem Typ entweder durch energetische Verbesserungen oder durch Abgänge verbessern. Gleichzeitig kommen durch den Neubau neue Gebäudetypen mit neuen Bedarfswerten hinzu. Erst in der Überlagerung der zeitlich abgestimmten und im Modell genau festgelgten Einzeleffekte kann die Gesamtentwicklung verstanden und auch quantitativ nachvollzogen werden.
Durch die gewählte Modellierung im Kohortenmodell wird die Entwicklung des Heizwärmebedarfs als evolutionärer Prozess schrittweiser Verbesserung erkennbar. Die Gelegenheiten für Effizienzverbesserungen ergeben sich nur nach und nach über den gesamten Betrachtungszeitraum und sind im Modell aus wirtschaftlichen Gründen immer an ohnehin anstehende Instandhaltungs- und Erneuerungsmaßnahmen gekoppelt.

Die Unterschiede in den Szenarien liegen vor allem in den dort jeweils eingesetzten energetischen Qualitäten der Bau- und Technikkomponenten. Liegt eine hohe Eingriffsempfindlichkeit vor, können die davon betroffenen Maßnahmen nicht oder nur in abgeänderter Form durchgeführt werden. Ein Monitoringsystem der Klimaschutzmaßnahmen ist ebenfalls auf eine derartige nach räumlichen und sonstigen Merkmalen (z.B. Eingriffsempfindlichkeit, Baualter, Gebäudetyp) differenzierte Typologie angewiesen.

Der Gebäudepark stellt insgesamt ein eher träges System dar, in dem sich neue Standards aufgrund der langen Nutzungsdauern der Bauteile und Komponenten nur langsam durchsetzen können. Für effektive Minderungspfade sind daher langfristige Orientierungen notwendig. Daher war es sinnvoll als Bezugsjahr für die energetischen Ziele Luxemburgs das Jahr 2050 zu wählen und Zwischenziele für 2030 und 2040 zu definieren.

Die Entwicklung in der Anlaufphase seit 1990 ist ebenfalls aufschlussreich. Es ist gut zu erkennen, dass in diesem Zeitraum kaum energetische Verbesserungen im Hinblick auf den Heizwärmebedarf im Bestand erzielt werden konnten, während durch den Neubau immer neue Energieverbraucher hinzukamen. Eine Trendwende ist erst ab dem Jahr 2000 - 2005 sichtbar. Erst dann gehen die Heizwärme-Bedarfswerte im Bestand allmählich zurück, was ab 2015 dann in allen Szenarien zu absinkenden Werten führt. Dieser Minderungspfad fällt dann in der Folge im Business-as-usual-Szenario nur schwach aus, während im Effizienz-Szenario und noch mehr im Effizienz-Plus-Szenario im Laufe der nächsten Jahrzehnte einen deutlichen Rückgang der Bedarfswerte zur Folge hat.

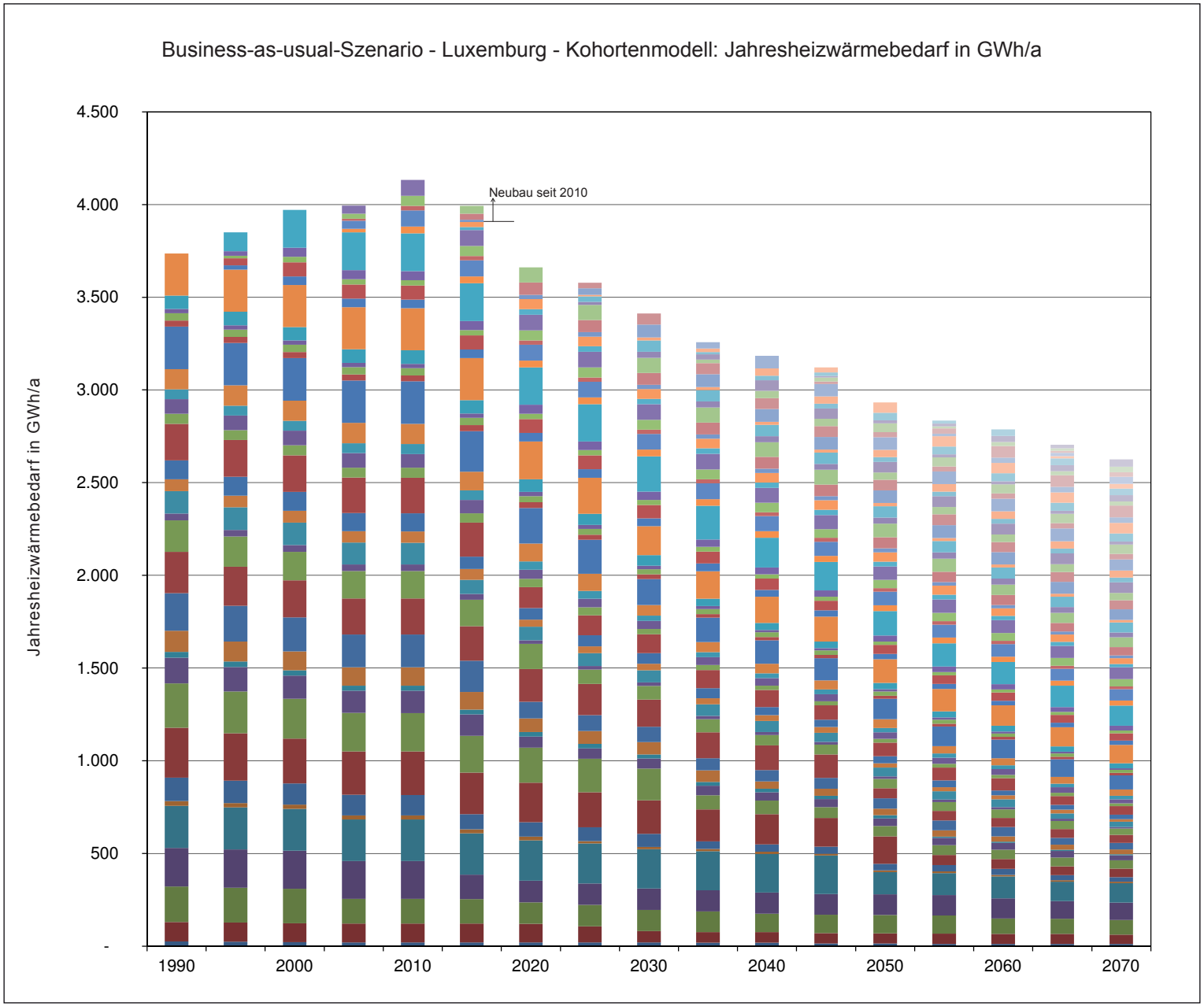


Abbildung 5.7
Darstellung der Ergebnisse zum jährlichen Heizwärmebedarf des Kohortenmodells des Wohngebäudepark Luxemburgs im Business-as-usual-Szenario. Die Werte der insgesamt 70 Gebäudetypen sind aufeinander gestapelt und bilden damit in differenzierter Form die Gesamtentwicklung in 5-Jahres-Schritten im Zeitraum 1990 - 2070 ab.

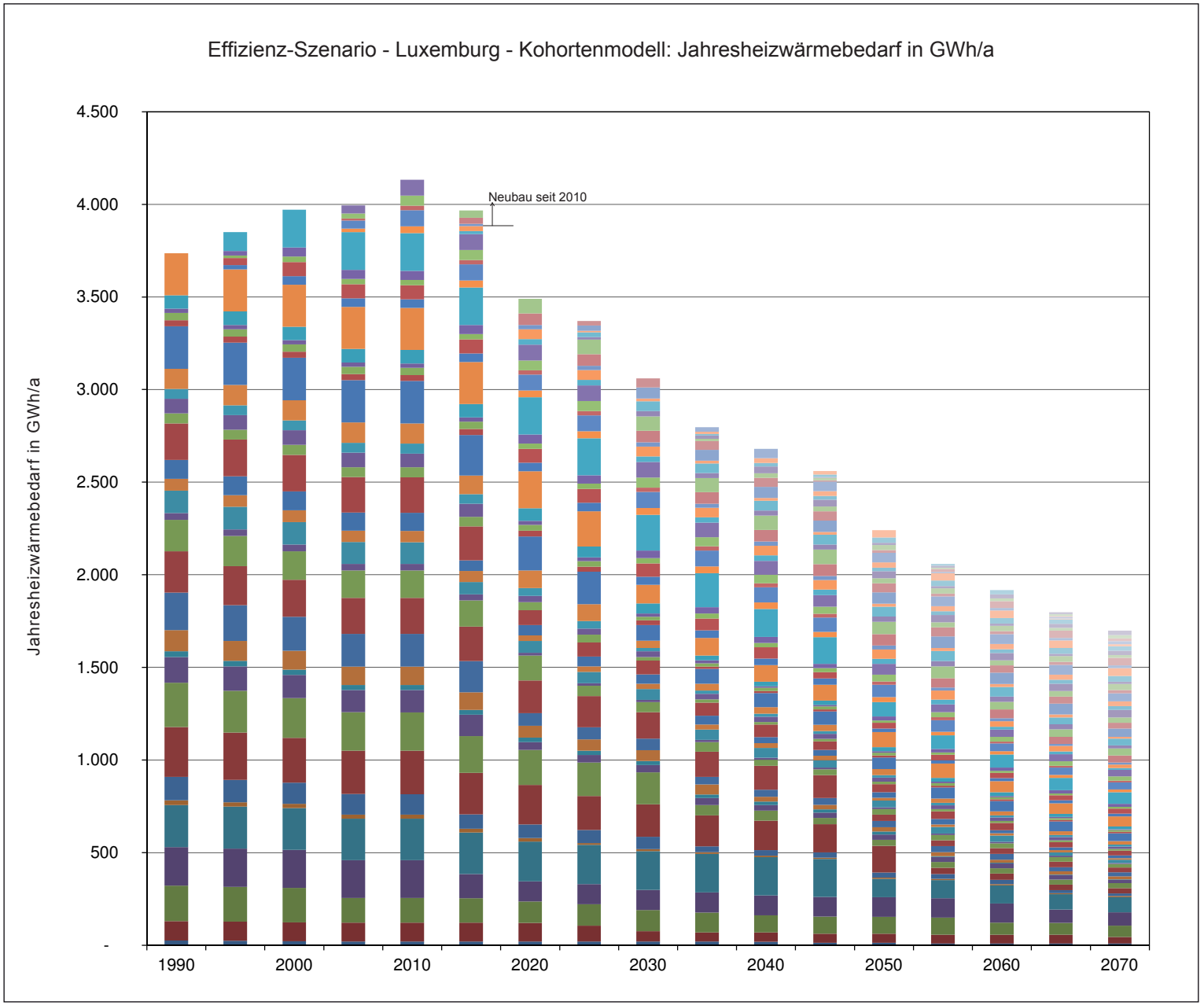
Oben sind in abgeschwächten Farbtönen die Neubauten seit 2010 aufgetragen.

Angabe der Werte in GWh/a.

Abbildung 5.8
Darstellung der Ergebnisse zum jährlichen Heizwärmebedarf des Kohortenmodells des Wohngebäudepark Luxemburgs im Effizienz-Szenario. Die Werte der insgesamt 70 Gebäudetypen sind aufeinander gestapelt und bilden damit in differenzierter Form die Gesamtentwicklung in 5-Jahres-Schritten im Zeitraum 1990 - 2070 ab.

Oben sind in abgeschwächten Farbtönen die Neubauten seit 2010 aufgetragen.

Angabe der Werte in GWh/a.



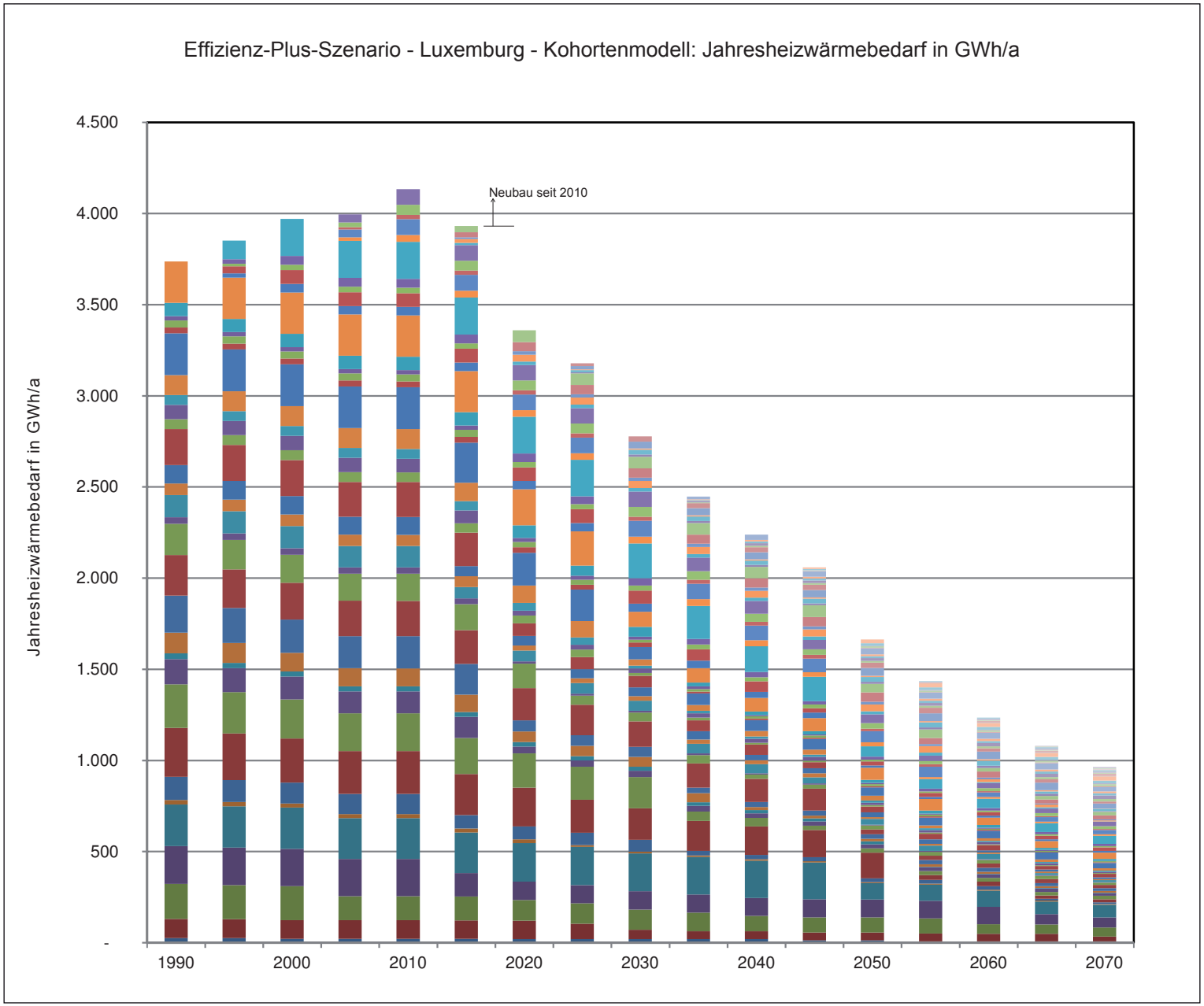


Abbildung 5.9
Darstellung der Ergebnisse zum jährlichen Heizwärmebedarf des Kohortenmodells des Wohngebäudepark Luxemburgs im Effizienz- Plus Szenario. Die Werte der insgesamt 70 Gebäudetypen sind aufeinander gestapelt und bilden damit in differenzierter Form die Gesamtentwicklung in 5-Jahres-Schritten im Zeitraum 1990 - 2070 ab.

Oben sind in abgeschwächten Farbtönen die Neubauten seit 2010 aufgetragen.

Angabe der Werte in GWh/a.

6 Entwicklung Endenergiebedarf 2010 - 2070

An der Entwicklung des Endenergiebedarfs wird deutlich, welche Effizienzfortschritte beim Energieeinsatz insgesamt und in den verschiedenen Handlungsfeldern innerhalb des Betrachtungszeitraums bis 2050 bzw. 2070 erreicht werden können. Erkennbar ist zunächst, dass eine schnelle Verringerung des Endenergieeinsatzes bis 2020 nicht erwartet werden kann. Grund ist die große Trägheit des Gebäudeparks als Energiesystem. Somit kommt es darauf an, die sich bietenden Gelegenheiten konsequent für den Einsatz hoher Qualitäten zu nutzen, wie dies in den Effizienzszenarien der Fall ist. Auf längere Sicht ist dann sehr wohl eine durchgreifende Effizienzsteigerung im Wohngebäudepark erreichbar. Dies stellt im Übrigen auch die Voraussetzung für eine künftige Versorgung Luxemburgs mit erneuerbaren Energien dar. Der eher langsame Prozess hilft, die dafür notwendige Umstellung der Energieversorgungssysteme ohne abrupte Systembrüche durchzuführen. Werden hingegen, wie im Business-as-usual-Szenario modelliert, nur mittlere Qualitäten gewählt, bleiben die Bedarfswerte auch längerfristig auf einem hohen Niveau. Sie stellen, weil dies zu spät – d.h., ab etwa 2030 – erkannt wird, dann ein bedeutendes Hemmnis für das Erreichen der energetischen Ziele Luxemburgs dar.

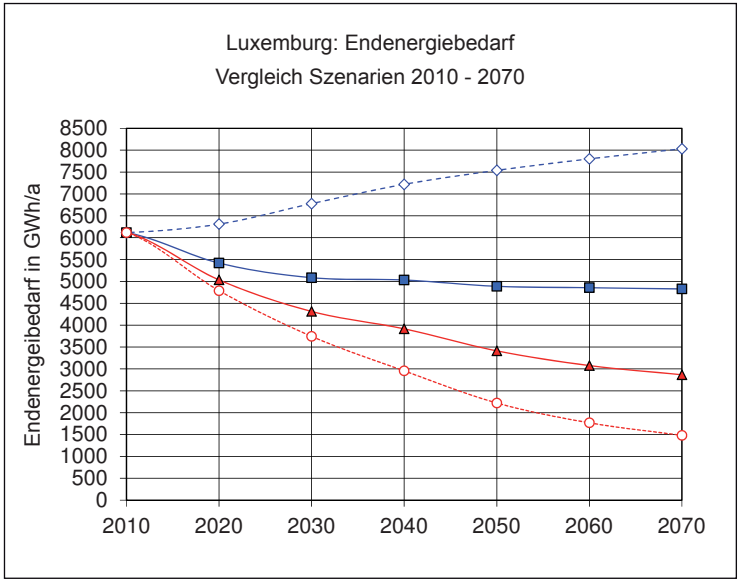


Abbildung 6.1:
Entwicklung des gesamten Endenergiebedarfs in GWh/a in den vier Hauptszenarien im Zeitraum 2010 - 2070.

Von 1990 bis 2010 bleibt der gesamte Endenergieverbrauch mit ca. 6100 GWh/a nahezu konstant. Im Status-quo-Szenario steigen anschließend die Werte wegen der starken Zunahme der Wohnflächen kontinuierlich an. Im Business-as-usual-Szenario ergibt sich eine zwar stetige jedoch nur geringe Minderung der Bedarfswerte, die im Jahr 2030 bei 5090 GWh/a und im Jahr 2050 bei 4900 GWh/a zu liegen kommen. Nur in den Effizienzszenarien kann eine deutliche Reduktion der gesamten Endenergie erreicht werden. Die entsprechenden Kennwerte betragen im Effizienz-Szenario 4310 GWh/a (2030) und 3410 GWh/a (2050) sowie im Effizienz-Plus-Szenario 3740 GWh/a (2030) und 2220 GWh/a (2050).

In Abbildung 6.2 ist der Endenergiebedarf nach Anwendungen im Jahr 2010 denjenigen im Jahr 2030 und 2050 gegenübergestellt. Im Ausgangszustand 2010 dominiert eindeutig der Raumwärmebedarf mit 79 % den Endenergiebedarf. Für die Verbesserung der Effizienz kommt es darauf an, sowohl im Bereich der Gebäudehülle und der Lüftungskonzepte als auch bei der Wärmeversorgung (Erzeugung, Speicherung, Verteilung) kombinierte Strategien im Gesamtbestand zu etablieren. Werden hierbei, wie dies im Business-as-usual-Szenario der Fall ist, nur mittlere Qualitäten eingesetzt, gelingt es kaum, eine spürbare Reduzierung des Endenergiebedarfs in diesem zen-

tralen Anwendungsfeld zu erreichen. Ausgehend von ca. 4900 GWh/a liegen die Bedarfswerte hier im Jahr 2030 bei 3390 GWh/a und im Jahr 2050 bei etwa 2730 GWh/a. Durch den Einsatz höherer Qualitäten wie im Effizienz-Szenario modelliert, sinken diese Werte bereits spürbar ab und betragen 2030 etwa 2980 GWh/a und im Jahr 2050 ca. 1950 GWh/a, was ca. 40 % des Wertes von 2010 entspricht. Erst unter den Bedingungen des Effizienz-Plus-Szenarios gelingt ein durchgreifender Minderungserfolg bei der Raumbeheizung des Gesamtbestandes. Die Werte sinken hier im Jahr 2030 auf 2600 GWh/a und im Jahr 2050 sogar auf 1170 GWh/a ab und betragen dann nur noch knapp ein Viertel des Ausgangswertes von 2010.

Für die Warmwasseranwendungen sind keine oder nur geringe Effizienzverbesserungen erzielbar. Das liegt einerseits an den Hygienebestimmungen (z.B. Schutz vor Legionellen), die hohe Betriebstemperaturen oder aufwändige Verteilsysteme erfordern und andererseits an den steigenden Komfortansprüchen der Nutzer. Informativ seien auch hier die Werte 2030 und 2050 genannt. Ausgehend vom Ausgangswert von ca. 460 GWh/a im Jahr 2010 steigen sie im Business-as-usual-Szenario auf 500 bzw. 580 GWh/a an; im Effizienz-Szenario liegen die Werte bei 470 und 490 GWh/a und schließlich im Effizienz-Plus-Szenario bei 420 und 350 GWh/a. Gerade im Bereich der Warmwasseranwendungen sind daher neue Effizienzstrategien (z.B. Duschwasser-Wärmerückgewinnung) von hohem Interesse. Diese kommen vor allem im Effizienz-Plus-Szenario zum Einsatz.

Bei den Stromanwendungen sind die Unterschiede zwischen den Szenarien besonders groß. Im Business-as-usual-Szenario steigen die Bedarfswerte von 870 GWh/a im Jahr 2010 auf 1400 GWh/a 2030 bzw. 1900 GWh/a im Jahr 2050 an. Hintergründe sind das Bevölkerungswachstum sowie neue Stromanwendungen in den Haushalten, die durch die zurückhaltenden Effizienzverbesserungen der Geräte und Ausstattungen nicht ausgeglichen werden können. In den Effizienzszenarien

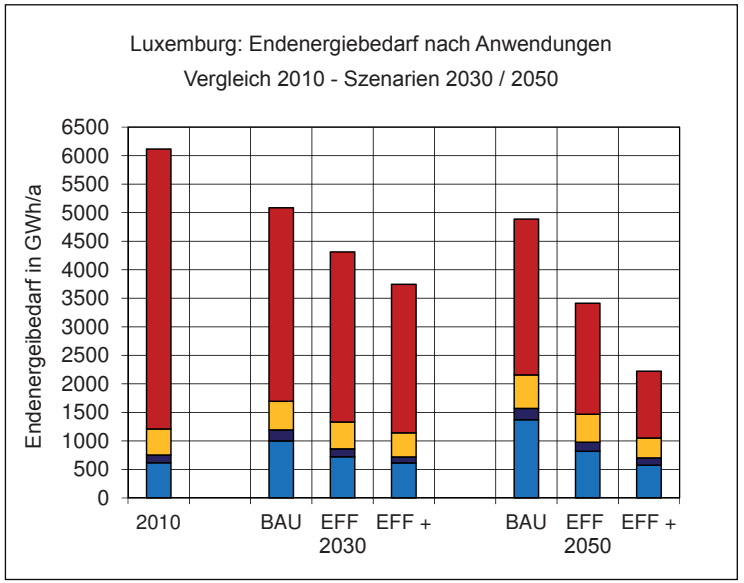


Abbildung 6.2
Entwicklung des Endenergiebedarfs in GWh/a, differenziert nach den Hauptanwendungen in den Wohngebäuden. Vergleich der Werte 2010 mit denen der Jahre 2030 und 2050 im Business-as-usual- (BAU), im Effizienz- (EFF) und im Effizienz-Plus-Szenario (EFF +).

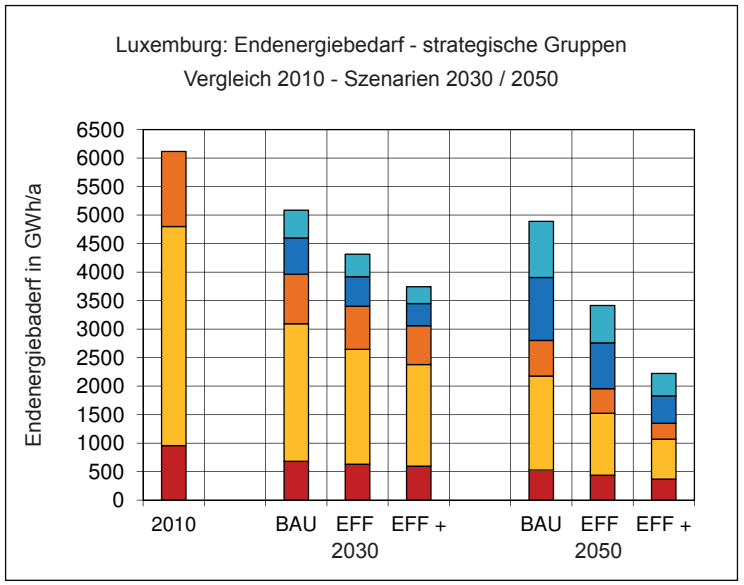
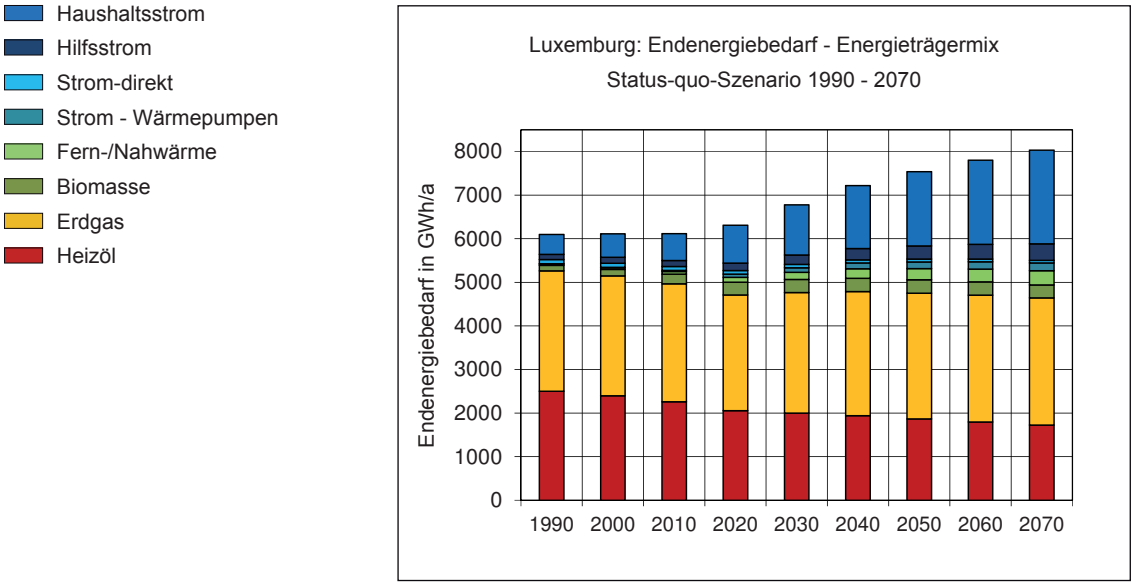
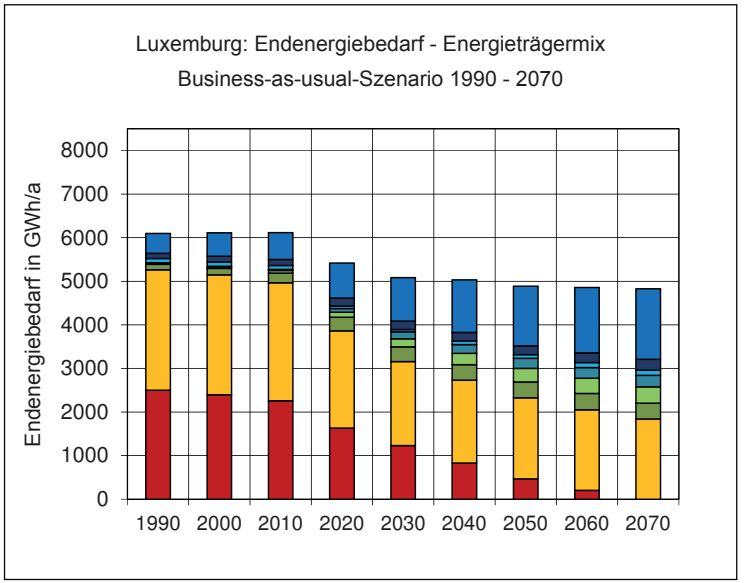
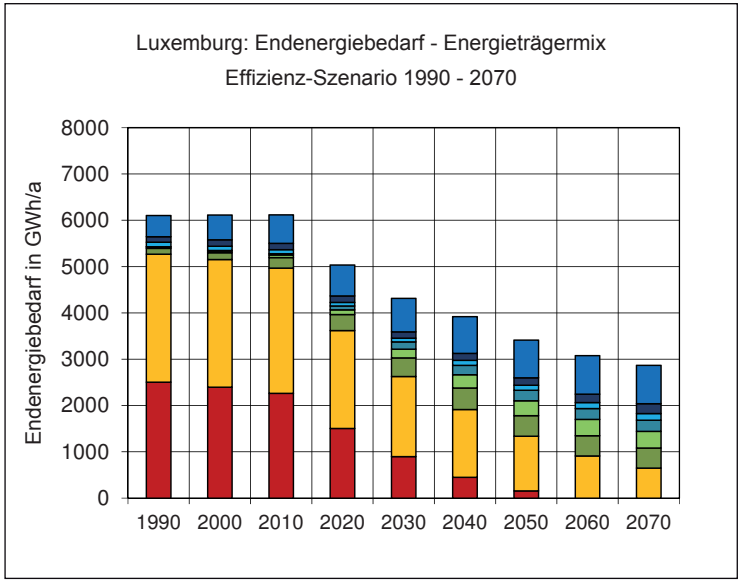


Abbildung 6.3
Entwicklung des Endenergiebedarfs in GWh/a, differenziert nach den strategischen Gruppen. Vergleich der Werte 2010 mit denen der Jahre 2030 und 2050 im Business-as-usual- (BAU), im Effizienz- (EFF) und im Effizienz-Plus-Szenario (EFF +).







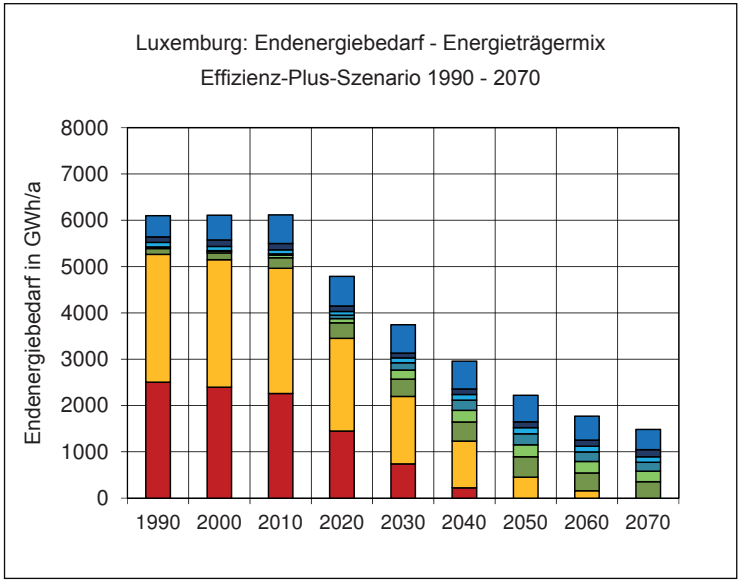


Abbildung 6.4 a - d
Entwicklung des Endenergiebedarfs in GWh/a, differenziert nach den Energieträgern der Versorgungssysteme im Zeitraum 1990 - 2070 für alle vier Hauptszenarien:
a Status-quo-Szenario (links, oben)
b Business-as-usual-Szenario (rechts, oben)
c Effizienz-Szenario (links, unten)
d Effizienz-Plus-Szenario (rechts, unten).
Die Szenarien unterscheiden sich u.a. im Hinblick auf die Zeitpunkte des Ausstiegs aus den fossilen Heizsystemen, speziell Heizöl.

fällt der Anstieg Endenergiebedarf für Strom geringer aus. Dies gelingt vor allem durch Effizienzsteigerungen bei Haushaltsgeräten, Beleuchtung und Kleinanwendungen (z.B. Stand-by-Funktionen, Kommunikationselektronik) aber auch durch Verbesserung der Nutzungseffizienz (z.B. durch Bewegungsmelder, schaltbare Steckdosen und Zeitschaltuhren). Im Effizienz-Szenario liegen die Strombedarfswerte daher 2030 bei 1100 GWh/a und 2050 bei 1310 GWh/a. Bezieht man zusätzlich technologische Fortschritte mit ein, wie dies im Effizienz-Plus-Szenario der Fall ist, steigen die Strombedarfswerte nochmals weniger an. Sie betragen dann etwa 980 GWh/a im Jahr 2030 und 1070 GWh/a im Jahr 2050.

Hinsichtlich Komfort und Anwendungumfang unterscheiden sich die Szenarien nicht untereinander, d.h. es wurden bei den Szenarien keine Suffizienzstrategien modelliert, auch wenn diese durchaus wertvolle Beiträge zur Reduzierung des Endenergiebedarfs leisten könnten (siehe hierzu weiterführende Hinweise im nächsten Unterabschnitt). Dies hat v.a. modelltechnische Gründe, um die Vergleichbarkeit der Effizienzstrategien zwischen den Szenarien sicherzustellen. In Abbildung 6.3 ist die Entwicklung des Endenergiebedarfs in Bezug auf die strategischen Typen dargestellt. Hier wird erkennbar, dass durch den Neubau ab 2010 in relevantem Umfang neue Endenergie benötigt wird. Im Status-quo-Szenario steigen daher die Werte trotz des allmählichen Abgangs von schwierig sanierbaren Bestandsgebäuden stetig an. Im Business-as-usual-Szenario, können die Bedarfswerte durch die energetische Sanierung des Bestandes und die allmähliche Umstellung der Heizsysteme von fossilen auf erneuerbare Systeme spürbar sinken. Ds gilt jedoch nicht für die Stromanwendungen. Die Gesamtreduktion fällt zu gering aus, um von einer Effizienzstrategie sprechen zu können. Im Effizienz-Szenario führt der Einsatz von hohen Qualitäten bei den Bau- und Technikkomponenten trotz des deutlichen Zuwachses der Wohnflächen zu einer deutlichen Abminderung der Wärmebedarfswerte. Hierbei spielt auch der Neubau eine entscheidende Rolle. Noch

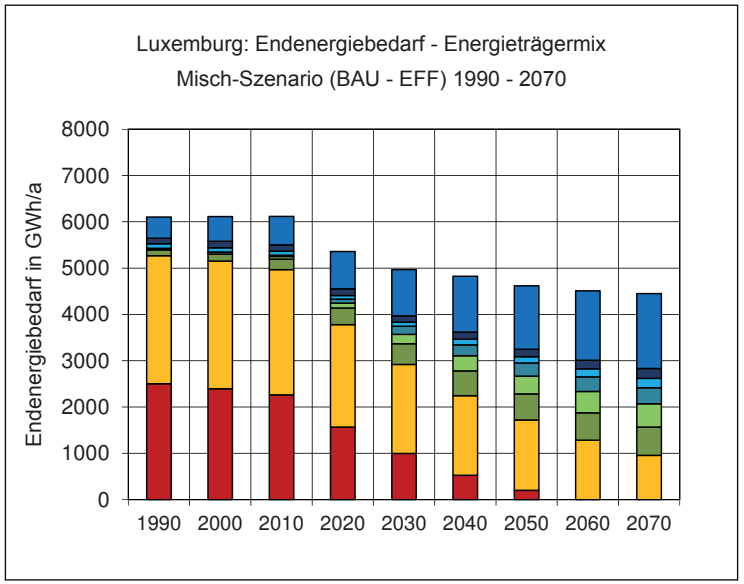


Abbildung 6.5
Entwicklung des Endenergiebedarfs in GWh/a, differenziert nach den Energieträgern der Versorgungssysteme im Zeitraum 1990 - 2070 für das sog. Mischszenario. In diesem wird nur die Energieversorgung, wie im Effizienz-Szenario modelliert, während alles andere wie im Business-as-usual-Szenario angenommen wird.

deutlichere Effizienzerfolge bei den Wärmeanwendungen stellen sich ein, wenn man den technologischen Fortschritt mit einbezieht, wie dies im Effizienz-Plus-Szenario der Fall ist.

Betrachtet man nun die Aufteilung der Endenergiebeiträge getrennt für die Energieträger (Abb. 6.4 a-d) wird zusätzlich sichtbar, wie wichtig der Wandel der Strom- und Wärmeerzeugungsstruktur für den Erfolg der Effizienzstrategien insgesamt ist. Am besten wird dies am direkten Vergleich der Szenarien mit dem Status-quo-Szenario sichtbar: In diesem sind vor allem die Stromanwendungen für den Anstieg des Endenergiebedarfs verantwortlich. Antrieb ist vor allem das Bevölkerungswachstum. In den Effizienzszenarien gelingt es durch stromsparende Ausstattungen und den verstärkten Ausbau erneuerbarer Systeme, dass der Strombedarf spürbar geringer ansteigt. Nur im Effizienz-Plus-Szenario kann er in etwa konstant gehalten werden. Völlig anders gelagert ist die Situation bei den Wärmeanwendungen. Dort weisen alle brennstoffgestützten Systeme (Heizöl-, Erdgas- und Biomasseheizungen) hohe Umwand-

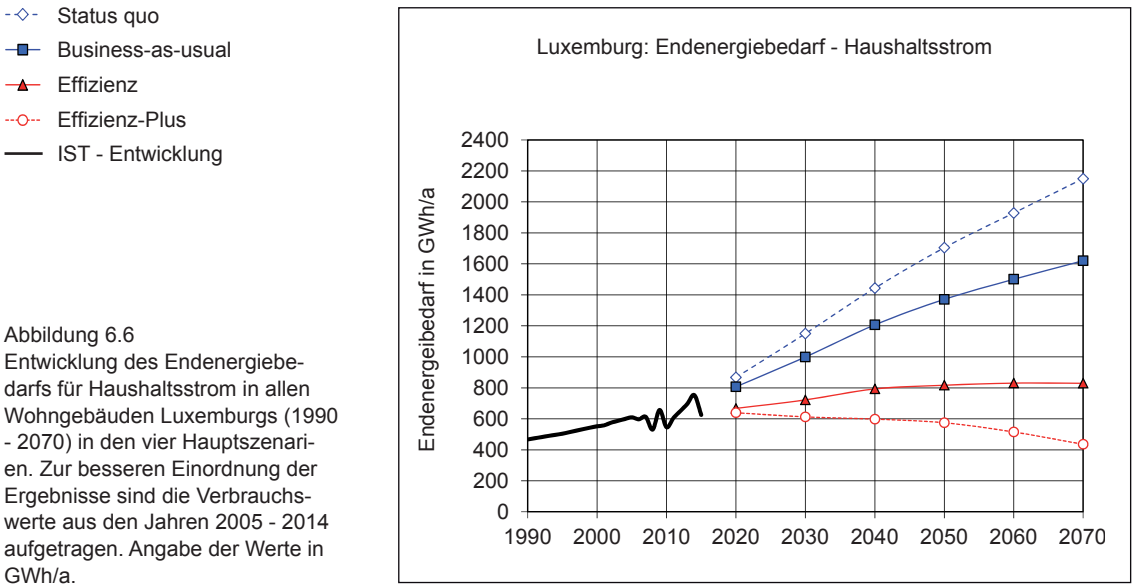


Abbildung 6.6
Entwicklung des Endenergiebedarfs für Haushaltsstrom in allen Wohngebäuden Luxemburgs (1990 - 2070) in den vier Hauptszenarien. Zur besseren Einordnung der Ergebnisse sind die Verbrauchswerte aus den Jahren 2005 - 2014 aufgetragen. Angabe der Werte in GWh/a.

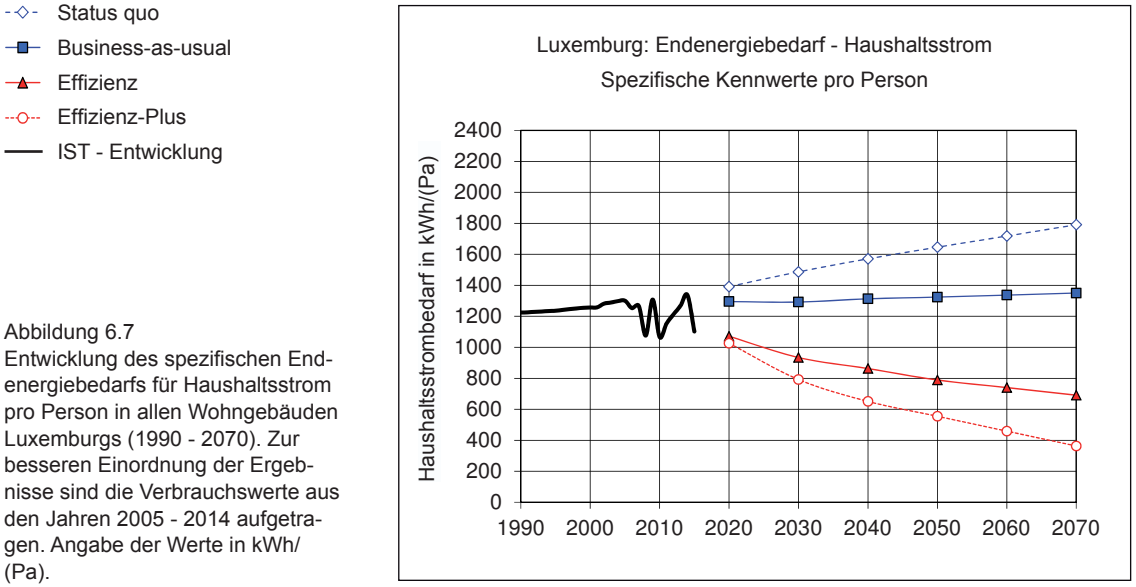


Abbildung 6.7
Entwicklung des spezifischen Endenergiebedarfs für Haushaltsstrom pro Person in allen Wohngebäuden Luxemburgs (1990 - 2070). Zur besseren Einordnung der Ergebnisse sind die Verbrauchswerte aus den Jahren 2005 - 2014 aufgetragen. Angabe der Werte in kWh/(Pa).

lungsverluste auf. Der allmähliche Ausstieg aus den fossil gestützten Systemen führt daher neben dem hier entscheidenden Aspekt der Reduktion der Treibhausgase auch zu einem Absinken des relativen Endenergieeinsatzes je bereitgestellter Wärmeeinheit. Die Szenarien unterscheiden sich hier deutlich im Hinblick auf den möglichen Zeitpunkt eines Ausstiegs aus den fossilen Heizsystemen (zunächst Heizöl, später dann auch Erdgas).

Misch-Szenario

In einem speziellen Misch-Szenario (Abb. 6.5) wurde untersucht, wie sich der Endenergiebedarf entwickeln würden, wenn man die Gebäudequalität (Hülle, Lüftungskonzepte, Warmwasser- und Strom-Nutzenergiebedarf) wie im Business-as-usual-Szenario, die Versorgungsstruktur (Strom- und Wärmeversorgung) jedoch wie im Effizienz-Szenario modellieren würde. Das Ergebnis ist auf den ersten Blick überraschend, weil kaum Unterschiede zum Referenzfall (BAU) existieren (vgl. Abb. 6.4.b). Verantwortlich sind die hohen Nutzenergie-Bedarfswerte im Business-as-usual-Szenario, die durch eine effizientere Versorgungstechnik nicht ausgeglichen werden können.

Ein konsequenter Ausbau erneuerbarer Systeme ist aus technischen und wirtschaftlichen Gründen auf Effizienzsteigerungen der Gebäuden angewiesen. Einerseits ist hierbei die begrenzte Verfügbarkeit bestimmter Energieträger (z.B. Biomasse) zu beachten, andererseits ist ein wirtschaftlicher Betrieb und/oder eine leistbare Energieversorgung stark von den jährlichen Verbrauchswerten und dem zeitlichen Verlauf (Tages- Wochen- und Saisongang) abhängig. Bei Gebäuden mit geringem Heizbedarf ist sowohl die Eigendeckung als auch die jahreszeitliche Gleichmäßigkeit deutlich höher, als bei Gebäuden mittlerer Qualität. Als Ergebnis wird sichtbar, dass eine sinnvolle Effizienzstrategie alle Komponenten des Gesamtsystems umfassen sollte und ein Gegeneinander-Ausspielen von gebäudegebundenen Maßnahmen und den Strategien zur Verbesserung der Versorgungssysteme nicht zum Erfolg führt.

Haushaltsstrombedarf

Der Haushaltsstrom ist der bedeutendste Teilbereich der Stromanwendungen in den Haushalten. Interessant ist der Vergleich mit der bisherigen Entwicklung, die gerade in den letzten Jahren extreme Schwankungen aufwies (Abb. 6.6). Nur im Effizienz-Plus-Szenario kann eine Reduzierung des Haushaltsstrombedarfs erreicht werden. Dort sinken die Bedarfswerte ausgehend von 615 GWh/a im Jahr 2010 bis 2030 auf etwa 610 GWh/a und bis 2050 auf etwa 575 GWh/a leicht ab. Schon im Effizienz-Szenario liegen diese Werte 2030 mit 720 GWh/a und 2050 mit 820 GWh/a spürbar höher. Im Business-as-usual-Szenario steigt mit ca. 1000 GWh/a im Jahr 2030 und ca. 1370 GWh/a im Jahr 2050 der Strombedarf dann deutlich an. Es handelt sich beim Haushaltsstrom daher um ein strategisch besonders wichtiges Handlungsfeld, das u.U. im Rahmen einer seperaten Sonderstudie genauer betrachtet werden sollte.

Die Pro-Kopf-Werte (Abb. 6.7) steigen im Business-as-usual-Szenario aufgrund neuer Anwendungen im Vergleich zum Ausgangswert im Jahr 2010 mit etwa 1230 kWh/(Pa) bis 2030 auf 1290 kWh/(Pa) leicht an, während im Effizienz-Szenario eine Reduzierung auf 930 kWh/(Pa) und im Effizienz-Plus-Szenario sogar auf 790 kWh/(Pa) gelingt. Im Jahr 2050 liegt dieser Wert im Business-as-usual-Szenario nochmals höher bei 1320 kWh/(Pa), während er in den Effizienz-Szenarien mit ca. 790 bzw. 560 kWh/(Pa) deutlich weiter abgesunken ist. Ein ähnliches Bild zeigt sich bei den spezifischen Kennwerten je Haushalt (siehe Abb. 6.8).

Warmwasserbedarf

Der spezifische Warmwasserbedarf pro Person ist in Abbildung 6.9 aufgetragen. In diesem Anwendungsfeld sind die Unterschiede zwischen den Szenarien weniger ausgeprägt als im Bereich Raumwärme und Strom. Jedoch tragen auch die hier möglichen Effizienzverbesserungen zu der positiven Gesamtentwicklung in den Effizienzszenarien bei, die sich ja aus vielen kleinen Einzelbeiträgen zusammensetzt.

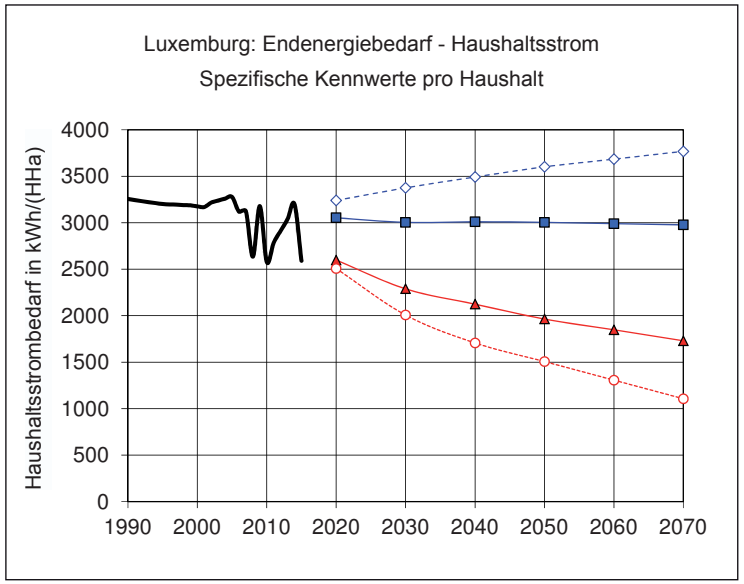


Abbildung 6.8
Entwicklung des spezifischen Endenergiebedarfs für Haushaltsstrom pro Haushalt in allen Wohngebäuden Luxemburgs (1990 - 2070). Zur besseren Einordnung der Ergebnisse sind die Verbrauchswerte aus den Jahren 2005 - 2014 aufgetragen. Angabe der Werte in kWh/(HHa).

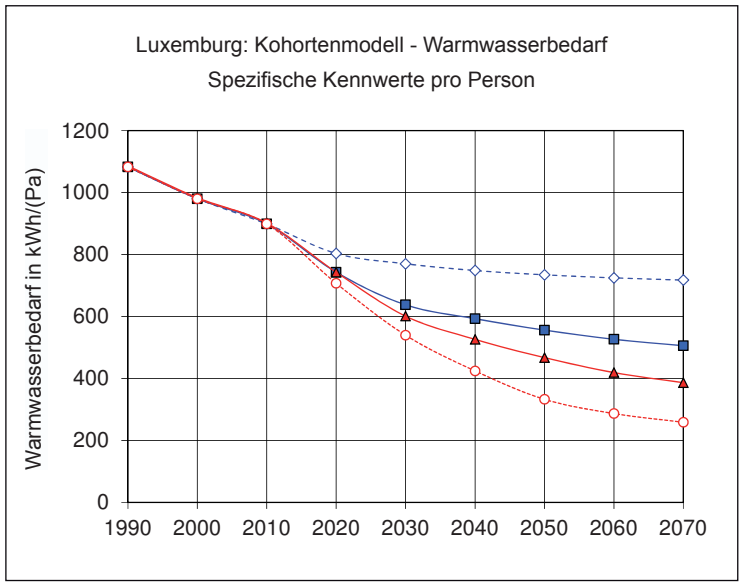


Abbildung 6.9
Entwicklung des spezifischen Endenergiebedarfs für Warmwasser pro Person in den Wohngebäuden Luxemburgs (1990 - 2070). Angabe in kWh/(Pa).

7 Entwicklung Primärenergiebedarf 2010 - 2070

Im Primärenergiebedarf werden die gesamten Energieaufwendungen inklusive der vor- und nachgelagerten Energieketten (z.B. Exploration, Förderung, Transporte, Aufbereitung, Herstellung Kraftwerkpark bzw. Heizzentralen und Entsorgung) zusammengeführt. Erst dann ergibt sich ein zuverlässiger Maßstab für den energetischen Aufwand und seine Verbesserungen im Gesamtprozess hinsichtlich der Energieeffizienz sowie der Reduzierung der Umweltbelastungen (die allerdings je Energieträger unterschiedlich zu bewerten sind).

In Abbildung 7.1 ist die gesamte Primärenergie (fossiler, nuklearer und erneuerbarer Anteil) zusammengeführt und für die vier Hauptszenarien im Zeitverlauf dargestellt. Im Status-quo-Szenario findet eine starke Steigerung des Primärenergiebedarfs statt. Die Werte steigen in den Jahren 2010 bis 2050 von 8980 auf 12900 GWh/a um etwa 45 % an. Dass sie nicht noch weiter ansteigen liegt an den indirekten Effizienzverbesserungen durch Abgang und Ersatz durch deutlich effizientere Neubauten; ähnliches findet im Bereich der Warmwasser- und Stromanwendungen statt. Im Business-as-usual-Szenario ist kein durchgreifender Effizienzerfolg erkennbar. Die Werte sinken bis 2050 nur gering auf etwa 6650 GWh/a ab, was einer Reduktion von gerade einmal 25 % entspricht. Das EU Ziel (-27% bis 2030 ausgehend vom Wert 2005, der für die privaten Haushalte Luxemburgs 8980 GWh/a betrug) wird hier mit 7450 GWh/a (-17 %) deutlich verfehlt. Nach 2050 verbleibt darüber hinaus der Primärenergiebedarf auf diesem hohen Niveau. Im Effizienz-Szenario wird bereits eine deutliche Minderung erzielt. Diese liegt 2030 mit 5900 GWh/a (-34 %) ziemlich genau im Rahmen der EU-Beschlüsse. Auch danach sinken die Werte weiter ab. Die Reduktion beträgt 2050 mit etwa 4790 GWh/a dann -47 % und 2070 mit 4090 GWh/a sogar -54 %. Noch deutlicher fällt die Primärenergiereduktion im Effizienz-Plus-Szenario aus. Hier liegen die Werte mit 5500 GWh/a im Jahr 2030 (-39 %) und 4470 GWh/a im Jahr 2050 (-50%) sowie 3580 GWh/a im Jahr 2070 (-60%) nochmals niedriger. Nur in den Effizienzszenarien findet eine substanzielle Verringerung des Primärenergieeinsatzes statt. Dies hat zudem den Vorteil, dass damit die Voraussetzungen für einen hohen Anteil erneuerbarer Energieträger geschaffen werden können.

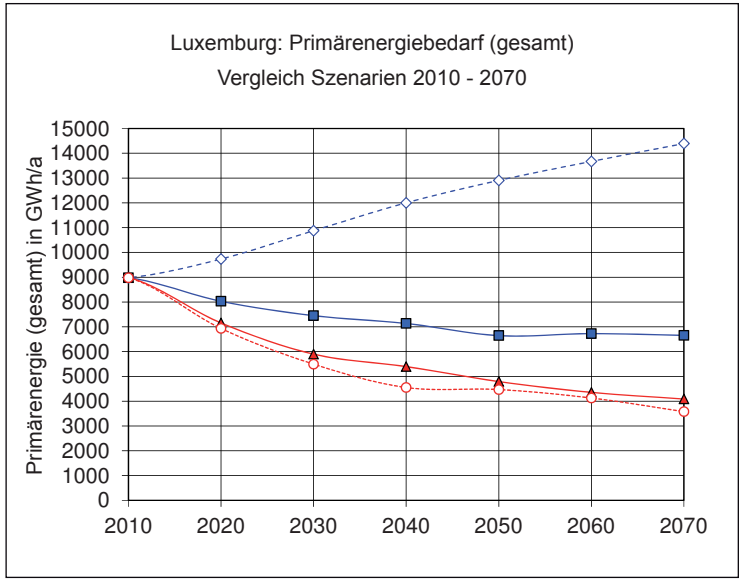


Abbildung 7.1
Entwicklung des jährlichen Primärenergiebedarfs aller Wohngebäude Luxemburgs 2010 - 2070. Angabe in GWh/a.

Betrachtet man in Abbildung 7.2 die Pro-Kopf-Werte für die gesamte Primärenergie, wird hier im Vergleich zur Abbildung 7.1 der Einfluss des Bevölkerungszuwachses deutlich sichtbar. Hier sinken in allen Szenarien die Werte stetig ab, jedoch in stark unterschiedlicher Ausprägung. Interessant ist in diesem Zusammenhang der Bezug zu den Zielen der 2000-Watt-Gesellschaft, einem gut etablierten Effizienzkonzept aus der

Schweiz. Ordnet man aus Gründen der Vereinfachung den privaten Haushalten ein Viertel, d.h. 500 Watt als weltweit verträgliche Dauerleistung pro Person zu, ergibt sich ein Zielwert von 4380 kWh/(Pa). Dieser ist als rote Linie in Abbildung 7.2 eingetragen. Er wird in beiden Effizienzszenarien ziemlich exakt im Jahr 2060 erreicht. Im Business-as-usual-Szenario liegt dieses Ziel, wenn es überhaupt jemals erreicht werden kann, in zeitlich weiter Ferne.

In Abbildung 7.3 ist schließlich der Primärenergiebedarf differenziert nach den einzelnen Energieträgern für das Ausgangsjahr 2010 und als Vergleich zwischen den Szenarien für 2030 sowie 2050 dargestellt. Im Vergleich zur Auswertung der Endenergiebilanz (siehe Abb. 6.4) wird hier der spürbar höhere Primärenergieeinsatz für die Stromerzeugung sichtbar. Indirekt wird daran sichtbar, dass Wärme und Strom unterschiedliche energetische Wertigkeiten aufweisen. Dieser Effekt wird jedoch im Betrachtungszeitraum immer geringer, weil der Anteil der nicht brennstoffgestützen erneuerbaren Energieträger, wie Wasser- und Windkraft oder Photovoltaik immer mehr zunimmt. Weil diese gemäß der 100%-Methode ohne Wirkungsgradverluste gerechnet werden, sinkt entsprechend der Primärenergiebedarf auch wegen dieser definitorischen Festlegung ab.
Gerade in den Effizienzszenarien nähern sich Brennstoff- und Stromeinsatz immer stärker an. Daran wird die grundsätzliche Tendenz sichtbar, dass eine erneuerbare Energieversorgung viel weniger auf Brennstoffe gestützt ist, als die heutige. Das gilt sowohl für die Wärme- als auch die klassischen Stromanwendungen. Dabei ist zusätzlich zu beachten, dass im Bereich der Mobilität neue Stromanwendungen durch Elektromobilität hinzukommen werden, die in der Summe dazu führen können, dass trotz Effizienzverbesserungen in allen Sektoren, am Ende der gesamte Strombedarf langfristig wieder ansteigt. Dieser Aspekt wird in Kapitel 10 nochmals aufgegriffen und weiter vertieft, während er in der Primärenergiebilanz des Kohortenmodells zunächst nicht berücksichtigt wurde.

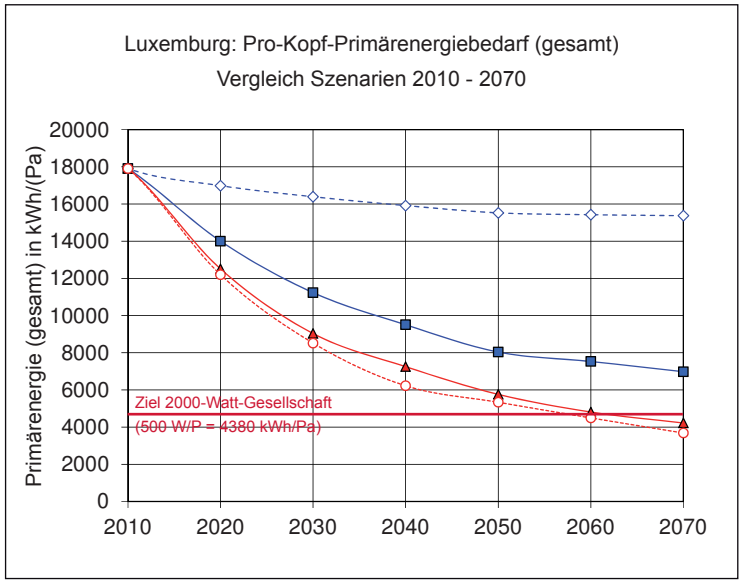


Abbildung 7.2
Entwicklung des Pro-Kopf-Primärenergiebedarfs in kWh/(Pa) in den vier Hauptszenarien im Zeitraum 2010 - 2070. Zum besseren Vergleich ist das Ziel der 2000-Watt-Gesellschaft für die privaten Haushalte (500 W/(Pa) bzw. 4380 kWh/(Pa) als rote Linie eingetragen. Dieses Ziel wird in den Effizienzszenarien etwa 2060 erreicht.

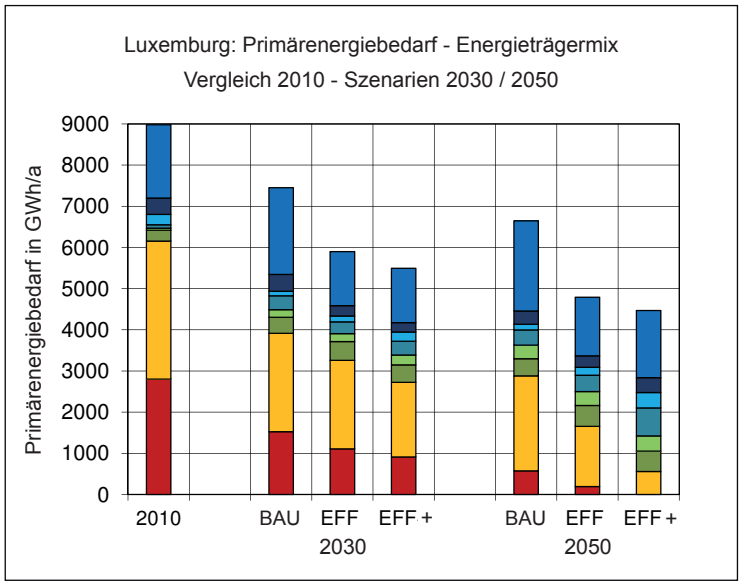


Abbildung 7.3
Entwicklung des Primärenergiebedarfs in GWh/a, differenziert nach Energieträgern in den Wohngebäuden. Vergleich der Werte 2010 mit denen der Jahre 2030 und 2050 im Business-as-usual- (BAU), im Effizienz- (EFF) und im Effizienz-Plus-Szenario (EFF +).

8 Entwicklung Treibhausgasemissionen 2010 - 2070

Der Klimaschutz stellt im Hinblick auf die Energiesysteme derzeit das gravierendste und drängendste Nachhaltigkeitsproblem dar und nicht die Ressourcenfrage. Von daher stellt die Reduzierung der Treibhausgasemissionen eine Schlüsselfrage der Energiepolitik Luxemburgs dar. Für die Auswertung sind zusätzlich die Zielsetzungen der EU (Reduktion der nicht unter den Emissionshandel fallenden Verbraucher im Jahr 2030) und der Pariser Klimakonferenz (Einhaltung des 2-Grad Ziels, besser des 1,5-Grad Ziels) zu beachten. Leider ist die Zuordnung dieser Ziele zu bestimmten Sektoren oder Energiedienstleistungen nicht immer einfach. In dieser Untersuchung wird daher Bezug genommen zu einer Studie, die anhand eines Vergleichs verschiedener Gerechtigkeitsgrundsätze zulässige Pro-Kopf-Emissionen für das Jahr 2050 in Form von sog. „Zielfeldern“ bestimmt hat (Kern 2016).

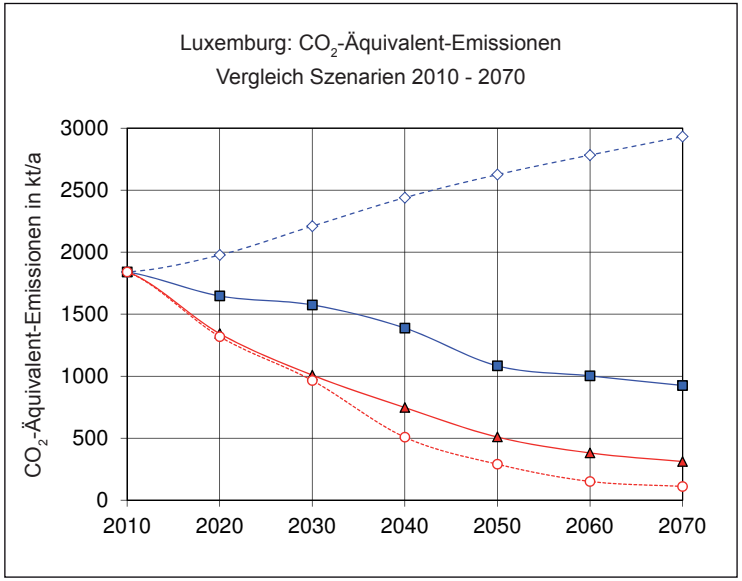


Abbildung 8.1
Entwicklung der Treibhausgasmissionen in kt/a CO_2-Äquivalenten in den vier Hauptszenarien im Zeitraum 2010 - 2070.

Grundlage bildet das gerade noch zulässige Globalbudget von Treibhausgasemissionen im Zeitraum bis 2050, die mit dem 2-Grad-Ziel vereinbar sind. Das Zielfeld für die privaten Haushalte beträgt in allen mitteleuropäischen Staaten 100 – 500 kg/(Pa) CO_2-Äquivalente, und muss im Zeitraum 2045 – 2055 erreicht werden. Die Güte eines Klimaschutzkonzeptes bestimmt sich darüber, ob bzw. in welchem Bereich die Entwicklung der Pro-Kopf-Emissionen eines Minderungspfades in das Zielfeld „eintaucht“. Damit können unterschiedliche Konzepte und Maßnahmenbündel auf einfache und zugleich nachvollziehbare Art im Hinblick auf den Klimaschutz beurteilt werden.

In Abbildung 8.1 sind zunächst die gesamten CO_2-Äquivalent-Emissionen der privaten Haushalte über den Zeitraum 1990-2070 aufgetragen. Die Verläufe ähneln sehr denen für die gesamte Primärenergie. Im Status-quo-Szenario steigen die Treibhausgasemissionen stetig an und sind im Jahr 2050 mit ca. 2630 kt/a um ca. 35% höher als 1990. Im Business-as-usual-Szenario sinken die Emissionen bis 2030 auf 1570 kt/a ab, was einer Reduktion um ca. 19 % gegenüber dem Stand von 1990 bzw. um 15 % gegenüber dem Stand von 2010 entspricht. Im Jahr 2050 liegt dieser Wert bei 1080 Kt/a und weist damit eine Reduktion um 45 % bzw. 41% auf.

Im Effizienz-Szenario sinken die Treibhausgasemissionen viel deutlicher ab. Im Jahr 2030 betragen sie 1010 kt/a (Reduktion um 48 % bzw. 45 %) und im Jahr 2050 nur noch ca. 510 kt/a (Reduktion um 74 % bzw. 72 %). Im Effizienz-Plus-Szenario wird schließlich ein durchgreifendes Klimaschutzkonzept verwirklicht. Bereits im Jahr 2030 betragen die CO_2-Äquivalent-Emissionen nur noch ca. 960 kt/a (Reduktion um 51 % bzw. 48 %) und sinken danach bis 2050 weiter auf etwa 290 kt/a (Reduktion um 85 % bzw. 84 %). Mit Ausnahme im Status-quo-Szenario sinken die Treibhausgasemissionen in allen Szenarien auch nach 2050 weiter ab.

Im Hinblick auf die Pro-Kopf-Treibhausgas-Emissionen zeigt sich zwar in allen Szenarien eine Minderung (Abb. 8.2), im Status-quo-Szenario fällt diese jedoch nur sehr gering aus und bleibt auch im Business-as-usual-Szenario weit vom genannten Klimaschutzziel entfernt. Nur im Effizienz-Plus-Szenario wird 2050 mit 390 kg/(Pa) ein Wert erreicht, der mit dem 2-Grad-Ziel kompatibel ist. Im Effizienz-Szenario wird mit 670 kg/(Pa) der Zielwert von 500 kg/(Pa), der nach dem derzeitigen Stand der Wissenschaft in guter Übereinstimmung mit dem 2-Grad-Ziel steht, bereits um etwa 35 % überschritten.

Die hier vorgenommene Beurteilung wird dann besser nachvollziehbar, wenn man die kombinierte Darstellungsform eines Klimaschutzkorridors mit Zielfeld (Kern 2016) wählt, wie dies in Abbildung 8.3 der Fall ist. Als Bezugsjahr ist das Jahr 1990, in dem die Rio-Konferenz stattgefunden hat, gewählt, weil sich die globalen und nationalen Klimaschutzpfade bzw. Minderungsziele in der Regel darauf beziehen. Nun ist klar zu erkennen, dass das Status-quo-Szenario bereits 2030 und das Business-as-usual-Szenario etwa 2040 aus dem grau markierten Klimaschutzkorridor austreten. Nur die beiden Effizienzszenarien bleiben im Korridor und können daher auch als Klimaschutzszenarien bezeichnet werden. Während das Effizienz-Szenario jedoch nur knapp in das Zielfeld eintaucht (und damit gerade noch mit dem 2-Grad-Ziel in Übereinstimmung gebracht werden kann), kommt das Effizienz-Plus-Szenario im unteren Bereich des Zielfeldes zu liegen. Es kann von daher als vollwertiges Klimaschutzszenario eingestuft werden.

In Abbildung 8.4.a-d werden für alle vier Szenarien die Treibhausgasemissionen getrennt für die Energieträger ausgewiesen. Es ist besonders aufschlussreich zu sehen, wie sich hier, vor allem unter den gewählten Randbedingungen in den beiden Effizienzszenarien, die Effizienzstrategie und der daran gekoppelten Ausbau der erneuerbaren Energiesysteme gegenseitig stützen und erst in Kombination zu einer deutlichen Reduktion der energiebedingten Klimagasemissionen führen.

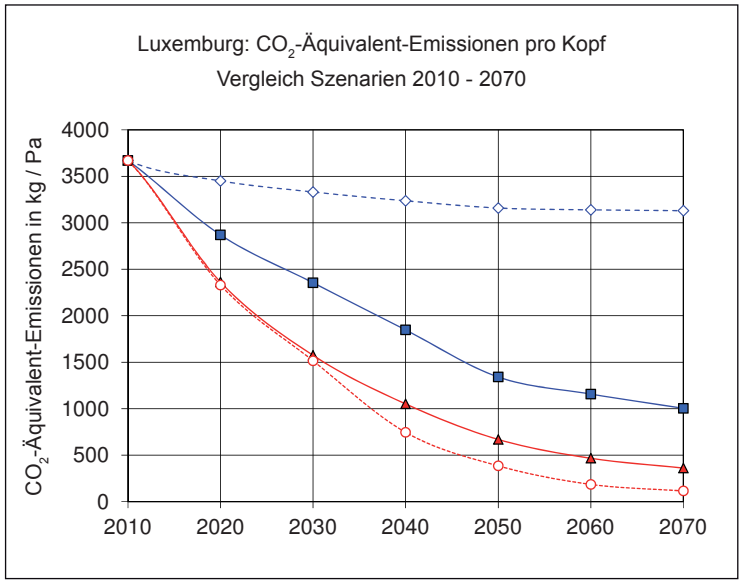


Abbildung 8.2
Entwicklung der Pro-Kopf-Treibhausgasemissionen in kg/(Pa) CO_2-Äquivalenten in den vier Hauptszenarien im Zeitraum 2010 - 2070.

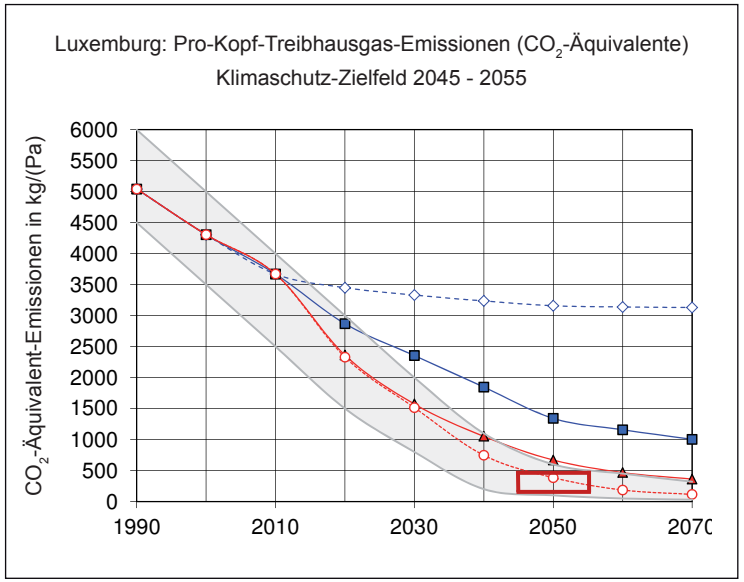


Abbildung 8.3
Entwicklung der Pro-Kopf-Treibhausgasemissionen in kg/(Pa) CO_2-Äquivalenten in den vier Hauptszenarien im Zeitraum 1990 - 2070 und deren Bezug zum sog. Klimaschutz-Zielfeld 2045 - 2055, wie in (Kern 2016) entwickelt. Nur die Effizienzszenarien stehen in Übereinstimmung mit dem 2-Grad-Ziel der Pariser Klimakonferenz.

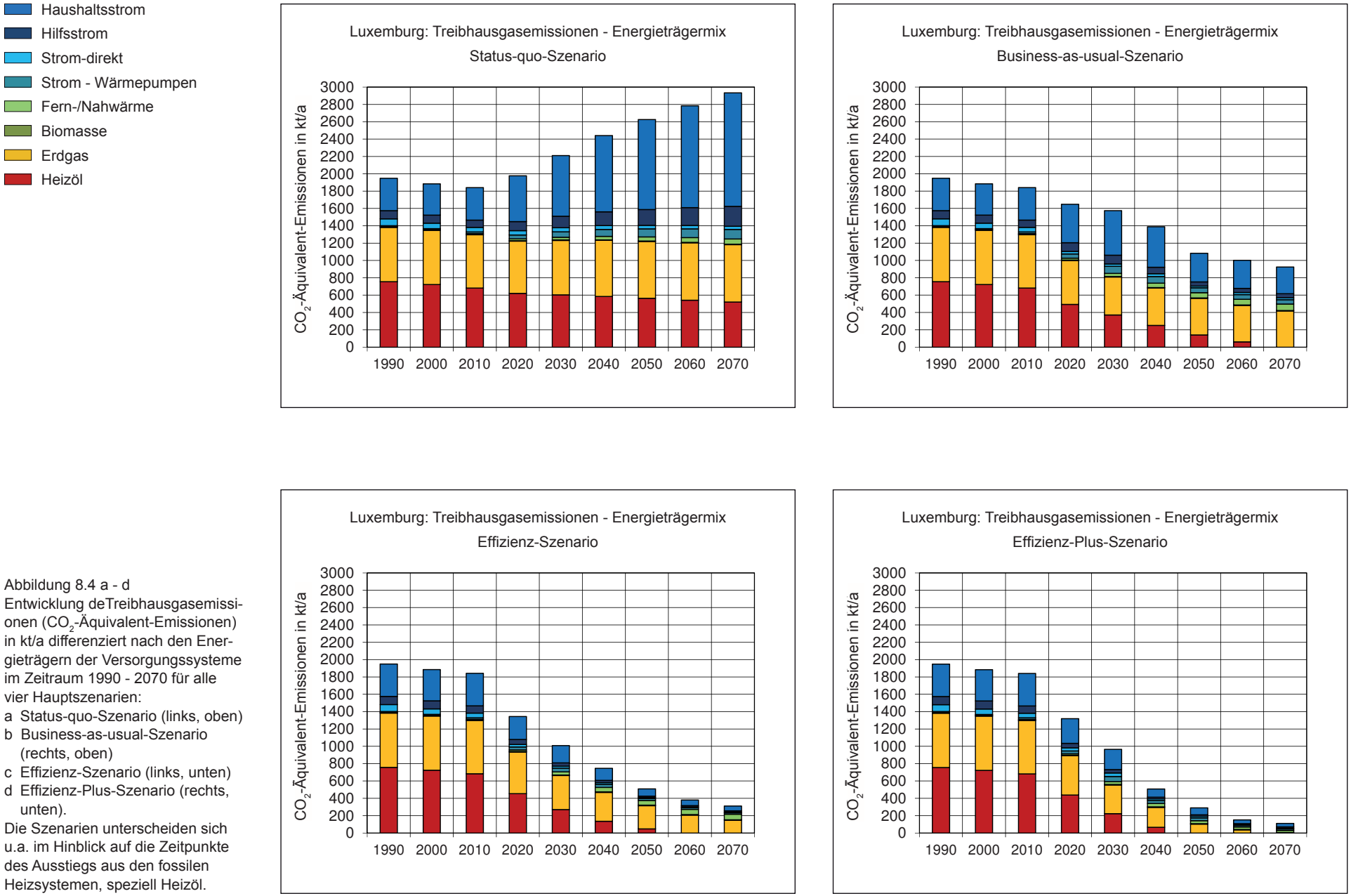


Abbildung 8.4 a - d
Entwicklung deTreibhausgasemissionen (CO_2-Äquivalent-Emissionen) in kt/a differenziert nach den Energieträgern der Versorgungssysteme im Zeitraum 1990 - 2070 für alle vier Hauptszenarien:

a Status-quo-Szenario (links, oben)
b Business-as-usual-Szenario (rechts, oben)
c Effizienz-Szenario (links, unten)
d Effizienz-Plus-Szenario (rechts, unten).

Die Szenarien unterscheiden sich u.a. im Hinblick auf die Zeitpunkte des Ausstiegs aus den fossilen Heizsystemen, speziell Heizöl.

Im Effizienz-Plus-Szenario können bis 2070 die Treibhausgasemissionen bis auf einen nahezu vernachlässigbaren Restbetrag fast gänzlich zurückgefahren werden. Hier spielt dann auch das Thema der Stromeffizienz und die weitgehend erneuerbare Stromerzeugung eine große Rolle.

Im Gegenzug wird deutlich, dass die fehlenden Effizienzerfolge im Business-as-usual-Szenario dazu führen, dass insbesondere Erdgas als fossiler Energieträger zur Wärmeversorgung im System verbleibt. Zugleich führt die fehlende Stromeffizienz in den Haushalten und die auch nach 2030 noch immer vorhandene fossile Stromerzeugung dazu, dass mittel- und langfristig ein substanzielles Absinken der Treibhausgasemissionen verhindert wird.

Für die Klimaschutzstrategie ist von daher der Ausstieg aus der fossilen Strom- und Wärmeerzeugung in Kombination mit den Effizienzsteigerungen der Gebäude und ihrer Stromanwendungen der Schlüssel zum Erfolg.

Misch-Szenario

Im Hinblick auf Klimaschutzstrategien ist häufig eine Haltung verbreitet, die die wirksamen Maßnahmen nicht als UND- sondern als ODER-Verküpfungen interpretiert. Gemäß dieser Vorstellung kann ein wirksamer Klimaschutz sich entweder auf die gebäudebezogenen oder auf die versorgungsseitigen Maßnahmen stützen. Dies kann entweder generell oder von Fall zu Fall gelten. Oftmals wird auch versucht, bestimmte Einzelmaßnahmen, z.B. einen fehlenden Wärmeschutz an Gebäudefassaden durch den Einsatz der Kraft-Wärmekopplung oder den Einsatz erneuerbarer Energien auszugleichen.

In einem speziellen Misch-Szenario wurde daher zusätzlich untersucht, wie sich der Endenergiebedarf und die Treibhausgasemissionen entwickeln würden, wenn man die Gebäudequalität (Hülle, Lüftungskonzepte, Warmwasser- und Strom-Nutzenergiebedarf) wie im Business-as-usual-Szenario, die Versorgungsstruktur (Strom- und Wärmeversorgung) jedoch wie im Effizienz-Szenario modellieren würde (Abb. 8.5).

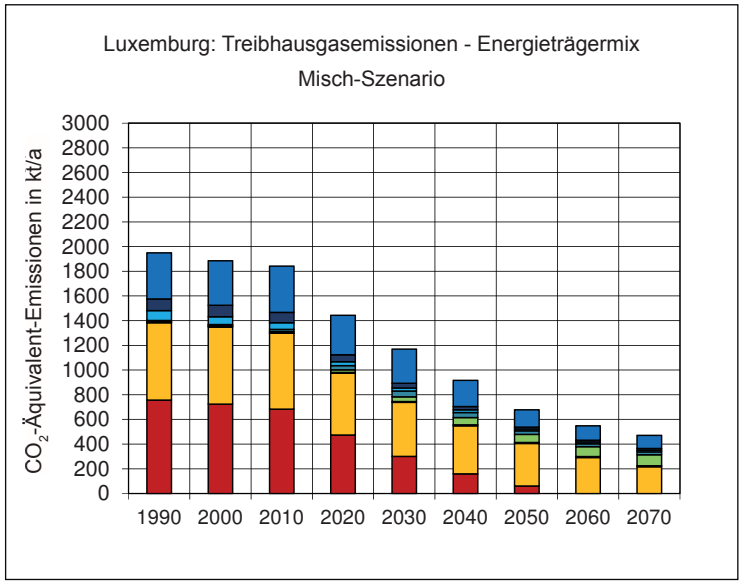


Abbildung 8.5
Entwicklung der Treibhausgasemissionen (CO_2-Äquivalent-Emissionen) in kt/a, differenziert nach Energieträgern in den Wohngebäuden für das sog. Misch-Szenario. In diesem werden die Gebäude mit deren energetischen Eigenschaften wie im Busness-as-usual-Szenario, die Versorgungssysteme jedoch wie im Effizienz-Szenario modelliert.

Die resultierenden Treibhausgasemissionen im Misch-Szenario liegen mit ca. 1170 Kt/a im Jahr 2030 und 680 Kt/a im Jahr 2050 ungefähr in der Mitte zwischen den Werten im Business-as-usual-Szenario (Abb. 8.4.b) und denen im Effizienz-Szenario (vgl. Abb. 8.4.c). Als personenbezogener Kennwert im Jahr 2050 ergeben sich ca. 890 kg/(Pa), womit das Zielfeld deutlich verfehlt wird. Die Erklärung hierfür liegt vor allem in den hohen Nutzenergie-Bedarfswerten im Business-as-usual-Szenario, die durch eine effizientere bzw. stärker auf erneuerbare Energieträger gestützte Versorgungstechnik nicht ausgeglichen werden können.

Als Fazit aus der Analyse der Ergebnisse des Misch-Szenarios lässt sich formulieren: Es kommt somit darauf an, die wirksamen Klimaschutzstrategien nicht gegeneinander auszuspielen, sondern sie sinnvoll miteinander zu kombinieren.

9 Strategische Fragen und Analysen

Zum Schluss sollen die Ergebnisse aus einer übergeordneten Sicht bewertet werden.

Überbrückung der Winterlücke

Sofern die langfristigen Ziele der EU und Luxemburgs verwirklicht werden, wird das künftige Energiesystem Luxemburgs eine gänzlich andere Struktur aufweisen als heute. Eine erneuerbare Stromversorgung wird in Nord- und Mitteleuropa im Sommer tendenziell Überschüsse produzieren, während im Winter eine Energielücke existiert, die mit speicherbaren erneuerbaren Energieträgern geschlossen werden muss (Abb. 9.1). Um die sog. Winterlücke möglichst klein zu halten, ist es notwendig, dass die Gebäude speziell im Kernwinter wenig Energie benötigen. Das ist nur mit einer konsequenten Effizienzstrategie möglich, die alle Strom- und Wärmeanwendungen umfasst. Wenn noch zusätzliche Stromverbraucher hinzukommen (z.B. Elektromobilität) wird die Frage der Stabilität der Stromversorgung noch anspruchsvoller. Von daher stellt sich die Frage, wie die erneuerbare Energieversorgung und -erzeugung künftig stärker sektorenübergreifend organisiert werden kann und welche Rolle hier Speicher auf verschiedenen Zeitebenen (Kurzzeit, Langzeit) spielen werden. Die Energiesysteme in den Wohngebäuden können dazu einen gewissen, jedoch nicht den entscheidenden Beitrag leisten (siehe Untersuchung im folgenden Abschnitt 10).

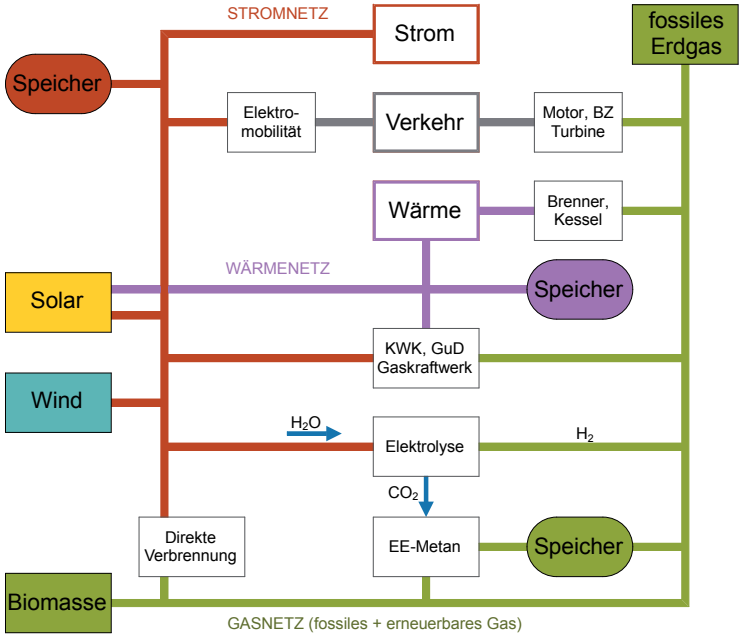


Abbildung 9.1
Schemadarstellung zur „Power to Gas“ - Strategie. Abgeändert nach (Sterner et al. 2011) S. 19.

Effizienzfaktoren

Der Erfolg der Effizienzstrategien in den Wohngebäuden lassen sich übersichtlich über sog. Effizienzfaktoren abbilden. Dabei wird das Status-quo-Szenario als Bezugsgröße mit einem durchgängig vorgegebenen Faktor 1,0 gewählt. Es beruht auf der fiktiven Annahme, dass die Qualität der energetisch relevanten Bau- und Technikkomponenten nach 2010 konstant gehalten wird. Man kann sich das so vorstellen, dass bei Instandsetzungs- und Erneuerungsarbeiten das jeweils vorhandene System zwar ausgewechselt wird, jedoch in seinen energetischen Eigenschaften unverändert bleibt. Im Vergleich zu diesem Szenario können nun die Effizienzfortschritte in den anderen Szenarien sehr einfach ermittelt werden. Für diesen Vergleich wurde die gesamte Primärenergie gewählt, weil sie als Indikator für den Einsatz energetischer Ressourcen steht.

In Abbildung 9.2 wird erkennbar, dass im Business-as-usual-Szenario die Effizienzverbesserungen nur mäßig ausfallen. Im Jahr 2050 lässt sich unter seinen Randbedingungen gerade einmal ein Faktor von 1,9 realisieren. Im Effizienz-Szenario liegt der Effizienzfaktor im Jahr 2050 bereits bei 2,7 und im Ef-

fizienz-Plus-Szenario sogar bei 2,9 und steigt dort bis 2070 auf 4,2 an. Hier wird deutlich, dass eine längerfistige Effizienzstrategie auf jeden Fall die künftigen wirtschaftlich interessanten Technologieverbesserungen miteinbeziehen sollte. Von daher wird hier vorgeschlagen, spätestens im Jahr 2030 die Zielvorgaben des Effizienz-Plus-Szenarios umzusetzen.

Dekarbonisierungsfaktoren

Noch deutlicher fallen die Unterschiede aus, wenn man die Minderungserfolge bei den Treibhausgasemissionen betrachtet. Diese lassen sich, bei einer analogen Systematik, wie bei den Effizienzfaktoren, als sog. Dekarbonisierungsfaktoren darstellen. Dieser Faktor gibt an, in welchem Ausmaß die CO_2-Äquivalent-Emissionen in den Szenarien im Vergleich zu einer Status-quo-Entwicklung abgesenkt werden konnten.

Im Business-as-usual-Szenario können bis ins Jahr 2050 die Treibhausgasemissionen nur um einen Faktor von 2,4 reduziert werden. Damit kann hier nicht von einem Klimaschutzpfad gesprochen werden. Im Effizienz-Szenario wird 2050 ein Dekarbonisierungsfaktor von 4,7 und 2070 von 8,7 erreicht. Das Effizienz-Plus-Szenario steht für eine Entwicklung, in dem die Treibhausgasemissionen bis 2050 um einen Faktor 8,2 und bis 2070 um einen Faktor 27 reduziert werden können. Damit hat man das Nullemissionsziel fast erreicht. Die verbleibenden minimalen CO_2-Äquivalent-Emissionen sind dann vernachlässigbar gering.

Hier wird nochmals deutlich, dass das Effizienz-Szenario übergangsweise bis etwa 2030 verfolgt werden kann, es jedoch danach geboten erscheint, die nochmals verbesserten energetischen Qualitäten, wie sie im Effizienz-Plus-Szenario beschrieben sind, als neuen Standard festzulegen. Dann tritt, das zeigen die Dekarbonisierungsfaktoren auf, ein selbstverstärkender Effekt ein, der durch den somit möglichen Ausstieg aus den fossilen Energiesystemen, den Weg hin zu einer Energieversorgung ohne Klimagasemissionen eröffnet.

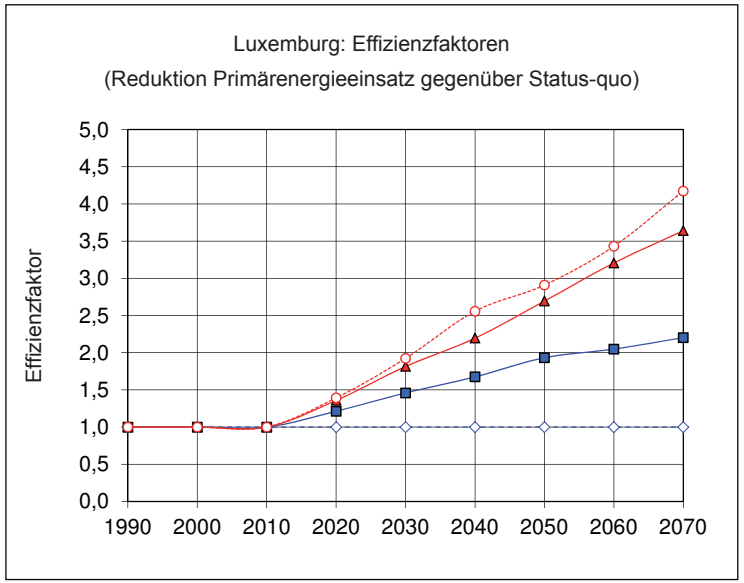


Abbildung 9.2
Darstellung der primärenergetischen Effizienzverbesserungen in den vier Hauptszenarien im Zeitraum 2010 - 2070 in Form von sog. Effizienzfaktoren.

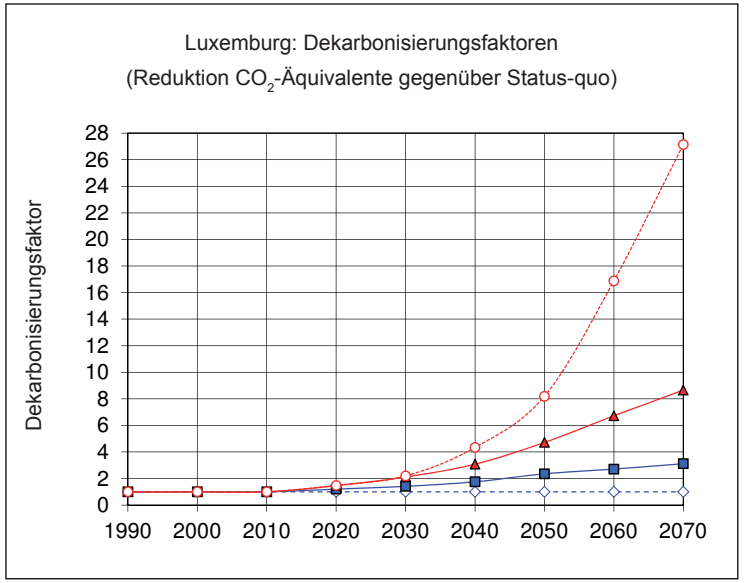


Abbildung 9.3
Reduzierungserfolge bei den Treibhausgasemissionen (CO_2-Äquivalente) in den vier Hauptszenarien im Zeitraum 1990 - 2070. Darstellung in Form der sog. Dekarbonisierungsfaktoren.

10 Ausbau Photovoltaikerzeugung und Elektromobilität

Im Hauptteil dieser Studie wird analysiert, wie sich die Energiebedarfe und die CO_2-Äquivalent-Emissionen des Wohngebäudeparks für Heizung, Warmwasser, Hilfs- und Haushaltsstrom in den vier Hauptszenarien bis 2070 entwickeln werden. Die Stromerzeugung durch gebäudeintegrierte PV-Anlagen wird dabei nicht gesondert betrachtet, da vereinfachend davon ausgegangen wird, dass die gesamte PV-Stromerzeugung auch künftig in das öffentliche Stromnetz eingespeist wird und so den Luxemburger Strommix um erneuerbare Anteile ergänzt. Gebäudeintegrierte PV-Anlagen werden bei dieser Art der Bilanzierung nicht als Teil der Gebäudeenergiebilanz bewertet, sondern als dezentraler Teil des luxemburgischen Kraftwerkparks. Der Ausbau von PV-Anlagen spiegelt sich bei dieser Betrachtung nur in Form verbesserter Primärenergiefaktoren bzw. CO_2-Äquivalent-Emissionen des Strommixes, nicht jedoch in der Bewertung der Einzelgebäude wider.

Für die Zukunft ist absehbar, dass sich diese Art der Betrachtung zunehmend verändern wird. In einem zunehmenden Anteil der Gebäude mit PV-Anlage werden deren Erträge zumindest teilweise im Gebäude selbst genutzt. Treiber dieser Entwicklung sind tarifliche Aspekte, sinkende Preise für Batteriespeicher, der Wunsch nach größtmöglicher Autonomie in Sachen Energie und – bislang erst in wenigen Fällen – der Wunsch nach Nutzung der Erträge der gebäudeintegrierten PV zum Laden des eigenen Elektroautos.

Um dieser Entwicklung Rechnung zu tragen wird im folgenden Kapitel die Bilanzgrenze in zweierlei Hinsicht ausgeweitet: Bedarfsseitig wird zusätzlich zu den o.g. Anwendungsarten der Strombedarf von Elektroautos mit bilanziert, die in oder an Wohngebäuden beladen werden. Erzeugungsseitig wird zusätzlich die Stromerzeugung gebäudeintegrierter PV-Anlagen berücksichtigt, die Gesamt-Erzeugung der PV-Systeme wird in einen eigengenutzten Anteil (für Heizung, Warmwasser, Hilfs- und Haushaltsstrom sowie für E-Mobilität) und einen ins Netz eingespeisten Anteil differenziert.

Bei der Abschätzung der zusätzlich berücksichtigten Bilanzanteile wird wie folgt vorgegangen:

- **Schritt 1:** Abschätzung des zusätzlichen Strombedarfs des Wohngebäudeparks durch das Beladen von Elektroautos (Abschnitt 10.1)
- **Schritt 2:** Potenzialabschätzung und Ausbauszenarien für wohngebäudeintegrierte PV (Abschnitt 10.2)
- **Schritt 3:** Abschätzung des Anteils des im Gebäude selbst genutzten PV-Strom und des Anteils, der ins Netz eingespeist wird – unter Berücksichtigung des Bedarfs durch Elektromobilität (Abschnitt 10.3)

Es wird ausdrücklich darauf hingewiesen, dass dieser Teil der Studie mit deutlich größeren Unsicherheiten behaftet ist, als der Hauptteil, in dem nach der bislang üblichen Bilanzierungsgrenze vorgegangen wurde. Die Ergebnisse sind daher nur als grobe Abschätzungen zu verstehen.

10.1 Abschätzung des zusätzlichen Strombedarfs des Wohngebäudeparks durch das Beladen von Elektroautos

Zur Quantifizierung des Einflusses der Beladung von Elektroautos auf den Strombedarf des Wohngebäudeparks müssen Annahmen für die folgenden Haupteinflussgrößen getroffen werden:

Bevölkerungsentwicklung
Wie in der gesamten Studie wurde in Abstimmung mit dem Auftraggeber und Statec unterstellt, dass die Bevölkerung Luxemburgs von etwa 567.000 Einwohner im Jahr 2015 auf etwa 1.051.000 Einwohner im Jahr 2050 und etwa 1.219.000 Einwohner im Jahr 2070 ansteigt – siehe Abbildung 2.3 und 2.4 in diesem Bericht.

Entwicklung des Gesamt-PKW-Bestandes
Luxemburg verfügt aktuell mit 660 PKW/1000 Einwohner im Europäischen Vergleich über eine der höchsten Dichten an PKW (VCÖ 2014). Eine Publikation des Statec nennt für 2012 einen Wert von 666 PKW/1000 Einwohner (Hansen 2012). Für die zukünftige Entwicklung wurde von einer konstanten PKW-Dichte ausgegangen. Der Gesamtbestand an PKW stiege damit mit der oben beschriebenen Bevölkerungsentwicklung von derzeit 371.000 auf 693.000 im Jahr 2050.

Entwicklung des Marktanteils von Elektroautos am Gesamtbestand
Im dritten nationalen Energieeffizienz-Aktionsplan Luxemburg (NEEAP) wurde ein Marktanteil der Elektro-PKW von 10% am Gesamt-PKW-Bestand als Zielwert für das Jahr 2020 definiert (MdE 2014). Wie in nahezu allen europäischen Ländern verläuft die Markteinführung von Elektro-PKW jedoch bislang deutlich langsamer, als vor Jahren angenommen.

Die Zulassungszahlen der vergangenen Jahre lagen in Luxemburg zwischen 31 im Jahr 2011 und 301 im Jahr 2014. 2015 und 2016 gingen die Zahlen der Neuzulassungen auf 71 bzw. 136 zurück, 2017 wurden bislang 216 Elektro-PKW neu registriert (EAFO 2017). Aus den genannten Zulassungszahlen kann der Bestand an Elektro-PKW auf etwa derzeit 950 geschätzt werden. Dies entspricht einem derzeitigen Anteil von 0,26% am Gesamtbestand. Im Jahr 2015 waren etwa 600 Elektro-PKW zugelassen, dies entspricht einem Marktanteil von etwa 0,16%. Auch wenn die Ladeinfrastruktur in Luxemburg in den

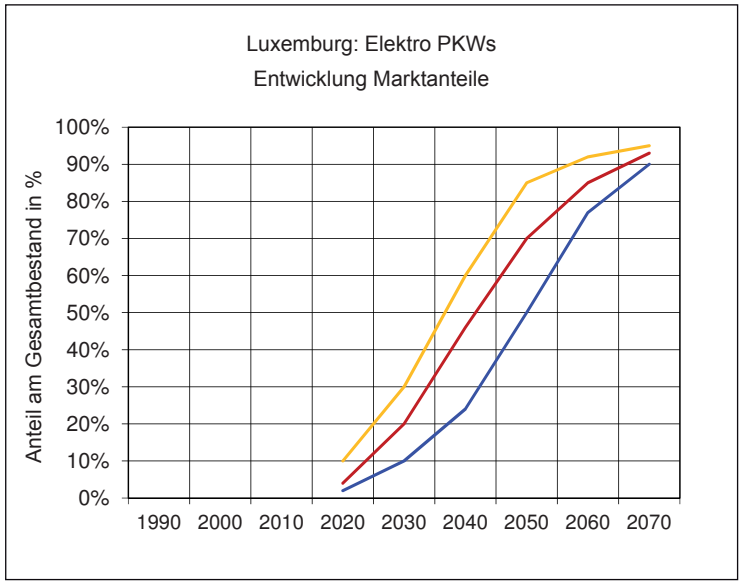


Abbildung 10.1
Annahmen zur zeitlichen Entwicklung des Markanteils von Elektro-PKW in Luxemburg in Form von drei Ausbaupfaden.

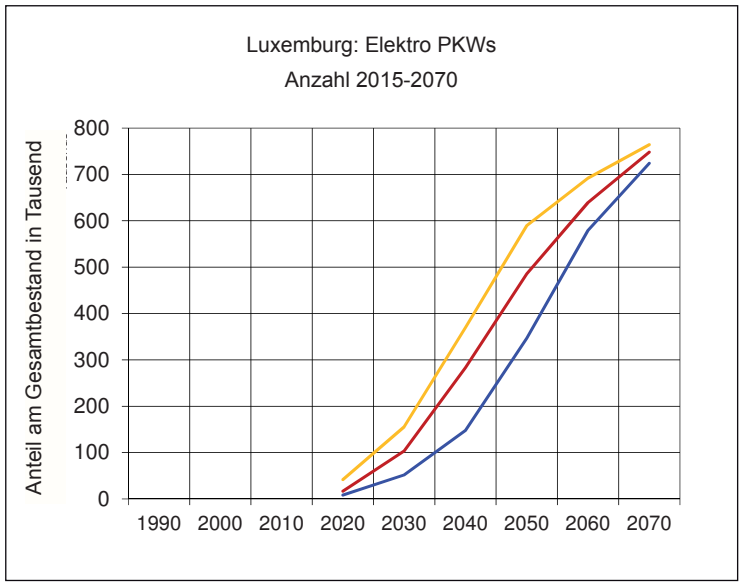


Abbildung 10.2
Annahmen zur zeitlichen Entwicklung der Stückzahl von Elektro-PKW in Luxemburg in Form von drei Ausbaupfaden.

vergangenen Jahren sehr schnell ausgebaut wurde, ist das Erreichen des im NEEAP für 2020 anvisierten Zielwerts von 10% des Gesamt-PKW-Bestandes angesichts der bisherigen Marktentwicklung sehr unwahrscheinlich. 10% Anteil am Gesamtbestand des Jahres 2020 entspräche ca. 41.750 Elektro-PKW. Um diesen Wert zu erreichen, müssten 2018 bis 2020 durchschnittlich mehr als 13.000 Elektro-PKW verkauft werden und damit etwa 80 mal mehr, als im Mittel der vergangenen 7 Jahre. Angesichts der Unsicherheit der weiteren Marktentwicklung werden für die Studie drei Ausbaupfade (langsam, mittel und hoch) definiert, in denen die prozentualen Anteile der Elektro-PKW am Gesamtbestand unterschiedlich schnell ansteigen. Der Ausbaupfad „hoch" wird so definiert, dass die Zielmarke von 10% Marktanteil in 2020 erreicht wird.

Wie aus Abbildung 10.1 zu entnehmen, differieren die Annahmen für die Marktanteile für die Jahre 2020 bis 2050 deutlich um sich gegen Ende des Betrachtungszeitraum im Jahr 2070 einer nahezu 100%-Deckung anzunähern. Die Geschwindigkeit der Markteinführung ist nur bedingt durch Maßnahmen in Luxemburg steuerbar, da sie sehr stark davon abhängt, wie schnell große Anbieter massentaugliche Modelle anbieten. Dies wiederum hängt stark davon ab, wie sich die politischen Randbedingungen in wichtigen Märkten und Produktionsstandorten wie China, den USA und Europa (v.A. Deutschland und Frankreich) entwickeln. Die wichtigste in Luxemburg steuerbare Voraussetzung für eine schnelle Markteinführung der Elektromobilität – der Aufbau einer geeigneten Ladeinfrastruktur – kommt gut voran. In Abbildung 10.2 sind die Absolutzahlen der Elektroautos in den drei Ausbau-Szenarien dargestellt. Hier differieren die Annahmen für die Gesamtzahl der zugelassenen Elektro-PKW in den drei Ausbaupfaden deutlich. So liegen die Stückzahlen für das Jahr 2020 zwischen 8.300 und 41.700 Elektro-PKW, für das Jahre 2030 zwischen 52.000 und 155.000 und für 2050 zwischen 347.000 und 590.000 Elektro-PKW.

Durchschnittliche jährliche Fahrleistung pro PKW

Die derzeitige durchschnittliche Fahrleistung von PKW in Luxemburg wurde anhand von drei Quellen abgeschätzt. Eine Veröffentlichung des Österreichischen Verkehrsclubs VCÖ nennt einen Wert von mit 12.560 km/a (VCÖ 2017). Eine Studie des Statec nennt eine durchschnittliche Fahrleistung von 8.535 km/a pro PKW als Durchschnittswert (Hansen 2012).

In einer Studie für das Ministerium für nachhaltige Entwicklung und Infrastrukturen wird die Gesamt-Fahrleistung der PKW inländischer Fahrzeughalter mit 4,792 Mrd km/a angegeben. Bei einem Fahrzeugbestand von etwa 370.000 PKW entspricht dies einer durchschnittlichen Fahrleistung von 12.916 km/a pro PKW (Ewringmann 2017). Auf Basis der in den drei Quellen genannten Werte wird in dieser Studie für 2015 eine durchschnittliche Fahrleistung von 11.337 km/a pro PKW angenommen.

Für die Zukunft wird angenommen, dass diese Fahrleistung unverändert bleibt, da sowohl Indikatoren vorhanden sind, die ein Sinken der Fahrleistung erwarten lassen (zunehmender Anteil städtischer Bevölkerung mit der Möglichkeit höherer ÖPNV-Anteile, steigender Anteil an Flugreisen an den Gesamt-Urlaubsreisen) als auch solcher, die ein Ansteigen der mittleren Fahrleistung nahelegen (zunehmende Entfernung von PKW-Pendlern zu ihrem Arbeitsplatz).

Durchschnittlicher Strombedarf pro 100 km Fahrleistung

Der durchschnittliche reale Strombedarf der Elektro-PKW wurde im Mix der derzeit zugelassenen Elektro-PKW mit 22 kWh/100 km angenommen. Dieser Wert liegt deutlich höher als der von den Herstellern angegebene Normverbrauch (NEFZ), da dieser ähnlich wie bei PKW mit Verbrennungsmotoren unter zu optimistischen Randbedingungen ermittelt wird und Stromverbräuche für Heizen, Ladeverluste, Kühlen der Batterien, Licht, Lüftung etc. überhaupt nicht berücksichtigt. In einer Schweizer Studie wird daher zur Berechnung realistischerer CO_2-Emissi-

onswerte der Norm-Verbrauch mit einem Faktor von 1,7 multipliziert (VCS 2017). Die Normverbräuche heutiger Modelle liegen zwischen knapp 10 und knapp über 20 kWh/100 km. Heute übliche Elektro-PKW (Nissan Leaf, Renault Zoe, BMW i3) liegen bei etwa 12-14 kWh/100km. Aus diesem mittleren Normverbrauch kann unter Annahme des Aufschlagfaktors von 1,7 der mittlere reale Stromverbrauch der heutigen Elektro-PKW-Flotte auf etwa 22 kWh/100km geschätzt werden.

In Zukunft sind einerseits Effizienzfortschritte zu erwarten, etwa durch Entwicklung von leichteren, speziell für E-Autos konzipierten Karosserien. Diesem Trend dürfte jedoch eine Tendenz zu immer mehr Elektroautos „normaler Größe“ entgegenwirken. Der durchschnittliche Stromverbrauch der zukünftigen Elektro-PKW-Flotte wurde daher unverändert mit 22 kWh je 100 km Fahrleistung angenommen.

Anteil der PKW, die im/am Wohngebäude geladen werden

Der Anteil der Elektro-PKW, die im/am Wohngebäude geladen werden, wurde in Absprache mit dem Auftraggeber auf derzeit 75% geschätzt. Es ist zu erwarten, dass sich dieser Anteil mit dem Ausbau der öffentlichen Ladeinfrastruktur und der Ladeinfrastruktur an Nicht-Wohngebäuden (d.h. am Arbeitsplatz) reduziert. Für 2050 wurde ein Anteil von 54% für die Ladung im/am Wohngebäude angenommen. Gerade für die Zukunft sind solche Werte nur erreichbar, wenn in Wohngebäuden entsprechend hohe Leistungen verfügbar sind.

Anteil der Elektro-PKW, die tagsüber in oder an Wohngebäuden aufgeladen werden

Für die Abschätzung des Anteils des am Wohngebäude erzeugten PV-Stroms, der zur Beladung von Elektroautos genutzt wird, muss der Anteil der Ladevorgänge im/am Wohngebäude geschätzt werden, der tagsüber durchgeführt wird. Nur für diesen Anteil der Beladung kann (ohne Nutzung stationärer Batterien) PV-Strom vom eigenen Wohnhausdach verwendet werden.

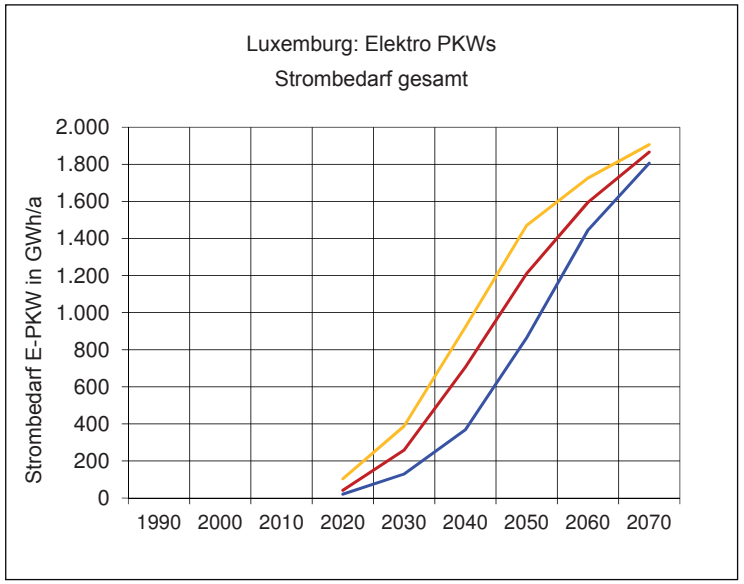


Abbildung 10.3
Zeitliche Entwicklung des gesamten Strombedarfs von Elektro-PKW in Luxemburg.

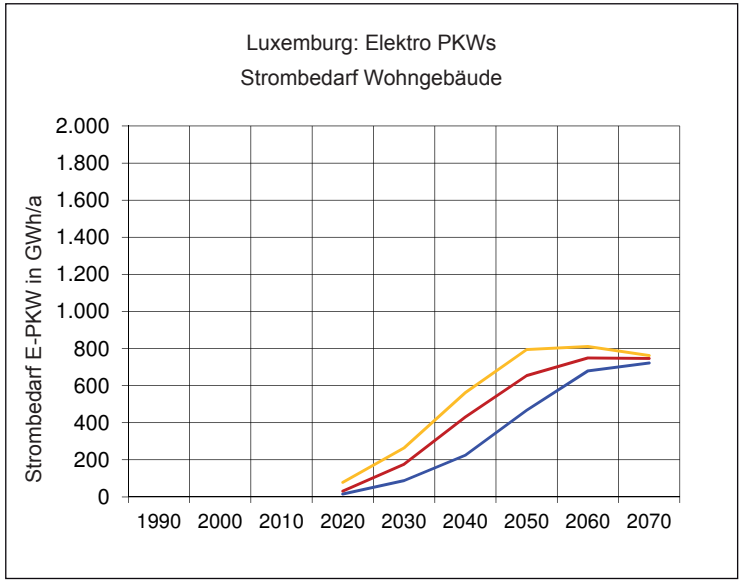


Abbildung 10.4
Zeitliche Entwicklung des Strombedarfs für Elektro-PKW in Luxemburg durch Ladestationen in Wohngebäuden.

Der Anteil der „Tag-Lader“, d.h. der Elektroautobesitzer, die ihren PKW tagsüber zu Hause laden, wurde mit 30% angenommen. Für 70% der „zu-Hause-Lader“ wurde dementsprechend angenommen, dass die Beladung in der Nacht stattfindet. Für die Zukunft wurde angenommen, dass der Anteil der „Tag-Lader“ auf 42% im Jahr 2050 ansteigt, da unterstellt wurde, dass immer mehr Personen den am Wohngebäude selbst erzeugten PV-Strom zum Laden nutzen wollen.

Anteil der tagsüber zu Hause in EFH und MFH geladenen Elektro-PKW

Da der wohnflächenspezifische PV-Stromertrag in Mehrfamilienhäusern, aufgrund der kleineren verfügbaren Dachfläche pro Person, geringer ausfällt, als in Einfamilienhäusern, wurden die Anteile der PKW, die in EFH und MFH geladen werden, geschätzt. Der Anteil der Elektro-PKW, die an EFH geladen werden wurde für 2015 auf 70% geschätzt. Für 2050 wurde ein Wert von 42% angenommen.

Ergebnisse Strombedarf für Ladung von Elektro-PKW in Luxemburg

Auf Basis der o.g. Annahmen zur Marktentwicklung ergeben sich die in Abbildung 10.3 dargestellten Werte des Strombedarfs für Elektro-PKW in Luxemburg. Der Gesamt-Strombedarf der Elektro-PKW in Luxemburg entwickelt sich je nach Ausbaupfad von etwa 2,5 GWh/a im Jahr 2015 auf Werte zwischen 21 und 104 GWh/a im Jahr 2020, zwischen 129 und 388 GWh/a im Jahr 2030 und zwischen 865 und 1.471 GWh/a im Jahr 2050. Nur ein Teil dieses Strombedarfs wird durch Ladestationen an Wohngebäuden gedeckt, der andere Teil erfolgt über Ladestationen am Arbeitsplatz oder im öffentlichen Raum.

Anhand der dargestellten Randbedingungen und Annahmen kann nun der Anteil des Strombedarfs von Elektro-PKW, der in/an Wohngebäuden gedeckt wird, abgeschätzt werden. Er entwickelt sich je nach Ausbaupfad von etwa 1,8 GWh/a im Jahr 2015 auf Werte zwischen 16 und 78 GWh/a im Jahr 2020, zwischen 88 und 264 GWh/a im Jahr 2030 und zwischen 467 und 794 GWh/a im Jahr 2050.

10.2 Potenzialabschätzung und Ausbauszenarien für wohngebäudeintegrierte Photovoltaik

Bei der Abschätzung des Potenzials für wohngebäudeintegrierte PV-Anlagen wurde wie folgt vorgegangen:

- Abschätzung des Potenzials PV-geeigneter Dachflächen auf der Basis der im Kohortenmodell bis 2070 hinterlegten Dachflächen.
- Abschätzung der Dachflächen für Solarthermieanlagen.
- Abschätzung des theoretischen PV-Stromerzeugungspotenzials.
- Status Quo-Analyse der PV-Erzeugung auf Wohngebäuden.
- Definition von vier PV-Ausbaupfaden.
- Gegenüberstellung des Strombedarfs der Gebäude ohne und mit E-Mobilität mit der PV-Stromerzeugung für die vier Ausbaupfade.

Potenziale Solardächer zur Erzeugung von PV-Strom

Um die Dachflächenpotentiale zur Nutzung aktiver Solartechniken (z.B. thermische Solaranlagen und Photovoltaik) zu bestimmen, wurden für alle Gebäudemodelle die Flächen von Flachdächern sowie von Dächern, die Richtung Süden, Westen oder Osten ausgerichtet sind, bestimmt. Dabei wurde berücksichtigt, dass durch geforderte Randabstände, Kamine, Gauben, Dachflächenfenster nicht die reinen Dachflächen, sondern nur Teilbereiche zur Verfügung stehen. Teilweise schränken auch die räumlichen Randbedingungen (z.B. Verschattung durch Bäume und Nachbarbebauung) die Einsatzmöglichkeiten für eine aktive Solarnutzung ein. Generell wurden nur 80 % der geometrisch ermittelten Dächflächen jeweils ohne Dachüberstände angesetzt.

Ganz bewusst werden die Fassaden nicht mitbetrachtet. Hier liegen im Einzelfall sehr viele Beschränkungen vor (z.B. Fenster- und Balkonanordnungen, Fassadenversprünge und -gliederungen) und eine Verschattung stellt eher den Regel- als den Ausnahmefall dar. Daher stellen die Südfassaden eine „Flächenreserve“ für die Fälle dar, die als mindernde Faktoren bei den Dächern nicht berücksichtigt wurden.
In Abbildung 10.5 wird die Entwicklung des Dachflächenpotenzials aller Wohngebäude Luxemburgs im Zeitraum 2010 - 2070 dargestellt. Vor allem die Dächer der Ein-und Zweifamilienhäuser haben große Bedeutung für die Energieproduktion von Solarstrom bzw. Solarwärme. Dies gilt sowohl im Bestand als auch im Neubau. Gründe hierfür sind das im Vergleich zu Mehrfamilienhäusern günstige Verhältnis von Dach- zu Wohnfläche und der hohe Anteil zwischen 70% (2015) und 50% (2070) der Einfamilien, Doppel- und Reihenhäuser an der Gesamtwohnfläche.

Bei den Dachflächen wird der bedingt sanierbare Bestand nicht berücksichtigt, weil davon ausgegangen wird, dass speziell bei denkmalgeschützten Gebäuden eine Integration von thermischen Solaranlagen oder Photovoltaikmodulen aus gestalterischen Gründen schwierig oder ausgeschlossen ist.

Dachflächenabschätzung Solarthermie

Ferner ist zu berücksichtigen, dass ein bestimmter Flächenanteil für thermische Solaranlagen genutzt wird. Die Dachflächen, welche für die Solarthermie benötigt werden, sind je nach Szenario unterschiedlich. Aus den im Kohortenmodell dieser Studie berechneten Endenergieeinsparungen durch Solarthermie wird mit einem mittleren spezifischen Kollektorertrag von 350 kWh/m² Kollektorfläche und Jahr die gesamte benötigte Kollektorfläche berechnet. Die installierte Kollektorfläche wird laut EurObserv’ER Solar Thermal Barometer (EurObserv’ER 2016b) für das Jahr 2015 mit 55.600 m² angenommen. Die vorliegende Studie geht im Effizienz-Szenario von grob 63.000 m² aus.

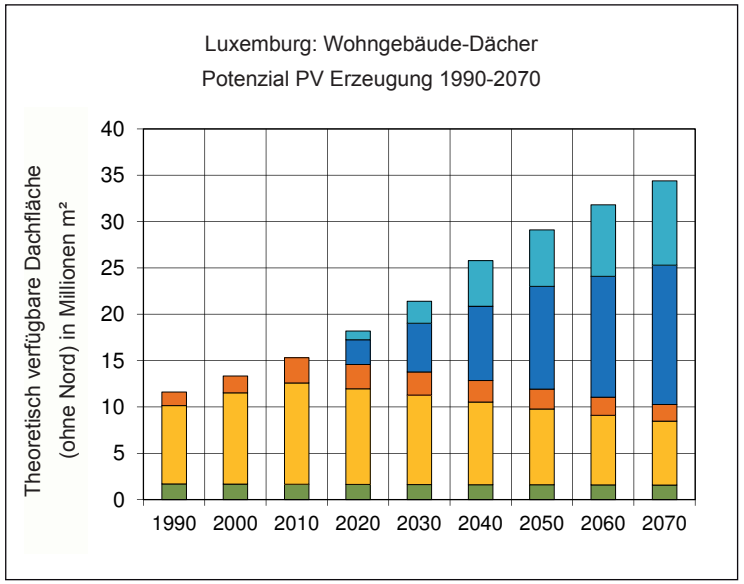


Abbildung 10.5
Zeitliche Entwicklung der für die PV-Erzeugung geeigenten Dachflächen auf Wohnhäusern in Luxemburg. Darstellung der Potenziale, getrennt nach strategischen Typen. Angabe der Werte in Mio. m².

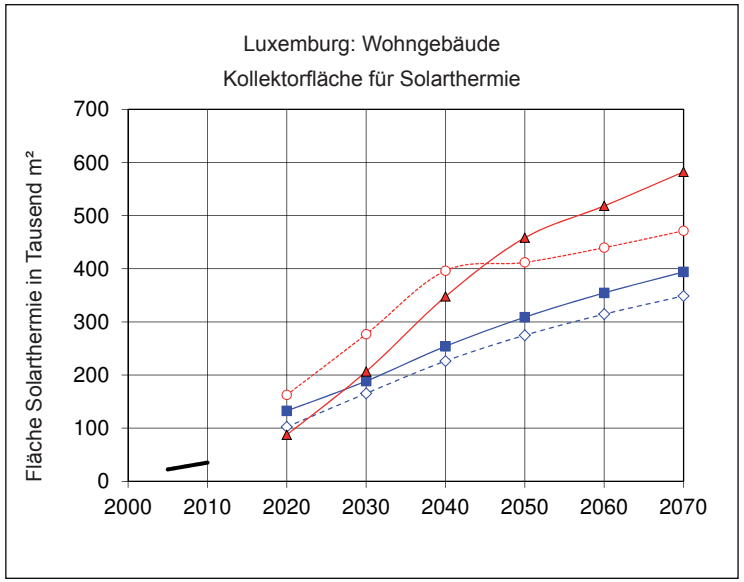


Abbildung 10.6
Zeitlichen Entwicklung der Kollektorfläche für Solarthermie auf den Wohngebäuden in den vier Hauptszenarien. Angabe der Werte in Tsd. m².

	obere Abschätzung	mittlere Abschätzung	untere Abschätzung
Süd	160	120	80
Ost / West	120	90	60
Horizontal	120	90	60

Tabelle 10.1
PV-Ertrag pro Quadratmeter Kollektorfläche als Grundlage für Potentialabschätzungen.

Die Aktualisierung der Potenzialanalyse für Erneuerbare Energien 2016 (Schön et al. 2016) geht für 2020 von einem Potenzial von 136.000 m² aus und für 2030 von 362.000 m². In der vorliegenden Studie wird dieses Potenzial für 2030 nach der Bottom -up-Berechnung auch im ambitionierten Effizienz-Plus-Szenario mit 277.000 m² nicht erreicht. Derzeit sind ca. 0,5 % der Dachflächen mit Süd-, West- und Ostausrichtung mit solarthermischen Anlagen bedeckt. 2070 werden bei linearer Fortschreibung ca. 2% der süd-ost- und westorientierten Dachflächen mit Solarthermie bedeckt sein. Diese Fläche steht demnach nicht für PV-Anlagen zur Verfügung.

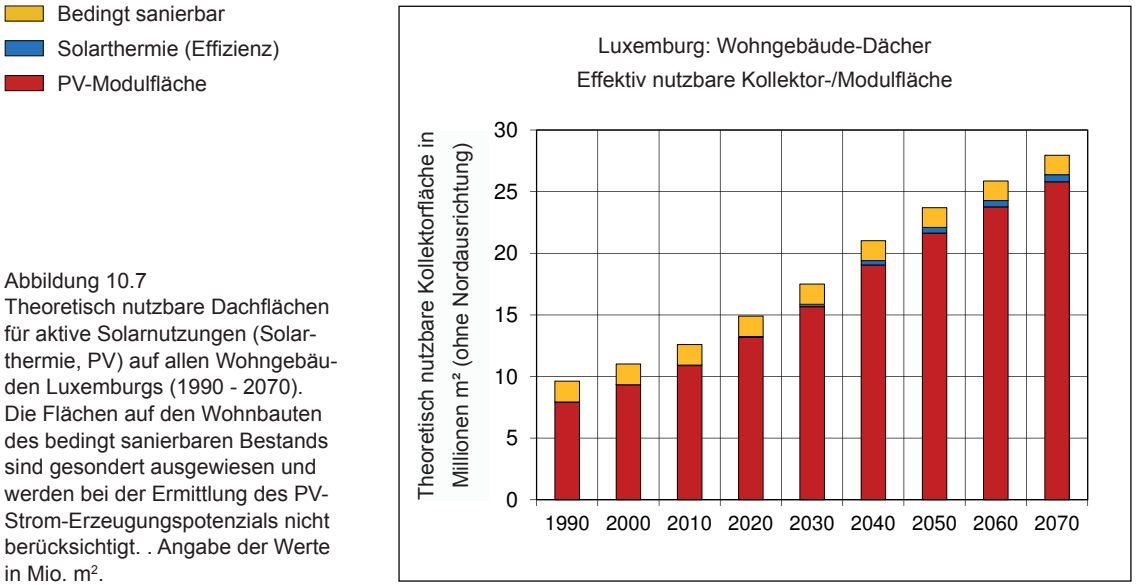


Abbildung 10.7
Theoretisch nutzbare Dachflächen für aktive Solarnutzungen (Solarthermie, PV) auf allen Wohngebäuden Luxemburgs (1990 - 2070). Die Flächen auf den Wohnbauten des bedingt sanierbaren Bestands sind gesondert ausgewiesen und werden bei der Ermittlung des PV-Strom-Erzeugungspotenzials nicht berücksichtigt. . Angabe der Werte in Mio. m².

Abschätzung des theoretischen (bzw. oberen) Potenzials der PV-Erzeugung

Die Abschätzung erfolgt mit ca. 1100 kWh/m²a Globalstrahlung auf die Horizontale. Die untere Abschätzung deckt sich in etwa mit der Umrechnung in (Kessler et al. 2011) und wird zur vereinfachten Betrachtung herangezogen. Dies berücksichtigt auch Verschattung der Module durch die Umgebung. Daraus ergeben sich orientierungsabhängige Erträge je Quadratmeter Kollektorfläche gemäß Tabelle 10.1. Diese sind auf der sicheren Seite abgeschätzt, d.h. sie können im Einzelfall durchaus höher liegen (z.B. bei leistungsfähigen Modulen und geringer Verschattung). Die Erfahrung zeigt jedoch andererseits, dass in der gebauten Wirklichkeit immer wieder mindernde Faktoren eine Rolle spielen (z.B. besondere Dachformen, Verschattung durch Bäume und Nachbarbebauung oder eigene Bauteile). Daher ist hier eine konservative Abschätzung angebracht.

Es wird vereinfacht zur Potenzialabschätzung davon ausgegangen, dass ca. 20% weniger Kollektorfläche als Dachflächen installiert werden. Diese Abzugsflächen werden z.B. für geforderte Randabstände, Dachaufbauten, Profile der Module und ähnliches benötigt.

Bei den folgenden Berechnungen werden die Dachflächen im bedingt sanierbaren Bestand nicht mehr berücksichtigt, da er teilweise unter Denkmalschutz steht oder aus gestalterischen Gründen nicht zur Aufnahme von PV-Anlagen oder Solarthermie geeignet ist (auch wenn dies im Einzelfall anders sein sollte kann damit ein Ausgleich für ähnlich gelagerte Fälle im voll sanierbaren Bestand hergestellt werden).

Gemäß diesen Randbedingungen lässt sich nun der theoretisch mögliche Stromertrag auf den Dachflächen aller Wohngebäude Luxemburgs kalkulieren. In Abbildung 10.8 ist dies zunächst differenziert nach den strategischen Gruppen für die mittleren Erträge gemäß Tabelle 10.1 aufgetragen.

In Abbildung 10.9 ist die gesamte Bandbreite, definiert über die obere, mittlere und untere Ertragsabschätzung gemäß Tabelle 10.1, für alle Dächer der Wohngebäude in Luxemburg dargestellt.

Bisherige Entwicklung der PV-Erzeugung

In Luxemburg wurden im Jahr 2015 laut Energiestatistik (Statec 2017) 103 GWh PV-Strom erzeugt. Dies erfolgt über Freianlagen und auf Gebäuden, vor allem solchen mit Wohnnutzung. Seit 2005 zeigt sich dies, beginnend mit 17,7 GWh/a als stetige Entwicklung, die jedoch nicht gänzlich gleichmäßig verläuft. Die kumulierte PV-Leistung stieg im selben Zeitraum von 21,2 auf 125 MWp an. Durch das Verhältnis der kumulierten Leistung in Luxemburg insgesamt zu der kumulierten Leistung der PV-Anlagen der Wohngebäude kann der mittlere jährliche Zubau abgeschätzt werden. Im Zeitraum 2013 bis 2015 lässt sich so ein Wert von 40 % ermitteln, der beim Ausbau der Photovoltaik auf die Wohngebäude entfällt. Als weiterer Kennwert ergibt sich ein mittlerer spezifischer Ertrag von 806 kWh/kWp für alle Wohngebäude.

Aufbauend auf der Entwicklung der vergangenen Jahre können vier Ausbaupfade definiert werden, die sich durch verschiedene Ausbauraten voneinander unterschieden:

- Der untere Ausbaupfad entspricht mit 5,6 MWp pro Jahr den Wachstumsraten in den Jahren 2015 und 2016.
- Der mittlere Ausbaupfad entspricht mit 8,8 MWp pro Jahr dem realen Ausbau im Jahr 2013.
- Der hohe Ausbaupfad geht von 12 MWp Zubau pro Jahr aus.
- Der maximale Ausbaupfad basiert auf der Annahme einer konstanten jährlichen Steigerung auf 20MWp. Gemäß einer Studie des Fraunhofer-Instituts (Schön et al. 2016) ist ein jährliches Potenzial auf Freiflächen von 30 MWp vorstellbar. Daraus wird geschlossen, dass auf Wohngebäuden wenigstens 2/3-tel dieses Wertes als jährlicher Zubau realisierbar wäre.

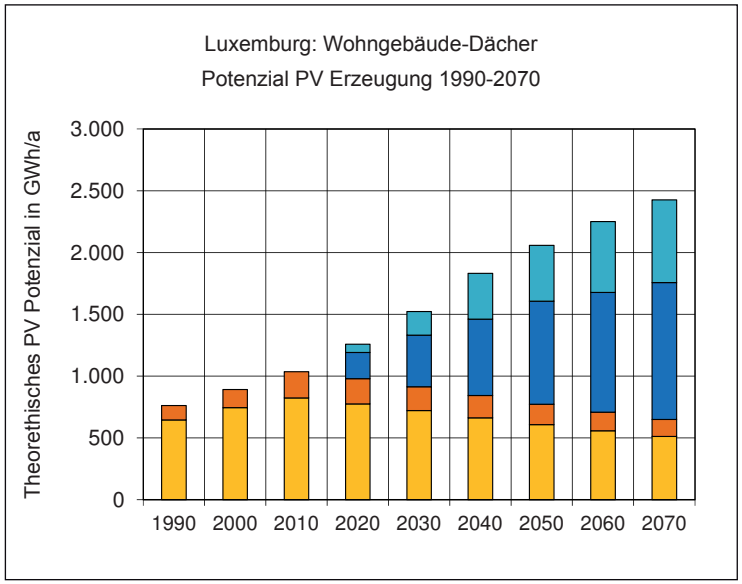


Abbildung 10.8
Theoretisches Potential der PV-Stromerzeugung auf den Dächern der Wohngebäude in Luxemburg unter der Annahme der mittleren Abschätzung gemäß Tabelle 10.1. Angabe der Werte in GWh/a.

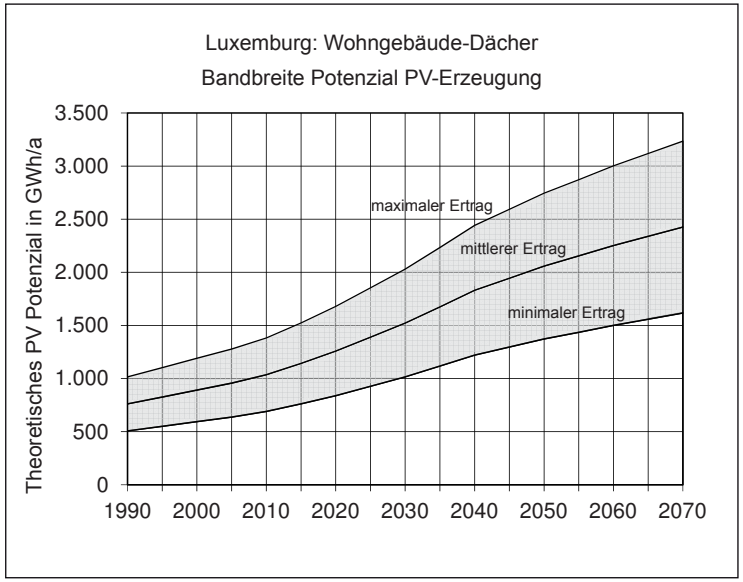


Abbildung 10.9
Bandbreite des theoretisch möglichen Potenzials der PV-Stromerzeugung auf den Wohngebäuden Luxemburgs gemäß der oberen, mittleren und unteren Ertragswerte in Tabelle 10.1. Angabe der Werte in GWh/a.

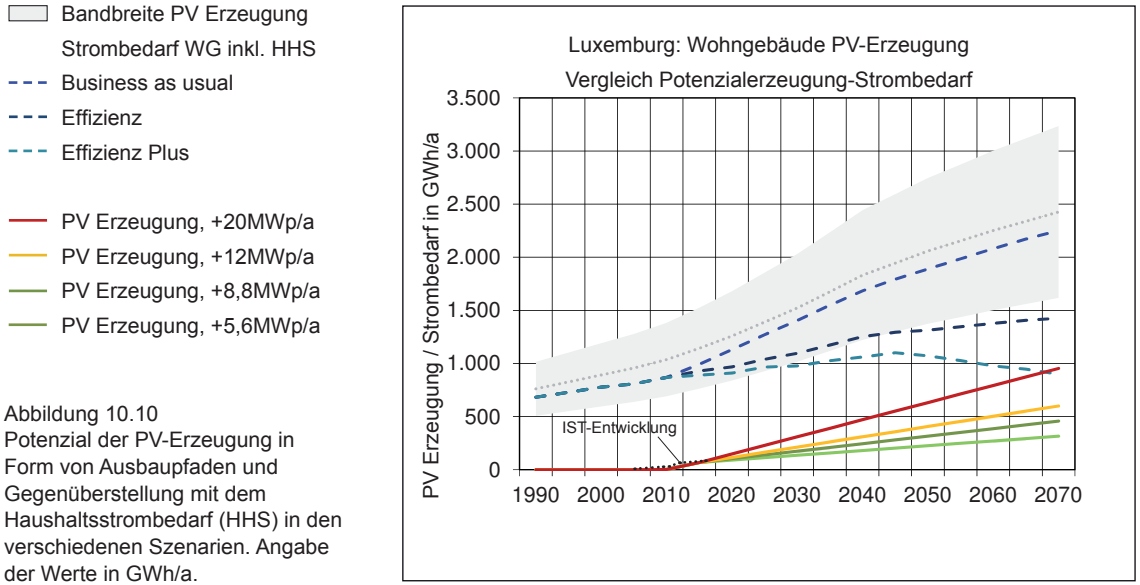


Abbildung 10.10
Potenzial der PV-Erzeugung in Form von Ausbaupfaden und Gegenüberstellung mit dem Haushaltsstrombedarf (HHS) in den verschiedenen Szenarien. Angabe der Werte in GWh/a.

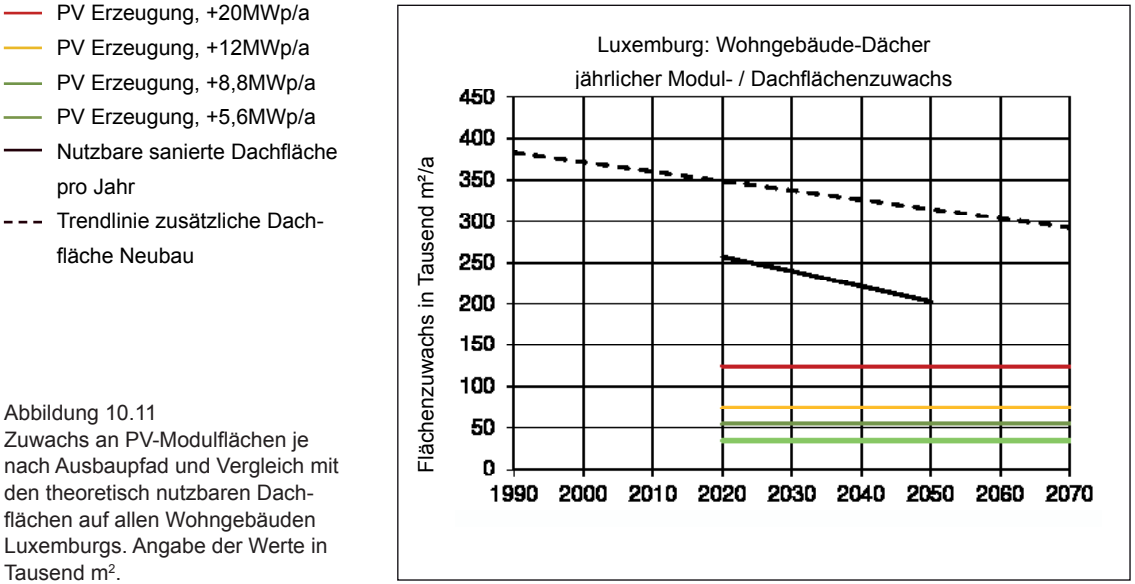
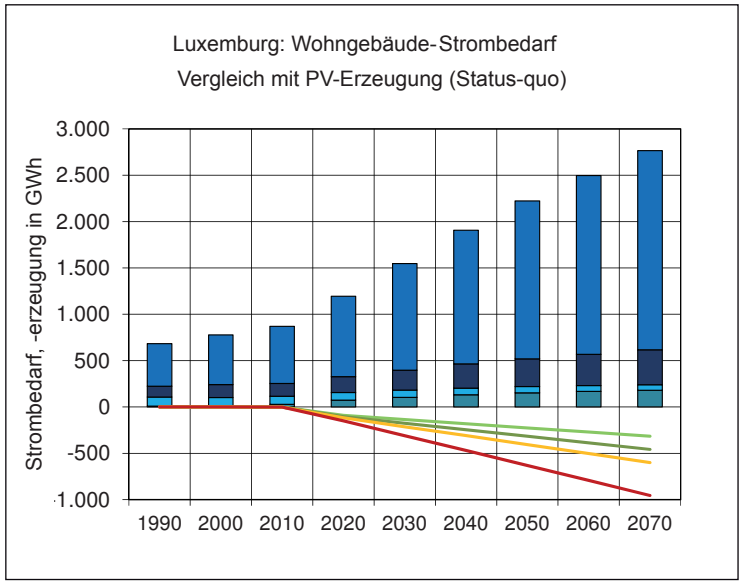
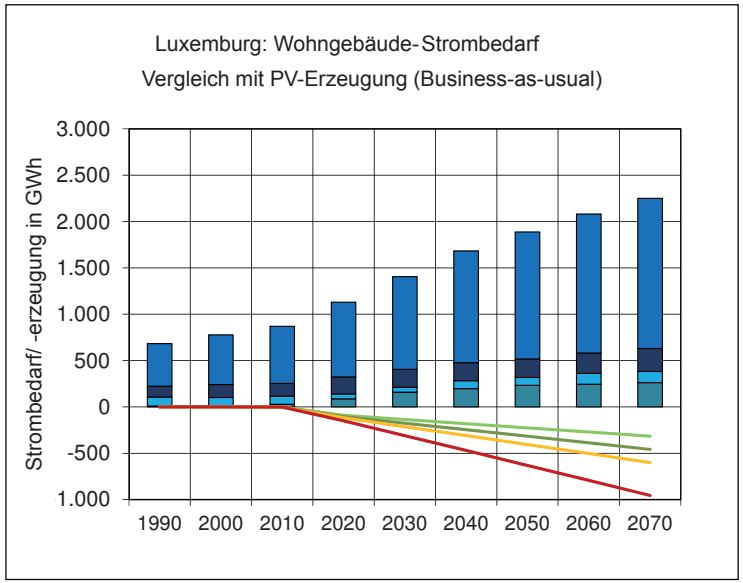


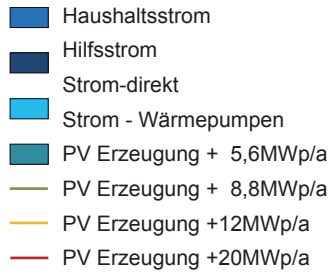
Abbildung 10.11
Zuwachs an PV-Modulflächen je nach Ausbaupfad und Vergleich mit den theoretisch nutzbaren Dachflächen auf allen Wohngebäuden Luxemburgs. Angabe der Werte in Tausend m².

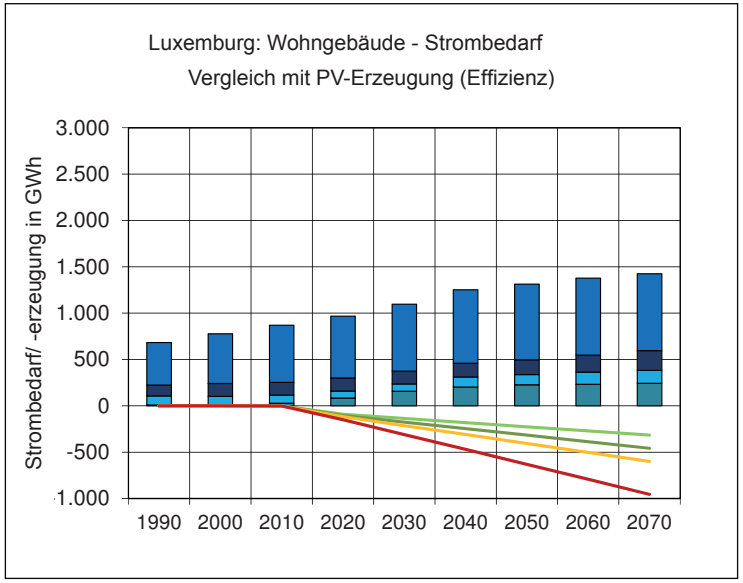
In Abbildung 10.10 wird das Potenzial der PV-Erzeugung in verschiedenen Entwicklungszenarien dargestellt. Die schwarz gepunktete Linie von 2005 bis 2015 stellt die bisherige Entwicklung der PV-Erzeugung auf Wohngebäuden 2005 - 2015 dar. Die daran anschließenden durchgezogenen Linien beschreiben die vier verschiedenen Ausbaupfade. Die gestrichelten Linien im oberen Bereich der Grafik stellen den Strombedarf der Wohngebäude inklusive Haushaltsstrom für die Szenarien Business-as-usual, Effizienz und Effizienz-Plus dar. Man erkennt, dass die Gesamterzeugung im schnellsten PV-Ausbaupfad (Zubau 20 MWp pro Jahr) dem Gesamt-Strombedarf inkl. Haushaltsstrom im Effizienz-Plus-Szenario im Jahr 2070 über die Jahresbilanz entspricht. Die grau-gepunktete Linie stellt das theoretische PV-Potenziel der Dachflächen bei mittleren Erträge dar, der grau hinterlegte Bereich die Bandbreite zwischen oberer und unterer Abschätzung der flächenspezifischen Erträgen gemäß Tabelle 10.1. Das theoretische PV-Potenzial bei mittleren Erträgen liegt demnach jahresbilanziell höher, als der Strombedarf im Business-as-usual-Szenario. In keinem der PV-Ausbaupfade wird das theoretische Potenzial auch nur annähernd ausgeschöpft.

Dies wird auch in Abbildung 10.11 deutlich. Schon alleine der Dachflächenzuwachs im Neubau würde genügen, um den Flächenbedarf aller Ausbaupfade abzudecken. Der jährliche Zuwachs an Modulflächen in den verschiedenen PV-Ausbaupfaden ist hier im Vergleich zum Dachflächenzuwachs im Neubau und zur jährlich zu sanierenden Dachfläche dargestellt. Die Nutzungsdauer der Dächer wurde mit durchschnittlich 40 Jahren angenommen, beim Flachdach beträgt sie nur 30 Jahre, jedoch 50 Jahre beim Steildach. Dies ergibt eine Sanierungsrate der Dächer von durchschnittlich 2,5%. Im Jahr 2050 sind bei dieser Annahme dann alle Dächer einmal saniert worden und, wenn diese konsequent mit PV-Modulen ausgestattet werden, wäre im Bestand 2050 die maximal mögliche Kollektorfläche erreicht. Die benötigten Dachflächen liegen auch im höchsten Ausbaupfad weit unter den verfügbaren Dachflä-









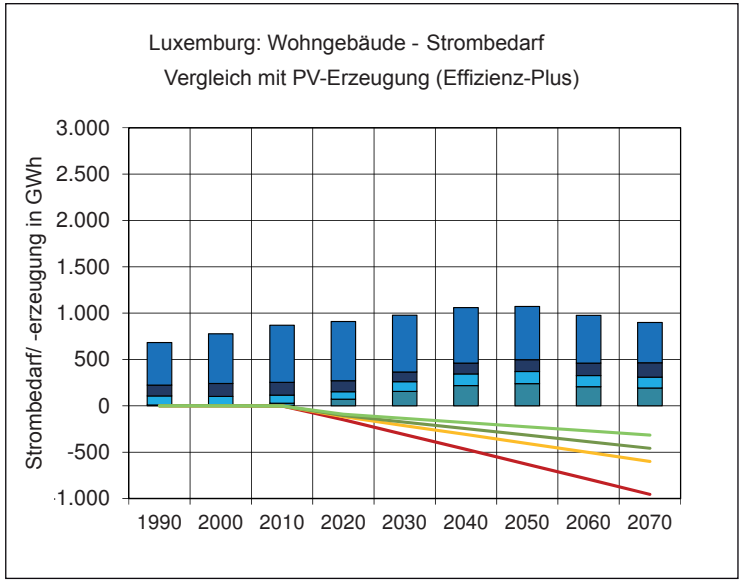


Abbildung 10.12
Gegenüberstellung des Strombedarfs der privaten Haushalte (Haushaltsstrom, Hilfsstrom, Heizung, Warmwasser) in den vier Hauptszenarien und des PV-Ertrags gemäß den vier verschiedenen Ausbaupfaden. Angabe der Werte in GWh/a.

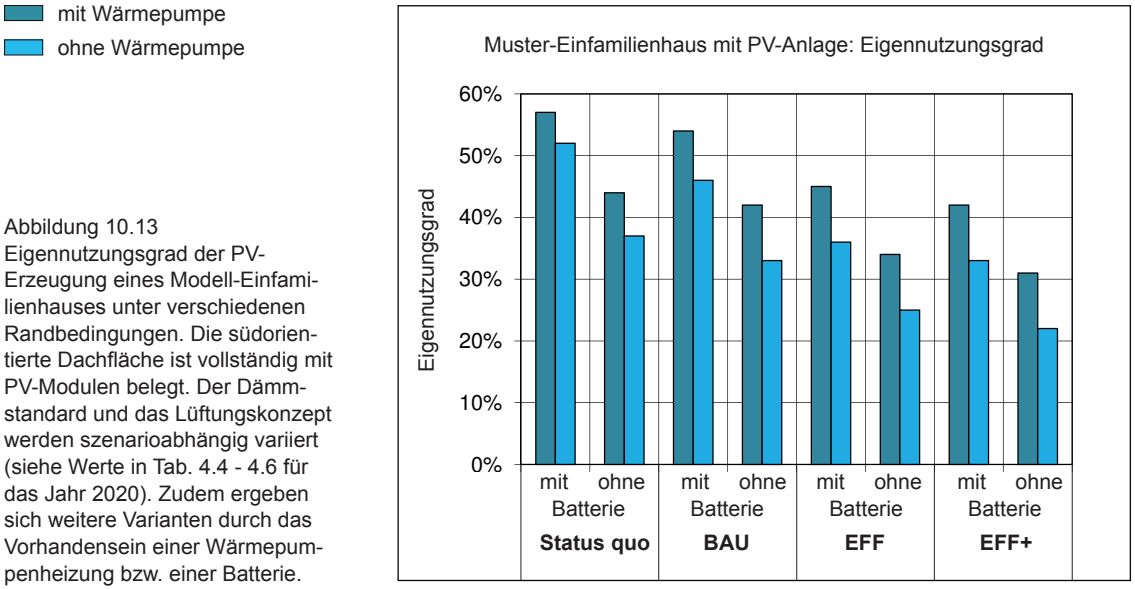


Abbildung 10.13
Eigennutzungsgrad der PV-Erzeugung eines Modell-Einfamilienhauses unter verschiedenen Randbedingungen. Die südorientierte Dachfläche ist vollständig mit PV-Modulen belegt. Der Dämmstandard und das Lüftungskonzept werden szenarioabhängig variiert (siehe Werte in Tab. 4.4 - 4.6 für das Jahr 2020). Zudem ergeben sich weitere Varianten durch das Vorhandensein einer Wärmepumpenheizung bzw. einer Batterie.

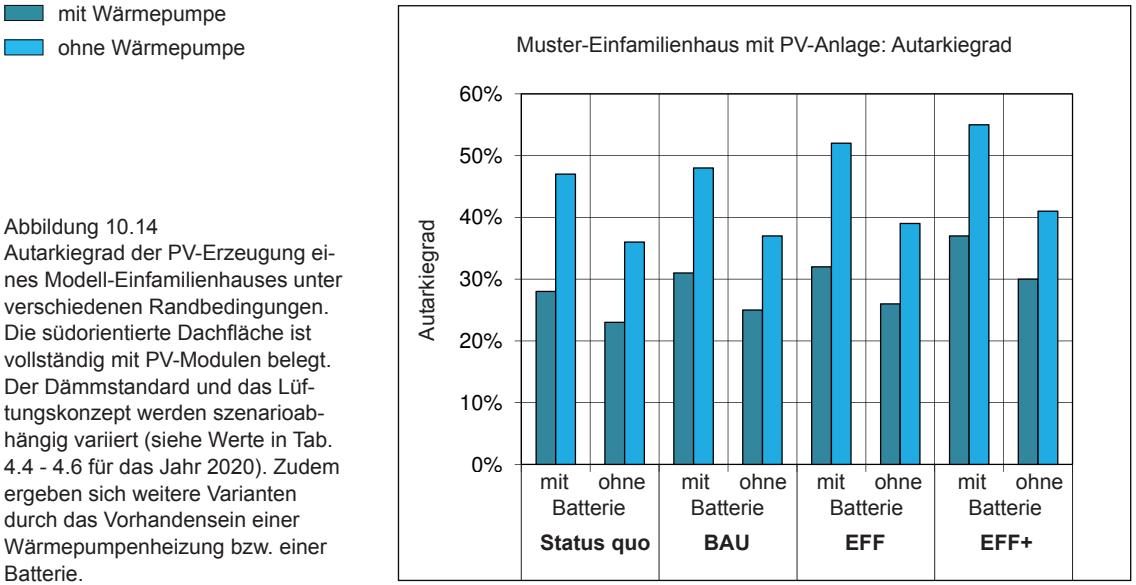


Abbildung 10.14
Autarkiegrad der PV-Erzeugung eines Modell-Einfamilienhauses unter verschiedenen Randbedingungen. Die südorientierte Dachfläche ist vollständig mit PV-Modulen belegt. Der Dämmstandard und das Lüftungskonzept werden szenarioabhängig variiert (siehe Werte in Tab. 4.4 - 4.6 für das Jahr 2020). Zudem ergeben sich weitere Varianten durch das Vorhandensein einer Wärmepumpenheizung bzw. einer Batterie.

chen im Neubau. Dies bedeutet, dass das Dachflächenpotenzial in jedem Falle ausreichend ist, um auch bei einer hohen Zuwachsrate die PV-Module auf den Wohngebäuden unterzubringen. Jedoch unterscheidet sich das Zubauvolumen zwischen den Ausbaupfaden deutlich. Für die untere Entwicklung müssten jährlich ca. 35.000 m² Modulfläche installiert werden, für die obere Entwicklung hingegen etwa 125.000 m².

Abbildung 10.12 zeigt für alle vier Hauptszenarien in welchem Verhältnis der Strombedarf und die PV-Erzeugung über den Betrachtungszeitraum 1990 - 2070 zueinander stehen. Daran wird vor allem deutlich, wie wichtig eine hohe Stromeffizienz für höhere Deckungsraten ist. Nur unter den Randbedingungen des Effizienz-Plus-Szenarios kann die PV-Stromroduktion jahresbilanziell in die Nähe des Strombedarfs geführt werden kann. Wenn man das Ziel einer vollständigen Energieversorgung mit erneuerbaren Energien anstrebt, ist gerade bei den Stromanwendungen die Energieeffizienz der Haushaltsgeräte und sonstigen Stromverbraucher besonders wichtig.

In Abbildung 10.15 ist nun abschließend für das Effizienz-Szenario der gesamte Strombedarf der privaten Haushalte inklusive Elektromobilität (mittlerer Ausbaupfad) dem Stromertrag der PV-Erzeugung gemäß dem mittleren Ausbaupfad gegenübergestellt.

10.3 Abschätzung des eigengenutzten PV-Stroms – unter besonderer Berücksichtigung der Elektromobilität

Eigennutzungsanteil und Autarkiegrad ohne E-Mobilität

Für die Effizienzszenarien wird nun abschließend genauer analysiert, welchen Beitrag die Photovoltaik zur Deckung des Strombedarfs in den privaten Haushalten leisten kann. Erst in einem zweiten Schritt wird abgeschätzt, inwieweit der Eigennutzungsanteil durch die Integration der Elektromobilität (z.B. durch gebäudeintegrierte Ladestationen) beeinflusst wird. Bei

der Photovoltaiknutzung wird normalerweise der erzeugte Strom zunächst direkt in den Wohngebäuden genutzt und nur die Überschüsse ins Netz eingepeist. Daher ist von Interesse, wie hoch der Eigennutzungsanteil unter verschiedenen Randbedingungen ist. Er hängt von einer Reihe von Einflussfaktoren ab (vgl. Lichtmeß 2015):

- Größe, Orientierung und Ausrichtung der PV-Anlage
- Effizienz der technischen Anlagen (z.B. Geräte, Beleuchtung, Pumpen)
- Vorhandensein einer Lüftungsanlage und deren Stromeffizienz und Betriebsweise
- Speichermöglichkeit des PV-Stroms (z.B. Batteriesystem)
- Nutzerverhalten und Belegung

Bei einer stromgestützten Wärmeversorgung (z.B. Wärmepumpe) kommen folgende Punkte hinzu:

- Wärmebedarf des Gebäudes inkl. Verteilverluste
- Temperaturniveau des Wärmeübergabesystems
- Effizienz und Betriebsweise der Wärmeerzeugung
- Wärmequelle und deren Erschließung
- Belegung und daraus resultierender Warmwasserbedarf
- Vorhandensein einer thermischen Solaranlage

Die Eigenverbrauchsquote ist als Quotient aus der direkt vor Ort genutzten Energie ($E_{PV,EV}$ wird nicht ins öffentliche Netz eingespeist) und der gesamten Energie ($E_{PV,tot}$) die von der PV-Anlage geliefert wird. Im Gegensatz dazu wird beim Solaren Deckungsgrad oder auch Autarkiegrad die selbst genutzte Energie ($E_{PV,EV}$) der PV-Anlage dividiert durch den gesamten Energiebedarf des Verbrauchers (E_{tot}).

Der Eigenverbrauchsanteil und der solare Deckungsgrad wird mit dem EIV-eigenen online-tool SUSI, (EIV 2017) für ein Einfamilienhaus für verschiedene Szenarien abgeschätzt. Variiert wurden die energetische Gebäudequalität, der Haushalts- und Hilfsstrombedarf sowie der Strombedarf des Wärmeversorgungssystems (Wärmepumpe bzw. Heizkessel).

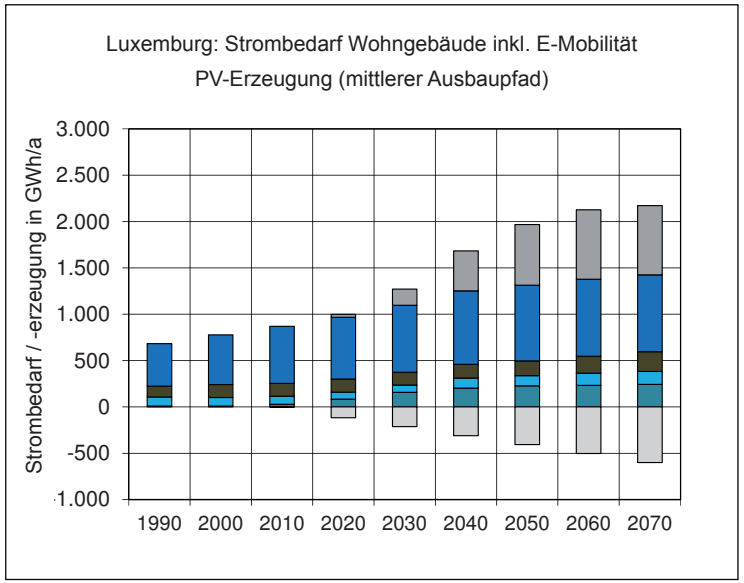


Abbildung 10.15
Gegenüberstellung des Strombedarfs der privaten Haushalte (Haushaltsstrom, Hilfsstrom, Heizung, Warmwasser) inklusive des Strombedarfs für Elektromobilität und dem PV-Ertrag aller Wohngebäude Luxemburgs gemäß den jeweils mittleren Ausbaupfaden. Angabe der Werte für das Effizienz-Szenario in GWh/a.

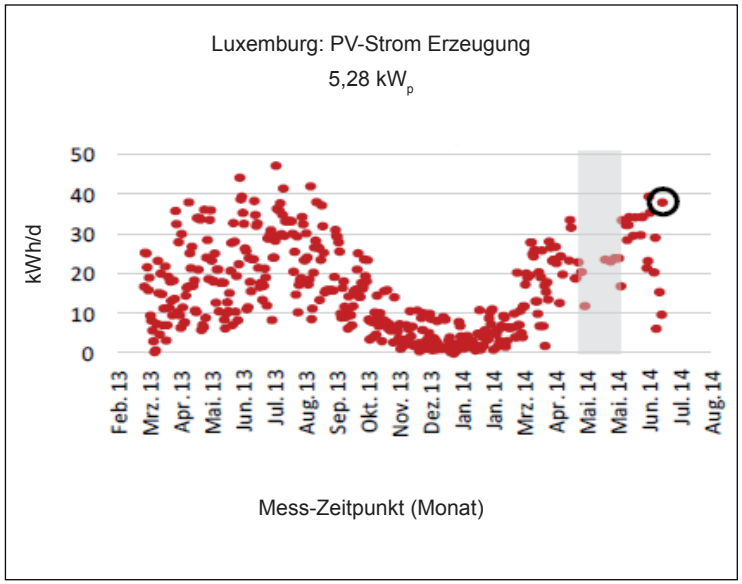
Außerdem wurden Varianten mit und ohne Batteriespeicher berücksichtigt. Die Ergebnisse sind in den Abbildungen 10.13 und 10.14 dargestellt. Die Werte liegen für die untersuchten Einfamilienhäuser unter den Randbedingungen des Effizienz-Szenarios zwischen 27 und 52 % und im Effizienz-Plus-Szenario zwischen 30 und 55 %. In Mehrfamilienhäusern liegen die Autarkiegrade geringer, weil die spezifischen Dachflächen pro Person bzw. pro Nutzflächeneinheit niedriger ausfallen. Auf der Basis dieser Ergebnisse wurde der Eigennutzungsgrad im Mittel von EFH und MFH mit etwa 30% angenommen.

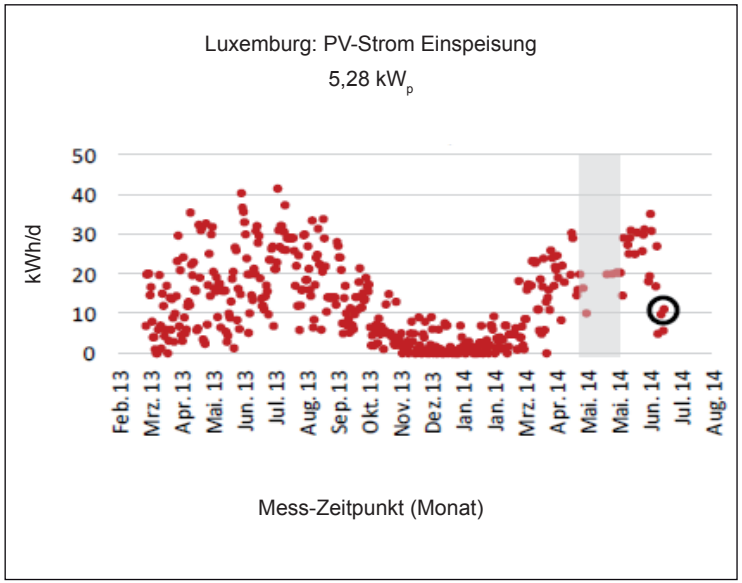
Erhöhung des Eigennutzungsgrades durch E-Mobilität

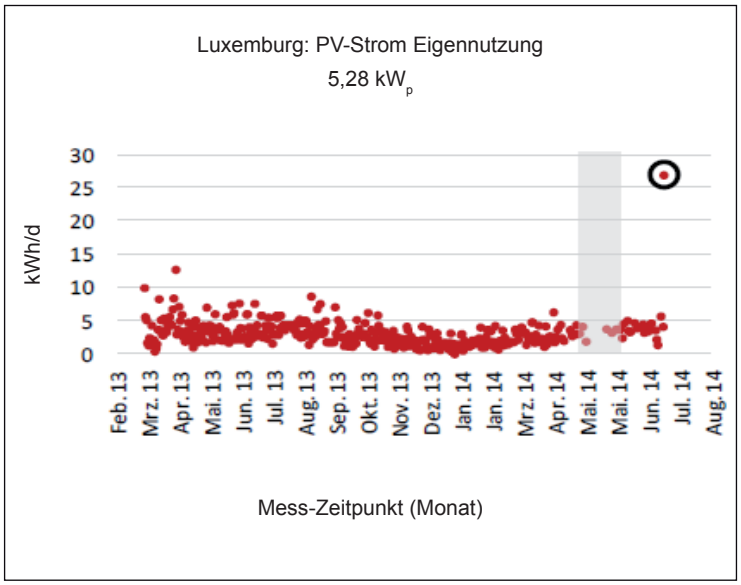
In Wohngebäuden mit PV-Anlage kann der Eigennutzungsgrad des PV- Stroms erhöht werden, wenn dieser zusätzlich zu den Anwendungen Haushaltsstrom, Hilfs- und Allgemeinstrom, Heizung und Warmwasser auch zur Ladung von Elektro-PKW genutzt werden kann. Die Höhe des Eigennutzungsgrades und das Ausmaß der Steigerung dieses Eigennutzungsgrades hängt von einer Reihe von Faktoren ab, u.a.:

Bereich mit Datenlücken

Datenpunkt mit Elektroauto (14.07.)







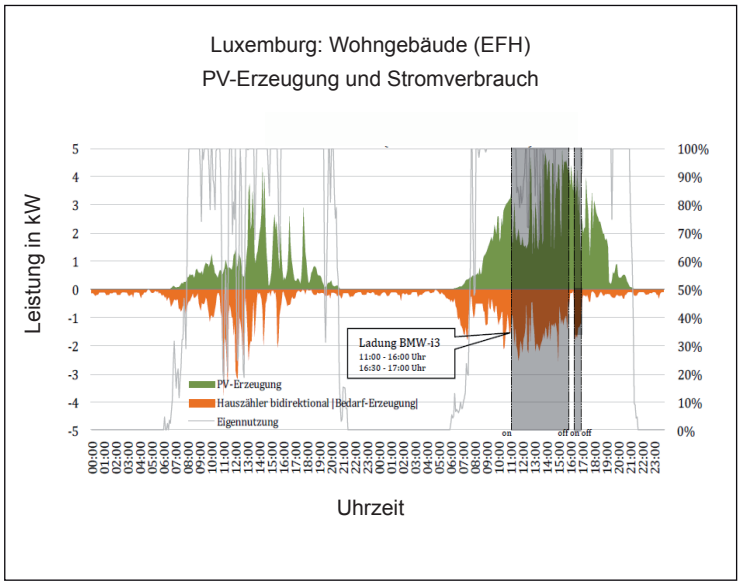


Abb. 10.16 a-d
Gemeinsame Darstellung von PV-Stromerzeugung, Einspeisung ins Netz und Eigennutzung mit/ ohne Elektro-PKW für ein typisches Einfamilienhaus mit einer PV-Anlage mit 5,28 kWp. Unten rechts ist zur näheren Erläuterung die PV-Erzeugung und der Strombedarf des Einfamilienhauses inklusive der Beladung des Elektro-PKW an einem Sommertag in hoher zeitlicher Auflösung aufgetragen. Quelle: (Lichtmeß 2017).

- Höhe des Haushaltsstrombedarfs
- Höhe des Hilfs- und Allgemeinstrombedarfs
- Art des Wärmeversorgungssystems, z.B. elektrische Wärmepumpe oder Heizkessel (fossil/Biomasse)
- Höhe der Stromerzeugung durch die gebäudeintegrierte PV-Anlage
- Zeitpunkt der Beladung (Tag/Nacht)

Um die Erhöhung des Eigennutzungsgrades zu prüfen, wurden detaillierte Berechnungen auf Basis von Messungen des Beladevorgangs eines Elektro-PKW an einem Einfamilienhaus mit PV-Anlage (5,28 kWp) durchgeführt (Lichtmeß 2017). Diese Berechnungen zeigen, dass im konkreten Fall das Fahrzeug (ein BMW i3) zwischen 11:00 und 16:00 sowie zwischen 16:30 und 17:00 bei Sonnenschein geladen wurde. Die Batterie wurde in diesen 5,5 Stunden von etwa 20% auf 70% der Kapazität geladen, dies entspricht ca. 11 kWh (siehe Abb. 10.14). In den drei Grafiken sind die Tageswerte der PV-Stromerzeugung, der Einspeisung sowie der Eigennutzung aufgetragen. Die Werte für den Tag, an dem der Elektro-PKW geladen wurde, sind eingekreist. Wie zu erkennen, war die Erzeugung am betreffenden Tag mit etwa 37 kWh recht hoch. Durch die zusätzliche Beladung des Elektro-PKW ist die Eigennutzung mit etwa 26 kWh deutlich höher als in den sonstigen Tagen während die Netzeinspeisung mit etwa 10 kWh deutlich geringer ausfällt. Die Messung zeigt, dass die zusätzliche Ladung von Elektro-PKW an sonnigen Sommertagen zu deutlichen Erhöhungen des Eigennutzungsgrades führt. Um den Einfluss der zusätzlichen Ladung des Elektro-PKW auf den Jahres-Eigennutzungsgrad zu ermitteln, wurden aufbauend auf den o.g. Messergebnissen Jahressimulationen für ein 200 m² großes Einfamilienhaus mit einer 5,28 kWp-PV-Anlage durchgeführt (Lichtmeß 2017a). Berechnet wurden Varianten mit Gas- und mit Wärmepumpenheizung sowie Varianten mit einem Haushaltsstrombedarf von 3.500 bzw. 2000 kWh/a. Für alle Varianten wurde der Eigennutzungsgrad zunächst ohne Beladung des Elektro-PKW und danach mit Beladung ermittelt.

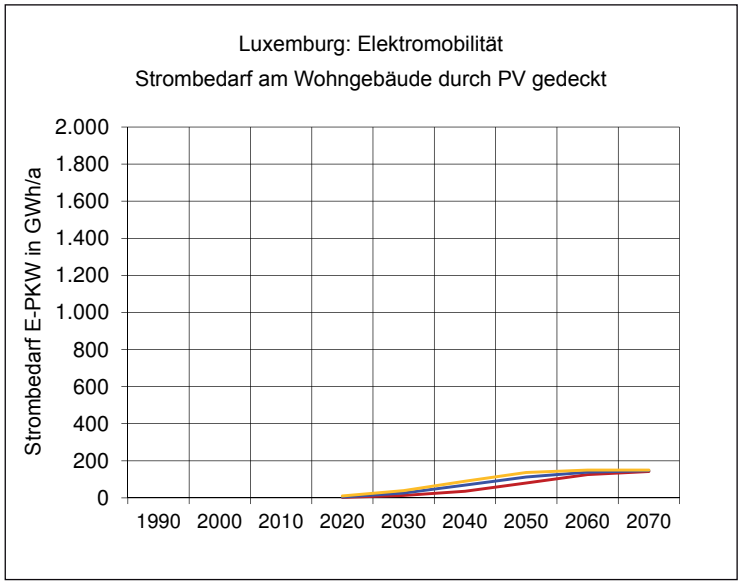


Abb. 10.17
Zeitliche Entwicklung des Strombedarfs für Elektro-PKW, der durch PV-Strom von Wohngebäuden in Luxemburg gedeckt werden kann. Angabe in GWh/a. Vergleiche Strombedarf gesamt (Abb. 10.3) und Stromgedarf Wohngebäude (Abb. 10.4).

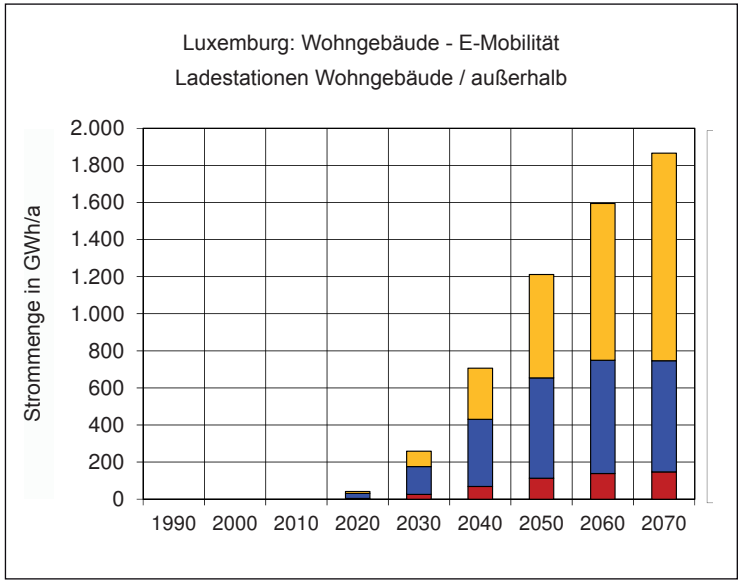


Abb. 10.18
Strombedarf für Elektro-PKW in Luxemburg gemäß mittleren Ausbaupfad und seine Verteilung auf verschiedene Ladestandorte. Angabe in GWh/a.

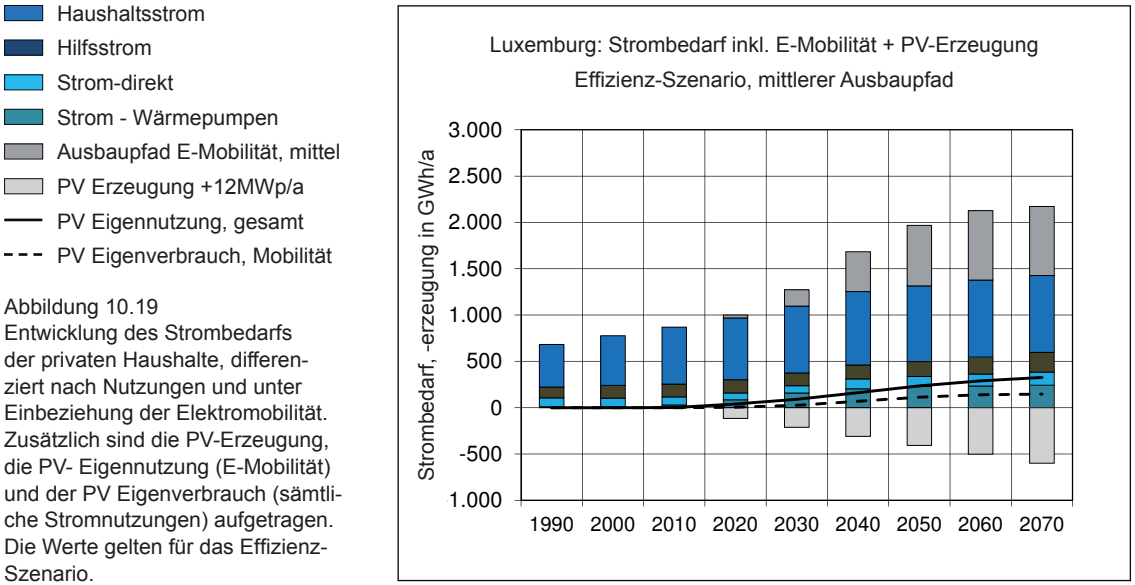


Abbildung 10.19
Entwicklung des Strombedarfs der privaten Haushalte, differenziert nach Nutzungen und unter Einbeziehung der Elektromobilität. Zusätzlich sind die PV-Erzeugung, die PV- Eigennutzung (E-Mobilität) und der PV Eigenverbrauch (sämtliche Stromnutzungen) aufgetragen. Die Werte gelten für das Effizienz-Szenario.

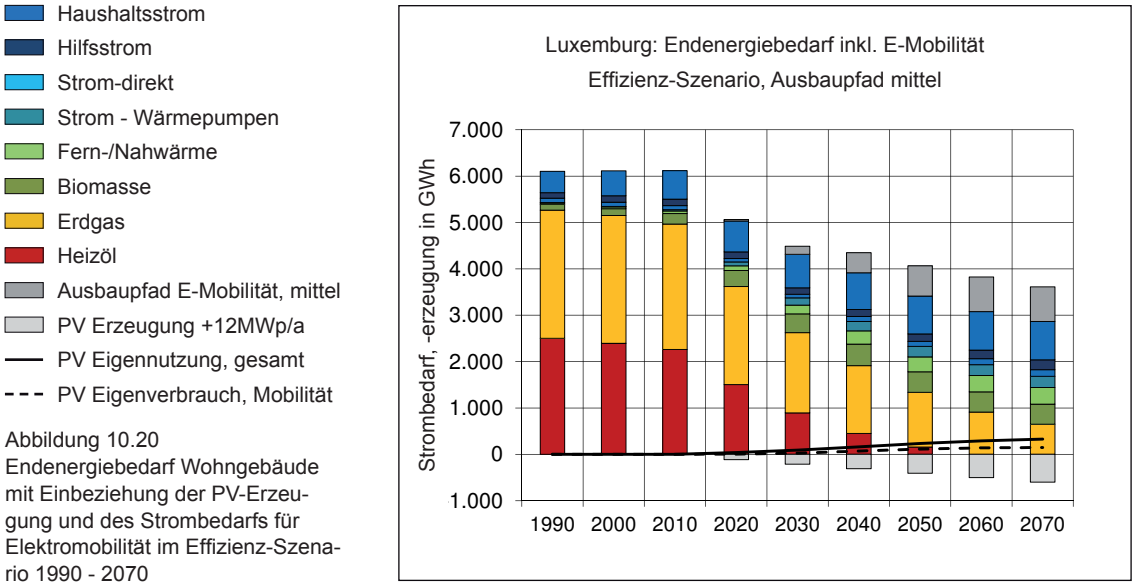


Abbildung 10.20
Endenergiebedarf Wohngebäude mit Einbeziehung der PV-Erzeugung und des Strombedarfs für Elektromobilität im Effizienz-Szenario 1990 - 2070

Die Modellrechnungen zeigen, dass „Tag-Lader“ (230 V, einphasig, 10A Absicherung) einen merklichen Anteil des Jahres-Strombedarfs des Elektro-PKW über die PV-Anlage decken können. Der eigengenutzte Anteil des PV-Stroms erhöhte sich im Mittel der untersuchten Varianten um etwa 1.400 kWh/a, der Eigendeckungsanteil stieg um etwa 25%. In Mehrfamilienhäusern steht pro Elektroauto wegen der vergleichsweise kleineren verfügbaren Dachfläche nur ein geringerer PV-Stromanteil zur Ladung zur Verfügung. Dieser wurde auf 500 kWh/a pro Elektro-PKW geschätzt.

Da nur ein Teil der Ladung an den Wohngebäuden tagsüber, und damit in Zeiten mit PV-Stromerzeugung der wohngebäudeintegrierten PV-Anlagen erfolgt, ist der Anteil des Strombedarfs der „zu-Hause-Lader“, der durch PV-Strom gedeckt werden kann, nur relativ gering. Er steigt von etwa 0,2 GWh/a im Jahr 2015 auf 2 bis 10 GWh/a im Jahr 2020, 13 bis 39 GWh/a im Jahr 2030 und auf 81 bis 137 GWh/a im Jahr 2050 (Abb. 10.17). Wie Abbildung 10.18 zeigt, wird der überwiegende Anteil des Strombedarfs der Elektro-PKW aus Netzstrom in/an Wohngebäuden bzw. an Bürogebäuden oder öffentlichen Ladestationen bezogen.

Unter den o.g. Annahmen ist der Anteil des an Wohngebäuden bezogenen PV-Stroms zur Beladung von Elektro-PKW relativ gering. Dies unterstreicht die Bedeutung einer guten öffentlichen Ladeinfrastruktur und des Ausbaus von PV-Anlagen auf den Dächern von Bürogebäuden und an anderen Arbeitsplätzen, in die die Arbeitnehmer mit dem Privat-PKW fahren.

Gegenüberstellung der Erzeugung/Bedarfe inkl. E-Mobilität und Eigennutzung

Bis hierher wurde der eigennutzbare Strom aus der PV-Erzeugung welcher für die E-Mobilität verwendet werden kann, hergeleitet. In Abbildung 10.19 erkennt man den Strombedarf im Effizienz-Szenario, also einem Szenario mit stark reduziertem Stromverbrauch und – mit negativem Vorzeichen dargestellt –

den PV-Ertrag beim 12 MWp p.a. PV-Ausbaupfad. Zusätzlich sind die Abschätzungen für den Eigennutzungsanteil des PV-Stroms aufgetragen: Die gestrichelte Line beschreibt den Anteil, der im Gebäude für die Anwendungen Heizung, Warmwasser, Hilfs- und Haushaltsstrom, der Bereich zwischen gestrichelter und durchgezogener Linie beschreibt den Teil des PV-Stroms, der zusätzlich zur Beladung von Elektro-PKW in/an Wohngebäuden genutzt werden kann.

Es ist gut zu erkennen, dass perspektivisch im Wohngebäudepark nur ein relativ geringer Anteil des Gesamt-Strombedarfs inkl. E-Mobilität durch PV-Strom gedeckt werden, so dass auch in Zukunft der Großteil des Gesamt-Strombedarfs aus dem Netz bezogen werden muss. Dies gilt schon in der dargestellten Jahresbilanz und noch stärker in Zeiten hohen Bedarfs mit niedriger PV-Erzeugung, wie etwa an trüben Wintertagen.

In Abbildung 10.20 ist die Stromerzeugung und der Strombedarf im Effizienz-Szenario mit dem 12 MWp p.a. PV-Ausbaupfad dargestellt, sowie der Eigenverbrauch und der gesamte Endenergiebedarf aller Energieträger. Wie zu erwarten, verringert sich der Anteil des eigengenutzten PV-Stroms nochmals, wenn er nicht nur dem Strombedarf, sondern dem Bedarf aller Energieträger gegenübergestellt wird.

Nachdem das Effizienz-Szenario aus Klimaschutzsicht nicht vollumfänglich mit den Anforderungen des 2-Grad-Ziels übereinstimmt, wurden die Kalkulationen zusätzlich für das Effizienz-Plus-Szenario durchgeführt, das gerade im Bereich der Stromnutzungen von einer viel höheren Stromeffizienz in den Wohngebäuden ausgeht (Abb. 10.21 und 10.22). Der durch PV-Erzeugung an Wohngebäuden erzielbare Anteil steigt dadurch sowohl aus Perspektive der Gesamtbilanz, als auch im Hinblick auf den eigengenutzten Anteil spürbar an. Daher ist es auch aus der Sicht der PV-Erzeugung und der Elektromobilität empfehlenswert ab etwa 2030 die Gesamtanforderungen am Niveau des Effizienz-Plus-Szenarios auszurichten.

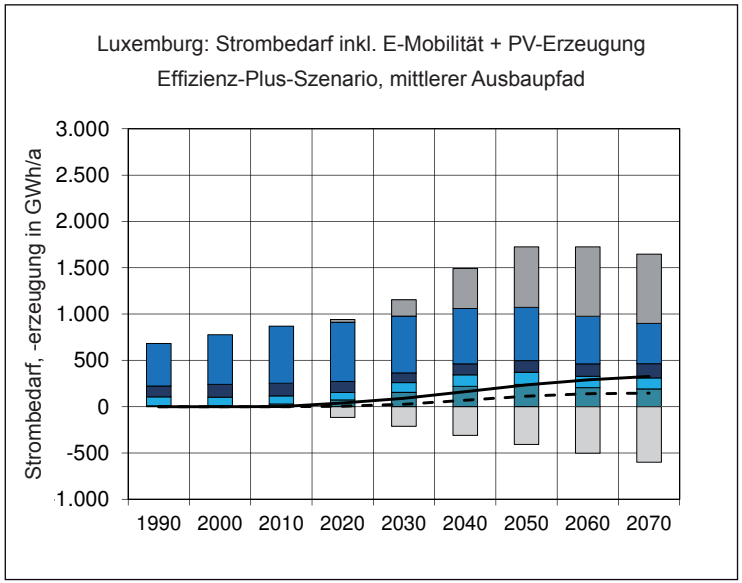


Abbildung 10.21
Entwicklung des Strombedarfs der privaten Haushalte, differenziert nach Nutzungen und unter Einbeziehung der Elektromobilität. Zusätzlich sind die PV-Erzeugung, die PV- Eigennutzung (E-Mobilität) und der PV Eigenverbrauch (sämtliche Stromnutzungen) aufgetragen. Die Werte gelten für das Effizienz-Plus-Szenario.

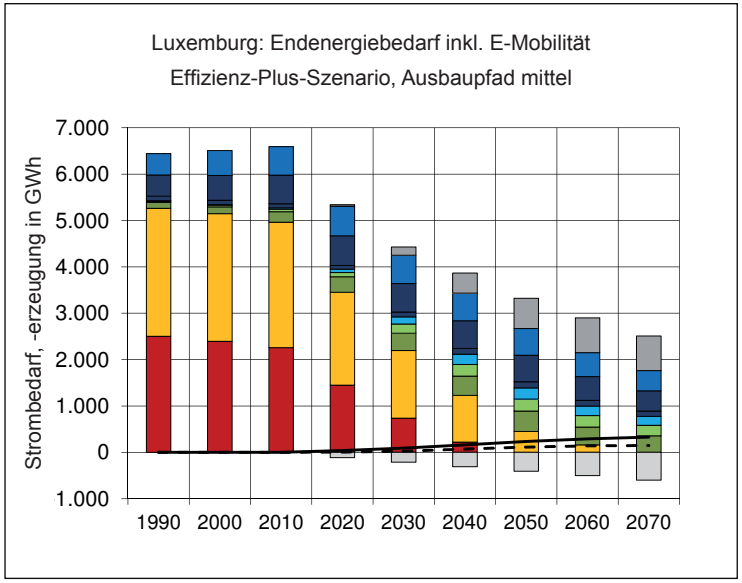


Abbildung 10.22
Endenergiebedarf Wohngebäude mit Einbeziehung der PV-Erzeugung und des Strombedarfs für Elektromobilität 1990 - 2070 im Effizienz-Plus-Szenario.

Tabelle 10.2
Strombedarf nach Anwendungen im Effizienz-Szenario und Vergleich mit Erzeugung und Eigenverbrauch der PV-Erzeugung gemäß dem mittleren Ausbaupfad (12 MWp p.a.) im Zeitraum 2000 - 2050. Angabe der Werte in GWh/a.

Jahr	**2000**	**2010**	**2020**	**2030**	**2040**	**2050**
Haushaltsstrom	536	616	667	722	793	817
Hilfsstrom	139	138	143	138	149	160
Strom direktelektrisch	93	87	74	79	108	109
Strom WP	9	29	84	157	203	228
PV-Erzeugung (12 MWp p.a.)	0	2	149	310	471	632
Eigenverbrauchsanteil im Gebäude (ohne E-Mobilität)	0	1	35	64	93	122

In Tabelle 10.2 sind nun abschließend die gezeigten Ergebnisse, bezogen auf das Effizienz-Szenario nochmals detailliert als Werte in GWh/a zusammengestellt. Auch hier wird nochmals deutlich, dass ausgehend von hohen Bedarfswerten, die im Betrachtungszeitraum durch die neue Anwendungen (Kleinelektronik, Kommunikationselektronik, Heizsysteme, Elektromobilität) sogar noch ansteigen ein Ausbau der PV-Erzeugung gegenübersteht, der diesen Effekt nich gänzlich ausgleichen kann. Das gilt umso mehr, wenn hier anstelle der gesamten PV-Erzeugung nur der durch PV abgedeckte Eigennutzungsanteil betrachtet wird.

Insofern kommt es darauf an, dass die Elektromobilität in das gesamte Energiesystem integriert wird, das künftig viel stärker auf Stromnutzungen aufbauen wird, als dies heute der Fall ist.

11 Literatur

(AGEB 2017) Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen. 2017. http://www.ag-energiebilanzen.de/.

(C&C 2000) Meyer, Aubrey: „Contraction & Convergence. The Global Solution to Climate Change." Green Books für The Schumacher Society, Bristol, 2000.

(Denkmalschutzbehörde Luxemburg) Service des sites et monuments nationaux (SSMN), Luxemburg, E-Mail vom 01.05.2016.

(EAFO 2017) European alternative fuels observatory – Luxemburg: http://www.eafo.eu/content/luxembourg. Abruf am 14.09.2017.

(EIV 2016) Ploss, Martin; Hatt, Tobias et al.: Modellvorhaben „KliNaWo" Klimagerechter Nachhaltiger Wohnbau – Zwischenbericht Jänner 2017, Energieinstitut Vorarlberg, Dornbirn 2017.

(EIV 2017) Energieinstitut Vorarlberg (Hrsg.): SUSI, Strom-Unabhängigkeits-Simulation. www.energieinstitut.at. 2017.

(Energiekonzept 2010) Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) (Hrsg.): Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung. Berlin, September 2010.

(EurObserv'ER. 2016b). „Solar Thermal Barometer". https://www.eurobserver.org/pdf/solar-thermal-and-csp-barometer-2016-en/. Abruf am 01.09.2017

(European Commission 2010) European Commission: Directive 2010/31/EU of 19 May 2010 on energy performance of buildings; European Commission, EU, 2010.

(European Commission 2012) European Commission: „Commission Delegated Regulation (EU) No 244/2012 of 16 January 2012 supporting Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council on the energy performance of buildings; Official Journal of the European Union, EU, 2012.

(EUROSTAT 2014) Eurostat: Hauptszenario-Bevölkerung am 1. Januar nach Alter und Geschlecht. 2014. http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?dataset=proj_13npms&lang=de. Abruf am: 16.09.2016.

(ewi/prognos 2005) Energiewirtschaftliches Institut an der Universität Köln (Hrsg.): „Energiereport IV", Oldenburg Industrieverlag, München, 2005.

(ewi/gws/prognos 2014) Schlesinger, Michael et al.: „Entwicklung der Energiemärkte – Energiereferenzprognose"; Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (Hrsg.); Eigenverlag, Basel, Köln, Osnabrück, 2014.

(Ewringmann 2017) Ewringmann, D.: Ermittlung und Bewertung der positiven und negativen Wirkungen des Treibstoffverkaufs unter besonderer Berücksichtigung negativer externer Umwelt- und Gesundheitseffekte – Status quo und maßnahmeninduzierte Veränderungen; Kurzfassung; Bericht für das Ministerium für nachhaltige Entwicklung und Infrastrukturen des Großherzogtums Luxemburg. 2017.

(Frondel et al. 2006) Frondel, Manuel et al.: „Erhebung des Energieverbrauchs der privaten Haushalte für das Jahr 2005", Forschungsprojekt Nr. 15/06 des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie, Eigenverlag, Berlin, 2006.

(Hansen 2009) Hansen, Patrick: „Entwicklung eines energetischen Sanierungsmodells für den europäischen Wohngebäudesektor unter dem Aspekt der Erstellung von Szenarien für Energie- und CO_2-Einsparpotenziale bis 2030.", Forschungszentrum Jülich GmbH Zentralbibliothek, Verlag, Jülich, 2009.

(Hansen 2012) Hansen, Frank „Le Luxembourg 1960 - 2010 – caractéristiques du parc automobile de 1962 a 2012"; Statec, Luxemburg, 2012. http://www.statistiques.public.lu/catalogue-publications/luxembourg/2012/PDF-17-12.pdf. Abruf am: 28.08.2017.

(IWU 2003) Institut Wohnen und Umwelt (Hrsg.): „Deutsche Gebäudetypologie – Systematik und Datensätze", Eigenverlag, Darmstadt, 2003.

(IWU 2003a) Born, Rolf; Großklos, Marc und Loga, Tobias; Institut Wohnen und Umwelt (Hrsg.): „Energieeinsparung durch Verbesserung des Wärmeschutzes und Modernisierung der Heizungsanlage für 31 Musterhäuser der Gebäudetypologie; Studie im Auftrag des Impulsprogramms Hessen". Eigenverlag, Wiesbaden und Darmstadt, 2003.

(IWU 2012) Institut Wohnen und Umwelt (Hrsg.): „Standardnutzungsbedingungen für LEG-Jahresverfahren", Excel-Datei >leg-standardnutzung<, Download unter: www.iwu.de. Abruf am: 05.10.2012.

(Kah et. al 2005) Kah, Oliver; Pfluger, Rainer; Feist, Wolfgang: „Luftwechselraten in bewohnten, sehr luftdichten Gebäuden mit kontrollierter Wohnungslüftung", IEA SHC TASK 38 / ECBCS ANNEX 38, 2995. Download unter: www.passiv.de.

(Kern 2016) Kern, Michaela: Die Konsequenzen des 2°-Ziels auf die energetischen Anforderungen an Wohngebäude, Eigenverlag, München, 2016.

(Kessler et al. 2011) Kessler, S.; Sieber, W.; Groß, A; Schedler, B; u.a.: „Schritt für Schritt zur Energieautonomie in Vorarlberg – Maßnahmenplan bis 2020 Schlussbericht“. 101 enkeltaugliche Maßnahmen. Bregenz: Vorarlberger Landesregierung. 2011.

(Kleemann et a. 2000) Kleemann, Martin; u.a.: „Die Entwicklung des Energiebedarfs zur Wärmebereitstellung in Gebäuden“, Bremer Institut (Hrsg.), Eigenverlag, Bremen, 2000.

(Klobasa et al. 2016) Klobasa, Marian; Steinbach, Jan; Pudlik, Martin: „Bewertung des Potenzials für den Einsatz der hocheffizienten KWK und der effizienten Fernwärme und Fernkälteversorgung.“ Ministerium für Wirtschaft Luxemburg (Hrsg.), (KWK-Studie), Eigenverlag, 2016.

(Klobasa 2017) Klobasa, Marian: persönliche Mitteilung per E-Mail.

(LEG Energiepass Heizung-Warmwasser) Loga, Tobias; Imkeller-Benjes, Ullrich: „LEG-Energiepass Heizung-Warmwasser“, Eigenverlag, Darmstadt, 1997, Download unter: www.iwu.de. Abruf am: 05.10.2012.

(Lichtmeß 2015) Lichtmeß, Markus: „Vereinfachte Bestimmung der Eigenstromnutzung von PV-Anlagen in einer Monatsbilanz“. EnOB Forschung für Energieoptimiertes Bauen. Luxemburg. 2015. http://www.enob.info/de/publikationen/publikation/details/vereinfachte-bestimmung-der-eigenstromnutzung-von-pv-anlagen/.

(Lichtmeß 2017) Lichtmeß, Markus: Strombilanz BMW i3; Messergebnisse der Beladung an einem EFH mit PV-Anlage; persönliche Mitteilung an die Autoren, August 2017.

(Lichtmeß 2017a) M. Lichtmeß: Auswertung zur Eigenstromnutzung von PV-Strom bei Einbeziehung von Elektroautos; Goblet Lavendier et Associés, 10.08.2017, Version 2.

(MdE 2014) Ministère de l‘Économie, „Dritter Nationaler Energieeffizienzaktionsplan Luxemburg“, NEEAP. https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/3e_plan_national_daction_en.pdf. Abruf am: 27.09.2017.

(MdE 2014a) . Ministère de l´Économie (Herausgeber): „Berechnung kostenoptimaler Niveaus von Mindestanforderungen an die Gesamtenergieeffizienz für neue und bestehende Wohn- und Nichtwohngebäude“; Luxemburg, April 2014.

(MdE 2017) Ministère de l‘Économie, „Vierter Nationaler Energieeffizienzaktionsplan Luxemburg“, NEEAP. https://www.gouvernement.lu/7180112/vierter-nationaler-energieeffizienzaktionsplan-luxembourg.pdf. Abruf am: 27.09.2017.

(Meinshausen et al.) Meinshausen, Malte; u.a.: „Greenhouse-gas-emission targets for limiting global warming to 2°C“, Nature, Vol. 458, 30. April 2009, doi: 10.1038/nature 08017.

(Miara et al. 2011) Miara, M.; u.a.: „Wärmepumpen Effizienz – Messtechnische Untersuchung von Wärmepumpenanlagen zur Analyse und Bewertung der Effizienz im realen Betrieb“, Fraunhofer Institut für solare Energiesysteme (Hrsg.), Eigenverlag, Freiburg, 2011.

(Nitsch et al. 2012) Nitsch, Joachim; u.a.: „Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global“, Eigenverlag, 2012. http://www.dlr.de/dlr/Portaldata/1/Resources/bilder/portal/portal_2012_1/leitstudie2011_bf.pdf. Abruf am: 27.09.2017.

(Nitsch 2013) Nitsch, Joachim: „Szenario 2013 – eine Weiterentwicklung des Leitszenarios 2001“, Arbeitspapier 2013.

(Peper/ Feist 2008) Peper, Soren; Feist, Wolfgang: „Gebäudesanierung >Passivhaus im Bestand< in Ludwigshafen-Mundenheim“, Passivhaus-Institut (Hrsg.), Eigenverlag, Darmstadt, 2008.

(Peper et al. 2009) Peper, Sorgen; u.a.: „Sanierung mit Passivhauskomponenten – Messtechnische Untersuchun und Auswertung Tevesstraße Frankfurt am Main“, Passivhaus Institut (Hrsg.), Eigenverlag, Darmstadt, 2008, 2009.

(PHPP 2007) Autorenteam des Passivhausinstituts: „Passivhaus-Projektierungs-Paket“, Eigenverlag, Darmstadt, 2007, Bezug über: www.passiv.de.

(PHPP) Autorenteam des Passivhausinstituts: „Passivhaus-Projektierungs-Paket“, Version 7 (2012), Eigenverlag, Darmstadt, 2012, Bezug über: www.passiv.de.

(PHPP V9) Autorenteam des Passivhausinstituts: „Passivhaus-Projektierungs-Paket“, Version 9 (2015), Eigenverlag, Darmstadt, 2015, Bezug über: www.passiv.de.

(Ploss 2015) Ploss, Martin; Jung, Patrick: „Strategiepapier zur energetischen Sanierung des luxemburgischen Gebäudebestands“. Interne Veröffentlichung, 2015.

(Ploss 2017): Ploss, Martin: „Kosten und Wirtschaftlichkeit von Sanierungen auf Passivhausniveau“, in: IBO (Österreichisches Institut für Bauen und Ökologie (Hrsg.): Passivhaus Bauteilkatalog Sanierung, Birkhäuser Verlag, 2017.

(Reiß/ Erhorn/ Ohl 2001) Reiß, J.; Erhorn, H.; Ohl, J.: „Klassifizierung des Nutzerverhaltens bei der Fensterlüftung“. HLH 52 (2001), Heft 8, S. 22-26.

(RGD 2016) Règlement grand-ducal du 23 juillet modifiant 1. Le règlement grand-ducal modifié du 30 novembre 2007 concernant la performance énergétique des bâtiments; Amtsblatt des Großherzogtums Luxemburg A-No. 146, Luxemburg 1. August 2016.

(Schön et al 2016) Schön, Michael; Reitze, Felix und Ragwitz, Mario: „Wissenschaftliche Beratung zu Fragen der Energiestrategie Luxemburgs mit besonderem Fokus auf Erneuerbare Energien: Aktualisierung der Potenzialanalyse für Erneuerbare Energien 2016“. Karlsruhe: IREES GmbH – Institut für Ressourceneffizienz und Energiestrategien und Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung (Fh-ISI). 2016.

(Schröder et. al 2012) Schröder, Franz; u.a.: „Spezifischer Heizenergieverbrauch und Temperaturverteilungen in Mehrfamilienhäusern – Rückwirkung des Sanierungsstandes auf das Nutzerverhalten“, HLH Bd. 61 (2010), Nr. 11, S. 22-25.

(STATEC 2014) STATEC (Nationales Institut für Statistik und Wirtschaftsstudien): Haas, Tom; STATEC (Hrsg.): „Baseline macro-économique de long terme. PIB Emploi et Population à l‘horizon 2030“. 21.07.2014.

(STATEC 2015) STATEC (Nationales Institut für Statistik und Wirtschaftsstudien): „A4302 Final energy consumption according to the different uses and energy forms 2000 - 2014“, 2015. http://www.statistiques.public.lu/stat/TableViewer/tableView.aspx.

(STATEC 2016) (Nationales Institut für Statistik und Wirtschaftsministerium): persönliche Mitteilung von Herrn Trauffler, E-mail vom 14.09.2016.

STATEC (Nationales Institut für Statistik und Wirtschaftsstudien) „B1501 Conditions de logement des ménages privés 1960-2001; Recensemet de la population“, 2005. http://www.statistiques.public.lu/stat/TableViewer/tableView.aspx?ReportId=12841&IF_Language=eng&MainTheme=2&FldrName=1&RFPath=70. Abruf am: 30.08.2017.

STATEC (Nationales Institut für Statistik und Wirtschaftsstudien) „B1508 Private households livin in conventional dwellings by main source of heating, main type of fuel and type of ownership 2001; Census data“, 2003. http://www.statistiques.public.lu/stat/TableViewer/tableView.aspx?ReportId=12847&IF_Language=eng&MainTheme=2&FldrName=1&RFPath=70. Abruf am: 30.08.2017.

STATEC (Nationales Institut für Statistik und Wirtschaftsstudien) RP2001 “Résultats du Recensement de la population 2011”, 2011. http://www.statistiques.public.lu/fr/population-emploi/rp2011/index.html. Abruf am: 30.08.2017.

(Sterner et al. 2011) Sterner, Michael; Jentsch, Mareike; Holzhammer, Uwe: “Energiewirtschaftliche und ökologische Bewertung eines Windgas-Angebotes”, Fraunhofer Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik (IWES) (Hrsg.), Internet-Publikation, http://www.greenpeace-energy.de/fileadmin/docs/sonstiges/Greenpeace_Energy_Gutachten_Windgas_Fraunhofer_Sterner.pdf. Abruf am: 10.12.2012.

(UN 2015) United Nations, Department of Economic and Social Affairs: “Population Division. World Population Prospects- the 2015 Revision” 2015. https://esa.un.org/unpd/wpp/DataQuery/, Abruf am 16.09.2016.

(UN Census Bureau) UN Census Bureau: https://www.census.gov/population/international/data/idb/region.php?N=%20Results%20&T=13&A=separate&RT=0&Y=2020,2025,2030,2035,2040,2045,2050&R=-1&C=LU. Abruf am 16.09.2016.

(Vallentin 2011) Vallentin, Rainer: „Energieeffizienter Städtebau mit Passivhäusern. Begründung belastbarer Klimaschutzstandards im Wohnungsbau“, Cuvillier Verlag, Göttingen, 2011.

(Vallentin 2012) Vallentin, Rainer: „Nachhaltige Energieversorgung – Lösungsansätze für den Sektor der privaten Haushalte in Deutschland bis 2050“, In: Feist, Wolfgang (Hrsg.): Protokollband kostengünstige Passivhäuser Nr. 46, „Nachhaltige Energieversorgung mit Passivhäusern“, Eigenverlag, Darmstadt, 2012, S. 9-98.

(VCÖ 2014) Verkehrsclub Österreich: Österreich hat im EU-Vergleich viele Autos, aber niedrige Fahrleistung; 19.05.2014, https://www.vcoe.at/news/details/vcoe-oesterreich-hat-im-eu-vergleich-viele-autos-aber-niedrige-fahrleistung, Abruf am: 28.08.2017.

(VCS 2017) Verkehrsclub Schweiz (VCS): Auto-Umweltliste – der Ratgeber für den umweltbewussten Autokauf; Ausgabe März 2017.

(WBGU 2009) Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen: „Kassensturz für den Weltklimavertrag – Der Budgetansatz“, Eigenverlag, Berlin, 2009.