unabhängige Forschung seit 1949

Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V.

Energiezukunft 2050

Teil II - Szenarien

Endbericht © FfE, 2009

Energiezukunft 2050

Teil II – Szenarien

Auftraggeber:	**EnBW** **E.ON Energie** **RWE Power** **Vattenfall Europe**
FfE-Auftragsnummer:	**EVU-0001**
Bearbeiter/in:	**M. Beer** **R. Corradini** **C. Fieger** **T. Gobmaier** **L. Köll** **R. Podhajsky** **M. Steck** **M. Zotz** **H.-D. Karl (ifo)**

Impressum

Endbericht
der Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V. (FfE)
in Zusammenarbeit mit dem ifo Institut für Wirtschaftsforschung

zum Projekt:

Energiezukunft 2050

Teil II – Szenarien

Auftraggeber:

EnBW
E.ON Energie
RWE Power
Vattenfall Europe

Kontakt

Am Blütenanger 71
80995 München
Tel.: +49 (0) 89 158121-0
Fax: +49 (0) 89 158121-10
E-Mail: info@ffe.de
Internet: www.ffe.de

Wissenschaftlicher Leiter
Prof. Dr.-Ing. U. Wagner

Geschäftsführer
Prof. Dr.-Ing. W. Mauch

Projekt-Manager
Dipl.-Phys. R. Corradini

2. Auflage, Oktober 2009

© 2009 Forschungsstelle für Energiewirtschaft e. V., München

Das Werk einschließlich aller Abbildungen ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwendung außerhalb der Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung der Forschungsstelle für Energiewirtschaft e. V. unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen, die Bearbeitung für Ton- und Bildträger sowie für Film und Fernsehen und die Einspeicherung und Bearbeitung in elektronischen Systemen.

ISBN: 978-3-941802-04-9

Inhalt

1 Definition der Szenarien ... 1

1.1 Vorhersagen ... 1

1.1.1 Trend ... 2
1.1.2 Prognose ... 2
1.1.3 Szenarien ... 3
1.1.4 Einflussfaktoren auf den Energieverbrauch ... 4
1.1.5 Bedarfsdeterminanten als Basis der Fortschreibung ... 6
1.1.6 Diskussion der Relevanz verschiedener Rahmendaten ... 9

1.2 Grundlagen der betrachteten Szenarien ... 12

1.2.1 Szenario 1 – Referenz ... 13
1.2.2 Szenario 2 – Erhöhte Technikeffizienz ... 15
1.2.3 Szenario 3 – Umweltbewusstes Handeln ... 17
1.2.4 Sozioökonomische Rahmendaten ... 21
1.2.5 Einfluss politischer Entwicklungen auf den Energieverbrauch ... 38

2 Szenario 1 – Referenz ... 39

2.1 Entwicklung im Sektor Haushalte ... 39

2.1.1 Maßgebliche Bedarfsdeterminanten ... 40
2.1.2 Technikstruktur ... 55
2.1.3 Endenergieverbrauch ... 66

2.2 Entwicklung im Sektor GHD ... 75

2.2.1 Maßgebliche Bedarfsdeterminanten ... 75
2.2.2 Technikstruktur ... 79
2.2.3 Endenergieverbrauch ... 96

2.3 Entwicklung im Sektor Industrie ... 105

2.3.1 Maßgebliche Bedarfsdeterminanten ... 105
2.3.2 Technikstruktur ... 109
2.3.3 Endenergieverbrauch ... 112

2.4 Entwicklung im Sektor Verkehr ... 129

2.4.1 Maßgebliche Bedarfsdeterminanten ... 129
2.4.2 Technikstruktur ... 134
2.4.3 Endenergieverbrauch ... 141

2.5 Entwicklung im Umwandlungssektor ... 147

2.5.1 Simulationsmodell zur Kraftwerkseinsatzplanung ... 147
2.5.2 Lastgangsynthese: Gesamtlastgang ... 148
2.5.3 Lastgangsynthese: Regenerative Energien ... 154

2.5.4 Lastgangsynthese: Kraft-Wärme-Kopplung 167
2.5.5 Notwendige Leistung 170
2.5.6 Technikstruktur und Parameter 172
2.5.7 Primärenergieverbrauch 180
2.5.8 CO_2-Emissionen 181
2.6 Zusammenfassung der Ergebnisse aus Szenario 1 183

3 Szenario 2 – Erhöhte Technikeffizienz 187

3.1 Entwicklung im Sektor Haushalte 187
3.1.1 Maßgebliche Bedarfsdeterminanten 187
3.1.2 Technikstruktur 191
3.1.3 Endenergieverbrauch 195
3.2 Entwicklung im Sektor GHD 203
3.2.1 Maßgebliche Bedarfsdeterminanten 203
3.2.2 Technikstruktur 203
3.2.3 Endenergieverbrauch 210
3.3 Entwicklung im Sektor Industrie 221
3.3.1 Maßgebliche Bedarfsdeterminanten 221
3.3.2 Technikstruktur 221
3.3.3 Endenergieverbrauch 222
3.4 Entwicklung im Sektor Verkehr 241
3.4.1 Maßgebliche Bedarfsdeterminanten 241
3.4.2 Technikstruktur 241
3.4.3 Endenergieverbrauch 246
3.5 Entwicklung im Umwandlungssektor 251
3.5.1 Technikstruktur und Parameter 251
3.5.2 Primärenergieverbrauch 255
3.5.3 CO_2-Emissionen 256
3.6 Zusammenfassung der Ergebnisse aus Szenario 2 259

4 Szenario 3 – Umweltbewusstes Handeln 263

4.1 Entwicklung im Sektor Haushalte 263
4.1.1 Maßgebliche Bedarfsdeterminanten 263
4.1.2 Technikstruktur 265
4.1.3 Endenergieverbrauch 265
4.2 Entwicklung im Sektor GHD 273
4.2.1 Maßgebliche Bedarfsdeterminanten 273
4.2.2 Technikstruktur 275
4.2.3 Endenergieverbrauch 275

4.3 Entwicklung im Sektor Industrie ... 285
4.3.1 Maßgebliche Bedarfsdeterminanten ... 285
4.3.2 Technikstruktur ... 285
4.3.3 Endenergieverbrauch ... 285
4.4 Entwicklung im Sektor Verkehr ... 301
4.4.1 Maßgebliche Bedarfsdeterminanten ... 301
4.4.2 Technikstruktur ... 304
4.4.3 Endenergieverbrauch ... 306
4.5 Entwicklung im Umwandlungssektor ... 313
4.5.1 Technikstruktur und Parameter ... 313
4.5.2 Primärenergieverbrauch ... 317
4.5.3 CO_2-Emissionen ... 318
4.6 Zusammenfassung der Ergebnisse aus Szenario 3 ... 319

5 Zusammenfassung und Ausblick ... 323

5.1 Zusammenfassung und Vergleich der Szenarien ... 323

5.2 Fazit und Ausblick ... 328

6 Anhang ... 331

6.1 Sozioökonomische Rahmendaten ... 331

7 Quellen ... 341

Abkürzungen

a	Jahr
A/V	Verhältnis von Oberfläche zu Volumen eines Gebäudes
AA-CAES	Advanced Adiabatic Compressed Air Energy Storage
AC	Wechselspannung
AGEB	Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen
BAK	Baualtersklasse
BAT	Beste verfügbare Technik (best available technic)
BHKW	Blockheizkraftwerk
BIP	Bruttoinlandsprodukt
BK	Braunkohle
BoA-Kraftwerk	Braunkohlekraftwerk mit optimierter Anlagentechnik
BRD	Bundesrepublik Deutschland
BSZ	Brennstoffzelle
BV	Bevölkerung
CCS	Carbon Capture and Storage
CES	Center for Economic Studies
CO_2	Kohlenstoffdioxid
CRT	Cathode Ray Tube
DB AG	Deutsche Bahn AG
DENA	Deutsche Energie-Agentur
DVD	Digital Versatile Disc
EB	Ensemblegebäudeklasse
EDV	Elektronische Datenverarbeitung
EEG	Erneuerbare Energien Gesetz
EEWärme-Gesetz	Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz
EEWG	Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz
EFH	Einfamilienhäuser
EJ	Exajoule
EnEV	Energieeinsparverordnung
EPR	Europäischer Druckwasserreaktor (European Pressurized Water Reactor)
ESF	Elektrostraßenfahrzeug
EU	Europäische Union
EVG	Elektronische Vorschaltgeräte
EVU	Energieversorgungsunternehmen
EZH	Ein- und Zweifamilienhäuser
FfE	Forschungsstelle für Energiewirtschaft e. V.
Fkm	Fahrzeugkilometer
FW	Fernwärme
GHD	Gewerbe, Handel, Dienstleistungen
GSV	Güterstraßenverkehr
GT	Gasturbine
GuD-Kraftwerk	Gas-und-Dampfturbinenkraftwerk
GW	Gigawatt

GWh	Gigawattstunde
H_2	Wasserstoff
HA	Heimarbeit
HEL	Heizöl Extra Leicht
HH	Haushalte
HKP	Heizkreispumpen
HWWA	Hamburgisches Welt-Wirtschafts-Archiv
IEKP	Integriertes Energie- und Klimaprogramm
IFO	Ifo-Institut für Wirtschaftsforschung e. V.
IKARUS	Instrumente für Klimareduktionsstrategien
IRC	Infra-Red-Coating
IT	Informationstechnik
IuK	Information und Kommunikation
KE	Kernenergie
KfW	KfW-Bankengruppe, früher Kreditanstalt für Wiederaufbau
KVG	Konventionelle Vorschaltgeräte
KW21	Projekt „Kraftwerke des 21. Jahrhunderts“
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
LCD	Liquid Crystal Display
LED	Light Emitting Diode
LK	Leistungsklasse
LW	Laufwasser
Mb/d	Millionen Barrel pro Tag
mE	mechanische Energie
MFH	Mehrfamilienhäuser
Mio.	Million
MIT	Massachusetts Institute of Technology
MIV	Motorisierter Individualverkehr
MJ	Megajoule
Mrd.	Milliarde
OECD	Organisation for Economic Cooperation and Development
OPEC	Organization of Petroleum Exporting Countries
ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr
ÖPV	Öffentlicher Personenverkehr
ORC-Prozess	Organic Rankine Cycle Prozess
PC	Personal Computer
PI	Produktionsindex
PJ	Petajoule
PK	Prozesskälte
Pkm	Personenkilometer
Pkw	Personenkraftwagen
PV	Photovoltaik
PW	Prozesswärme
RLT	Raumlufttechnik
RW	Raumwärme
SK	Steinkohle
SKE	Steinkohleeinheit

SSD	Solid State Drive
SSU	Straßen-, S- und U-Bahnen
SZ	Szenario
TC	Thin Clients
tkm	Tonnenkilometer
TRY	Testreferenzjahr
Tsd.	Tausend
TU München	Technische Universität München
TWh	Terawattstunde
TWP	Trinkwasserpumpen
UCTE	Union for the Coordination of Transmission of Electricity
ÜNB	Übertragungsnetzbetreiber
UV-Strahlung	Ultraviolettstrahlung
WMO	World Meteorological Organisation
WW	Warmwasser
ZEN	Zukunftsmodell ENergie

Energiezukunft 2050 –Teil II
Szenarien

Im zweiten Teil des Abschlussberichtes zum Projekt „Energiezukunft 2050“ wird die Projektion des in Teil I dargestellten Ist-Zustandes in die Zukunft betrachtet.

Dazu werden zunächst die Rahmenbedingungen einer Fortschreibung sowie die drei untersuchten Szenarien selbst definiert. In den darauf folgenden Kapiteln werden die Methoden und Ergebnisse der Szenarienrechnung für die einzelnen Anwendungssektoren und den Umwandlungssektor dargestellt.

1 Definition der Szenarien

1.1 Vorhersagen

Das Vorhersagen zukünftiger Entwicklungen ist verständlicherweise immer mit Unsicherheiten verbunden. In **Abbildung 1-1** sind einige Vorhersagen von Experten aufgelistet, die sich später als falsch herausstellten.

1901	***Wilbur Wright*** *Flugpionier*	Der Mensch wird es in den nächsten fünfzig Jahren nicht schaffen, sich mit einem *Metallflugzeug* in die Luft zu erheben.
1901	***Albert Einstein*** *Physiker*	Es gibt nicht das geringste Anzeichen, daß wir jemals Atomenergie entwickeln können.
1932	***Daimler Motoren Gesellschaft*** *Marktforschungsstudie*	Die weltweite Nachfrage nach Kraftfahrzeugen wird eine Million nicht überschreiten – allein schon aus Mangel an verfügbaren Chauffeuren.
1943	***Thomas J. Watson*** *Vorstandsvorsitzender IBM*	Ich glaube, auf dem Weltmarkt besteht Bedarf für fünf Computer, nicht mehr.
1965	***Battelle-Institut***	Die letzten Autobusse werden 1990 aus dem Stadtverkehr verschwinden.
1968	***Business Week***	Es wird der japanischen Automobilindustrie nicht gelingen, einen nennenswerten Marktanteil in den USA zu erreichen.
1977	***Ken Olsen*** *Vorstandsvorsitzender DEC*	Ich sehe keinen Grund, warum einzelne Individuen ihren eigenen Computer haben sollten.

Abbildung 1-1: *Berühmte Fehlprognosen der Geschichte /SCMI 98/*

Im Bereich der Energietechnik steht der Club of Rome mit seinen Vorhersagen, insbesondere zu Peak-Oil, inzwischen quasi als Synonym für falsche Vorhersagen. Für die 1972 veröffentlichte Studie „Grenzen des Wachstums“ von Donella und Dennis L. Meadows wurde erstmals die von Jay W. Forrester am Massachusetts Institute of Technology (MIT) entwickelte Methodik der System Dynamics angewendet. Das entwickelte Szenario prognostizierte ein Erreichen der natürlichen Wachstumsgrenzen „in den nächsten hundert Jahren“, da die angesetzten Rahmenbedingungen zumeist von exponentiellem Wachstum ausgingen.

Die Begriffe Szenario und Prognose werden im Zusammenhang mit der Vorhersage der Zukunft häufig synonym oder zumindest nicht genau bzw. sogar falsch gegeneinander abgegrenzt verwendet.

Zur Diskussion der Vorteile von Prognosen und Szenarien werden zunächst die Begriffe Trend, Prognose und Szenario erläutert.

1.1.1 Trend

Unter einem Trend versteht man die Grundrichtungen von statistisch erfassbaren Entwicklungen. **Abbildung 1-2** zeigt beispielhaft den Trend verschiedener Kennzahlen aus dem Gebäudebereich. Die historisch belegbaren Daten wurden in die Zukunft extrapoliert. Hierbei wird deutlich, dass die Ergebnisse von derartigen Fortschreibungen – gerade bei langen Zeiträumen – nicht ohne eine Interpretation und Prüfung angenommen werden können. So ist ein unendliches Ansteigen von Parametern ebenso unrealistisch, wie ein stetes Absinken.

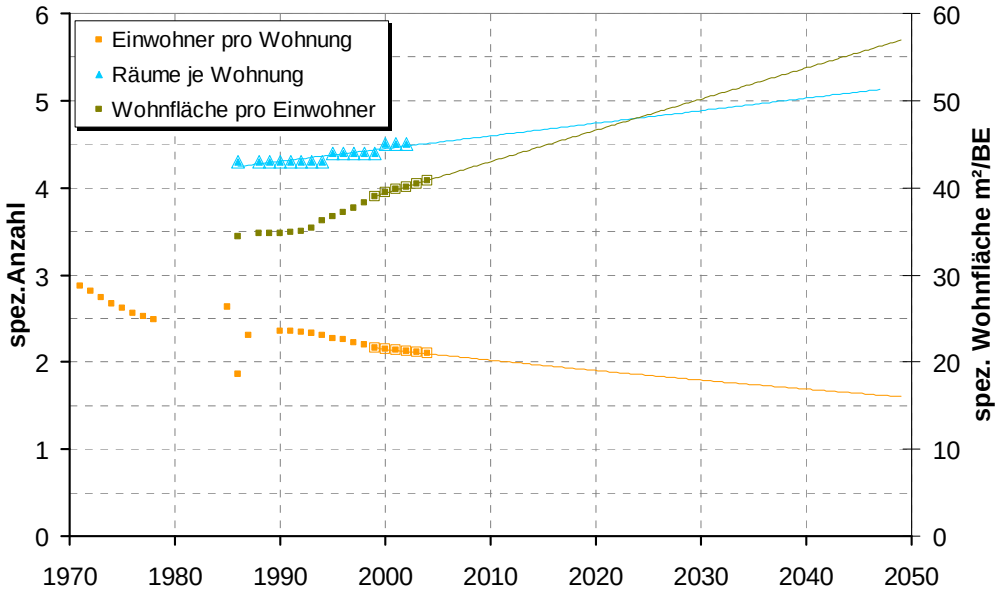

Abbildung 1-2: *Beispiele für Trendfortschreibungen aus historischen Daten /StBu 08b/, /eigene Fortschreibung/*

Trendfortschreibungen einzelner Einflussfaktoren bilden dennoch häufig die Grundlage sowohl für Prognosen als auch Szenarien. Die Plausibilität jedes Einzeltrends sowie die Konsistenz und Verknüpfbarkeit mehrerer Trendfortschreibungen müssen jedoch geprüft werden.

Grundaussage einer Trendfortschreibung ist: „Das war schon immer so und wird auch immer so bleiben!“

1.1.2 Prognose

Der Begriff der Prognose entstand aus dem griechischen Wort „Prognosis“ und bedeutet das Vorwissen und die Vorhersage eines Ereignisses, eines Zustandes oder einer Entwicklung.

Eine Prognose ist die Bestimmung eines oder mehrerer Trends bzw. die Vorhersage von Trends für einen bestimmten zukünftigen Zeitraum. Prognosen werden auf der Basis von Beobachtungen der Vergangenheit und der Gegenwart erstellt. Für den beobachteten Trend in der Vergangenheit muss dafür eine Theorie oder Erklärung bzw. ein zu Grunde liegender Mechanismus gefunden werden. Unter der Annahme, dass dieser Mechanismus auch im Prognosezeitraum weiterhin Gültigkeit besitzt, kann der Trend entsprechend fortgeschrieben werden.

Nach /TON 81/ sind wissenschaftliche Prognosen das Ergebnis erkenn- und messbarer Gesetzmäßigkeiten. Diese wiederum können Aussagen deterministischer oder stochastischer Natur sein. Als Basis einer Prognose dienen daher Erkenntnisse zur Kausalität, also des Zusammenhangs zwischen Ursache und Wirkung, die für einen Trend verantwortlich sind. Unter Umständen kann einer Wirkung dabei eine mathematische Wahrscheinlichkeit zugeordnet werden.

Da beim Erstellen einer Prognose sämtliche verfügbaren Erkenntnisse über den Mechanismus eines Trends berücksichtigt werden, stellt eine Prognose immer eine einzige und allgemeingültige Zukunftsvorhersage dar. Im Gegensatz zum anschließend erläuterten Begriff des Szenarios stellt eine Prognose eine Fortschreibung einer aktuellen Entwicklung auf einem eng abgegrenzten Teilgebiet dar. Prognosen werden dabei immer durch Experten für das entsprechende Teilgebiet erstellt.

Die Aussagekraft einer Prognose wird dabei nach /LIN 02/ von folgenden vier Faktoren bestimmt:

- Extrapolierbarkeit aus der Vergangenheit
- Allgemeinheit, Bestimmtheit und Grad der Bestätigung der zugrunde liegenden Theorie / des Mechanismus
- Länge des bisherigen Beobachtungszeitraums sowie Qualität der Vergangenheitsinformation
- Länge des Prognosezeitraums

Grundaussage einer Prognose ist: „Die Zusammenhänge sind bekannt, daher wird die Zukunft sich in der vorhergesagten Weise entwickeln!“

1.1.3 Szenarien

Im Gegensatz dazu ist ein Szenario nach /WIL 06/ „… ein plausibel ausformuliertes, hypothetisches Zukunftsbild eines abgegrenzten Problemfeldes, das alternative Entwicklungsmöglichkeiten berücksichtigt und der Entscheidungsvorbereitung dient.“

In Abgrenzung zu der Fortschreibung eines einzigen Trends aus der Vergangenheit in die Zukunft, handelt es sich bei einem Szenario also um die gedankliche Analyse der erwarteten Entwicklung einzelner Teilsysteme und die Berechnung der Entwicklung des Gesamtsystems aufgrund dieser Einzelprognosen. Ein Szenario zeigt also einen angenommen Zustand in der Zukunft und die Entwicklung dorthin auf. /BLA 06/ definiert daher Szenarien als „… die Beschreibung einer komplexen, in sich konsistenten zukünftigen Situation sowie die Darstellung eines Entwicklungspfades, der einen Weg aus der Gegenwart zu dieser möglichen Situation aufzeigt.“

Beim Erstellen von Szenarien wird die Entwicklung sämtlicher Faktoren, die einen Einfluss auf das betrachtete Gesamtsystem haben, mit einbezogen. Eine Besonderheit

ist die Möglichkeit, durch Szenarien nicht lineare Verläufe und unberechenbare Ereignisse in Form von qualitativen und normativen Einflüssen in der Zukunftsforschung zu berücksichtigen. Dies grenzt die Szenariofeldanalyse von anderen Prognosemodellen ab, die formale Zusammenhänge für die Fortschreibung benötigen.

Das Erstellen von Szenarien folgt einer weitgehend intuitiv geprägten Methodik mit einer sehr systematischen Vorgehensweise, in die analytische Praktiken als Teilmethoden integriert werden können.

Da sich die Schlüsselfaktoren, die auf einen Trend wirken, unterschiedlich entwickeln können, variiert die Qualität der Einflüsse stark. Daher werden oft Spannen der Eintrittswahrscheinlichkeit für die Entwicklung der Einflüsse angegeben. Anschließend werden für das betrachtete Gesamtsystem Szenarien erstellt, indem die mögliche Entwicklung angesichts dieser Einflüsse dargestellt wird. Entsprechend entstehen so immer mehrere Szenarien für die Entwicklung des Gesamtsystems. Prinzipiell können je nach Anzahl der Faktoren und deren mögliche Entwicklungen beliebig viele Szenarien erstellt werden. Die Aussagekraft und Anschaulichkeit steigt aber nicht mit zunehmender Anzahl an Szenarien. Deshalb werden zumeist drei Szenarien erstellt, da bei dieser Menge eine kognitive Grenze der menschlichen Vorstellungskraft liegt. Üblicherweise werden ein Best-Case-Szenario, ein Worst-Case-Szenario und ein Trendszenario formuliert. Ein Szenario kann seinem inneren Wesen nach nicht falsch sein. Allenfalls ist es weniger wahrscheinlich als ein anderes Szenario.

Szenarien können folgende Funktionen haben:

- Orientierung: Erkenntnisse aus Szenarien müssen/können nicht direkt in Entscheidungen überführt werden.
- Kommunikation: Informationen über zukünftige Entwicklungsmöglichkeiten werden strukturiert dargestellt (für Entscheidungsträger).
- Didaktik: Zwang zur systematischen Auseinandersetzung mit Entwicklungsmöglichkeiten

Grundaussage eines Szenarios ist: „Was könnte passieren, wenn sich etwas anderes in einer bestimmten Art und Weise entwickelt?“

1.1.4 Einflussfaktoren auf den Energieverbrauch

In diesem Arbeitspunkt werden Einflussfaktoren für die zukünftige Entwicklung im Energiebedarf bis 2050 analysiert. Die Abhängigkeiten sind vielfältig, z. B. spielen Veränderungen des wärmetechnischen Zustandes der neu errichteten Gebäude sowie des Gebäudebestands, mögliche Rückwirkungen durch geänderte Mobilitätsbedürfnisse, soziodemographische Rahmenbedingungen (wie etwa Arbeitszeiten, Telepräsenz etc.) oder unterschiedliche gerätetechnische Ausstattungen in Büros und Haushalten eine wichtige Rolle. Als Basisjahr für die weitere Fortschreibung wird das Jahr 2003 herangezogen, für das zu Beginn des Projektes eine verlässliche statistische Datenbasis zur Verfügung stand. Als Stützjahre sind die Jahre 2010, 2020, 2030 und 2040 vorgesehen.

Für die Szenarien der zukünftigen Entwicklung des Energiebedarfs werden für die einzelnen Anwendungsarten jedes Sektors die relevantesten Einflussfaktoren analysiert. So werden z. B. die konjunkturellen Einflüsse auf den industriellen Energiebedarf (Entwicklung des Produktionsindexes und des BIP), die Entwicklung des Kältebedarfs

(mechanische Energie) usw. betrachtet. Erster Schritt wird daher die Zusammenstellung der Einflussfaktoren und die Prognose ihrer zeitlichen Entwicklung an Hand theoretischer Überlegungen sein. Darauf aufbauend wird für die einzelnen Stützjahre und dem Zieljahr 2050 der mögliche Verlauf der Bedarfsdeterminanten prognostiziert. Insgesamt ergibt sich damit für die einzelnen Zeitpunkte die sektorale Aufteilung des Bedarfs an Energie bzw. Energiedienstleistungen.

Um diese Entwicklungen transparent zu machen, sind für die Anwenderseite der heutige Stand sowie Abschätzungen über die Entwicklung des Bedarfs an Nutzenergie bzw. Energiedienstleistungen zu erarbeiten. Dabei muss nach den Energieformen Wärme, mechanische Energie, Licht, sowie Information und Kommunikation differenziert werden. Anschließend sind mit Blick auf den heutigen und den prognostizierten Stand der Technik mögliche langfristige Trends zu betrachten.

Für die Beurteilung der Potenziale sind u. a. folgende Fragestellungen zu berücksichtigen:

- Welches Temperaturniveau hat der Wärme- bzw. Kältebedarf in den verschiedenen Sektoren? Wie groß ist ihr Bedarf im Zeitverlauf über die kommenden Dekaden, wobei strukturelle Veränderungen der Wirtschaftssektoren und ihrer Produktionstechnik oder der Wärmeschutz von Gebäuden zu beachten sein dürften?
- Wie beeinflussen die Änderungen im Nutzenergiebereich bei den Umwandlungssystemen und bei dem Wechsel von Endenergieträgern sowie die vermehrte Nutzung dezentraler erneuerbarer Energien (die teilweise nicht als kommerzielle Energieträger in der Statistik erscheinen) den Bedarf an Primärenergieträgern?
- Wie sind die möglichen Kostendegressionen bei den Effizienztechniken (z. B. Wärmeschutz, Wärmepumpen, kontrollierte Lüftung mit Wärmerückgewinnung), den neuen Techniken der Energiewandlung (z. B. Brennstoffzellen) oder den erneuerbaren Energien einzuschätzen?
- Wie sieht die Dynamik dieser technischen Möglichkeiten mit ihren z. T. sehr verschiedenen Re-Investitionszyklen aus? Gibt es Interimstechnologien, die vielleicht nur vorübergehend zum Einsatz kommen, wie z. B. die Brennwertkessel, die durch Wärmepumpen und/oder Brennstoffzellen abgelöst werden?
- Welche bestehenden Hemmnisse einer technologischen Neuerung sind noch zu beseitigen und welche beschleunigende Wirkung hätte dies auf die Marktdiffusion einer betrachteten Technik?

Am Beispiel eines Kraftwerksneubaus seien einige Einflussfaktoren kurz dargestellt, die zumindest unterbewusst in die Überlegungen zu einer künftigen Entwicklung der Energiebereitstellung einfließen müssen. Am energiewirtschaftlichen Zieldreieck aus Versorgungssicherheit, Wirtschaftlichkeit und Umweltverträglichkeit wird deutlich, dass nicht allein die Wirtschaftlichkeitsrechnung über den Einsatz einer bestimmten Technologie entscheidet. Mehrere Größen haben einen entscheidenden Einfluss auf die Zukunft der Energiebereitstellung. So ist es notwendig, die in **Abbildung 1-3** innerhalb des Dreiecks und in der Nähe der Ziele platzierten Rahmenbedingungen zu kennen, um belastbare Aussagen zu einem Kraftwerksneubau treffen zu können.

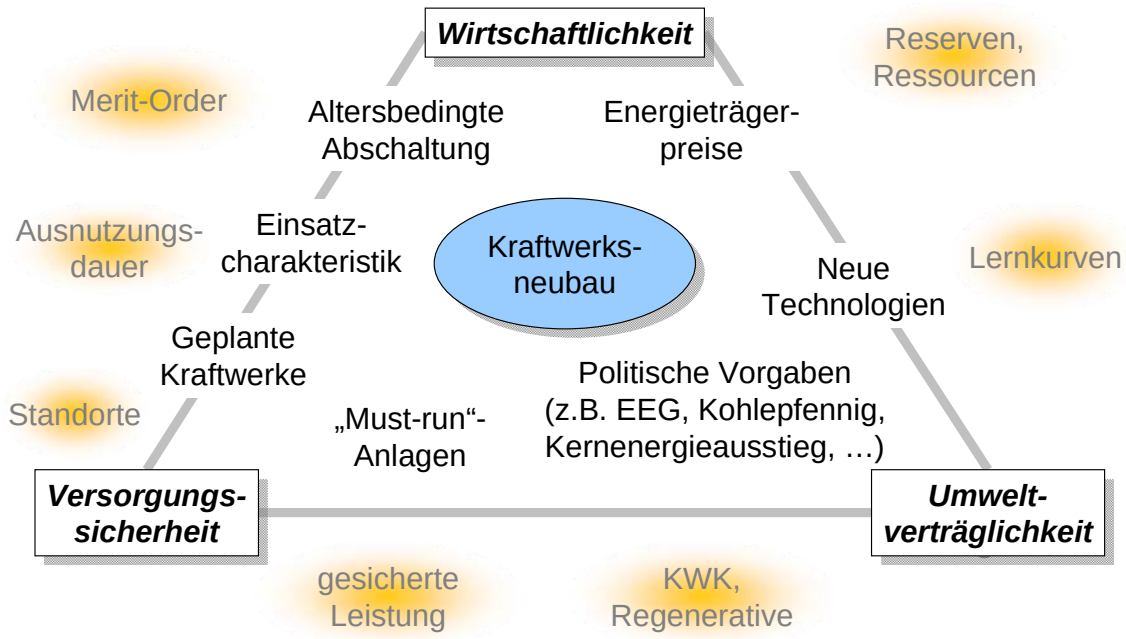

Abbildung 1-3: *Einflussfaktoren auf den Kraftwerksneubau im Kontext des energiewirtschaftlichen Zieldreiecks*

Politische Vorgaben, wie beispielsweise das Erneuerbare Energien Gesetz, haben meist den Umweltschutz als Ziel oder aber die wirtschaftliche Stärkung bestimmter Technologien und Branchen. Die zukünftige Entwicklung der Energieträgerpreise hat einen direkten Einfluss auf die wirtschaftlichen Erfolgsaussichten einer Investition in neue Kraftwerksprojekte. Die altersbedingte Abschaltung bestehender Anlagen und bereits geplante Neubauprojekte geben den Bedarf an zusätzlichen Neubaumaßnahmen vor. Die in Abbildung 1-3 außerhalb des Dreiecks stehenden Begriffe charakterisieren die direkten Einflussfaktoren näher, sind aber auch teilweise Ergebnis einer Modellrechnung. Beispielsweise wird sich die Ausnutzungsdauer eines neuen Kraftwerks gemäß dessen Einsatzcharakteristik – unter Umständen nach der Merit-Order – ergeben.

1.1.5 Bedarfsdeterminanten als Basis der Fortschreibung

Die Basis der Fortschreibung bilden Bedarfsdeterminanten, die eine Nachfrage nach Energiedienstleistungen repräsentieren. Aus dieser resultiert letztendlich der Energieverbrauch. Menschen fragen jedoch nicht originär Energie nach. Sie setzen vielmehr Technologien ein, um ihre Bedürfnisse zu befriedigen. Die verschiedenen Stufen der menschlichen Bedürfnisse wurden von Abraham Maslow 1943 hierarchisch in Form der in **Abbildung 1-4** dargestellten Bedürfnispyramide angeordnet.

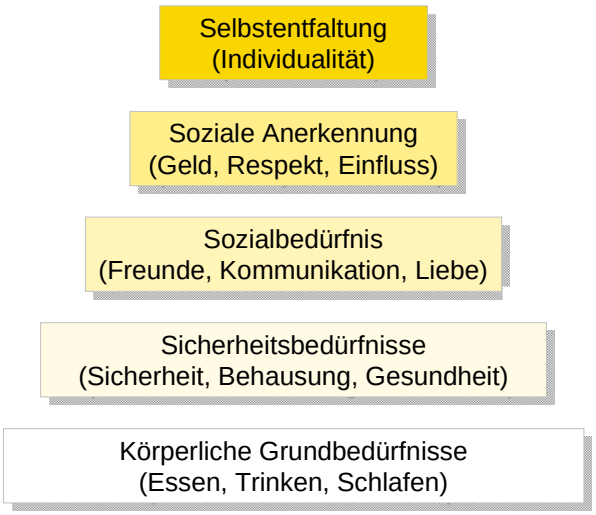

Abbildung 1-4: *Bedürfnispyramide nach Maslow*

Die Bedürfnisse der niedrigsten Stufe – die so genannten Grund- oder Existenzbedürfnisse – müssen zunächst befriedigt sein, ehe die Motivation ansteigt, um die Bedürfnisse einer höheren Stufe zufrieden zu stellen. In jeder Ebene können technische Hilfsmittel eingesetzt werden, um die Bedürfnisse zu erfüllen. Diese wiederum bedingen meist einen Energieeinsatz und stellen Nutzenergie bereit, die als Dienstleistung den empfundenen Mangel beseitigt. Somit generieren die Bedürfnisse der Menschen einen Bedarf an Energie.

Beispielsweise ist nicht der Bedarf an der Nutzenergieform „Raumheizwärme“ ursächlich verantwortlich für den Endenergieeinsatz zu Beheizungszwecken. An unterster Ebene steht das Bedürfnis des Menschen nach Wärme, um eine Unterkühlung des Körpers zu vermeiden. Daraus resultiert zunächst der Bedarf an temperiertem Wohnraum. Aus den Verlusten des Gebäudes, die durch einen Wärmeerzeuger aufgefangen werden müssen, resultiert schließlich der Raumheizwärmebedarf. **Abbildung 1-5** zeigt in einer Mind Map – bei Weitem nicht vollständig – welche Faktoren einen Einfluss auf den Energieeinsatz zur Raumheizwärmebereitstellung haben.

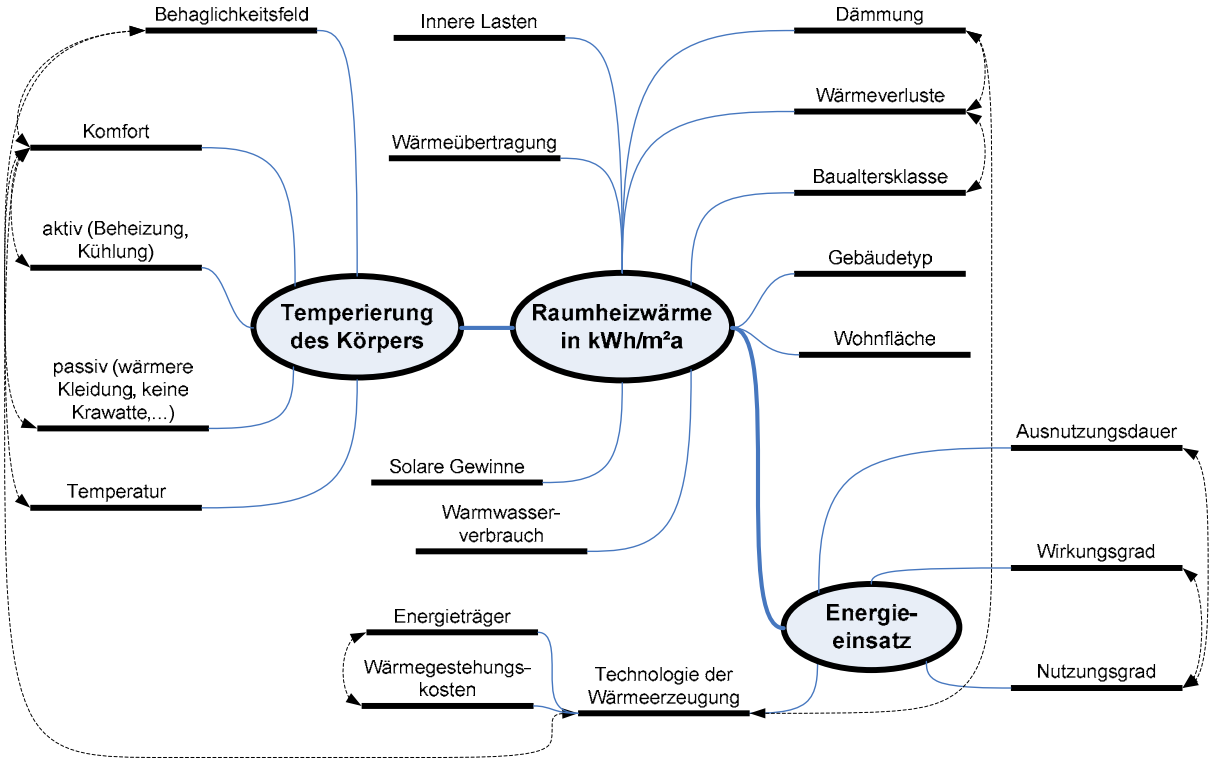

Abbildung 1-5: *Assoziationen zur Nutzenergie „Raumheizwärme“*

Während die Nutzenergie Raumheizwärme noch relativ einfach zu definieren ist, so ist die Festlegung eines ursächlichen Bedürfnisses für andere Energie benötigende Bedarfsdeterminanten komplexer. Exemplarisch sind in der Mind Map in **Abbildung 1-6** Assoziationen zum Bedarf an Papier und speziell an Büropapier dargestellt. Zur Ermittlung des zukünftigen Energiebedarfs für die Papierproduktion muss zunächst die benötigte Menge an Büropapier fortgeschrieben werden. Diese ergibt sich u. a. aus der Aufgabe, die Papier erfüllt. Hierbei stellt sich die Frage, ob die Kommunikation, bestehend aus den Aufgaben der Datenspeicherung und der Datenübertragung, nicht durch andere Technologien „besser“ erledigt werden kann. Besser könnte in diesem Zusammenhang nicht allein energiesparender, sondern auch komfortabler, kostengünstiger und schneller bedeuten.

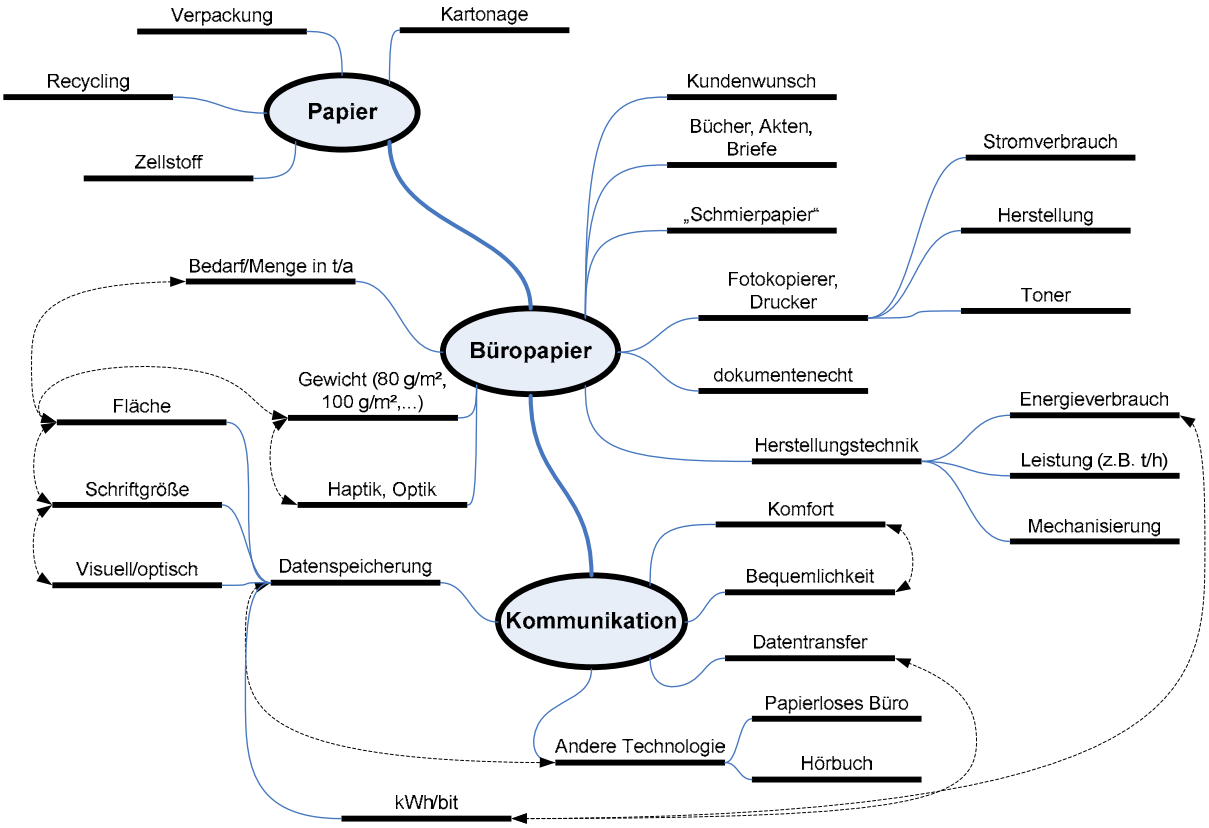

Abbildung 1-6: *Mindmap zum Bedarf an Büropapier bzw. Energiebedarf*

Die Fortschreibung der Bedarfsdeterminanten erfolgt in diesem Projekt auf der untersten noch möglichen bzw. sinnvollen Ebene. So ist es nicht praktikabel, am Beispiel der Papierherstellung die Fortschreibung auf der Ebene der zu speichernden Datenmenge zu beginnen. Vielmehr wird davon ausgegangen, dass sich kein Bruch gegenüber der bisherigen historischen Entwicklung ergibt. Dennoch ist zu berücksichtigen, dass ein Wechsel der Technologie, z. B. zum papierlosen Büro, stattfinden kann.

1.1.6 Diskussion der Relevanz verschiedener Rahmendaten

Nachfolgend sind die Einflussfaktoren für die zukünftige Entwicklung des Energiebedarfs in Deutschland zusammengestellt:

- Wirtschaftliche Rahmenbedingungen (z. B. Bruttoinlandsprodukt (BIP), Produktionsindex, Energiepreise, Inflation, Lernkurven)
- Bevölkerungsentwicklung (z. B. Altersstruktur, demografische Faktoren, Geburten- und Sterberate, Veränderungen im Nutzerverhalten)
- Klimatische Veränderungen (z. B. Treibhauseffekt, ökologische Auswirkungen der Energienutzung)
- Energiepolitische Rahmenbedingungen (z. B. Gesetze, Richtlinien, Normen, Forschungsausgaben)
- Technische Entwicklungen (sowohl zur End- wie zur Nutzenergiebereitstellung, z. B. Wirkungsgrade, Temperaturniveau der Wärme, Erneuerbare Energien)
- Entwicklung der Infrastruktur (z. B. Gebäude, Straßen, Strom-, Gas- und Fernwärmenetze)

Zur Eingrenzung der benötigten Rahmendaten wurde zunächst eine Einteilung der Rahmendaten in verschiedene Gruppen durchgeführt und deren Einfluss auf den Energieverbrauch bzw. die Technikstruktur der jeweils fünf zu analysierenden Bereiche abgeschätzt. Außerdem wurde bewertet, wie gut die jeweiligen Einflussfaktoren zu quantifizieren und zu prognostizieren sind (siehe rechter Teil der **Tabelle 1-1**). Die Bewertung erfolgte im Rahmen einer Befragung unter den Mitarbeitern der Forschungsstelle für Energiewirtschaft. In weiteren Schritten wurden dann auf der Grundlage dieser Bewertungen eine Einteilung der Analysetiefe bei den einzelnen Faktoren sowie eine Aufteilung der Arbeitspaktete für die Projektbearbeitung durch die FfE und das ifo-Institut durchgeführt. Die daraufhin ermittelten Rahmendaten, die auch für die weiteren Projektphasen als Datengrundlage für die Analyse der möglichen zukünftigen Entwicklung dienen, werden in den folgenden Kapiteln erläutert.

Tabelle 1-1: *Matrix zur Bewertung der Wirkung verschiedener Rahmendaten*

Bewertung: 0 bis 3 (0 ist nicht relevant bzw. schlecht prognostizierbar, 3 ist sehr relevant bzw. gut prognostizierbar)	Prognostizierbarkeit	Relevanz für die Sektoren					Quantifizierbarkeit	Art und Umfang der Analyse + : Quantitativ analysieren (+) : Quantitativ analysieren aber eingeschränkt z.B. beim Zeithorizont - : Qualitativ analysieren
		Industrie	GHD	HH	Verkehr	UMWANDLUNG		
Bevölkerungsstruktur								
Bevölkerungszahl	2,5	2,3	2,5	3,0	2,8	1,3	2,9	+
Altersstruktur (Geburtenrate, Sterberate)	2,4	1,3	1,5	1,9	1,3	0,8	2,5	+
Migration (West-Ost, Nord-Süd)	1,8	0,8	0,9	0,9	1,0	0,8	1,4	-
Infrastrukturelle Rahmendaten								
Siedlungsstruktur (Anteil Ballungszentren, Landbev. etc.)	1,9	0,6	1,8	3,0	2,1	2,2	1,5	+
Verkehrsinfrastruktur (Schienen-, Straßenkapazitäten, max. mögl. Verkehr)	2,3	1,3	1,1	1,1	3,0	0,8	2,5	+
Gebäude und Wohnungen (MFH-EFH)	2,0	0,1	1,0	2,8	0,4	0,5	2,3	+
Politik								
Globale und nationale Konflikte	0,5	1,5	1,3	1,4	1,3	1,2	0,3	-
Umweltauflagen (nationale Gesetze in Deutschland)	1,6	2,5	1,8	2,1	2,3	2,5	1,0	(+)
Entwicklungsstrategien der bzw. für Schwellenländer	0,9	0,9	0,6	0,6	0,6	0,8	0,5	-
Bi- u. multilaterale Abkommen	0,8	1,6	0,8	0,9	1,0	1,2	0,3	-
Ordnungspolitik, Wettbewerbsbedingungen								(+)
Emotionen								
Öffentliche Meinung / Akzeptanz von Energieträgern	1,3	1,3	1,3	2,3	1,6	2,0	0,5	-
Konsumgewohnheiten	1,5	2,1	2,5	1,8	1,5	0,2	1,3	(+)
Nutzerverhalten								
Bedienung von technischen Systemen	1,3	0,3	1,1	2,5	0,3	0,2	0,9	(+)
"Energiebewusstes" Handeln	1,3	2,0	2,0	2,8	2,3	1,0	0,5	(+)
Raumklimaverbesserung (Komfortwunsch)	1,2	0,8	2,1	2,8	1,0	0,2	1,1	(+)
Fahrgewohnheiten (Freizeitgestaltung etc.)	1,7	0,5	1,4	1,1	2,8	0,0	2,4	+
Fortschritt								
Architektur	1,5	0,1	1,9	2,8	0,0	0,3	1,1	+
Technologische Entwicklung (Verbesserung der Effizienz, neue Technologien)	1,8	3,0	3,0	3,0	3,0	2,6	2,3	+
Klimawandel								
Auswirkungen der Klimaerwärmung	1,3	0,5	1,9	2,3	0,8	1,3	1,5	-
Erwerbsstruktur								
Heimarbeit	1,3	0,5	2,5	2,5	2,0	0,3	1,9	+
Arbeitslosigkeit	1,2	1,4	1,7	1,3	1,4	0,6	2,0	-
Erwerbsarten (sektorale Verschiebungen)	1,3	1,6	1,9	0,4	0,7	0,4	1,0	-
Arbeitszeiten (24h)	1,3	1,9	2,5	1,8	1,1	1,0	1,3	+
Lohnstruktur								+
Wirtschaftliche Rahmenbedingungen								
Wirtschaftswachstum (BIP, Teilung nach Branchen)	1,3	2,8	2,8	1,1	1,3	0,8	2,6	+
Import / Export von Waren	1,5	2,5	1,5	0,3	2,0	0,5	2,1	+
Energie- und Rohstoffpreise (Gestehungskosten, Preis)	1,5	2,6	2,1	1,9	1,8	2,7	2,4	+
Güteraufkommen, Personenverkehr (Schiene, Straße, Luftfracht, Binnenschifffahrt)	1,7	1,1	1,0	0,3	2,9	0,3	2,0	+
Öffnungszeiten im Handel	0,8	0,3	2,9	0,5	1,0	0,5	1,8	-
Industrieproduktion	1,2	3,0	0,8	0,1	0,8	0,8	2,5	+
Ausgabe- und Sparverhalten	0,0	0,5	0,5	2,0	0,8	0,0	0,5	+

1.2 Grundlagen der betrachteten Szenarien

Ziel dieses Projektes ist eine möglichst gute, auf maximal diversifizierten Daten basierende Modellierung der zukünftigen Entwicklung des Energiebedarfs und dessen Deckung mit geeigneten Szenarien bis zum Jahr 2050.

Als Basis hierfür wird ein Referenzszenario gewählt, welches die wahrscheinlichste Entwicklung widerspiegelt, die sich aus den zugrunde gelegten Rahmenbedingungen und kausalen Zusammenhängen ergibt. Diese zukünftigen Rahmenbedingungen basieren auf Erwartungen, Prognosen und Fortschreibungen des gegenwärtigen Zustandes und stellen wiederum die wahrscheinlichste Entwicklung dar. Aufgrund des weiten Prognosezeitraumes und der Sensitivitäten wird sich die Entwicklung in einem Korridor um die zugrunde gelegten Rahmenbedingungen bewegen; je weiter ein betrachteter Zeitpunkt entfernt liegt und je höher die Sensitivität bezüglich einer Rahmenbedingung ist, desto breiter ist der Korridor.

Auf dem Weg zu einer ökologisch und ökonomisch sinnvollen Energieversorgung sind besonders Szenarien mit Pfaden interessant, die zu einem ökologischeren und ökonomischeren Gesamtsystem führen könnten. So werden zwei weitere Szenarien entworfen, welche die Grenzen der positiven Entwicklungen darstellen.

Würde bei der Erstellung von Szenarien jede in diesem Projekt verwendete Rahmenbedingung verändert, so könnten wegen der Vielzahl der Einflussgrößen kaum Aussagen über die Wirkmechanismen und deren Auswirkungen extrahiert werden. Daher soll in den Szenarien nur eine geringe und somit überschaubare Anzahl an Rahmenbedingungen verändert werden.

Grundsätzlich werden nur die zwei Schlüsselfaktoren des Energiebedarfs, die Entwicklung der Technik und das menschliches Verhalten, verändert. Die Technik beinhaltet Art und Effizienz der verfügbaren Energiewandler. Das menschliche Verhalten bestimmt Häufigkeit, Art und Dauer des Technikeinsatzes.

Diese zwei Schlüsselfaktoren haben wiederum Einfluss auf viele Eingangsbedingungen, wie z. B. Heizwärmebedarf und Verkehrsleistungen. Im Folgenden werden die Szenarien zuerst kurz skizziert und anschließend eingehender beschrieben:

- Referenz:
  Alle Rahmenbedingungen entwickeln sich den langfristigen Trends und Erwartungen entsprechend. Dieses Szenario entspricht der Referenzentwicklung, aus der die anderen beiden Szenarien abgeleitet werden.
- Erhöhte Technikeffizienz:
  Landesweit werden die vorhandenen Techniken sukzessiv gegen die beste verfügbare Technik ausgetauscht, dadurch wiederum steigt der Innovationsdruck im Bereich energiesparender Geräte, so dass schon nach wenigen Jahren deutlich bessere Techniken verfügbar sind und eingesetzt werden als es im Referenzszenario der Fall wäre. Das Verhalten der Anwender wird gegenüber der Referenz gleich bleiben.

- Umweltbewusstes Handeln:
  Neben dem sukzessiven Austausch der Techniken ändert sich auch das Anwenderverhalten hin zu einem energetisch umsichtigen Verhalten. Neben einer geringen Senkung des Komfortanspruchs wird aktiv über Energieverbrauch nachgedacht und unnötiger Energieverbrauch weitestgehend vermieden.

Während das Referenzszenario eine aus heutiger Sicht wahrscheinliche Zukunft zeichnet, werden die beiden anderen Szenarien höchstens in einzelnen Teilaspekten eintreffen. Zweck der Szenarien „Erhöhte Technikeffizienz“ und „Umweltbewusstes Handeln“ ist das Aufzeigen von Grenzen, über welche die Entwicklung selbst durch strikte Gesetze und massive Förderprogramme nicht hinausgehen wird, gleichzeitig werden aber auch die Potenziale und Möglichkeiten zu deren Nutzung beschrieben.

Die Szenarien werden im Folgenden in Prosa beschrieben, um den Tenor der zugrunde liegenden Philosophie mit ihren normativen und qualitativen Einflussfaktoren erfassen zu können. Die konkreten Randbedingungen, wie z. B. Entwicklung der Bevölkerung, der Energiepreise und des Wirtschaftswachstums, wurden in Zusammenarbeit mit dem ifo (Institut für Wirtschaftsforschung e. V.) entwickelt und sind in Kapitel 1.2.4 sowie im Anhang detailliert dargestellt.

1.2.1 Szenario 1 – Referenz

Die langfristige Entwicklung des Energieverbrauchs ist von mehreren verschiedenen Determinanten abhängig. Die maßgeblichen Bestimmungsfaktoren sind die Entwicklung der Bevölkerung und des Bruttoinlandsprodukts, wobei nicht nur ihre absolute Höhe maßgeblich ist, sondern auch ihre Struktur. Weitere bedeutsame Wirkungen gehen von dem technischen Stand der Anlagen zur Energieerzeugung und Energienutzung, dem Verbraucherverhalten und nicht zuletzt den politischen Rahmenbedingungen aus. Im Referenzszenario wird die wahrscheinliche Entwicklung der genannten Größen zugrunde gelegt. Dabei werden detailliert die für die im Einzelnen betrachteten Energieanwendungen zu erwartenden Ausstattungs- und Verhaltensmerkmale, die letztlich von den genannten übergeordneten Bestimmungsgrößen abgeleitet werden, angesetzt.

1.2.1.1 Umwandlungssektor

Die gegenwärtige Energiepolitik der Bundesregierung wird fortgeführt. Der Kernenergieausstieg bis ca. 2020 führt zu einem Ersatzbedarf im Kraftwerkspark, der nur zum Teil durch den geplanten Ausbau der Windkraft und anderer regenerativer Stromerzeugung aufgefangen werden kann. Die fossilen Energieträger, insbesondere Braunkohle, werden ihren Anteil am Erzeugungsmix behalten, um die Versorgungssicherheit und eine gewisse Importunabhängigkeit zu gewährleisten. Dezentrale Erzeugung und dabei speziell die Nutzung regenerativer Energien kann in einigen Anwendungsgebieten ab 2015, teils durch staatliche Eingriffe wie Steuerbefreiung oder Einspeisevergütung, auf breiter Basis wettbewerbsfähig werden.

1.2.1.2 Industrie

Die Industrie wird weiterhin moderat, aber stabil wachsen. Die politischen Bestimmungen der EU zur Energieeffizienz werden knapp verfehlt. Da allein die Energiepreise den

Anreiz zur Effizienzerhöhung bieten, erhöht sich die Energieeffizienz in den Unternehmen im gleichen Umfang wie in den letzten Jahren.

1.2.1.3 Gewerbe, Handel, Dienstleistung

Der Sektor GHD ist in großem Umfang von den Haushalten bzw. der Nachfrage der Haushalte nach Waren und Dienstleistungen abhängig. Nutzenergieverbrauch und Effizienz entwickeln sich analog der Vergangenheit, es gibt keine Ereignisse, die einen Strukturbruch hervorrufen würden. Die Fortschreibung geschieht auf Basis der sozioökonomischen Rahmendaten und der Entwicklungstendenzen relevanter technischer Systeme der vergangenen Jahre.

1.2.1.4 Haushalte

Der Energieverbrauch im Haushaltssektor hängt von einer großen Zahl von Faktoren ab. Wie in den bereits genannten Sektoren entwickeln sich diese Faktoren entsprechend deren Verlauf in der Vergangenheit. Es wird angenommen, dass in diesem Szenario keine Störungen oder besonderen Ereignisse auftreten. Darauf aufbauend entwickeln sich sowohl der Nutzenergie- als auch der Endenergiebedarf bis 2050 stetig weiter.

Energiesparmaßnahmen werden nur schleppend umgesetzt, da die ökonomischen Aspekte über den ökologischen stehen. Energie- und umweltbewusstes Handeln setzt sich in der Bevölkerung nur langsam durch. Aufgrund steigender Energiepreise gewinnt die Energiesparmentalität jedoch zunehmend an Bedeutung, da aus diesem Grund Energiesparmaßnahmen wirtschaftlich werden.

Zunächst wird von einem Wachstum der Energienachfrage im Haushaltssektor ausgegangen, das insbesondere auf steigende Ausstattungsgrade (speziell bei der Unterhaltungselektronik) und höhere Komfortansprüche (höheren spezifischen Wohnflächenbedarf, etc.) zurückzuführen ist. Schwindende Bevölkerungszahlen und die zunehmende Durchdringung des Bestandes mit energieeffizienten Geräten wirken dem Anstieg des Energieverbrauchs entgegen.

1.2.1.5 Verkehrssektor

Die zunehmende Urbanisierung hat geringere Wege, z. B. zwischen Wohnung und Arbeitsplatz, zur Folge. Das steigende Durchschnittsalter der Bevölkerung führt dazu, dass die pro Person zurückgelegten Jahreskilometer sinken. Dies führt zusammen mit den weiterhin hohen Treibstoffkosten zu einer Verringerung der im Individualverkehr zurückgelegten Distanzen pro Person. Der öffentliche Nahverkehr profitiert von der Urbanisierung, auch die spezifischen Verkehrsleistungen im Luftverkehr nehmen aufgrund der günstigen Flugpreisentwicklung und der fortschreitenden Globalisierung zu. Der Güterverkehr wächst bei den Verkehrsträgern Straße, Schiene und Luft weiterhin konstant. Der Straßengüterverkehr baut dabei seine dominierende Rolle aus. Der Schiffsverkehr kann nur mit einer geringen jährlichen Steigerungsrate rechnen, da lange Transportzeiten den logistischen Aufwand deutlich erhöhen. Der spezifische Kraftstoffverbrauch der Fahrzeuge sinkt moderat. Die Beimischung von regenerativ erzeugten Kraftstoffen erfolgt gemäß gesetzlichen Vorgaben.

1.2.2 Szenario 2 – Erhöhte Technikeffizienz

Gegenüber Szenario 1 hebt sich das Szenario „Erhöhte Technikeffizienz“ deutlich ab. Hier wird zwar von einem unveränderten Verbraucherverhalten ausgegangen, aber unterstellt, dass bei einer Neuanschaffung oder dem Austausch von Anlagen jeweils die beste am Markt verfügbare Technik zum Einsatz kommt. Auch sollen alte Geräte dann ausgetauscht werden, wenn es wirtschaftlich angezeigt ist. Durch steigende Energiepreise und energiepolitische Maßnahmen, wie z. B. Energiesteuern, Vorschriften und Anreize, kann der Prozess, die beste Technik eher zu nutzen, beschleunigt werden. Dadurch werden auch Maßnahmen realisiert, die unter den Bedingungen des Referenzszenarios nicht oder nicht in der Breite zum Einsatz kämen. Gesamtwirtschaftlich führt das zu einem schnelleren Kapitalumschlag, also zu höheren Investitionen, was auch zu Lasten des Konsums gehen könnte. Diese Strategie kann bei deutlich steigenden Energiepreisen zu hohen Erträgen und entsprechend positiven gesamtwirtschaftlichen Effekten führen.

In der Bevölkerung verstärkt sich das Bewusstsein, dass zur Abwendung des Klimawandels, zur Verringerung der Importabhängigkeit von Energieträgern und zur Vorbereitung auf mögliche Energiepreiskrisen der Gerätepark der Energiewandler höchst effizient sein muss. Zudem sind effiziente Produkte meist auch qualitativ hochwertig. Unterstützt durch regulatorische Maßnahmen werden in allen Sektoren die Energieverbraucher deutlich schneller gegenüber dem Referenzszenario gegen die beste am Markt verfügbare Technik ausgetauscht. Dabei hilft ein Labelling-System, das alle Energiewandler sowie Gebäude und Autos in Effizienzklassen einteilt und somit dem Käufer einen einfachen Überblick über das Marktangebot erlaubt. Ähnlich wie bei Haushaltsgeräten zur Jahrtausendwende führt das Labelling dazu, dass weniger effiziente Geräte kaum verkäuflich sind, wodurch der Innovationsdruck auf die Hersteller steigt. Dies führt zu einer schnelleren Effizienzverbesserung der am Markt befindlichen Geräte und zu einem fortwährenden Wettstreit der Anbieter um das effizienteste Produkt seiner Klasse. Durch die beim Systemdesign berücksichtigten Recyclingkriterien können die ausgemusterten Geräte zum großen Teil wieder verwertet werden.

Ein darüber hinausgehender Trend hin zu energiesparendem Verhalten ist kaum zu erkennen. Es herrscht die Meinung, die Investition in effiziente Produkte trägt ausreichend zum Energiesparen bei und man ist folglich nicht bereit auf den gewohnten Komfort zu verzichten.

Dieses Szenario soll eine Grenze aufzeigen, welche Ziele alleine durch die Anwendung der besten verfügbaren Technik erreicht werden könnten.

1.2.2.1 Umwandlungssektor

Im Elektrizitätssektor werden verstärkt regenerative Energiequellen und innovative Technologien eingesetzt. So existiert beispielsweise ein Trend zu gebäudeintegrierter Photovoltaik, die auch architektonisch in Szene gesetzt wird. Durch regulatorische Maßnahmen (z. B. Anschlusszwang) wird zudem der KWK-Anteil an der Stromerzeugung deutlich erhöht. Fossil gefeuerte Kraftwerke werden weiterhin genutzt, jedoch teilweise mit CO_2-Abtrennung ausgerüstet. Die Laufzeit der Kernkraftwerke wird, wie in der ursprünglichen Projektierung vorgesehen, auf 40 Jahre verlängert. Auch der

Neubau von Kernkraftwerken des Typs EPR wird wieder als Option gesehen, wenn sich die Realisierung derartiger Projekte als wirtschaftlich darstellen lässt.

1.2.2.2 Industrie

In der Industrie helfen der CO_2-Zertifikatehandel, der auf alle Energieträger ausgeweitet wird, das Bedürfnis nach einem guten Umweltbericht, Initiativen wie z. B. Energietische und die staatliche Vorgabe eines Energiemanagements bei der Umstellung auf energieeffiziente Produktionen. Bei Investitionsentscheidungen wird zunehmend dem Energieverbrauch der Anlagen ein hoher Stellenwert eingeräumt. Contracting-Lösungen mit hocheffizienten mobilen Dampf- und Heizwärmeerzeugern in Containern in Standardgrößen ermöglichen kurzfristige Energielieferverträge mit geringen Stillstandszeiten zur Umstellung.

1.2.2.3 Gewerbe, Handel, Dienstleistung

Obgleich der Faktor Energie in GHD für die Wertschöpfung weit weniger von Bedeutung ist als in der Industrie, werden auch hier zunehmend hoch effiziente Heizsysteme, elektrische Anlagen und Geräte eingesetzt. Auch werden regenerative Energien sinnvoll genutzt. Es erfolgt eine sukzessive thermische Sanierung der Gebäudehüllen im Bestand, wo immer dies möglich ist. Im Neubau wird flächendeckend die EnEV umgesetzt. Die Beschäftigung entwickelt sich analog zum Referenzszenario und in ihrer Folge die beheizte Fläche in GHD.

1.2.2.4 Haushalte

Auch im Sektor HH wird davon ausgegangen, dass bis zum Jahr 2050 für sämtliche Energieanwendungen jeweils die energieeffizienteste Technologie eingesetzt wird. Die zu erwartenden hohen Investitionskosten werden in diesem Zusammenhang nicht als Investitionshindernis angesehen. Die Effizienz der Energieverbraucher bzw. der Energieumwandlungssysteme im Sektor Haushalte unterliegt dabei einer dynamischen Entwicklung. Durch Verbesserungen und weitere Fortschritte lassen sich ausgehend von der aktuell besten verfügbaren Technik (BAT = „best available technic“) bis 2050 Steigerungen der Effizienz erwarten, die in diese Betrachtungen mit einbezogen werden.

Energiesparmaßnahmen und CO_2-Verminderungsmaßnahmen resultieren in diesem Szenario aus der Substitution von fossilen Energieträgern, aus dem Umstieg auf die jeweils effizienteste Technologie bei der Umwandlung von Endenergie in Nutzenergie und aus der Reduktion des Nutzenergiebedarfs. Im Hinblick auf das Nutzerverhalten ergeben sich mit Ausnahme des Umgangs mit BAT keine Abweichungen von Szenario 1. In der öffentlichen Meinung ist eine Änderung des Nutzerverhaltens nicht notwendig, da der Umstieg auf effiziente Technologien als Energiesparmaßnahme als ausreichend empfunden wird. Es besteht daher keine Notwendigkeit, seine Komfortansprüche zu reduzieren.

Durch den Wechsel hin zur effektivsten Technologie ergibt sich eine erhebliche Reduktion des Energiebedarfs, die jedoch durch den allgemeinen Wunsch nach steigendem Komfort etwas gemindert wird. In diesem Zusammenhang wirken, wie bei Szenario 1, der steigende Ausstattungsgrad sowie der Zuwachs an beheizten Flächen der Reduktion des Energiebedarfs entgegen.

1.2.2.5 Verkehrssektor

Im Verkehrssektor setzen sich moderne Antriebe rasch durch. Die Beimischungsquote von regenerativen Kraftstoffen liegt über der des Referenzszenarios. Die Effizienz der Fahrzeuge nimmt stärker zu, Brennstoffzellen- und Elektrofahrzeuge kommen verstärkt zum Einsatz. Das Nutzerverhalten bezüglich der Wahl des Verkehrsmittels sowie der Jahreskilometer entspricht dem des Referenzszenarios.

1.2.3 Szenario 3 – Umweltbewusstes Handeln

Beim dritten Szenario stehen die Bedarfsdeterminanten im Vordergrund; sie stellen die zentralen, das Szenario charakterisierenden Operationsparameter dar. Dabei ist nicht nur an Verhaltensänderungen im engeren Sinne gedacht, wie etwa einem vernünftigen, also nicht verschwenderischen Umgang mit Energie, sondern auch an Einschränkungen des Energieverbrauchs im Sinn einer Verringerung des Bedarfs an Energiedienstleistungen. Dieses Szenario setzt somit unmittelbar bei den Verbrauchern an, die aus unterschiedlichen Motiven, z. B. um finanzielle Mittel für andere Zwecke einsetzen zu können oder um einen Beitrag zum Umwelt- und Ressourcenschutz zu leisten, ihr Energieverbrauchsverhalten in Richtung einer bewussteren und sparsameren Nutzung verändern.

Die Bevölkerung erkennt, dass neben hocheffizienten Geräten wie im Szenario „Erhöhte Technikeffizienz“ auch das energiesparende Verhalten weitere Einsparpotenziale birgt. Durch die mit der Zeit immer deutlicher sichtbaren Auswirkungen des Klimawandels sind viele Bürger bereit, ihr Verhalten zugunsten des Klimaschutzes zu ändern. Ein geringerer Komfort wird dabei allerdings nur hingenommen, wenn er durch einfache Mittel, wie z. B. einen Pullover oder die Aufhebung des Krawattenzwangs im Sommer, zu kompensieren ist.

So ist auf den verschiedenen Handlungsebenen eine Vielzahl von Maßnahmen denkbar, die zu einer Verringerung des Energiebedarfs führen können. Die Schwierigkeit bei diesem Szenario besteht vor allem darin, die Auswirkungen der Bedarfsänderungen im Einzelnen abzuschätzen. Neben dem unmittelbaren Verzicht auf Energiedienstleistungen betrifft das insbesondere die Effekte, die aus einer Veränderung der Nachfrage infolge gesellschaftlicher Veränderungen resultieren. Dadurch kann die Produktion bestimmter Erzeugnisse zurückgehen bzw. weniger stark wachsen als im Basisszenario; das Ausmaß solcher Nachfrageänderungen auf das Produktionsvolumen kann indes angesichts der starken Einbindung der deutschen Wirtschaft in den Weltmarkt nur grob abgeschätzt werden. Gleichzeitig können die Nachfrage nach Substituten mit einem geringeren Energiegehalt und somit auch deren inländische Produktion zunehmen. Es ist aber auch möglich, dass die durch Verzicht und Einschränkung der Nachfrage freiwerdenden Mittel nicht für andere Güter sondern für Dienstleistungen ausgegeben werden. Insgesamt bestehen zwischen Bedarfsänderungen und deren Auswirkungen auf die Industrieproduktion, den Handel und die Verkehrsleistungen sowie den davon ausgehenden Effekten auf den Energiebedarf komplexe Zusammenhänge. Für die Umsetzung dieser Variante zur Senkung des Energieverbrauchs lassen sich grundsätzlich die folgenden zwei Ansatzpunkte unterscheiden:

Individueller Ansatz
Der einzelne Verbraucher kann insbesondere in seinem privaten Umfeld sein Verbrauchsverhalten und seinen Energiebedarf ändern. Beispiele sind die Akzeptanz einer geringeren Raumtemperatur, der Verzicht auf Klimatisierung im Sommer, der gezielte Einsatz von Licht oder der Verzicht auf Standby-Funktionen. Dazu zählt aber auch die Reduzierung der Nachfrage nach bestimmten Erzeugnissen, wie z. B. Tiefkühlprodukten. Von wesentlicher Bedeutung sind auch Einschränkungen bei der Mobilität durch Verzicht auf Individualverkehr und stärkere Nutzung des öffentlichen Verkehrsangebots oder Car-Sharing sowie die Verringerung von oder sogar der Verzicht auf Fernreisen.

Außerhalb des privaten Bereichs sind die Möglichkeiten des Einzelnen stärker eingeschränkt. Lediglich im beruflichen Umfeld dürften begrenzte Wirkungen individuellen Verhaltens zu erzielen sein.

Gemeinschaftlicher Ansatz
In Einrichtungen, wie Unternehmen, Schulen oder Behörden, in denen zahlreiche Menschen tätig sind und deren Organisationsstruktur zumeist hierarchisch aufgebaut ist, kann das Verhalten in gewissen Grenzen vorgeschrieben werden bzw. der Bedarf in Absprache mit den Betroffenen angepasst werden. Grundsätzlich erfordert das entsprechende organisatorische Maßnahmen der jeweiligen Leitung, die im Allgemeinen die Bereiche Raumtemperatur, Licht- und Gerätenutzung, aber auch die Ausweitung des Anteils von Heimarbeitsplätzen betreffen können. Im Produktionsbereich könnten Prozesse unter dem Gesichtspunkt der Energieeffizienz umstrukturiert werden.

Neben diesen auf den Innenbereich bezogenen Maßnahmen zur Energieeinsparung gibt es die auf das Marktumfeld gerichteten Instrumente. Damit können Unternehmen durch Änderung der Nachfrage nach Erzeugnissen sowie ihrer Bezugsquellen und ihrer Absatzwege eine innovatorische Antwort auf die Herausforderungen der Energie- und Klimaproblematik geben. Beispiele sind die Reduzierung des Einsatzes bestimmter Produkte zur Produktion, wie etwa Düngemittel, sowie zur Vermeidung von Warentransporten die Bevorzugung von näher gelegenen Lieferanten; auch beim Absatz bestimmter Güter können durch Nutzung elektronischer Vertriebswege Verkehrsleistungen verringert werden.

Eine solche Strategie wird weit reichende Nachfrageverschiebungen zur Folge haben. So ist beispielsweise damit zu rechnen, dass sich Produktionsstrukturen verändern und es weniger Individualverkehr geben wird. Es wird insbesondere der Freizeit- und Urlaubsverkehr verringert werden und sich schließlich auf längere Sicht auch die Siedlungsstruktur ändern.

Dieses Szenario soll eine Grenze aufzeigen, welche Ziele unter Annahme eines sehr energiebewussten Handelns aller Beteiligten und der Anwendung der besten verfügbaren Technik erreicht werden könnten.

1.2.3.1 Umwandlungssektor

Wie auch in Szenario 2 werden im Elektrizitätssektor verstärkt regenerative Energiequellen und innovative Technologien eingesetzt. Durch regulatorische Maßnahmen (z. B. Anschlusszwang) wird zudem der KWK-Anteil an der Stromerzeugung deutlich erhöht. Durch geeignete Speichertechnologien kann ihr Deckungsbeitrag der dargebots-

abhängigen Stromerzeugung ebenfalls zunehmen. Neu zu bauende fossil gefeuerte Kraftwerke werden – gesetzlich verpflichtet – mit CO_2-Abtrennung versehen. Da die Bedrohung durch terroristische Akte verschwindet und das Risiko durch Fehlverhalten minimiert ist, wird auch Kernenergie wieder als Option gesehen, die Klimaproblematik zu lösen. Die Laufzeit der Kernkraftwerke wird dazu, wie bereits in den USA geschehen, auf 60 Jahre ausgeweitet.

1.2.3.2 Industrie

Im dritten Szenario werden die Bedarfsdeterminanten unter der Voraussetzung des besten Nutzerverhaltens angepasst. Im Bereich der Industrie betrifft dies den Produktionsindex in den einzelnen Industriesektoren. Die Abschwächung des Produktionswachstums kann zum einen auf die Reduktion des Energieeinsatzes je produziertem Gut durch eine Umstrukturierung der Prozesse zurückgeführt werden (Nutzerverhalten im Betrieb). Zum anderen ist durch ein verbessertes Nutzerverhalten der Bevölkerung – einen sparsamen Umgang mit den vorhandenen Ressourcen – ein Produktionsrückgang gegenüber den ersten beiden Szenarien und damit ein weniger starker Anstieg des Energiebedarfs in einigen Industriesektoren zu erwarten.

Da der Endenergieverbrauch direkt von der produzierten Gesamtmenge und dem spezifischen Energieverbrauch je produziertem Gut abhängt, spielt das Nutzerverhalten eine wichtige Rolle. Weiterhin kann in Produktionsprozesse nicht ohne weiteres im Sinne des Szenario 3 eingegriffen werden, was den Effekt auf den Endenergieverbrauch durch das „beste Nutzerverhalten“ auf Seiten der Industriebetriebe erheblich abschwächt. Ein weiterer Faktor ist das hohe Exportaufkommen in der Industrie. Das „beste Nutzerverhalten“ der Konsumenten im Ausland bleibt unberücksichtigt, was zu einem weiter sinkenden Einfluss der veränderten Inlandsnachfrage auf den Produktionsindex führt.

1.2.3.3 Gewerbe, Handel, Dienstleistung

Der Sektor GHD ist im Vergleich zu den übrigen Endenergieverbrauchssektoren außerordentlich heterogen aufgebaut. Eine einheitliche Bezugsgröße ist daher für den Sektor nicht abzuleiten. Hilfsweise können allenfalls Merkmale, wie die Wertschöpfung oder damit zusammenhängend die Anzahl der Beschäftigten, zur Charakterisierung der einzelnen Bereiche des Sektors herangezogen werden. Da der Energiebedarf zur Heizung und Warmwasserbereitung den größten Stellenwert in diesem Sektor einnimmt, kann von Verhaltensänderungen ein beträchtlicher Einfluss auf den Energieverbrauch ausgehen. Daneben kann durch den Einsatz helligkeits- und präsenzgeregelter Systeme der Beleuchtungsbedarf in diesem Bereich signifikant gesenkt werden.

Dabei kann die Änderung des Verhaltens in einer Verringerung der Raumtemperatur auf freiwilliger Grundlage oder durch Anordnung bestehen. Auf längere Sicht kann auch die Fläche je Beschäftigtem verringert werden, was ebenfalls den Energiebedarf reduzieren wird. Für den Handel wird unterstellt, dass durch Internethandel sowie Zentralisierung und optimierte Verkaufsraumgestaltung der Verkaufsflächenanteil sinkt. Im Handel mit Lebensmitteln dürfte auch der Prozesskältebedarf zurückgehen, da die Verbraucher vermehrt auf frische, regionale Produkte zurückgreifen.

Daneben kann eine organisatorische Maßnahme wie die stärkere Nutzung von Modellen des Home-Office den Energiebedarf im GHD-Sektor deutlich beeinflussen. Es wird

davon ausgegangen, dass dadurch rund 10 % der Beschäftigten in diesem Bereich künftig überwiegend zu Hause arbeiten werden und folglich ein entsprechend geringerer Flächenbedarf bei den Büroarbeitsplätzen erforderlich ist. In gewissem Umfang findet dabei zwar eine Verlagerung des Energieverbrauchs in den häuslichen Bereich statt, insgesamt ist aber damit zu rechnen, dass es zu einem geringeren Energieverbrauch kommen wird.

Der im Jahr 2050 geringere Wasserverbrauch der Bevölkerung in Szenario 3 wirkt sich auch auf den Energiebedarf aus. Die insbesondere für den Betrieb von Wasseraufbereitungsanlagen und Pumpen benötigte Energie wird entsprechend verringert werden.

1.2.3.4 Haushalte

Bei den Haushalten dürfte ein großes Potenzial verhaltensbedingter Anpassungsmaßnahmen bestehen. So wird unterstellt, dass bis zum Jahre 2050 innerhalb der öffentlichen Meinung der Energiespargedanke fest verankert ist. Die Energiepreisentwicklung hat ein steigendes Bewusstsein für nachhaltiges Handeln, ein verstärktes Umweltbewusstsein und die Forderung nach einer möglichst unabhängigen Energieversorgung zur Folge.

Das gilt vor allem für den quantitativ weitaus wichtigsten Bereich, den Energieverbrauch zur Raumheizung und Warmwasserbereitung. An Maßnahmen, die bis 2050 im Durchschnitt erreicht werden sollen, sind insbesondere zu nennen: Senkung der Raumtemperatur um durchschnittlich 1 °C, gezieltes Lüften und ein um rund 5 % geringerer Bedarf von Warmwasser. Diese Maßnahmen können auch vielfach mit gewissen Komforteinbußen verbunden sein (Reduktion der Gebäudeinnentemperatur – „Pullover anstatt Heizen“ oder „Licht sparen“). Diese werden jedoch von den Konsumenten im Rahmen des gesteigerten Umweltbewusstseins bewusst in Kauf genommen.

In diesem Zusammenhang ist auch zu berücksichtigen, dass der Spielraum für diese individuellen Anpassungsmaßnahmen mit zunehmend besserer technischer Ausstattung der Haushalte und Wärmedämmung abnimmt. Darüber wird unterstellt, dass nicht nur der Verbrauch von Warmwasser, sondern der gesamte Wasserverbrauch der Bevölkerung geringer sein wird.

Allerdings gibt es auch hier gegenläufige Tendenzen. Zu einer Erhöhung des häuslichen Energieverbrauchs kann die zunehmende Heimarbeit führen, und zwar sowohl bei der Heizenergie als auch beim Stromverbrauch zum Betrieb von Geräten. Es wird unterstellt, dass sich während des Schätzzeitraums ein Teil der Büroarbeitsplätze auf den häuslichen Bereich verlagern wird. Dabei wird in einigen Fällen ein zusätzliches Arbeitszimmer benötigt.

Außerdem wird erwartet, dass mehr auf dem Land lebende Bevölkerung in Städte ziehen werden als in Szenario 1. Dadurch ändert sich auf lange Sicht die Gebäudestruktur, der Anteil der Wohnungen in Mehrfamilienhäusern an den Wohnungen insgesamt wird zunehmen. Das hat insbesondere eine dämpfende Wirkung auf den Heizenergieverbrauch sowie den Personenverkehr.

1.2.3.5 Verkehrssektor

Im Verkehrssektor ist unter dem Gesichtspunkt verhaltensbedingter Bedarfsänderungen vor allem der Personenverkehr in Form des Individualverkehrs von Interesse. Den größten Spielraum hierfür dürfte der Freizeit- und Urlaubsverkehr bieten, auf den rund 45 % der gesamten Personenverkehrsleistung entfallen. Nimmt man den Einkaufs- und den Berufsverkehr, der durch zunehmende Heimarbeit beeinflusst werden wird, hinzu, kommt man auf einen Anteilswert von fast 80 %. Den weitaus größten Anteil daran hat der motorisierte Individualverkehr. Unter der Annahme, dass auf lange Sicht rund 25 % dieser Verkehrsleistung durch Verhaltensänderungen eingespart werden können, sinkt die gesamte Personenverkehrsleistung um etwa 20 %.

Weiterhin kann unterstellt werden, dass auch der Flugverkehr um 5 % reduziert wird. Ein Teil der Verringerung dieses Verkehrs soll durch die stärkere Nutzung der Eisenbahn zum Teil ausgeglichen werden. Es wird davon ausgegangen, dass die Personenverkehrsleistung der Schiene um 30 % höher ausfallen wird. Unter diesen Voraussetzungen ist mit einem Nettorückgang der Personenverkehrsleistung im Vergleich zum Referenzszenario von rund 15 % zu rechnen.

Daneben gibt es aber auch Entwicklungen, durch die die Nachfrage nach Verkehrsleistungen zunehmen wird. Zu nennen ist insbesondere das wachsende Online-Shopping, das zu einem zunehmenden Güterverkehr führt, bei zugleich dadurch rückläufigem individuellem Einkaufsverkehr. Abgesehen davon wird unterstellt, dass es in den kommenden Jahrzehnten zu einer Veränderung der Zusammensetzung der Güterverkehrsleistung kommen wird. Bei unveränderter Verkehrsleistung werden im Schätzzeitraum im Vergleich zum Referenzszenario der Straßenverkehr um 3 % und der Flugverkehr um 5 % zunehmen, während die Eisenbahn um 10 % und die Binnenschifffahrt um 3 % höher sein wird.

1.2.4 Sozioökonomische Rahmendaten

Die in diesem Abschnitt dargelegten sozioökonomischen Rahmendaten stellen eine Grundlage für die Bedarfsabschätzung des voraussichtlichen Energiebedarfs in Deutschland bis zum Jahr 2050 dar. Ausgangspunkt ist die Entwicklung der Bevölkerung und deren Altersstruktur. Neben der Projektion der zentralen makroökonomischen Größen geht es vor allem auch darum, Aussagen über die Entwicklung der Wirtschaftsstruktur treffen zu können. Verlangt ist eine Vorausschau der Entwicklung der realen Bruttowertschöpfung nach sechs großen Wirtschaftsbereichen. Damit verbunden wird zusätzlich die Entwicklung des Produktionswertes des verarbeitenden Gewerbes in Preisen von 2000 nach acht Industriezweigen ausgewiesen. Außerdem sind Leitdaten zur Charakterisierung der Entwicklung in der Wohnungswirtschaft und der Verkehrsnachfrage vorzulegen.

Für die Schätzung der Entwicklung in den Sektoren bzw. Wirtschaftsbereichen und Industriezweigen wurde ein Top-Down-Ansatz verwendet. Dabei wurden die Tendenzen des beobachtbaren langfristigen Strukturwandels berücksichtigt. Das zugrunde gelegte Rechensystem hatte den Definitionen und Konsistenzbedingungen der volkswirtschaftlichen Gesamtrechnung zu genügen. Zudem wurden wichtige Verflechtungen mit der internationalen Wirtschaftsentwicklung berücksichtigt.

1.2.4.1 Zentrale Annahmen der Projektion

Weltwirtschaftliches Umfeld

Deutschland treibt einen intensiven wirtschaftlichen Austausch mit allen Regionen der Erde und ist eine der führenden Handelsnationen. Die starke Einbindung in den Welthandel wird dadurch unterstrichen, dass die deutsche Wirtschaft gegenwärtig beim Warenexport weltweit an der Spitze steht. Wichtige Rahmendaten für die langfristige Entwicklung der deutschen Wirtschaft bilden deshalb die Annahmen zum Wachstum in den Industrieländern (OECD-Länder) sowie in Russland, China und Indien. Für die OECD-Länder, die Entwicklungsländer und die Transformationsländer wird ein von der internationalen Energieagentur entwickeltes Szenario übernommen, das für den Zeitraum bis 2030 von einem Ölpreis – in US-Dollar des Jahres 2006 – in einer Größenordnung zwischen 57 und 62 Dollar pro Barrel ausgeht; nominal und somit nicht inflationsbereinigt entspricht das zwischen 2006 und 2030 einem Anstieg von 61,7 auf 107,6 $/Barrel /IEA 07/. Es unterstellt eine sukzessive Annäherung beim Wachstum in den großen Wirtschaftsblöcken, allerdings bei abnehmenden jährlichen Wachstumsraten (vgl. **Tabelle 1-2**).

Tabelle 1-2: *Wirtschaftswachstum nach Weltregionen – Jahresdurchschnittliche Veränderungsraten nach /IEA 07/, /IFO 09/*

	Nordamerika	OECD-Europa	OECD-Pazifik[a)]	OECD	Transformationsländer	Entwicklungsländer	Welt
1980-1990	3,1	2,4	4,2	3,0	-0,5	3,9	2,9
1990-2005	3,0	2,1	2,2	2,5	-0,4	5,8	3,4
2005-2015	2,6	2,4	2,2	2,5	4,7	6,1	4,2
2015-2030	2,2	1,8	1,6	1,9	2,9	4,4	3,3
2030-2040[b)]	1,9	1,7	1,5	1,7	2,5	3,5	2,5
2040-2050[b)]	1,8	1,6	1,4	1,6	2,0	3,0	2,2

a)Japan, Korea, Australien, Neuseeland.-b)Schätzungen des ifo Instituts.

Bevölkerung und Altersstruktur

Die Bevölkerungsentwicklung in Deutschland bestimmt maßgeblich die weitere Wirtschaftsentwicklung. Sie beeinflusst die Veränderungen der Anzahl der Haushalte, die nicht nur für die Bestimmung der Konsumnachfrage wichtig sind, sondern auch Auswirkungen auf die Nachfrage nach Wohngebäuden zeigen. Darüber hinaus beeinflussen die Höhe der Einwohnerzahl und Veränderungen ihrer Zusammensetzung nach Alter und Geschlecht das Arbeitskräfteangebot. **Abbildung 1-7** zeigt die Bevölkerungsentwicklung, wie sie sich aus der Variante 1-W2 „mittlere“ Bevölkerung, Obergrenze der 11. koordinierten Bevölkerungsvorausrechnung des Statistischen Bundesamtes für Deutschland ergibt /StBu 06/. Für diese Variante sind u. a. folgende Annahmen zugrunde gelegt worden:

- Der aktuelle Trend wird sich in den nächsten 20 Jahren fortsetzen. Die zusammengefasste Geburtenziffer verbleibt auf dem derzeitigen Niveau von knapp 1,4 Kindern je Frau bei gleichzeitigem Anstieg des durchschnittlichen Gebäralters um etwa 1,6 Jahre. Für den Zeitraum von 2026 bis 2050 werden konstante Geburtenverhältnisse unterstellt.
- Es wird mit einem anhaltenden Anstieg der Lebenserwartung gerechnet. Bei männlichen Neugeborenen steigt die Lebenserwartung von 74,8 Jahren – lt. Sterbetafel 1998/2000 – bis 2050 auf 83,5 Jahre, bei den weiblichen Neugeborenen nimmt sie von 80,8 auf 88,0 Jahre zu.
- Es wurde von einem durchgängig positiven Wanderungssaldo ausgegangen. Der Zuwanderungsüberschuss der ausländischen Wohnbevölkerung wird vom vergleichsweise niedrigen Niveau von knapp 100.000 Personen im Jahr 2005 wieder steigen. Für den Zeitraum von 2010 bis 2050 wurde von einem jährlichen Wanderungsüberschuss von 200.000 Personen ausgegangen.

Unter diesen Prämissen wird die Wohnbevölkerung in Deutschland, ausgehend von knapp über 82 Mio. Personen im Jahr 2000, in den kommenden Jahren ungefähr auf diesem Niveau verbleiben und dann kontinuierlich abnehmen. Der Rückgang wird sich ab etwa 2020 verstärken und recht deutlich auf knapp 74 Mio. im Jahr 2050 absinken. Gleichzeitig wird sich im Betrachtungszeitraum die Altersstruktur der Wohnbevölkerung massiv verschieben; der Altersquotient, als Verhältnis der Bevölkerung im Alter ab 65 Jahren zur Gesamtbevölkerung bestimmt, wird sich von 16,7 % im Jahr 2000 auf 31,8 % im Jahr 2050 nahezu verdoppeln (vgl. Abbildung 1-7). Der Anteil der Personen unter 20 Jahren geht im Betrachtungszeitraum von 21,3 % auf 15,4 % zurück. Dadurch ergibt sich zwangsläufig ein ausgeprägter Rückgang der Personen im erwerbsfähigen Alter bzw. des Erwerbspersonenpotenzials.

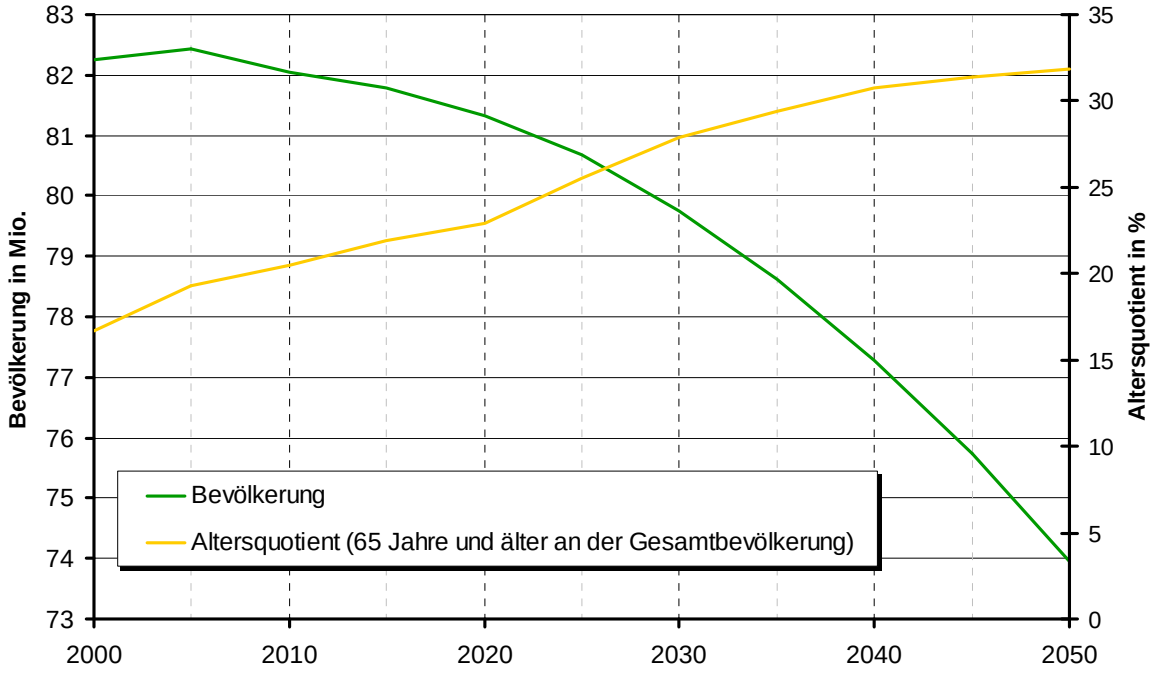

Abbildung 1-7: *Entwicklung der Wohnbevölkerung und des Altersquotienten in Deutschland bis 2050 /StBu 06/ Variante 1-W2*

1.2.4.2 Szenario der Wirtschaftsentwicklung in Deutschland

Gesamtwirtschaftliche Entwicklung und Tendenzen auf dem Arbeitsmarkt
Nach der ausgewählten Variante 1-W2 der aktuellen Bevölkerungsprognose des Statistischen Bundesamts für Deutschland /StBu 06/, die als wahrscheinlichste Entwicklungsperspektive anzusehen ist, verschlechtert sich die Relation von Erwerbspersonen zu den Nichterwerbspersonen im Untersuchungszeitraum deutlich. Während zwischen 2003 und 2050 die Zahl der Erwerbspersonen von 42,6 Mio. auf 33,5 Mio. sinkt, erhöht sich die Anzahl der Nichterwerbspersonen leicht von 40,2 Mio. auf 40,4 Mio. Die Erwerbslosen – nach der Definition der Internationalen Arbeitsorganisation – werden sich im Untersuchungszeitraum mehr als halbieren; analog dazu werden die registrierten Arbeitslosen deutlich sinken. Infolgedessen wird die Anzahl der erwerbstätigen Inländer, zu denen auch die Selbstständigen zählen, bis 2050 weniger stark zurückgehen als die der Erwerbspersonen insgesamt. Zusammen mit den Einpendlern, die im Schätzzeitraum bei konstant 80.000 Personen liegen sollen, errechnen sich die Erwerbstätigen im Inland; ihre Anzahl wird zwischen 2003 und 2050 von 38,7 Mio. auf 32,1 Mio. (– 17 %) zurückgehen. Dadurch sinkt die globale Erwerbsquote – definiert als Anzahl der Erwerbspersonen dividiert durch die gesamte Bevölkerung – von 51,6 % im Jahr 2003 auf 45,3 % im Jahr 2050. Wegen der sinkenden Erwerbslosigkeit geht der Anteil der inländischen Erwerbstätigen an der Bevölkerung in diesem Zeitraum weniger stark von 46,9 % auf 43,3 % zurück. Im Einzelnen ist die zugrunde gelegte Entwicklung auf dem Arbeitsmarkt der **Tabelle 1-3** zu entnehmen. Grundsätzlich ist vor dem Hintergrund dieser demografischen Entwicklung davon auszugehen, dass eine zunehmende Qualifizierung der Erwerbstätigen erforderlich ist, um die ökonomischen Herausforderungen der Zukunft bestehen zu können.

Tabelle 1-3: *Erwerbsbeteiligung und Beschäftigung nach /StBu 07a/,/BA 07/, /IFO 09/*

- in Tsd. -	2003	2005	2010	2020	2030	2040	2050
Erwerbspersonen	42 551	43 322	42 268	41 031	37 607	35 543	33 528
Erwerbslose [1)]	3 918	4 573	2 600	2 300	1 800	1 600	1 500
registrierte Arbeitslose	4 377	4 861	2 742	2 450	1 900	1 700	1 600
Erwerbstätige (Inländer)	38 633	38 749	39 668	38 731	35 807	33 943	32 028
Selbstständige [2)]	4 073	4 356	4.600	4.600	4.600	4.500	4.400
Arbeitnehmer (Inländer)	34 560	34 393	35 068	34 131	31 207	29 443	27 628
Pendlersaldo	93	97	80	80	80	80	80
Arbeitnehmer (Inland)	34 650	34.490	35.148	34.211	31.287	29.523	27.708
Selbstständige [2)]	4 073	4 356	4.600	4.600	4.600	4.500	4.400
Erwerbstätige (Inland)	38 726	38 846	39 748	38 811	35 887	34 023	32 108

[1)] Abgrenzung der Erwerbslosen nach den Definitionen der Internationalen Arbeitsorganisation (ILO).
[2)] Einschl. mithelfende Familienangehörige.

Für die Vorausschätzung des Bruttoinlandsprodukts für den Zeitraum bis 2050 wurden angesichts dieser demografischen Bedingungen folgende Annahmen getroffen:

- die Produktivität je Erwerbstätigenstunde wird im Untersuchungszeitraum steigen und um durchschnittlich 1,5 % pro Jahr zunehmen und

- die geleisteten Arbeitsstunden je Erwerbstätigem werden kontinuierlich erhöht, der Rückgang der Erwerbstätigenzahl wird durch die höhere Arbeitszeit teilweise aufgefangen. Dabei steigen die jährlichen Arbeitsstunden der Arbeitnehmer von im Durchschnitt 1.360 Stunden im Jahr 2003 auf gut 1.600 Stunden im Jahr 2050; die jährlichen Arbeitsstunden der Selbstständigen werden im Durchschnitt mit etwas mehr als 2.100 Stunden angesetzt.

Diese Prämissen führen für den Zeitraum bis 2050 zu einem durchschnittlichen Wachstum des Bruttoinlandsprodukts von knapp 1,4 % pro Jahr. Die Wachstumsraten gehen im Lauf der Zeit zurück; während bis 2010 ein Durchschnittswert von gut 1,5 % zu erreichen ist, beläuft sich die Jahresdurchschnittsrate zwischen 2040 und 2050 auf nur noch rund 1,2 %. Das Bruttoinlandsprodukt pro Einwohner nimmt in diesem Szenario bis 2050 im Durchschnitt um gut 1,5 % pro Jahr zu (vgl. **Abbildung 1-8**). Das Bruttoinlandsprodukt je Erwerbstätigen, die Arbeitsproduktivität, steigt in diesem Zeitraum um durchschnittlich 1,8 % pro Jahr.

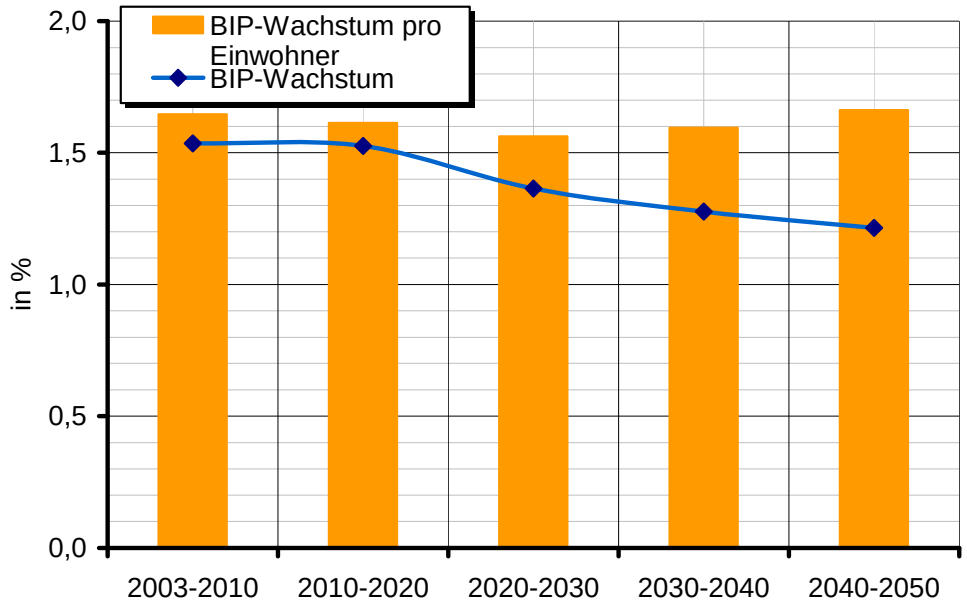

Abbildung 1-8: *Jährliche durchschnittliche Veränderungsrate des Bruttoinlandsprodukts und der Produktivität je Einwohner (preisbereinigt) /StBu 07a/, /IFO 09/*

Damit bleibt Deutschland beim Wachstum wie in den letzten 30 Jahren unter dem Durchschnitt der in der OECD zusammengeschlossenen Industrieländer. Der Abstand zum durchschnittlichen Wachstum der OECD-Länder wird aber geringer sein als noch in den letzten Jahren. Ein maßgeblicher Grund für die Wachstumsbeschleunigung in der Periode bis 2020 sind die in Angriff genommenen Reformen des Arbeitsmarktes und des Systems der sozialen Sicherung. Es wird davon ausgegangen, dass diese Wirkung zeigen und sich auch in Deutschland ein Niedriglohnsektor bildet. Ebenso ist durch die beschlossene Verlängerung der Lebensarbeitszeit ein wichtiger Schritt zur Stabilisierung des Rentensystems erfolgt.

1.2.4.3 Sektorale Entwicklung

Die großen Sektoren der deutschen Wirtschaft werden sich in den kommenden Jahrzehnten ziemlich unterschiedlich entwickeln, der Strukturwandel setzt sich fort. Dabei ist davon auszugehen, dass die Bedeutung des primären Sektors Land- und Forstwirtschaft, Fischerei weiter sinkt. Das Produzierende Gewerbe wird weniger wachsen als die Gesamtwirtschaft, kann aber vor allem aufgrund der weiterhin starken Stellung des Verarbeitenden Gewerbes seine Marktposition nahezu halten. Das ist vor allem darauf zurückzuführen, dass für die bedeutenden Branchen Chemie, Automobilindustrie und der Maschinenbau ein überdurchschnittliches Wachstum erwartet wird. Eine deutlich schlechtere Entwicklung wird vor dem Hintergrund der demografischen Entwicklung für das Baugewerbe, das einen bedeutsamen Teil des Produzierenden Gewerbes ausmacht, unterstellt. Gewinner der Strukturveränderungen dürfte der Dienstleistungssektor sein; dabei werden die Sparte Handel, Gastgewerbe, Verkehr und die in den Bereichen Finanzierung, Vermietung und für Unternehmen tätigen Dienstleister Anteilsgewinne verbuchen können.

Bei der Vorausschätzung bis 2050 wurde von einer Analyse der Entwicklung der Sektoren seit Mitte der 1990er Jahre ausgegangen. Auf der Grundlage dieser Tendenzen wurde mit Hilfe eines Elastizitätskoeffizienten in Bezug auf das Wachstum des Bruttoinlandsprodukts die sektorale Entwicklung fortgeschrieben. Während sich das Bruttoinlandsprodukt zwischen 2000 und 2050 nahezu verdoppelt, steigt die Wertschöpfung im Sektor Land- und Forstwirtschaft, Fischerei um 12 %, im Produzierenden Gewerbe um fast 81 % und in den Dienstleistungsbereichen um rund 114 % (vgl. **Abbildung 1-9** und Tabellen im Anhang).

Entsprechend verschieben sich die Anteile an der Wertschöpfung aller Wirtschaftsbereiche zwischen 2000 und 2050. Die Gewichte der Sektoren verändern sich wie folgt:

- Land- und Forstwirtschaft, Fischerei von 1,26 % auf 0,7 %,
- Produzierendes Gewerbe von 30,35 % auf rund 27,3 % und
- Dienstleistungsbereiche von 68,5 % auf 72,0 %.

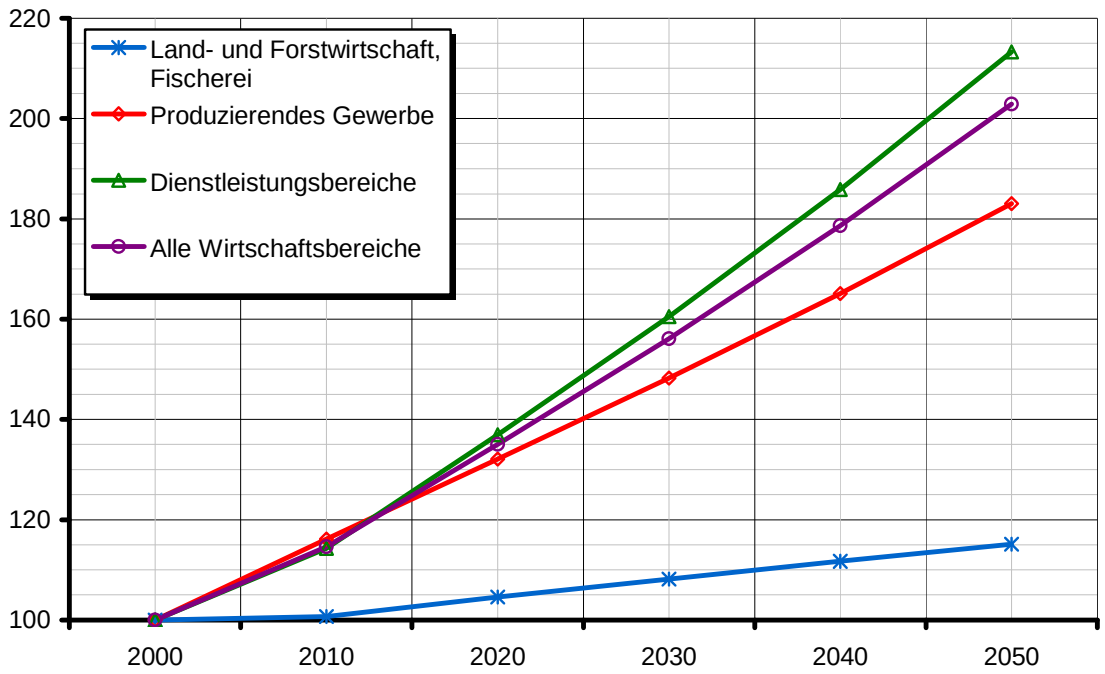

Abbildung 1-9: *Veränderung der Bruttowertschöpfung nach Sektoren im Zeitraum 2000 bis 2050 (2000=100) nach /StBu 07a/, /IFO 09/*

Das Produzierende Gewerbe setzt sich zusammen aus dem Verarbeitenden Gewerbe, das das mit Abstand größte Gewicht hat, dem Bergbau und der Gewinnung von Steinen und Erden, der Energie- und Wasserversorgung und dem Baugewerbe. Sowohl der Bergbau und die Gewinnung von Steinen und Erden als auch das Baugewerbe werden im Projektionszeitraum an Bedeutung verlieren. Das Verarbeitende Gewerbe wird ebenso wie der Wirtschaftsbereich Energie- und Wasserversorgung seine Stellung leicht ausbauen können. Die zentrale Voraussetzung hierfür ist allerdings, dass die deutsche Industrie ihre Wettbewerbsfähigkeit langfristig sichern kann. Das erfordert entsprechende Maßnahmen zur Erhaltung der Innovationskraft durch Forschung und Entwicklung. Eine wesentliche Voraussetzung für die Sicherung und Stärkung der wirtschaftlichen Basis ist die Verfügbarkeit von qualifiziertem Personal. Die erforderlichen Maßnahmen zur Verbesserung der Qualifikation der Erwerbstätigen müssen an der frühkindlichen Erziehung sowie der Schul-, Berufs- und Hochschulausbildung ansetzen. Darüber hinaus sind neben der vom Staat getragenen Grundlagenforschung vor allem Maßnahmen zur Deregulierung des Arbeitsmarktes und eine wachstumsfreundliche Wirtschaftspolitik notwendig. Eine weitere wesentliche Bedingung für die Aufrechterhaltung einer wettbewerbsfähigen industriellen Produktion in Deutschland ist eine sichere und preisgünstige Versorgung mit Energie.

Ausgewählte Wirtschaftszweige des Verarbeitenden Gewerbes

Für die detaillierte Untersuchung im Verarbeitenden Gewerbe wurden acht Wirtschaftszweige ausgewählt, die einerseits besonders energieintensive Produktionen aufweisen oder von denen auch in Zukunft eine deutlich über dem Durchschnitt liegende Wachstumsdynamik zu erwarten ist. Es sind folgende Branchen dargestellt:

- Ernährungsgewerbe,
- Papiergewerbe,

- Kokerei, Mineralölverarbeitung, Herstellung von Brutstoffen,
- Herstellung von chemischen Erzeugnissen,
- Glasgewerbe, Herstellung von Keramik, Verarbeitung von Steinen und Erden,
- Metallerzeugung und -bearbeitung,
- Maschinenbau,
- Herstellung von Kraftwagen und Kraftwagenteilen.

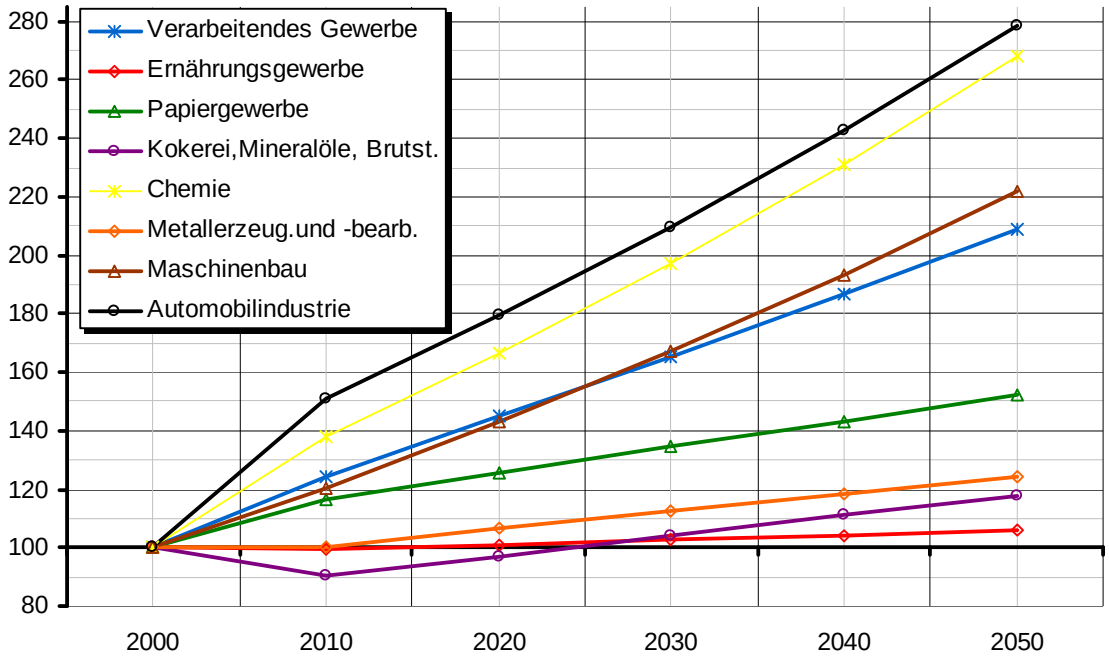

Abbildung 1-10: *Veränderung der Bruttowertschöpfung nach Wirtschaftszweigen des Verarbeitenden Gewerbes im Zeitraum 2000 bis 2050 (2000=100) nach /StBu 07a/, /IFO 09/*

Von diesen Branchen werden sich die chemische Industrie, der Maschinenbau und die Automobilindustrie aufgrund ihrer traditionell starken Position, die sich auch in umfangreichen Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten zeigt, besser entwickeln als das Verarbeitende Gewerbe insgesamt. Dagegen werden Kokereien, Mineralölverarbeitung und die Herstellung von Brutstoffen – etwa die Produktion von Brennstäben, aber auch die Erzeugung von radioaktiven Ausgangsstoffen für medizinische Anwendungen – die Metallerzeugung und -bearbeitung sowie das Ernährungs- und Papiergewerbe schwächer wachsen. Das übrige Verarbeitende Gewerbe ohne die ausgewählten Branchen wird sich ähnlich entwickeln wie der gesamte Sektor (vgl. **Abbildung 1-10** und Tabellen im Anhang).

Neben der Bruttowertschöpfung in den einzelnen Wirtschaftszweigen ist auch die Produktion von Interesse. Dabei wurde im Allgemeinen der Produktionsindex geschätzt, teilweise wurden auch die Mengen ausgewählter Produktionen bestimmt. Der Produktionsindex unterscheidet sich von der Bruttowertschöpfung dadurch, dass er auch die Vorleistungen umfasst. Insofern kann der Produktionsindex dann stärkeren Schwankungen unterliegen, wenn sich der Umfang der Vorleistungen deutlich verändert. Ein gutes Beispiel stellt die Automobilindustrie dar, die für einzelne Modelle bis zu 80 % des gesamten Produktionswertes von Vorlieferanten bezieht. In der folgenden **Tabelle 1-4**

sind die Produktionsindizes der ausgewählten Wirtschaftszweige von 2000 bis 2050 dargestellt.

Tabelle 1-4: *Entwicklung des Produktionsindex für ausgewählte Wirtschaftszweige nach /StBu 07b/, /IFO 09/*

2000=100	2000	2005	2010	2020	2030	2040	2050
Ernährungsgewerbe	100,0	107,5	113,0	120,0	126,0	131,0	135,0
Papier-, Verlags- und Druckgewerbe	100,0	97,7	102,0	110,0	118,0	125,0	130,0
- Papiergewerbe	100,0	107,4	122,0	126,0	132,0	138,0	143,0
Kokerei	100,0	68,8	75,0	65,0	60,0	55,0	50,0
Mineralölverarbeitung	100,0	109,4	110,0	117,0	123,0	127,0	130,0
H. v. chemischen Erzeugnissen	100,0	110,3	120,0	145,0	168,0	190,0	210,0
- H. v. chemischen Grundstoffen	100,0	107,7	112,0	125,0	137,0	148,0	160,0
Glas, Keramik, Steine und Erden	100,0	85,2	89,0	92,0	95,0	98,0	100,0
- Glas und Glaswaren	100,0	87,6	110,0	116,0	121,0	126,0	130,0
- Zement, Kalk, Gips	100,0	79,8	82,0	84,0	86,0	88,0	90,0
Metallerzeugung und -bearbeitung	100,0	104,9	118,0	130,0	141,0	151,0	160,0
- Erzeugung von Roheisen, Stahl und Ferrolegierungen	100,0	98,6	110,0	112,0	115,0	112,0	110,0
Maschinenbau	100,0	106,7	125,0	147,0	168,0	188,0	206,0
H. v. Kraftwagen und Kraftwagenteilen	100,0	117,4	126,0	150,0	173,0	195,0	215,0

Zusätzlich wurden für die Erzeugnisbereiche

- Papiergewerbe,
- Chemische Erzeugnisse,
- Glaswaren, Zement, Kalk,
- Metallerzeugung und -bearbeitung

die physischen Mengen ausgewählter Produktionen über den Untersuchungszeitraum geschätzt. Diese Angaben sind in den Tabellen im Anhang zusammengestellt.

Der Dienstleistungssektor

Auf Grundlage des Anteils der Dienstleistungsbereiche an der Wertschöpfung aller Wirtschaftsbereiche wurde eine Aufteilung auf die einzelnen Teilbereiche vorgenommen. Analog der Vorgehensweise beim Verarbeitenden Gewerbe wurde unter Berücksichtigung der Vergangenheitsentwicklung und der Einschätzung der Zukunftsperspektiven die Entwicklung in den Dienstleistungssparten abgeschätzt. Diese können sich zum Teil deutlich unterscheiden.

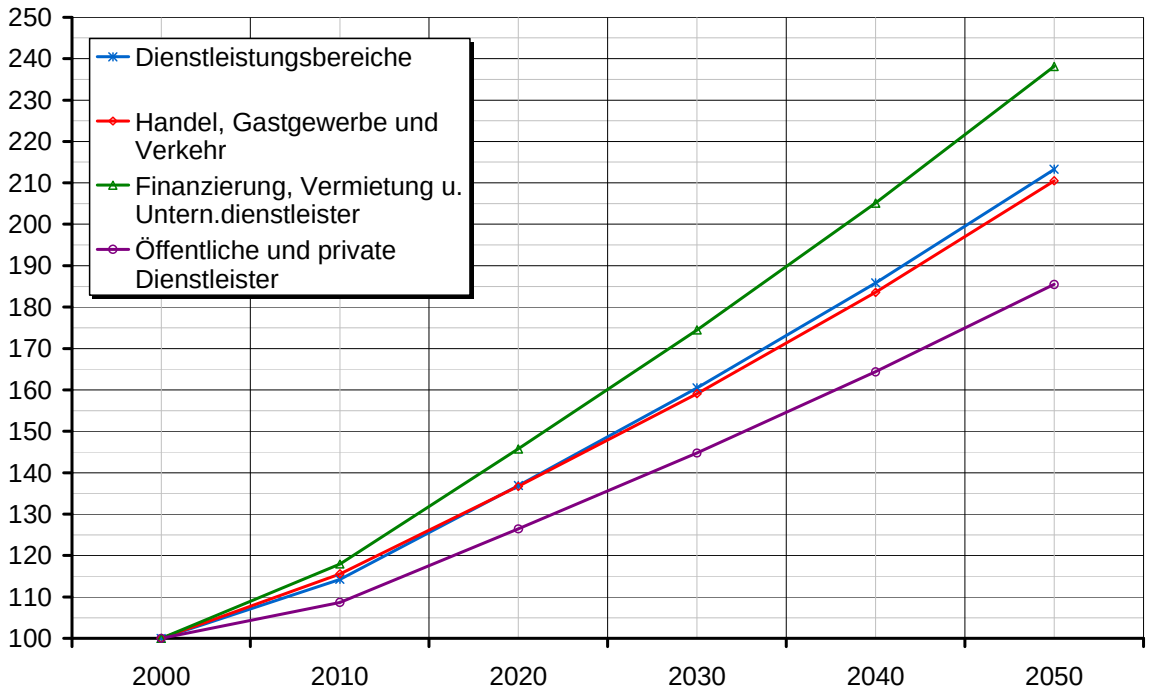

Abbildung 1-11: *Veränderung der Bruttowertschöpfung nach Wirtschaftszweigen der Dienstleistungsbereiche im Zeitraum 2000 bis 2050 (2000=100) nach /StBu 07a/, /IFO 09/*

Ingesamt wird sich die Bruttowertschöpfung im Dienstleistungsbereich von 2000 bis 2050 mehr als verdoppeln. Die stärkste Dynamik wird von den Bereichen Finanzierung (Kredit- und Versicherungsgewerbe), Vermietung und Unternehmensdienstleistungen erwartet. Die Bruttowertschöpfung dieser Bereiche wird von 2000 bis 2050 um fast 140 % zunehmen. In der Sparte Handel, Gastgewerbe und Verkehr wird die Wertschöpfung etwa ebenso stark erhöht, wie im gesamten Dienstleistungsbereich. Deutlich schwächer schneidet der Bereich der öffentlichen und privaten Dienstleister ab; seine Wertschöpfung wird 2050 um etwa 85 % höher sein als im Jahr 2000. Die Entwicklung bei den Dienstleistungen veranschaulicht **Abbildung 1-11**; für die Daten im Einzelnen wird auf den Anhang verwiesen.

Neben der Entwicklung der Bruttowertschöpfung stellt die Anzahl der Beschäftigten im Sektor Dienstleistungen eine zentrale Bestimmungsgröße für die Abschätzung des Energiebedarfs dar. In **Tabelle 1-5** ist die Entwicklung der Beschäftigten in Deutschland nach Sektoren dargestellt. Die Dienstleister einschließlich des Handels, des Gastgewerbes und der Hersteller mit weniger als 20 Beschäftigten werden danach ihre Stellung als der Bereich mit den meisten Beschäftigten in den kommenden Jahrzehnten zu Lasten des Produzierenden Gewerbes und des Sektors Land- und Forstwirtschaft, Fischerei noch ausbauen. Bis 2050 wird der Anteil der Beschäftigten im Dienstleistungsgewerbe in der genannten Abgrenzung, der im Jahr 2000 noch bei rund 72 % lag, auf etwa 80 % steigen. Zur Entwicklung der Beschäftigten in einzelnen Bereichen des Dienstleistungssektors wird auf die Tabellen im Anhang verwiesen.

Tabelle 1-5: *Beschäftigungsentwicklung in Deutschland /StBu 07a/, /StBu 05/, /IFO 09/*

- Beschäftigte in Tsd. -	2000	2003	2005	2010	2020	2030	2040	2050
Handel	6.078	5.922	5.899	6.041	5.980	5.562	5.283	4.966
Dienstleistungen	18.565	19.136	19.608	20.784	20.764	19.601	19.013	18.347
Hersteller, unter 20 Beschäftigten	1.862	1.712	1.626	1.561	1.436	1.264	1.125	1.000
Gastgewerbe	1.613	1.678	1.758	1.880	1.800	1.656	1.540	1.432
Summe	28.118	28.448	28.891	30.266	29.980	28.082	26.961	25.746
Land- und Forstwirtsch., Fischerei	936	880	850	825	783	666	586	500
Bergbau	128	99	89	80	68	54	47	40
Industrie	6.247	6.038	5.880	5.639	5.244	4.615	4.166	3.742
Energie- und Wasserversorgung	297	291	289	269	242	213	192	172
Baugewerbe	2.769	2.322	2.165	1.970	1.773	1.543	1.358	1.195
Private Haushalte	649	648	682	700	721	714	714	714
Insgesamt	39.144	38.726	38.846	39.748	38.811	35.887	34.023	32.108

Entwicklung im Wohnungsbau

Dem Wohnungsbau kommt das größte Gewicht innerhalb der Bautätigkeit zu. Sein Anteil am gesamten Bauvolumen lag in den vergangenen Jahren bei gut 50 %. Der Wohnungsbau umfasst die Errichtung von Neubauten und die Maßnahmen am Wohnungsbestand, wie Modernisierung, Renovierung und Instandsetzung /IFO 07/.

Der Energieverbrauch privater Haushalte wird überwiegend vom Energiebedarf für die Raumheizung und Warmwasserbereitung bestimmt. Maßgeblich ist dabei sowohl die gesamte Anzahl der Wohnungen als auch ihr energietechnischer Zustand. Daneben können nutzerspezifische Einflüsse eine nicht unerhebliche Rolle spielen. Da in den vergangenen Jahrzehnten die Anforderungen an den Heizenergiebedarf von Wohngebäuden nach und nach verschärft wurden, sind nicht nur der gesamte Wohnungsbestand von Interesse, sondern auch die jährlichen Wohnungsfertigstellungen. Damit kann der Energiebedarf der neu hinzukommenden Wohnungen besser abgeschätzt werden. Dabei wurde von den Bestandszahlen bis 2005 ausgegangen; im ersten Schritt wurden der Gebäude- und der Wohnungsbestand sowie die gesamte Wohnfläche bis 2050 abgeschätzt. Dabei wurde folgendermaßen vorgegangen:

- Um den Rückgang der Bevölkerung berücksichtigen zu können, wurde die Kennzahl Wohnungen je Einwohner für den Zeitraum von 1995 bis 2005 errechnet und bis 2050 fortgeschrieben. Anhand der Bevölkerungszahl wurde mit dieser Kennzahl die Zahl der Wohnungen bestimmt.

- Analog dazu wurde für die Anzahl der Wohngebäude die Kennzahl Wohnungen/Wohngebäude berechnet und bis 2050 abgeschätzt.
- Schließlich wurde mit Hilfe der Kennzahl Wohnfläche/Wohnung die gesamte Wohnfläche errechnet.

Entsprechend wurden die Bestandszahlen für die Wohnungen in Ein- und Zweifamilienhäusern und für Drei- und Mehrfamilienhäuser bestimmt. Die Ergebnisse dieser Vorausschätzungen sind in den Tabellen im Anhang zusammengestellt.

Zur Ermittlung der Wohnungsfertigstellungen wurde grundsätzlich zu dem Zuwachs an Wohnungen, wie er aus den Anhangtabellen zu entnehmen ist, die Anzahl von Wohnungen addiert, die dem Ersatz von Abgängen, beispielsweise durch Abriss, dient. Für die Abgänge gibt es zwar Anhaltswerte aus der Vergangenheit, für die zukünftige Entwicklung vor dem Hintergrund des Bevölkerungsrückgangs mussten jedoch Annahmen getroffen werden. Daneben konnte bis 2016 auf die Ergebnisse der Abschätzungen der Wohnungsfertigstellungen in der o. g. Studie des ifo Instituts zurückgegriffen werden.

Tabelle 1-6: *Wohnungsfertigstellungen in Deutschland nach /StBu 07c/, /IFO 07/*

	Wohnungen					
	insgesamt		in Gebäuden mit 1 und 2		in Gebäuden mit 3 und	
Jahr	Wohnungen in Tsd.	Wohnfläche in Mio. m^2	Wohnungen in Tsd.	Wohnfläche in Mio. m^2	Wohnungen in Tsd.	Wohnfläche in Mio. m^2
Istwerte						
1995	524,6	46,1	205,2	24,6	319,4	21,5
1996	485,2	42,9	188,8	22,7	296,4	20,2
1997	501,1	45,5	211,1	25,6	290,1	19,9
1998	432,2	41,9	220,6	27,1	211,6	14,8
1999	406,6	41,7	237,3	29,4	169,2	12,3
2000	368,5	39,1	229,7	28,9	138,8	10,2
2001	285,9	31,4	185,4	23,6	100,6	7,7
2002	253,7	28,6	172,9	22,3	80,8	6,3
2003	236,1	27,0	165,2	21,4	70,9	5,6
2004	247,8	28,8	177,2	23,2	70,6	5,6
2005	213,8	25,0	151,5	20,0	62,3	5,0
Schätzwerte	Jahresdurchschnittlicher Zuwachs					
2005-2010	220,0	25,5	150,0	19,8	70,0	5,7
2010-2015	210,0	24,1	140,0	18,5	70,0	5,6
2015-2020	200,0	23,0	135,0	17,8	65,0	5,1
2020-2030	180,0	20,5	120,0	15,8	60,0	4,7
2030-2040	150,0	17,0	100,0	13,2	50,0	3,8
2040-2050	100,0	11,2	65,0	8,6	35,0	2,6

Auch wenn derzeit eine Erholung der Bautätigkeit festzustellen ist, muss doch für die längerfristige Entwicklung von einem deutlichen Rückgang der Ausgaben für den Wohnungsbau und somit der Wohnungsfertigstellungen ausgegangen werden. Während

bis etwa 2010 noch jährlich etwa 210.000 Wohnungen in neuen Wohngebäuden errichtet werden, dürften es zwischen 2040 und 2050 nur noch etwa 100.000 Wohnungen pro Jahr sein (vgl. **Tabelle 1-6**). Das ist im Wesentlichen darauf zurückzuführen, dass schon derzeit eine vergleichsweise gute Versorgung der Haushalte mit Wohnraum gegeben ist und das Wachstum durch den Rückgang der Bevölkerung deutlich begrenzt wird. Ein bedeutsamer Teil der zusätzlichen Wohnungsfertigstellungen beruht darauf, dass in die Regionen der Bundesrepublik, die in Zukunft eine relativ gute wirtschaftliche Entwicklung aufweisen, Arbeitskräfte zuwandern werden und folglich zusätzliche Wohnungen benötigen.

1.2.4.4 Szenario der Energie- und Rohstoffpreisentwicklung

Entwicklung der Energiepreise

Die Energiepreise in Deutschland werden überwiegend von der Preisentwicklung auf den Weltmärkten bestimmt. Das gilt vor allem für die wichtigsten, international gehandelten Primärenergieträger Erdöl, Erdgas und Steinkohle. Aufgrund der günstigen Transporteigenschaften und der vielseitigen Einsetzbarkeit, nicht nur auf dem Wärmemarkt, sondern auch im Verkehrssektor und nicht zuletzt als Rohstoff, kommt dabei dem Erdöl eine besondere Bedeutung zu. Erdöl ist der am meisten gehandelte Energieträger. Den Stellenwert des Erdöls unterstreicht auch sein Anteil am weltweiten Primärenergieverbrauch von 35 % im Jahr 2004, welcher der aktuellen Prognose der Internationalen Energieagentur zufolge 2030 immer noch bei rund 31,5 % liegen soll /IEA 07/. Der Preis für Erdöl hat daher eine herausragende Bedeutung auf den Energiemärkten und beeinflusst zudem im Rahmen des Substitutionswettbewerbs die Entwicklung der Preise der übrigen Primärenergieträger maßgeblich.

Grundsätzlich wird die Preisentwicklung von der weltweiten Nachfrage nach Rohöl und seiner kurz- und langfristigen Verfügbarkeit bestimmt. Dass die weltweiten Verbrauchsschwerpunkte und die Regionen mit den höchsten Rohölexporten und den zugleich größten Reserven vergleichsweise weit voneinander entfernt sind, ist ein besonderes Merkmal des Ölmarktes. Ende 2005 beliefen sich die weltweiten Reserven auf rund 175 Mrd. t; bei einem Verbrauch von 3,8 Mrd. t errechnet sich eine statische Reichweite von 46 Jahren. Von den Gesamtreserven sind allein 101 Mrd. t im Nahen Osten konzentriert, der jährliche Verbrauch dieser Länder belief sich 2005 auf knapp 0,3 Mrd. t /EXX 06/. Für die Schätzung des Rohölpreises bis 2050 sind zahlreiche Annahmen auf der Nachfrage- und Angebotsseite zu treffen, durch die die wesentlichen Einflussfaktoren erfasst werden sollen. Dabei geht es darum, eine Trendprognose durchzuführen, die kurzfristige Schwankungen auf den Märkten unberücksichtigt lassen muss.

Für die Nachfrage nach Rohöl wurden die folgenden Prämissen zugrunde gelegt:

- Der Ölbedarf in den OECD-Ländern wird bis etwa 2030 wesentlich schwächer steigen als in der Vergangenheit. In den darauf folgenden Jahren ist mit einer Stagnation und sogar einem leichten Rückgang zu rechnen. Dagegen werden die übrigen Länder, also die Entwicklungs-, Schwellen- und Transformationsländer, ihren Rohölverbrauch noch deutlich ausweiten. Insgesamt wird der Zuwachs des Ölbedarfs nach 2030 spürbar zurückgehen.

- Die Elastizität des Zuwachses des Ölverbrauchs bezogen auf das reale Wirtschaftswachstum, die angibt, um wie viel der Ölbedarf bei einer Zunahme des Bruttoinlandsprodukts um 1 % steigt, beläuft sich für den Zeitraum von 2004 bis 2050 auf rund 0,13. Für die Jahre von 2005 bis 2030 liegt der Elastizitätskoeffizient bei 0,21 und für die Zeit danach bis 2050 bei 0,08. Dieses Gesamtergebnis resultiert aus einer getrennten Untersuchung der OECD-Länder und der übrigen Länder. Während es in den OECD-Ländern zwischen 2020 und 2030 zu einer Entkopplung des Ölverbrauchs vom Wirtschaftswachstum kommt, ist in den übrigen Ländern auch am Ende des Schätzzeitraums angesichts der Industrialisierung und Motorisierung das Wachstum mit einem höheren Ölverbrauch verbunden.
- Der im Zeitverlauf deutlich verlangsamte Zuwachs des Ölbedarfs ist auch darauf zurückzuführen, dass aufgrund der vergleichsweise hohen Ölpreise die Nachfrage infolge preiselastischen Verhaltens der Verbraucher und infolge der Durchführung von Maßnahmen zur Energieeinsparung weniger stark zunehmen wird und es außerdem zur Substitution von Rohöl durch andere Energieträger kommt. Es wurde bei der Abschätzung des Rohölpreises davon ausgegangen, dass die Preiselastizität der Nachfrage bis 2050 leicht zunimmt.

Auf der Angebotsseite ist vor allem sicherzustellen, dass die Kapazitäten von Rohöl weiter ausgebaut werden, um der steigenden Nachfrage begegnen zu können. Dazu müssen die Investitionen in die Gewinnung von Erdöl im Prognosezeitraum kräftig erhöht werden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass der größte Teil der Investitionen dazu benötigt wird, dem natürlichen Rückgang der Förderung aus bereits erschlossenen Vorkommen entgegenzuwirken. Es wurde angenommen, dass die OPEC-Länder hierfür im Durchschnitt 75 % ihrer Upstream-Investitionen ausgeben werden, bei den übrigen Ölförderländern liegt dieser Anteil mit 80 % noch etwas höher. Für die Erschließung neuer Ölfelder einschließlich der Gewinnung nicht-konventionellen Öls zur Deckung des steigenden Bedarfs dürften von 2003 bis 2030 rund 600 Mrd. $, von 2030 bis 2050 nochmals nahezu 500 Mrd. $ investiert werden /IEA 03/. Dabei wurde davon ausgegangen, dass die Produktivität der Investitionen im Zeitverlauf zurückgeht, im Durchschnitt der OPEC-Länder wegen der höheren konventionellen Reserven weniger stark als in den Förderländern außerhalb der OPEC. Es sind also immer höhere Investitionen erforderlich, um eine bestimmte Menge an Rohöl fördern zu können.

Der Rohölbedarf wird unter diesen Prämissen von 79,3 Mb/d im Jahr 2003 auf rund 110 Mb/d im Jahr 2030 steigen; 2050 ist ein weltweiter Ölbedarf in Höhe von gut 115 Mb/d zu erwarten. Der Anteil der OPEC-Länder daran wird von derzeit rund 42 % auf fast 54 % im Jahr 2050 zunehmen. Der reale Rohölpreis wird ausgehend von 29 $/b im Jahr 2003 auf rund 80 $/b im Jahr 2030 zulegen und in den Jahren danach leicht zurückgehen. Deutlich zunehmen wird in der Untersuchungsperiode der nominale Ölpreis, wobei von einer durchschnittlichen Inflationsrate von 2 % pro Jahr ausgegangen wurde. Der Rohölpreis in Euro zeigt einen etwas davon abweichenden Verlauf, da auf lange Sicht mit einer tendenziellen Erholung des Dollars gegenüber dem Euro gerechnet wird. Im Einzelnen ist die Entwicklung der zentralen Determinanten des Ölmarktes aus der **Tabelle 1-7** zu ersehen.

Tabelle 1-7: *Entwicklung des weltweiten Rohölbedarfs und der Rohölpreise*

	2003	2010	2020	2030	2040	2050
Rohölbedarf in Mb/d[1)]	79,3	91,1	102,1	110,1	114,5	115,6
Ölpreis, real in $/b	29,0	85,5	82,8	80,6	79,5	78,9
Ölpreis, nominal in $/b	29,0	98,2	115,9	137,5	165,4	200,0
Ölpreis, real in €/b	25,6	68,4	69,0	70,1	72,3	75,1
Ölpreis, nominal in €/b	25,6	73,3	76,2	77,4	79,8	83,0
Ölpreis, real in €/t	187,9	501,3	505,7	513,6	529,6	550,6
Ölpreis, nominal in €/t	187,9	575,8	708,1	876,7	1102,0	1396,4
19 Mb/d = Mio. Barrel/Tag.						

Angesichts der derzeit bestehenden, großen Unsicherheiten über die weitere Entwicklung des Ölmarktes ist eine solche langfristige Trendprognose des Ölpreises besonders problematisch. Gerade in den letzten Jahren zeigte der Rohölpreis eine extrem hohe Volatilität: Nach dem über mehrere Jahre erfolgten Anstieg lag der Ölpreis im Sommer 2008 in der Spitze bei 147 US-$/b. Danach kam es zu einem rasanten Absturz und Ende November 2008 bewegte sich der Preis für Rohöl zwischen 45 und 50 $/b. Auch wenn gegenwärtig noch nicht abgesehen werden kann, ob und wieweit der Rohölpreis noch fällt, ist doch davon auszugehen, dass die Ölpreise bei einer konjunkturellen Erholung der Weltwirtschaft angesichts der gegebenen fundamentalen Knappheiten auf mittlere Sicht wieder anziehen werden.

Ausgehend von der Entwicklung des Rohölpreises und des US-Dollar/Euro-Wechselkurses wurden die Rohölimportpreise bestimmt und daraus die Verbraucherpreise der privaten Haushalte und der Industrie abgeleitet. Dabei wurden neben Erdgas und elektrischem Strom bei den Haushalten leichtes Heizöl, Fernwärme und Holzpellets berücksichtigt. Für die Industrieabnehmer wurden die Preise für Strom, Erdgas, Fernwärme und schweres Heizöl ausgewiesen. Es wurde davon ausgegangen, dass die Bindung der Erdgaspreise an den Preis von Mineralölprodukten sich im Zeitverlauf lockert, aber aufgrund der weiterhin bestehenden Substitutionskonkurrenz die Preise beider Energieträger sich längerfristig in die gleiche Richtung bewegen. Bei der Abschätzung der Strompreisentwicklung wurde angenommen, dass wegen des geplanten Ausstiegs aus der Nutzung der Kernenergie in Deutschland zusätzliche Investitionen auf die Stromwirtschaft zukommen und längerfristig die Entwicklung der Brennstoffpreise wieder einen stärkeren Einfluss auf die Strompreisgestaltung bekommen wird. Während bei den Preisen für Fernwärme eine ähnliche Entwicklung wie beim Erdgas unterstellt wurde, ist vor allem wegen der höheren Investitionsausgaben im Vergleich zu Öl- und Gasheizungen von dauerhaft niedrigeren Preisen bei Holzpellets auszugehen. Die Entwicklung der Verbraucherpreise für Energieträger bis 2050 ist in **Tabelle 1-8** dargestellt.

Tabelle 1-8: *Entwicklung der Verbraucherpreise ausgewählter Energieträger /BMWi 09/, /IFO 09/*

		2003	2010	2020	2030	2040	2050
Haushalte (einschl. MwSt)							
Heizöl leicht	€/100 l	36,5	103,6	127,5	157,8	198,4	251,4
Erdgas	Cent/kWh	4,8	9,6	11,9	14,8	18,7	23,8
Strom[1)]	Cent/kWh	16,9	26,1	30,4	36,4	43,2	51,5
Fernwärme	Cent/kWh	5,7	8,6	10,9	13,4	16,7	21,0
Holzpellets	Cent/kWh	3,2	4,5	6,0	9,0	10,0	14,0
Industrie (ohne MwSt)							
Heizöl schwer	€/t	187,3	414,6	509,9	631,2	793,4	1005,4
Erdgas[2)]	Cent/kWh	2,2	4,8	5,9	7,4	9,3	11,9
Strom	Cent/kWh	5,8	12,1	14,4	17,3	20,9	25,6
Fernwärme	Cent/kWh	5,2	8,2	10,5	12,9	16,2	20,4

[1)] Tarifabnehmer, einschl. Strom- und Mehrwertsteuer; [2)] Durchschnittserlöse.

Daneben sind noch wegen ihres beträchtlichen Einsatzvolumens die Preise der Brennstoffe für Kraftwerke, Heizkraftwerke und Heizwerke von besonderem Interesse. Im Vordergrund stehen dabei die Preise für Kraftwerkskohle, Erdgas und Braunkohle. Angesichts des erwarteten starken Anstiegs der weltweiten Stromerzeugung und der reichlichen Verfügbarkeit von Steinkohlen wird davon ausgegangen, dass der Bedarf an Steinkohlen zur Verstromung weiter zunehmen wird. Infolge der hohen Nachfrage ist daher mit einem anhaltenden Preisanstieg bei Steinkohlen zu rechnen. Die Preise für Erdgas werden zwar nicht so stark ansteigen, Erdgas bleibt aber der mit Abstand teuerste Brennstoff. Bei der Braunkohle ist zu berücksichtigen, dass die Braunkohlenpreise für den Kraftwerkseinsatz in der Regel unternehmensinterne Verrechnungspreise darstellen und daher nicht direkt verfügbar sind. Es musste also nicht nur die Entwicklung bis 2050, sondern auch der Startwert geschätzt werden. Zum Vergleich ist noch der Preis für Braunkohlenprodukte, der für die Notierungen vorliegt, angegeben. Zusätzlich wurde noch eine Abschätzung der Entwicklung der Preise für Hackschnitzel vorgenommen. Hackschnitzel werden vorwiegend in kleineren Heizkraftwerken und Heizwerken oder zur Zusatzfeuerung eingesetzt. Die Entwicklung der Preise für ausgewählte Brennstoffe zeigt **Tabelle 1-9**.

Tabelle 1-9: *Entwicklung der Preise für ausgewählte Brennstoffe /StK 08/, /IFO 09/*

		2003	2010	2020	2030	2040	2050
Kraftwerkskohle[2)]	€/t SKE	40	79	100	123	153	192
Erdgas[3)] für Kraftwerke	€/t SKE	167	300	370	444	542	665
Braunkohle	€/t SKE	30	40	50	65	80	100
Braunkohlenprodukte[4)]	€/t SKE	88	101	122	147	176	210
Hackschnitzel	€/t SKE	85	100	120	145	170	200

ohne Mehrwertsteuer; [2)] Preis frei deutscher Grenze; [3)] Durchschnittserlöse der Abgabe an Endverbraucher einschl. Erdgassteuer; [4)] Mengengewogener Durchschnitt aller Braunkohlenprodukte aus alten und neuen Bundesländern.

1.2.4.5 Entwicklung ausgewählter Rohstoffpreise

Neben den Energieträgern spielt auch die Verfügbarkeit von Rohstoffen eine entscheidende Rolle für die weitere wirtschaftliche Entwicklung. Im Vordergrund stehen dabei die Industrierohstoffe, also vor allem die Metalle und einige agrarische Rohstoffe; eine große Bedeutung haben aber auch Nahrungsmittel, die insbesondere die wichtigen Getreide, pflanzliche Öle, Zucker, Kaffee und Tee umfassen.

Für eine Abschätzung der Rohstoffpreisentwicklung sind zahlreiche Bestimmungsfaktoren zu berücksichtigen. Wegen der Komplexität der Zusammenhänge sind dabei zahlreiche Annahmen zu treffen. Von wesentlicher Bedeutung sind die langfristige Entwicklung der Weltbevölkerung und der Weltwirtschaft, ihre strukturelle Zusammensetzung und damit das Ausmaß der Industrialisierung. Neben diesen die Nachfrageseite bestimmenden Faktoren kommt dem zu erwartenden Angebot an Rohstoffen ein entscheidender Stellenwert zu. Dabei ist auch zu berücksichtigen, ob und inwieweit Ersatzstoffe für knapper und teurer werdende Rohstoffe zur Verfügung stehen werden.

Ein Ansatzpunkt für die Preisentwicklung bei Rohstoffen ist die Entwicklung in den letzten Jahrzehnten und die aktuelle Situation. In den Jahren von 1980 bis 2003 sind die nominalen Preise für die im Index des Hamburgischen Welt-Wirtschafts-Archivs (HWWA) zusammengefassten Rohstoffe (ohne Energierohstoffe) auf Dollarbasis unter gewissen Schwankungen leicht zurückgegangen und über mehrere Jahre hinweg nahezu unverändert geblieben. Danach kam es zu einem kräftigen Preisanstieg, vor allem durch die hohe Nachfrage nach Metallen. Ende 2006 lag dieser Index um rund 80 % über dem Niveau zur Jahreswende 2002/2003. Im zweiten Halbjahr 2008 kam es in Zusammenhang mit der Finanzmarktkrise zu einem weltweiten Konjunkturabschwung, in dessen Folge die Rohstoffpreise massiv eingebrochen sind. Auch wenn es bei der Preisentwicklung mehrerer Rohstoffe in den vergangenen Jahren zu Übertreibungen, erst nach oben und zuletzt nach unten, gekommen ist, scheint es gute Gründe für einen längerfristigen Anstieg der Rohstoffpreise zu geben. Ein wichtiges Argument stellt die weiterhin hohe Nachfrage infolge der anhaltenden Industrialisierung bevölkerungsreicher Staaten wie China und Indien dar; dazu kommen die wirtschaftlichen Aufbrüche in mehreren Ländern Lateinamerikas und in Osteuropa sowie Russland. Vor diesem Hintergrund wurde davon ausgegangen, dass es bis 2050 bei den hier betrachteten Rohstoffen – Eisenerz, Stahlschrott, Aluminium, Kupfer, Zellstoff und den Nahrungsmitteln – zu mehr oder weniger starken Preisanstiegen kommen wird. In **Tabelle 1-10** sind die nominalen Preise für die genannten Güter bis 2050 auf Eurobasis dargestellt. Dabei ist zu berücksichtigen, dass ein Teil der Preissteigerungen auch darauf beruht, dass der Euro gegenüber dem Dollar langfristig etwas an Wert verlieren dürfte.

Tabelle 1-10: *Preisentwicklung ausgewählter Rohstoffe /AIECE 08/, /HWWI 08/, /IFO 09/*

Indexwerte auf Eurobasis, 2003=100	2003	2010	2020	2030	2040	2050
Eisenerz	100	325	283	302	306	315
Stahlschrott	100	103	118	123	125	126
Aluminium	100	108	108	128	131	134
Kupfer	100	230	227	259	260	266
Zellstoff	100	87	87	99	99	103
Nahrungsmittel	100	145	133	154	160	176

1.2.5 Einfluss politischer Entwicklungen auf den Energieverbrauch

Die Entwicklung des Energieverbrauchs wird durch das Nutzerverhalten sowie technische und sozioökonomische Größen beeinflusst. Für die Entwicklung der Parameter gibt es zwei ausgeprägte Möglichkeiten. Eine Möglichkeit besteht darin, dass sich alle Parameter frei und unbeeinflusst entwickeln, eine andere, die Entwicklung eines oder mehrerer Parameter mittels politischer Vorgaben gezielt in eine gewünschte Richtung zu beeinflussen. Beide Entwicklungspfade sind rein theoretischer Natur und kommen real in Reinform so nicht vor.

Betrachtet man die Vergangenheit, so zeigt sich, dass die energetische Entwicklung vielmehr ein Hybrid beider Extrempfade ist. Zwar wird seit Jahren und Jahrzehnten versucht, mittels diverser Programme, Förderungen und Verordnungen die energetische Entwicklung auf politischem Wege zu beeinflussen, jedoch meist nur mit mäßigem Erfolg. Oftmals scheitert deren Umsetzung schlichtweg an der mangelnden Kontrolle der Einhaltung bzw. Umsetzung der gesetzlichen Vorgaben, wie beispielsweise in der Vergangenheit bei den Wärmeschutz- und Energieeinsparverordnungen.

In Anlehnung an die historische Entwicklung der letzten Jahre werden auch die Auswirkungen der derzeitigen energie- und klimapolitischen Initiativen und Vorgaben auf die zukünftige energetische Entwicklung berücksichtigt.

2 Szenario 1 – Referenz

2.1 Entwicklung im Sektor Haushalte

Im Szenario „Referenz“ wird davon ausgegangen, dass das zukünftige Verbraucherverhalten nicht wesentlich vom bisherigen abweichen wird.

Im Sektor Haushalte sind die Änderungen in der Technikstruktur direkt mit dem Konsumverhalten verknüpft. Viele Entscheidungen, etwa die Neuanschaffung von Geräten, sind emotionsbehaftet. Sie unterliegen häufig externen Einflüssen, wie beispielsweise Modetrends. Der Übergang zu neuen Technologien bzw. die Weiterentwicklung geschieht im Allgemeinen in Form einer s-förmigen Funktion. Das heißt, dass sich Neuerungen anfangs zögerlich, dann mit größerer Marktdurchdringung rascher und zum Ende hin wieder langsamer durchsetzen. In der **Abbildung 2-1** sind Beispiele für s-Funktionen einer schnellen, mittleren und langsamen Marktdurchdringung angegeben.

Als ein geeignetes mathematisches Modell, um Wachstum und Strukturwandel in sozioökonomischen Systemen zu beschreiben und um wechselwirkungsbehaftete Etablierungsvorgänge zu simulieren, wurde das EVOLON-Modell /PES 90/ identifiziert. Es ergeben sich typische s-förmige Funktionsverläufe, die die Einführung neuer Technologien sehr realitätsnah abbilden.

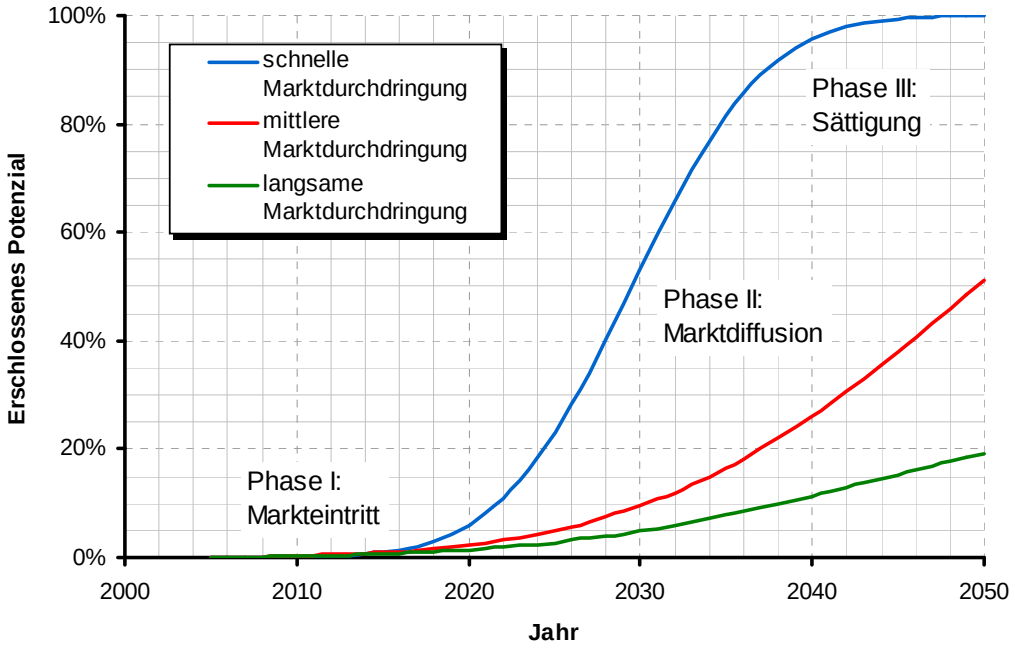

Abbildung 2-1: *Beispiel für s-Funktionen /eigene Berechnungen/ nach /BEE 07/*

Dieses Modell wurde, wenn nicht anders angegeben, der Fortschreibung von Effizienz und Marktdurchdringung der jeweiligen Energieanwendung zu Grunde gelegt.

Im Allgemeinen gilt für die folgenden Betrachtungen im Sektor Haushalte, dass Interaktionen der einzelnen Anwendungsbereiche, wie z. B. der Einfluss der Abwärme von

Beleuchtung oder mechanischer Energie auf die Raumwärme, nicht gesondert betrachtet werden, da ihr Anteil im Vergleich zu Raumwärme und Warmwasser (gemeinsam mehr als 87 % der Endenergie) sehr klein ist. Etwaige Wechselwirkungen liegen im Promillebereich und somit innerhalb der Prognoseunschärfe. Außerdem werden innere und solare Wärmegewinne im Zuge der Ermittlung des Raumwärmebedarfs nach EnEV berücksichtigt.

2.1.1 Maßgebliche Bedarfsdeterminanten

Im Folgenden werden jene Bedarfsdeterminanten im Sektor Haushalte, die für mehrere Energieanwendungsbereiche gelten, aufgeführt. Der Grund dafür ist, dass eine einzelne Determinante Einfluss auf mehrere Anwendungsbereiche haben kann, z. B. beeinflusst die Entwicklung der Heimarbeit den Energieverbrauch in den Anwendungsbereichen Raumwärme, Beleuchtung sowie Information und Kommunikation. Die Bedarfsdeterminanten, die nur einen einzelnen Energieanwendungsbereich betreffen, werden danach folgend im jeweils zugehörigen Kapitel angeführt.

Fortschreibung der Bevölkerung

Die Bevölkerungsentwicklung hat direkten Einfluss auf alle Energieanwendungsbereiche, weshalb ihr Effekt in den jeweiligen Kapiteln genauer quantifiziert wird. Die Bevölkerung hatte mit 82,5 Millionen (vgl. /StBu 08b/) ihren Höchststand im Jahr 2002. In der Zwischenzeit ergab sich bis heute (2008) eine stetige Abnahme. Die Mehrheit der einschlägigen Studien geht ebenso wie das IFO-Institut von einer schrumpfenden Gesamtbevölkerung in Deutschland bis zum Jahr 2050 aus.

In **Abbildung 2-2** ist die Entwicklung der Bevölkerung bis zum Jahr 2050 dargestellt.

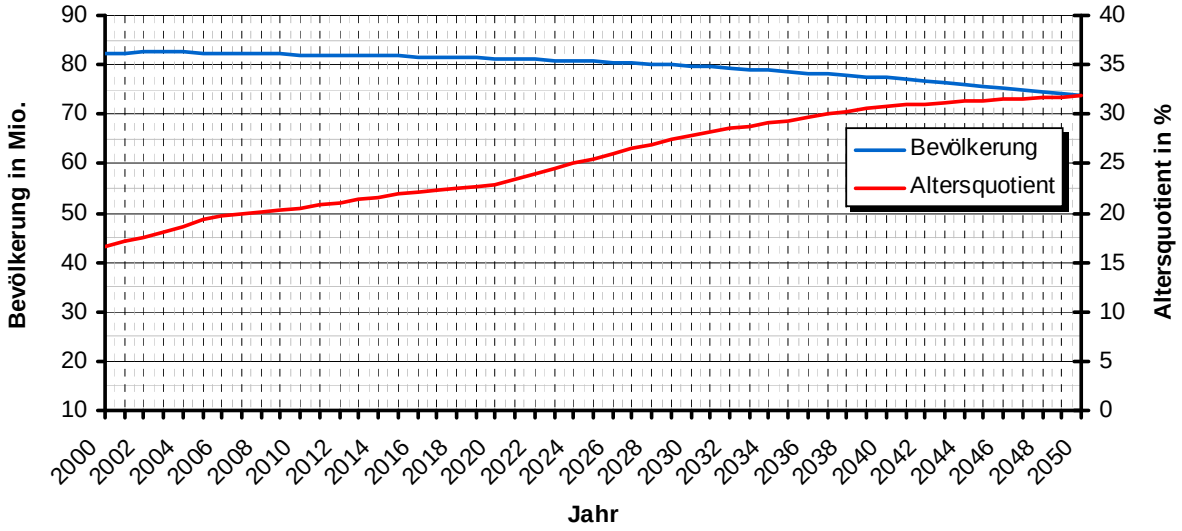

Abbildung 2-2: *Entwicklung der deutschen Bevölkerung und des Altersquotienten bis zum Jahr 2050 /IFO 06/*

Im Jahr 2050 wird die Bevölkerungszahl in Deutschland nach dieser Prognose nur mehr etwa 73,96 Millionen betragen. Neben der Abnahme der Bevölkerung ist auch die Zunahme des Altersquotienten, welcher das Verhältnis der über 65-jährigen zur Anzahl der 14 – 64-jährigen angibt, von Bedeutung. Grundlage für die weiteren Betrachtungen

in dieser Studie bildet diese Vorausberechnung der Bevölkerung durch das IFO-Institut /IFO 06/.

Fortschreibung des Gebäudebestandes

Die Anzahl der Wohngebäude wird bis zum Jahr 2050 auf ca. 20,1 Mio. ansteigen. Davon sind 16,9 Mio. Gebäude Ein- und Zweifamilienhäuser (EZH) und 3,2 Mio. Mehrfamilienhäuser (MFH). In **Abbildung 2-3** ist diese Fortschreibung dargestellt.

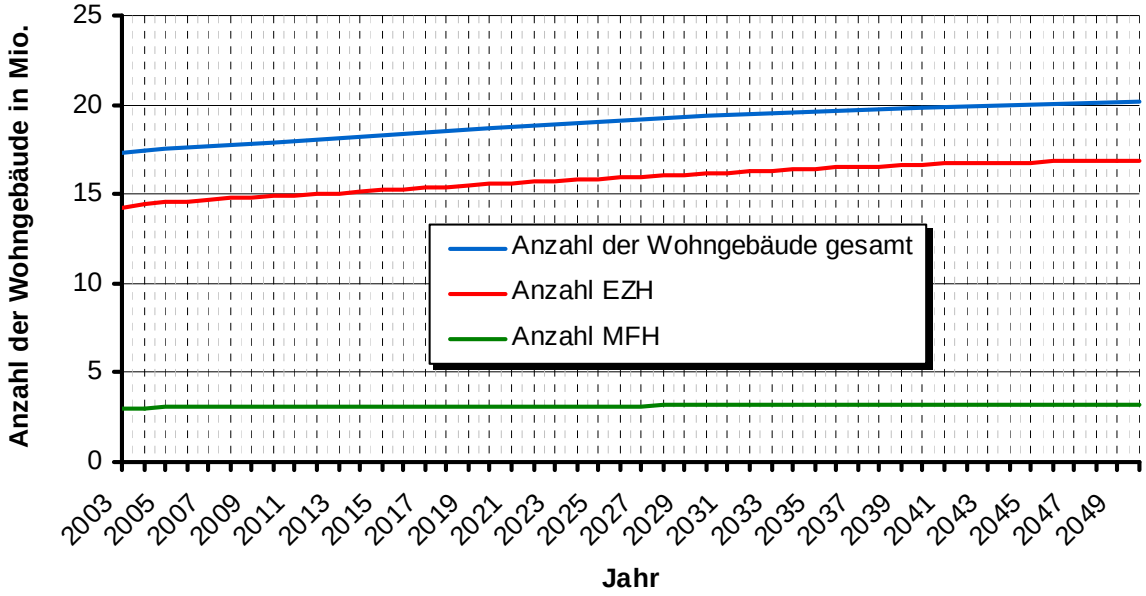

Abbildung 2-3: *Entwicklung des Gebäudebestandes in Deutschland bis zum Jahr 2050 /IFO 06/*

Fortschreibung des Wohnflächenbestandes (gesamt)

Die gesamte Wohnfläche in Deutschland wird nach den Vorausberechnungen des IFO-Institutes, wie in **Abbildung 2-4** dargestellt, von etwa 3.272 Mio. m² im Jahr 2003 auf ca. 3.860 Mio. m² in Jahr 2050 steigen.

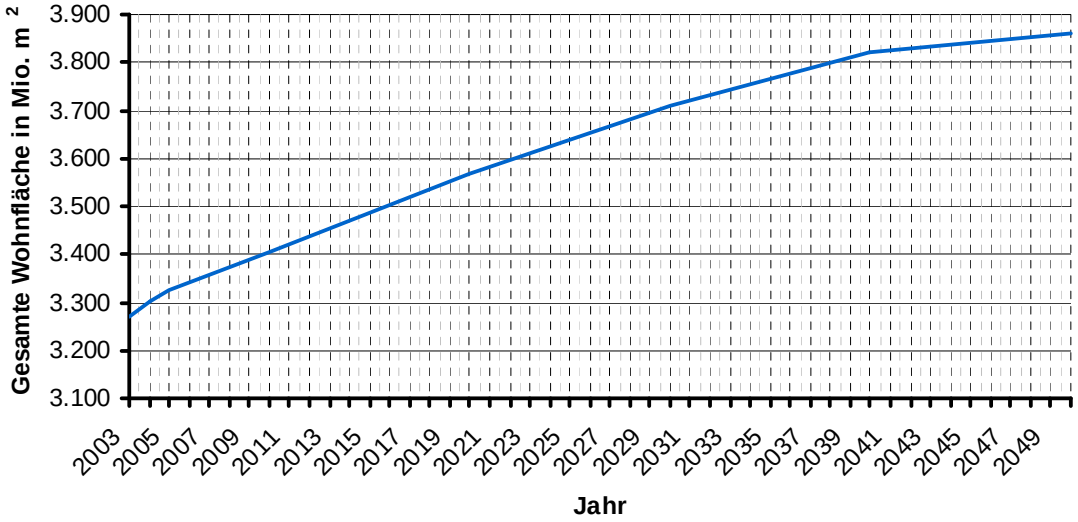

Abbildung 2-4: *Entwicklung der gesamten Wohnfläche in Deutschland bis zum Jahr 2050 /IFO 06/*

Die Wohnfläche ist die Bedarfsdeterminante für die Raumwärme, da das zu beheizende Raumvolumen direkt proportional zu ihr ist. Sie beeinflusst auch den Beleuchtungsbedarf, der zu einem gewissen Maß von der zu beleuchtenden Fläche abhängt.

Fortschreibung der Anzahl der Wohneinheiten und Haushalte

In **Abbildung 2-5** ist die Entwicklung der Anzahl der Wohneinheiten in Deutschland bis zum Jahr 2050 dargestellt. Eine Wohneinheit wird dabei folgendermaßen definiert: Ein Einfamilienhaus zählt als eine Wohneinheit, ein Zweifamilienhaus enthält zwei Wohneinheiten und im Mehrfamilienhaus entspricht jede Wohnung einer Wohneinheit. Die Anzahl der Wohneinheiten wird von ca. 38,4 Mio. im Jahr 2003 auf etwa 43,3 Mio. im Jahr 2050 steigen. Erklären kann man diesen Anstieg durch den zunehmenden Anteil an Single-Haushalten und kleineren Familien. Zudem vergrößert sich der Anteil an Zweitwohnsitzen. Darüber hinaus steht ein gewisser Prozentsatz an Wohnungen leer. Die steigende Anzahl von Wohneinheiten spielt für die Raumwärme eine Rolle, da Zweitwohnsitze und leer stehende Wohnungen in der Regel zumindest eine Mindestheizlast zur Vermeidung von Bauschäden aufweisen. Die Anzahl der Wohneinheiten spielt auch bei der mechanischen Energie eine Rolle, da z. B. der Energieverbrauch von Geräten wie Kühlschränken von der Zahl der Wohneinheiten und deren Ausstattungsgraden abhängen.

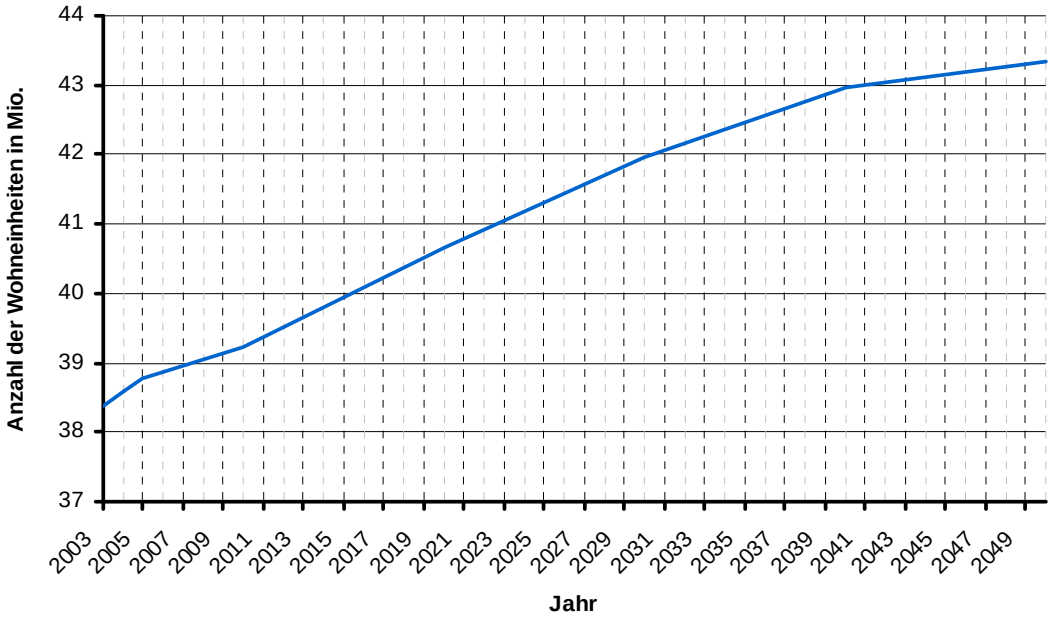

Abbildung 2-5: *Entwicklung der Anzahl der Wohneinheiten in Deutschland bis zum Jahr 2050 /IFO 06/*

Es wird angenommen dass die Anzahl der Haushalte pro Wohnung mit 1,014 bis zum Jahr 2050 konstant bleibt (die Zahl beruht auf dem Durchschnitt der Werte von 1995 bis 2005 /StBu 08b/). Mit diesem Verhältnis lässt sich auf Basis der Zahlen aus /IFO 06/ die Anzahl der Haushalte bis 2050 fortschreiben. Die Fortschreibung ist in **Abbildung 2-6** dargestellt.

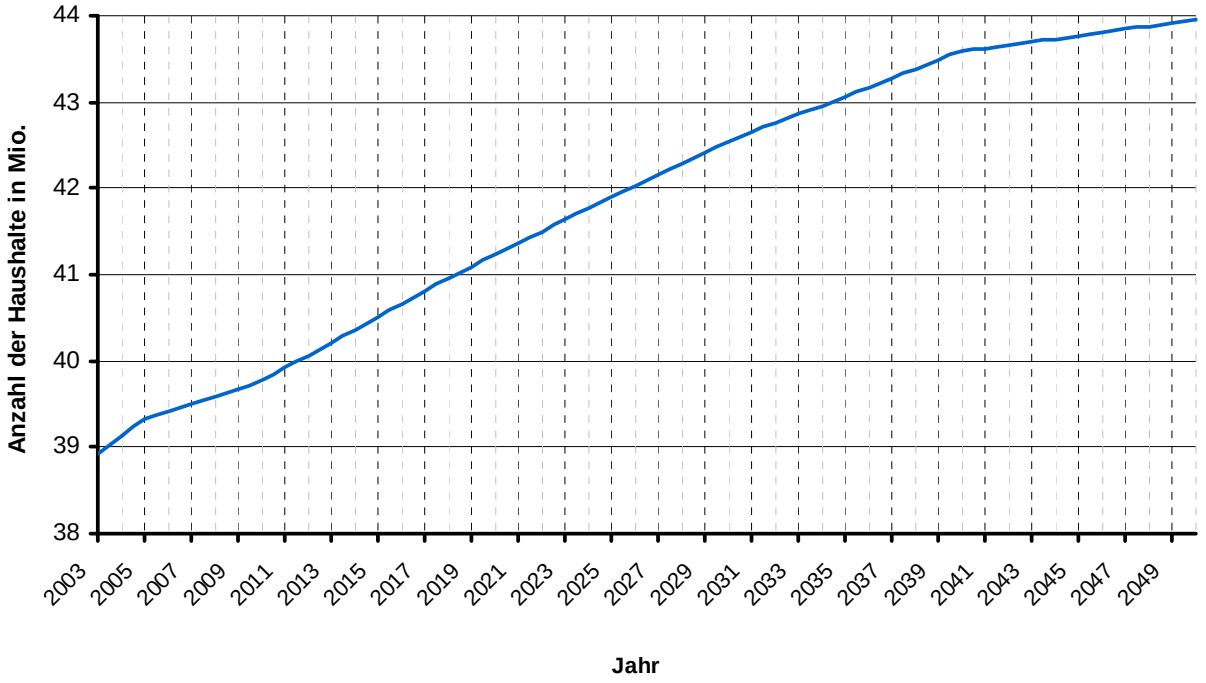

Abbildung 2-6: *Fortschreibung der Haushaltsanzahl /eigene Berechnung / basierend auf /IFO 06/ und /StBu 08b/*

Fortschreibung der spezifischen Wohnfläche

Ebenso wie die Gesamtanzahl der Wohneinheiten wird auch die spezifische Wohnfläche, wie in **Abbildung 2-7** dargestellt, pro Einwohner von ca. 39,7 m² (2003) auf etwa 52,2 m² im Jahr 2050 ansteigen. Bedingt wird das einerseits durch den Bevölkerungsrückgang, andererseits durch den Trend hin zu größeren Wohnungen (beispielsweise wohnt ein Single heute nicht mehr in einer Einzimmerwohnung, sondern in einer Zwei- oder Mehrzimmerwohnung). Außerdem bewohnen die Eltern nach dem Auszug der Kinder oft auch weiterhin die größere Wohnung bzw. das Haus.

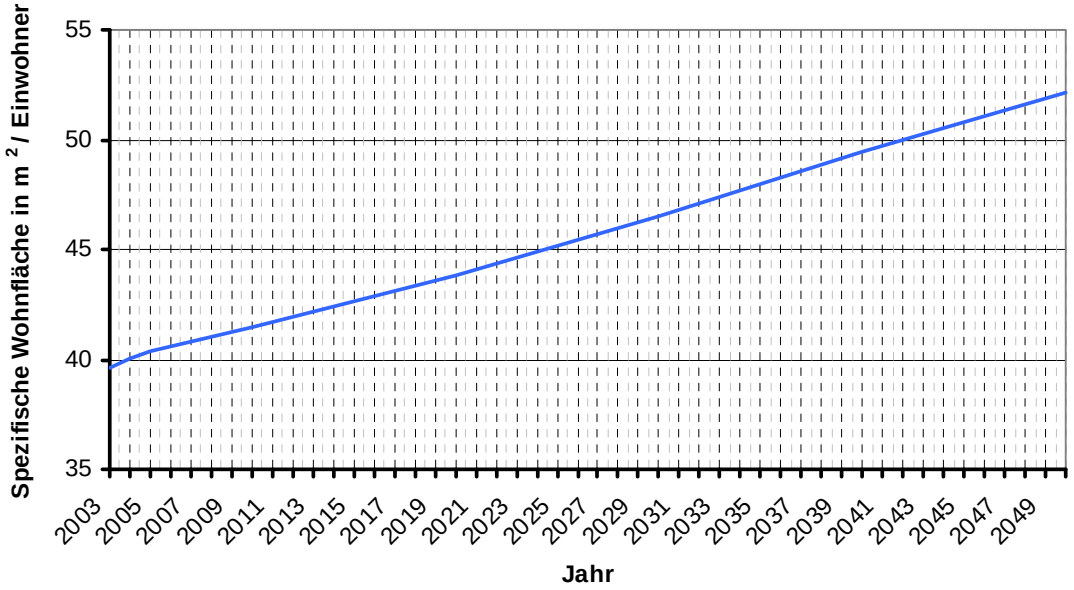

Abbildung 2-7: *Entwicklung der spezifischen Wohnfläche in Deutschland bis zum Jahr 2050 /IFO 06/*

Fortschreibung der Anzahl der Wohnungen je Gebäude
Die Fortschreibung der Anzahl der Wohnungen bzw. Wohneinheiten im Ein-, Zwei- und Mehrfamilienhaus ist in **Abbildung 2-8** dargestellt.

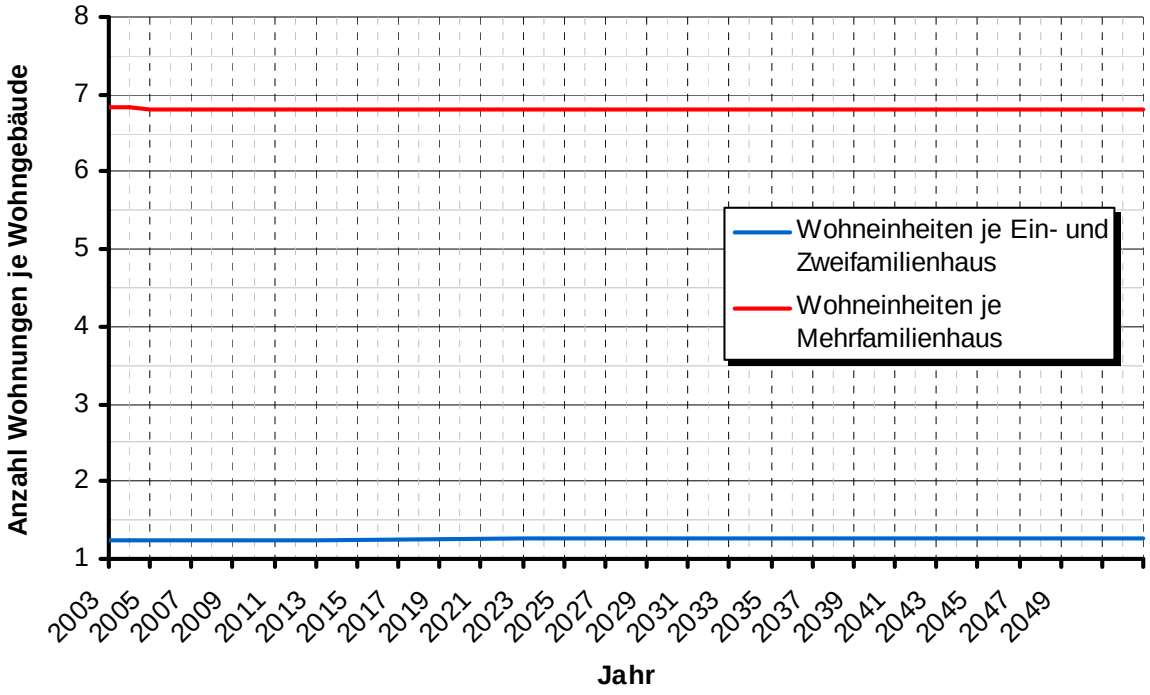

Abbildung 2-8: *Entwicklung der Anzahl der Wohnungen in den Wohngebäuden bis zum Jahr 2050, /IFO 06/, /eigene Berechnungen/*

Die durchschnittliche Anzahl an Wohnungen im Ein- und Zweifamilienhaus bewegt sich im Zeitraum 2003 bis 2050 in einem engen Bereich zwischen 1,24 und 1,26. Die Anzahl der Wohnungen pro Mehrfamilienhaus liegt zwischen 6,80 und 6,82. Es wird also von einer nahezu konstanten Menge an Wohnungen je Haustyp ausgegangen. In dieser Prognose ist somit keine, für den Energieverbrauch ausschlaggebende, Bevölkerungsmigration in die Stadt erkennbar.

Heimarbeit
Entgegen allgemeiner früherer Prognosen liegt der Prozentsatz an Heimarbeit heute (2003) immer noch, ähnlich wie das „papierlose Büro“, innerhalb der statistischen Unschärfe /IFO 09/ bei nahezu null. Der Grund hierfür ist, dass fast ausschließlich Büroarbeitsplätze nach Hause verlagert werden können. Bei diesen Büroarbeitsplätzen hat sich jedoch gezeigt, dass nur ein kleiner Bruchteil tatsächlich nach Hause verlagert wird. Es wird zwar durchaus Arbeit zu Hause erledigt (beispielsweise am Laptop) aber es haben nur wenige unselbständig Erwerbstätige einen eigenen Arbeitsraum zu Hause eingerichtet. Gearbeitet wird in vielen Fällen im Wohnzimmer oder der Küche.

Die für die Heimarbeit zusätzlich benötigte Energie wird im Anwendungsbereich IuK und Beleuchtung berücksichtigt. Die Auswirkungen auf die verbleibenden Energieanwendungsbereiche werden nicht weiter betrachtet, da der Anteil der Heimarbeitsplätze an der Gesamtbevölkerung sehr klein ist. Bis zum Jahr 2050 wird dieser Anteil auf 1,27 Mio. Beschäftigte anwachsen.

2.1.1.1 Raumwärme

Der Raumwärmebedarf hängt von folgenden Faktoren ab:

- Dämmqualität des Gebäudebestandes
- Zu beheizende Gesamtfläche
- Nutzungsgrad der verwendeten Heizungssysteme bzw. Speicher- und Verteilverluste

Thermische Qualität des Gebäudebestandes
Ausgehend von den aktuellen Gebäudebestandszahlen, basierend auf /StBu 08b/, wird unter Berücksichtigung der Zubau-, Sanierungs- und Abrissraten (vgl. Bericht Teil 1) der Gebäudebestand bis zum Jahr 2050 fortgeschrieben. Bei den EZH beträgt die jährliche Abrissrate 0,051 %, für die MFH liegt sie bei 0,067 %. Diese Werte waren für den Zeitraum zwischen 1992 und 2002 nahezu konstant. Aus diesem Grund und da die Änderungen, bezogen auf den Bestand, lediglich im Promillebereich liegen, wird für das weitere Vorgehen von diesen Abrissraten ausgegangen. Weiter gilt, dass in Summe durch Neubau und Sanierung pro Jahr neuer Wohnraum im Umfang von 2 % des Bestandes geschaffen wird. Damit ist die mittlere Lebensdauer eines Gebäudes im Modell bis zur Sanierung oder dem Abriss auf 50 Jahre festgelegt.

Eine weitere grundlegende Annahme für das Modell ist, dass eine Gebäudesanierung der Anhebung der bauphysikalischen Gebäudequalität auf den durchschnittlichen Neubaustandard entspricht. Daher erfolge die Zuordnung von renovierten Gebäuden zur aktuellen Baualters- bzw. Ensemblegebäudeklasse. In **Abbildung 2-9** ist die Fortschreibung des Gebäudebestandes dargestellt.

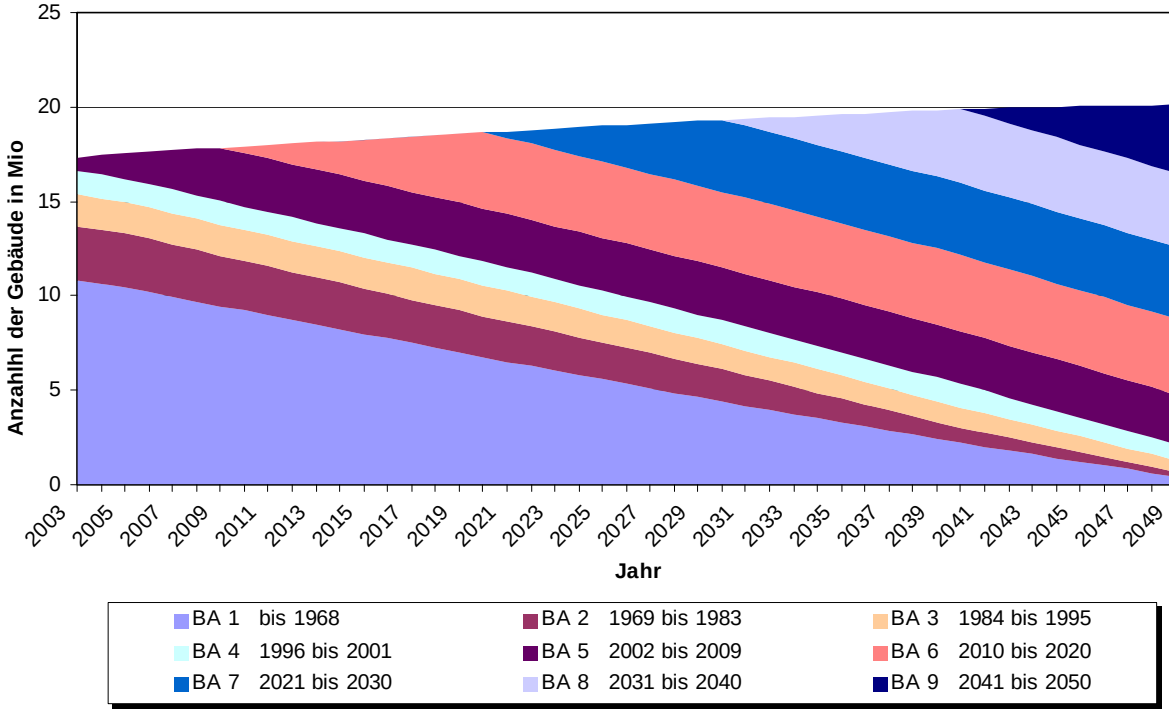

Abbildung 2-9: *Prognose des Gebäudebestandes bis zum Jahr 2050, /IFO 06/, /eigene Berechnungen/*

Die Einteilung kann alternativ in Ensemblegebäudeklassen (EB) erfolgen, wobei ein EZH der BA1 der EB1 entspricht und ein MFH der BA1 dem EB2 zugeordnet wird.

In **Tabelle 2-1** ist der spezifische Raumwärmebedarf für die jeweiligen Ensemblegebäudeklassen aufgeführt.

Tabelle 2-1: *Spezifischer Raumwärmebedarf der unterschiedlichen Ensemblegebäudeklassen /STO 07/, /eigene Berechnungen/*

Spezifischer Raumwärmebedarf (Nutzenergie)	EZH		MFH	
	Ensemblegebäude-klasse	kWh/m²*a	Ensemblegebäude-klasse	kWh/m²*a
bis 1968	EB 1	128,5	EB 2	154,0
1969-1982	EB 3	136,2	EB 4	163,9
1984-1995	EB 5	141,4	EB 6	128,7
1996-2001	EB 7	120,6	EB 8	120,8
2002-2009	EB 9	115,2	EB 10	106,4
2010-2020	EB 11	113,0	EB 12	103,8
2021-2030	EB 13	107,0	EB 14	103,5
2031-2040	EB 15	100,4	EB 16	99,1
2041-2050	EB 17	96,4	EB 18	93,2

Der Raumwärmebedarf der Ensemblegebäudeklassen 1 bis 8 wurde /ISO 00/ entnommen. Die Werte für die Ensemblegebäudeklassen 9 bis 18 entstammen /STO 07/.

Anhand von /STO 07/ wird aufgezeigt, dass der tatsächliche Raumwärmebedarf im Gebäudebestand erheblich höher ist, als allgemein angenommen wurde. Dies liegt zu einem großen Teil auch am Nutzerverhalten. Es stellt sich heraus, dass je besser ein Gebäude gedämmt ist und je niedriger deshalb die Betriebskosten ausfallen, die Bewohner in der Regel umso weniger Wert auf sparsames Nutzerverhalten legen. Deshalb liegt der tatsächliche Raumwärmebedarf gewöhnlich deutlich über dem errechneten Bedarf für ein Gebäude der jeweiligen Baualtersklasse. Aus diesem Grund wurde im Referenzszenario für die Fortschreibung von den Zahlen aus /STO 07/ ausgegangen.

Denkmalgeschützte Gebäude

Nach der Definition der Denkmalschutzgesetze der Länder sind schutzwürdige Kulturdenkmäler Sachen, Sachgesamtheiten oder Sachteile, an deren Erhaltung aus künstlerischen, wissenschaftlichen, technischen, geschichtlichen oder städtebaulichen Gründen ein öffentliches Interesse besteht. Aufgrund der Gesetzeslage sind schützenswerte Kulturdenkmäler neben den künstlerisch herausragenden Einzeldenkmälern (z. B. Schlösser, Burgen, Herrenhäuser, Kirchen, Klöster, usw.) auch historische Ortskerne und Ensembles, historische Parks und Gärten, Siedlungen des 20. Jahrhunderts, Bauten der Industrie und Technik sowie des Verkehrs und bewegliche Denkmäler. Über die jeweilige Anzahl gibt es keine bundesweit gültigen statistischen Daten. Im Jahr 2003 gab es in Deutschland ca. 300.000 denkmalgeschützte Wohngebäude /DKS 07/. Denkmalgeschützte Gebäude werden im zu sanierenden Bestand berücksichtigt.

Wohnfläche
Die Fortschreibung der Wohnfläche in Deutschland nach der Prognose aus /IFO 06/ ist in Abbildung 2-4 dargestellt.

Nutzungsgrad der betrachteten Heizungssysteme
In der folgenden **Tabelle 2-2** sind die betrachteten Heizsysteme und deren Nutzungsgrade aufgeführt (Bezugsjahr 2003), welche die Ausgangsbasis für die Fortschreibung darstellen. Die Nutzungsgrade basieren auf FfE-internen Daten und /ISO 00/.

Tabelle 2-2: *Betrachtete Heizsysteme und deren Nutzungsgrade /interne Daten/*

Heizsystem	Jahresnutzungs-grad
Pellets Holz	79,1%
Pellets Braunkohle	79,1%
Kessel HEL	75,2%
Kessel Erdgas	79,3%
Solarthermie	100,0%
Wärmepumpe	350,0%
Strom-Direktheizung	99,0%
Kompaktstation Fernwärme	98,0%
Kompaktstation Nahwärme	98,0%
KWK Erdgas	Umwandlungssektor
KWK HEL	Umwandlungssektor

Der Solarthermie wird ein Nutzungsgrad von 100 % zugewiesen, da der geringe Stromanteil, der für die Umwälzung und Regelung der Solaranlagen notwendig ist, im Bereich der mechanischen Energie bilanziert wird. Der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) wird kein Nutzungsgrad zugewiesen, da ihr in diesem Szenario 1 fortgeschriebener Endenergiebedarf im Umwandlungssektor behandelt wird. Der Energiebedarf wird deshalb zu 100 % an diesen weitergereicht. Im Umwandlungssektor werden aus Primärenergieträgern, wie Erdgas oder Heizöl, Strom und Wärme erzeugt.

In der **Abbildung 2-10** ist exemplarisch die Fortschreibung der drei am weitesten verbreiteten Heizsysteme dargestellt.

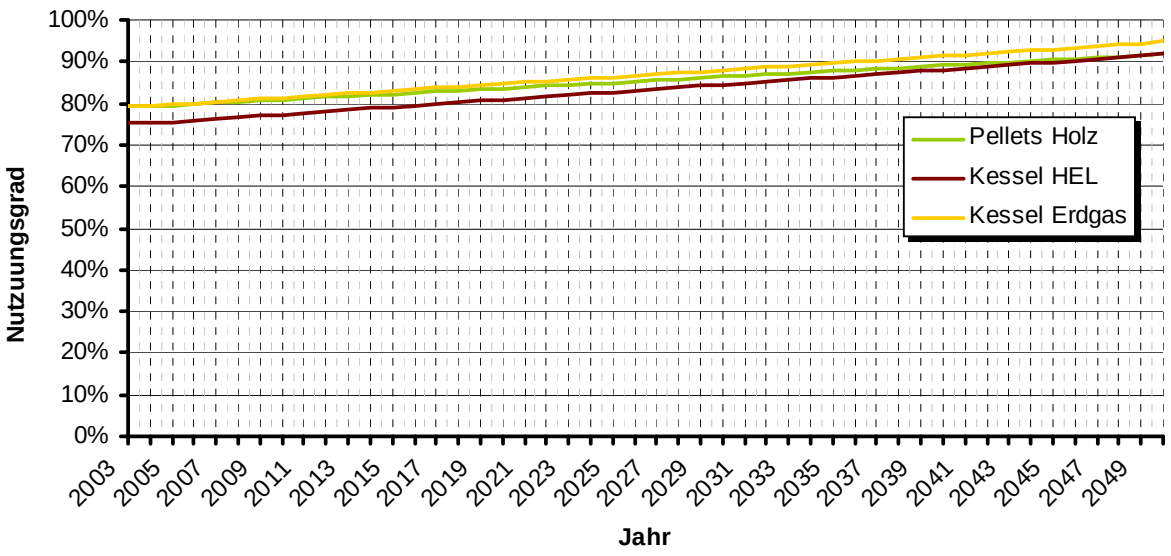

Abbildung 2-10: *Fortschreibung der Nutzungsgrade*

Der Nutzungsgrad der Braunkohlepelletkessel entspricht dem der Holzpelletkessel, da es Braunkohlepellets bereits am Markt gibt und der Aufbau sowie die Regelung der Kessel prinzipiell identisch sind. Es wird angenommen dass der Nutzungsgrad dieser Kessel bis 2050 auf 92 % steigt. Bei Heizöl wird ebenfalls eine Zunahme auf 92 % angenommen. Der Nutzungsgrad bei Erdgas wird bis 2050 auf 95 % wachsen.

Die angegebenen Nutzungsgradsteigerungen erscheinen im Hinblick auf zukünftige Energiepreissteigerungen und dem damit verbundenen Innovationsdruck durch folgende Maßnahmen bis 2050 bereits aus heutiger Sicht erreichbar:

- Senkung der Vor-/Rücklauftemperatur
- Vergrößerung des Modulationsbereichs der Kessel, dadurch sind weniger Start- und Stopp-Vorgänge notwendig
- Verbesserte Brennwerttechnik

Die Wärmepumpe wird mit einem jährlichen Nutzungsgrad (Arbeitszahl) von 350 % betrachtet (vgl. /FRI 08/), welcher bis 2050 im Szenario 1 auf 400 % ansteigt. Ermöglicht wird dies unter anderem durch Flächenheizsysteme mit geringeren Vorlauftemperaturen, wodurch sich die Arbeitszahlen verbessern.

Bei der Strom-Direktheizung ist kein Verbesserungspotenzial mehr gegeben, weshalb der Nutzugsgrad mit 99 % bis 2050 fortgeschrieben wird. Die Kompaktstationen Fernwärme und Nahwärme bestehen im Wesentlichen aus Wärmetauschern mit einem Wirkungsgrad von 99 %, der sich auch bis 2050 nicht weiter verbessern wird. Nahwärme und Fernwärme wird in der Fernwärmestatistik nicht getrennt erfasst. In dieser Studie werden die beiden Formen gesondert betrachtet und fortgeschrieben.

2.1.1.2 Warmwasser

Der Energieverbrauch im Bereich Warmwasser hängt von folgenden Faktoren ab:

- Warmwasserverbrauch (Brauchwasser)
- Warmwasserverbrauch Geschirrspüler und Waschmaschinen

- Effizienz der Warmwasserbereitung/-verteilung

Warmwasserverbrauch
Der Endenergiebedarf für Warmwasser betrug im Jahr 2003 ca. 316,5 PJ (vgl. /AGEB 03/). Somit entfallen 2003 etwa 11 % auf den Bereich Warmwasser. Von den 316,5 PJ entfielen etwa 12 PJ auf Geschirrspüler und ca. 22 PJ auf Waschmaschinen.

Der Endenergiebedarf für reines Warmwasser (Brauchwasser) hängt vom pro Kopf Verbrauch und der Geräteeffizienz ab. Für Szenario 1 wird angenommen, dass der spezifische Warmwasserverbrauch bis 2050 um 15 % gegenüber 2003 zunimmt. Der Grund dafür liegt im verstärkten Luxusbedürfnis (z.B. Wellnessanwendungen im Bad) und dem höheren Altersquotienten der Bevölkerung. Bedingt durch die Bevölkerungsabnahme (vgl. Abbildung 2-2) wird diese Zunahme abgeschwächt. Der Endenergiebedarf für die Warmwasserbereitung wird im Kesselmodell fortgeschrieben, da Warmwasser in Deutschland nahezu ausschließlich durch den Heizkessel bereitgestellt wird.

Warmwasserverbrauch Geschirrspüler und Waschmaschinen
Für die Fortschreibung des Endenergiebedarfs bei Geschirrspülern und Waschmaschinen stehen Daten aus /FFE 08a/ zur Verfügung.

Der Verbrauch hängt von folgenden Faktoren ab:

- Anzahl der Geräte: Die Fortschreibung der Haushaltsanzahl beruht auf der Entwicklung der Wohnungszahl entsprechend der Grundlage des Ifo-Instituts (vgl. Abbildung 2-6).
- Effizienz der Geräte: Im Szenario 1 wird angenommen, dass die Geräteeffizienz bis 2050 um 20 % steigt, d. h. der Energieverbrauch sinkt auf 80 %.
- Nutzungsdauer: Die Nutzungsdauer eines Gerätes hängt mit der Haushaltsgröße zusammen. Für die einzelnen Geräte liegen Verbrauchsdaten aus /FFE 08a/ für die unterschiedlichen Haushaltsgrößen vor. Zum Beispiel wird in einem Zweipersonenhaushalt nicht doppelt so viel Energie zum Waschen benötigt, wie in einem Einpersonenhaushalt. Es ergibt sich lediglich ein Mehrbedarf von knapp der Hälfte, da die Waschmaschine beispielweise besser ausgenutzt wird.

2.1.1.3 Prozesswärme

Prozesswärme wird in deutschen Haushalten durch Strom, Gas und Biomasse bereitgestellt. Der größte Anteil wird für das Kochen aufgewendet, weitere Prozesswärme wird in Küchengeräten bereitgestellt.

Der Verbrauch an Prozesswärme hängt von folgenden Faktoren ab:

- Anzahl der Geräte
- Effizienz der Geräte
- Benutzungsdauer

Anzahl der Geräte
Die Fortschreibung der Geräteanzahl beruht auf der Fortschreibung der Haushalte und der Ausstattungsgrade.

Effizienz der Geräte
Im Szenario 1 wird bei den Herden von einer Effizienzsteigerung von 15 % (d. h. der Energieverbrauch sinkt auf 85 %) bis zum Jahr 2050 ausgegangen.

Nutzungsdauer
Die Betriebsdauer eines Gerätes hängt neben dem Nutzerverhalten auch von der Haushaltsgröße ab, d. h. je mehr Personen in einem Haushalt leben, desto größer ist die Benutzungsdauer. Zu den einzelnen Geräten gibt es Verbrauchsdaten aus /FFE 08a/ für die unterschiedlichen Haushaltsgrößen. Der Zusammenhang zwischen Personenanzahl und Energieverbrauch ist jedoch nicht direkt proportional. Zum Beispiel wird in einem Zweipersonenhaushalt nicht doppelt so viel Energie zum Kochen benötigt wird, wie in einem Einpersonenhaushalt, sondern nur etwa ein Viertel mehr, da meist gemeinsam gekocht wird. Steigt die Haushaltsgröße an, so steigt auch der relative Energieverbrauch, da beispielsweise in einem fünf Personen Haushalt mehrmals täglich gekocht wird, wenn die Bewohner zu unterschiedlichen Zeiten nach Hause kommen.

Es wird unterstellt, dass sich die Benutzungsdauer bis zum Jahr 2050 nicht ändert.

2.1.1.4 Beleuchtung

Die zentrale Bedarfsdeterminante ist das Bedürfnis, Räume optimal zu beleuchten und eine angenehme Atmosphäre zu schaffen. Das menschliche Auge nimmt nicht die Lichtleistung, sondern den von der Lampe emittierten Lichtstrom, gemessen in Lumen, wahr.

Die Annahme für die Fortschreibung besteht darin, dass das Lichtbedürfnis auch in Zukunft gleich bleibt. Durch effizientere Leuchtmittel kann der benötigte Lichtstrom allerdings durch weniger elektrische Energie erzeugt werden.

2.1.1.5 Mechanische Energie

Im Haushalt wird mechanische Energie durch eine Vielzahl von unterschiedlichen Geräten umgesetzt (vgl. Bericht Teil 1). Wegen der Komplexität werden die Gerätearten in die folgenden vier wesentlichen Kategorien zusammengefasst:

- Pumpen
- Aufzüge
- Hilfsenergie für Kessel und Solarthermie
- Haushaltsgeräte (inkl. Kleingeräte)

Pumpen
Untersucht werden Zirkulations- und Heizkreispumpen. Boilerladepumpen werden aufgrund ihrer geringen Anzahl vernachlässigt. Der Energiebedarf für die Pumpen hängt von folgenden Faktoren ab:

- Anzahl der Pumpen (abhängig von der Gebäudebestandsentwicklung, vgl. Abbildung 2-3)

- Leistung und Effizienz der Pumpen. Bereits mit der heutigen Technologie ließe sich der Energiebedarf bei Austausch aller Pumpen durch das jeweils effizienteste Modell um knapp 80 % senken. Dieses Potenzial wird im Referenzszenario jedoch nur zum Teil genutzt. Es wird unterstellt, dass der Energieverbrauch der Pumpen bis zum Jahr 2050 um 70 % zurückgeht.

Es werden keine Interaktionen mit dem Bereich Raumwärme betrachtet und zwar aus zweierlei Gründen: Erstens nimmt die zu beheizende Wohnfläche in Deutschland bis 2050 zu und zweitens wird die Gebäudequalität (sowohl im Bestand, durch Sanierung, als auch im Zubau) stetig besser. Es handelt sich also um gegenläufige Trends.

Aufzüge

Der Energieverbrauch der Aufzüge hängt ab von:

- Anzahl der Aufzüge, hängt wiederum von der Gebäudebestandsentwicklung ab.
- Effizienz: Es wird angenommen, dass die Effizienz bis 2050 um 30 % steigt, was bereits heute in Anbetracht der hohen Standby-Verluste ohne weiteres möglich wäre /FFE 08a/.
- Die Bevölkerung nimmt ab (vgl. Abbildung 2-2) und deshalb sollte der Energieverbrauch der Aufzüge abnehmen. Auf der anderen Seite nimmt der Altersquotient der Bevölkerung zu. Es handelt sich um gegenläufige Effekte und in Anbetracht des geringen Anteils der Aufzüge am Gesamtenergiebedarf wird die Annahme getroffen, dass sich diese Effekte ausgleichen.

Die Anzahl der zukünftigen Aufzüge ist mit der Fortschreibung des Gebäudebestands (vgl. Abbildung 2-3) verknüpft. Es wird davon ausgegangen, dass jedes neue Gebäude mit vier und mehr Stockwerken einen Aufzug erhält. Mit der Abrissrate von 0,067 % (vgl. Bericht Teil 1) und der Neubaurate aus den Fortschreibungen des Ifo-Instituts wird die Anzahl der Aufzüge bis 2050 fortgeschrieben. Die Entwicklung des Aufzugbestandes ist in **Abbildung 2-11** dargestellt.

Die Anzahl der Wohngebäude betrug im Jahr 2003 etwa 17,3 Mio. /StBu 08b/. Die Statistik enthält nur Angaben zum Bestand an Wohneinheiten. Mit der Annahme dass alle Gebäude mit mehr als 13 Wohneinheiten und jedes zweite der Gebäude in der Klasse 7 bis 12 Wohneinheiten einen Aufzug haben, ergibt sich ein Anteil von etwa 20 % von Gebäuden mit Aufzug. Die Anzahl der Aufzüge in Einfamilienhäusern und Gebäuden mit weniger als vier Stockwerken ist vernachlässigbar und liegt innerhalb der statistischen Unschärfe.

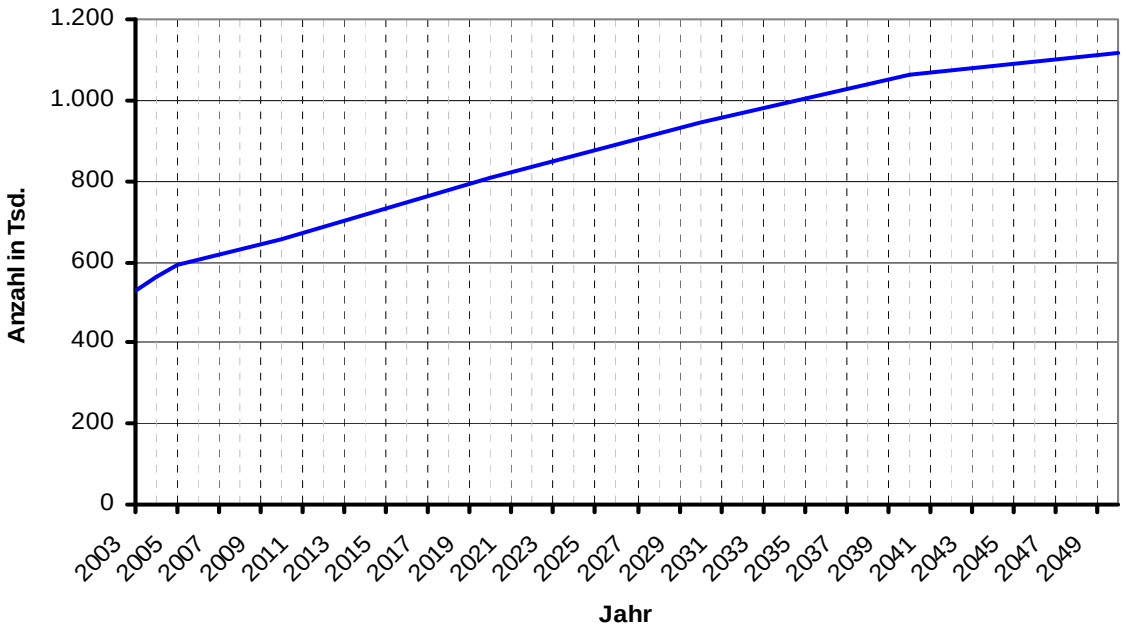

Abbildung 2-11: *Fortschreibung des gesamten Aufzugsbestands /eigene Berechnungen/nach /IFO 06/*

Durch den Ersatz der abgerissenen Gebäude und die insgesamt steigende Anzahl an Gebäuden wird der Anteil der Gebäude mit Aufzügen bis 2050 von etwa 15 % im Jahr 2003 auf gut 27 % ansteigen.

Hilfsenergie Kessel und Solarthermie

Die Hilfsenergie setzt sich aus der mechanischen Energie für die Heizkessel (Eigenbedarf, Steuerung) und der mechanischen Energie für die Umwälzpumpen von solarthermischen Anlagen zusammen.

Der Energiebedarf der Kessel hängt von folgenden Faktoren ab:

- Anzahl der Heizkessel (abhängig von der Anzahl der Heizsysteme (vgl. Kapitel 2.1.2, Berechnungsmodell).
- Effizienz der Kesseleigenversorgung, steigt im Szenario 1 bis 2050 um 25 %.

Der Energiebedarf bei der Solarthermie hängt von den folgenden Größen ab:

- Anzahl der solarthermischen Anlagen, die im Berechnungsmodell (Heizkesselmodell) fortgeschrieben werden.
- Es wird angenommen, dass die Effizienz der Solarpumpen bis 2050 um 25 % steigt. Die Solarkreispumpen sind in der Regel besser angepasst als etwa Heizkreispumpen und in Anbetracht des geringen Anteils von lediglich 0,8 PJ am Gesamtenergieverbrauch im Sektor Haushalte von etwa 2.828 PJ im Jahr 2003 erübrigt sich eine genauere Untersuchung der Effizienzpotenziale.

Haushaltsgeräte

Der Energieverbrauch bei den Haushaltsgeräten hängt von folgenden Faktoren ab:

- Anzahl der Geräte
- Effizienz der Geräte

- Benutzungsdauer

Anzahl der Geräte
Die Geräteanzahl richtet sich nach den Ausstattungsgraden und der Anzahl der Haushalte (vgl. Abbildung 2-6). Daten zu den Ausstattungsgraden stehen aus /FFE 08a/ zur Verfügung.

Effizienz
Für das Referenzszenario wird eine Verringerung des Enegriebedarfs um 20 % bis zum Jahr 2050 unterstellt. Dies erscheint aus heutiger Sicht ohne weiteres möglich, da es sich gezeigt hat, dass Effizienzsteigerungen, besonders im Bereich der Kleinmotoren in den Haushaltsgeräten, relativ kostengünstig durchzuführen sind.

Benutzungsdauer
Die Benutzungsdauer der Geräte hängt mit der Bevölkerungsentwicklung und der Haushaltsgröße zusammen.

Bei den Kühlgeräten ist die Abhängigkeit von der Personenzahl weniger stark ausgeprägt, als etwa bei den Herden. Der Unterschied besteht darin, dass größere Haushalte in der Regel größere Kühlgeräte haben. Für die einzelnen Geräte liegen Verbrauchsdaten aus /FFE 08a/ für die unterschiedlichen Haushaltsgrößen vor.

Eine Grundtendenz ist die generelle Abnahme der Benutzungsdauer aufgrund der Abnahme der Bevölkerung.

2.1.1.6 Information und Kommunikation

Der Energieverbrauch im Sektor IuK hängt von folgenden Faktoren ab:

- Anzahl der Geräte
- Effizienz der Geräte
- Betriebsdauer

Anzahl der Geräte
Die Anzahl der Geräte steht aus /FFE 08a/ zur Verfügung. Diese Zahl wird über die Entwicklung der Haushaltsanzahl (vgl. Abbildung 2-6), bzw. an der Bevölkerungsentwicklung (vgl. Abbildung 2-2) fortgeschrieben. Die Bevölkerung nimmt bis 2050 ab, während die Anzahl der Haushalte steigt. Es handelt sich also um gegenläufige Trends. Die jeweiligen Bedarfsdeterminanten werden jeder Gerätegruppe individuell zugeordnet und sind in **Tabelle 2-3** aufgeführt.

Tabelle 2-3: *Abhängigkeit der Fortschreibung der betrachteten Geräte im Sektor IuK /FFE 08a/*

Gerätetyp	Endenergie-verbrauch 2003 in PJ	Abhängigkeit von Haushaltsfortschreibung (HH) bzw. Bevölkerungsfortschreibung (BV) bzw. Heimarbeit (HA)	Rückgang auf null im Jahr
Audio			
Stereoanlage	6,78	HH	2028
Kompaktanlage	4,03	HH	
Radiowecker	0,77	BV	
Radiorekorder	0,43	BV	2013
Fernseher			
CRT	15,53	HH	2023
LCD	1,32	HH	
Plasma	0,06	HH	
Empfangsinfrastruktur	5,47	HH	
Player			
Video	2,6	HH	2013
DVD	0,44	HH	
Kommunikation			
Telefon	0,84	HA	
Anrufbeantworter	1,07	HA	
Faxgerät	0,75	HA	
EDV			
PC	3,52	HH, HA	
Laptop	0,39	BV, HA	
Internetinfrastruktur	0,86	HH, HA	
Tintenstrahldrucker	1,47	HH, HA	
Laserdrucker	0,78	HH, HA	
CRT Monitor	2,34	HH	2013
LCD Monitor	0,35	HH	
Summe	49,8		

Effizienz der Geräte

Der Fortschreibung wird eine Effizienzsteigerung von 25 % zu Grunde gelegt. Diese Effizienzsteigerung bezieht sich auch auf die Schein-Aus-Verluste. Sie werden im Referenzszenario nur zu 25 % eliminiert, da in der Vergangenheit verschiedene Initiativen, die Hersteller zu verpflichten, die Leerlauf-Verluste kenntlich zu machen, keine Wirkung zeigten. Die Leerlauf- und Schein-Aus Verluste machen knapp die Hälfte des Energieverbrauchs im Sektor IuK aus /FFE 08a/.

Die Steigerung der Effizienz erfolgt in diesem Szenario vor allem durch den Technologie-Shift, d. h. dass ineffiziente Gerätetypen verdrängt werden. So zeichnet sich bereits seit Jahren das Aussterben der Röhrenmonitore bzw. Röhrenfernseher ab /SCH 04/. Diese werden z. B. durch LCD-Bildschirme ersetzt. Ein weiterer Trend, der

sich bereits jetzt abzeichnet, ist, dass die Geräte wieder kleiner und damit energieeffizienter werden, z. B. geht der Trend beim Laptop hin zu kleineren Displays und damit kleineren Geräten.

Betriebsdauer

Im Szenario 1 wird unterstellt, dass die Betriebsdauer bis 2050 um 20 % gegenüber 2003 ansteigt. Es ist schwierig eine Prognose aufzustellen, da auch der Trend zum Zusammenlegen von Funktionen in den Geräten vorhanden ist. Ein Handy kann heute als mobile Kommunikationseinheit fungieren, welche die Aufgabe eines Telefons, Computers, Players und sogar einer Kamera und eines Navigationsgerätes übernimmt. Diese Funktionen werden mit einem minimalen Energieverbrauch bereitgestellt, da auch die Nutzung bzw. Bereitschaft parallel stattfindet.

Ausnahmen bilden Geräte, die nach einer bestimmten Zeit aussterben, z. B. wurde angenommen, dass die Stereoanlage nach 25 Jahren ausgestorben ist.

2.1.2 Technikstruktur

2.1.2.1 Raumwärme

Der Bereich Raumwärme stellt mit knapp 76 % des Endenergieverbrauchs den bei weitem größten Anteil dar. Somit ist er der bestimmende Faktor für die Fortschreibung des Energieverbrauchs.

Für die Betrachtung stehen Daten aus /FFE 08a/, /STO 07/ und /ISO 00/ zur Verfügung. Aufbauend auf diesen Werten wurde ein Berechnungsmodell entwickelt, das alle den Heizenergiebedarf bestimmenden Faktoren berücksichtigt. Weil die Warmwasserbereitung in Deutschland zum größten Teil über die Heizkessel erfolgt, wurde auch die Fortschreibung des Warmwasserverbrauches in das Modell integriert. Zusätzlich wurden alle Energieträger, die in Tabelle 2-2 aufgeführt sind, berücksichtigt.

Die prinzipielle Vorgehensweise ist in der **Abbildung 2-12** dargestellt.

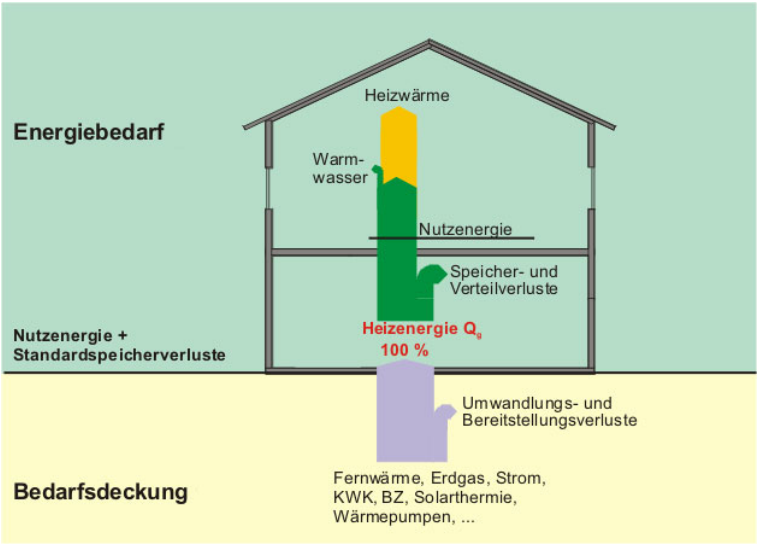

Abbildung 2-12: *Schema der Betrachtung des Energieflusses /STO 07/*

Der mit Hilfe der Bedarfsdeterminanten fortgeschriebene Heizwärme- bzw. Warmwasserbedarf wird auf die Endenergie hochgerechnet. Die Heizwärme errechnet sich aus dem Produkt des spezifischen Heizwärmebedarfs der Gebäude und der Wohnfläche. Hierin sind die Speicher und Verteilverluste bereits enthalten. Das Ergebnis ist die Heizenergie Q_g. Durch Berücksichtigung der Kesselwirkungsgrade ergibt sich der Endenergiebedarf.

Berechnungsmodell

Es hat sich gezeigt, dass Heizkesselmodelle, die die Zukunft auf Basis der Historie beschreiben, wegen der vielfältigen gesetzlichen Eingriffe der letzten Jahre (EEWärme-Gesetz, IEKP, EnEV2009, Emissionsgrenzwerte) die zukünftigen Veränderungen nicht mehr korrekt abbilden können.

Durch die staatlichen Eingriffe ist die Wirtschaftlichkeit der verschiedenen Heiztechnologien somit stark von den jeweiligen Förderungen abhängig. Daher wurde bei dieser Studie ein Modell erstellt, das das Entscheidungskalkül der Heizkesselbesitzer bei Defekt oder Austausch des Kessels nachbildet.

In **Abbildung 2-13** ist das Prinzip des Berechnungsmodells, das auch das Heizkesselmodell beinhaltet, dargestellt.

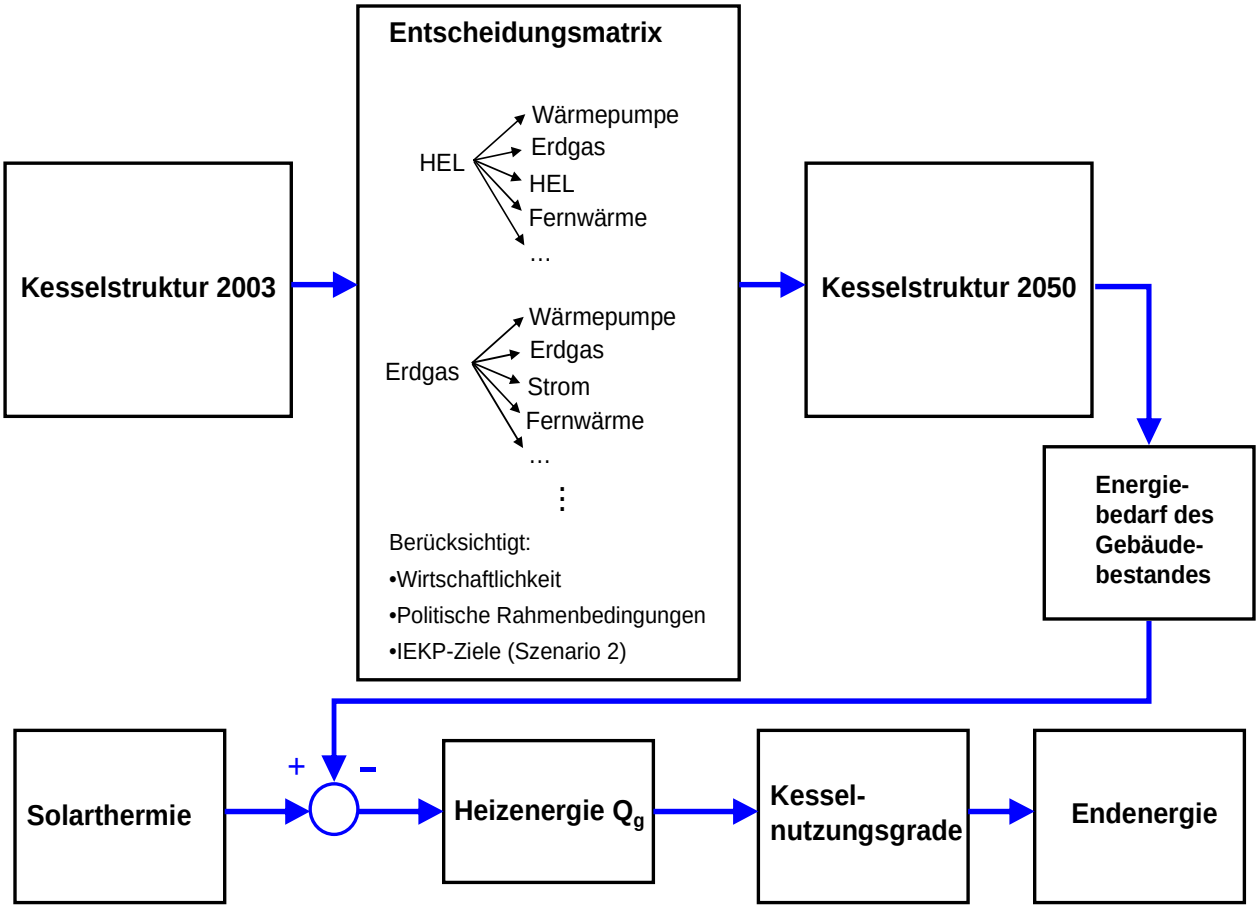

Abbildung 2-13: *Schema des Heizkesselmodells*

Der Heizkesselbestand wird, ausgehend von der Kesselstruktur im Jahr 2003, anhand dieser Entscheidungsmatrix bis zum Jahr 2050 fortgeschrieben.

In das Entscheidungskalkül gehen auch Faktoren wie Wirtschaftlichkeit der Technik und das Vorhandensein von Lager- und Speicherräumen (Pellets, Heizöl) ein.

Für jede Technologie wird eine Entscheidungsmatrix aufgestellt, die beim Austausch des Kessels die Wahrscheinlichkeit der Wahl der Kesseltechnologie (die bisherige oder eine andere) beschreibt.

Einen Ausschnitt aus dieser Entscheidungsmatrix für Erdgaskessel für 2003 gibt die **Tabelle 2-4**. Im Jahr 2003 wird angenommen, dass beim Ausfall eines Erdgaskessels zu 75 % dieselbe Technologie beibehalten wird. In 7 % der Fälle wird auf einen Holzpelletkessel umgestiegen usw.

Tabelle 2-4: *Betrachtete Heizsysteme und ihre Wechselwahrscheinlichkeit*

Bestehender Erdgaskessel	
Wechsel zu	**Wahrscheinlichkeit**
Pellets Holz	7%
Pellets Braunkohle	1%
Kessel HEL	1%
Kessel Erdgas	74%
Solarthermie	0%
Wärmepumpe	7%
Strom-Direktheizung	0%
Kompaktstation Fernwärme	2%
Kompaktstation Nahwärme	6%
KWK Erdgas	2%
KWK HEL	0%

Diese Entscheidungsmatrix wird für jedes Heizsystem gesondert aufgestellt. Außerdem wird das Entscheidungskalkül für jedes Jahr des Betrachtungszeitraums 2003 bis 2050 fortgeschrieben.

Die Anzahl der Heizkessel entspricht der Anzahl der Gebäude (Fortschreibung nach /IFO 06/). Z. B. werden fünf Etagenheizungen mit 10.000 kWh/a Energieerzeugung wie ein Heizsystem mit 50.000 kWh/a gewertet, da sich die Nutzungsgrade im Modell nicht mit der Heizungssystemgröße ändern.

Die mittlere Nutzungsdauer der Kessel wird mit 20 Jahren veranschlagt. Am Nutzungsende des Kessels wird der Brenner ebenfalls ausgetauscht.

Die Berücksichtigung der solarthermischen Gewinne erfolgt additiv, sie verringern die notwendige Heizenergie. Mit Berücksichtigung der Kesselnutzungsgrade ergibt sich als Ergebnis der Modellrechnung die Endenergie.

2.1.2.2 Warmwasser

Die Technikstruktur der Warmwasserbereitung entspricht dem Heizsystembestand mit Ausnahme einer geringen Anzahl an Elektroboilern. Die Warmwasserbereitung wird zur Gänze im Heizkesselmodell abgebildet.

Für die Bewertung der Entwicklung der Waschmaschinen und Geschirrspülmaschinen liefert /FFE 08a/ die Ausgangsbasis. Der Gerätebestand und dessen Endenergiebedarf werden anhand der zuvor beschriebenen Bedarfsdeterminanten fortgeschrieben.

2.1.2.3 Prozesswärme

Strombetriebene Geräte
Untersucht wurden die in **Tabelle 2-5** aufgeführten Geräte. Aus /FFE 08a/ stehen Daten zum Bestand (Ausstattungsgraden) und dem mittleren Energieverbrauch zur Verfügung.

Tabelle 2-5: *Ausstattungsgrade der betrachteten Haushalts- und Kleingeräte /FFE 08a/*

Gerätetyp	Ausstattungsgrad
Haushaltsgeräte	
Elektroherd	1
Wäschetrockner	0,4
Kleingeräte	
Toaster	0,9
Kaffeemaschine	0,95
Fön	1
Mikrowelle	0,15
Wasserkocher	0,8
Bügeleisen	1

Gasbetriebene Geräte
Trotz der viel beworbenen Vorteile des Gasherdes (schnellere Temperatureinstellung beim Kochen, etc.) lässt die Tendenz der Verbrauchszahlen eine Abschwächung der Konsumentennachfrage nach diesen Geräten erkennen. Demnach ist die Anzahl der Haushalte mit Gasherd von 1995 bis 2005 von etwa 5,3 Mio. auf knapp 4 Mio. gesunken, wobei die Anzahl gegen Ende des Betrachtungszeitraums nahezu stagniert ist /EON 09/. Im Gegensatz zu allen anderen Geräten im Bereich der Prozesswärme wird unterstellt, dass bei den Gasherden keine Effizienzsteigerung bis 2050 stattfindet.

Es wird angenommen dass die Anzahl der Gasherde bis 2050 konstant bleibt. Der Verbrauch an Gas zum Kochen nimmt, bedingt durch die Tatsache, dass ein Zweipersonenhaushalt nur etwa 25 % mehr Energie zum Kochen benötigt, wie ein Einpersonenhaushalt, nicht eins zu eins mit dem Bevölkerungsrückgang ab. Dies wird durch einen Umrechnungsfaktor berücksichtigt.

Biomasse
Biomasse wird praktisch ausschließlich in Form von Stückholz zum Kochen verwendet. Für die Fortschreibung gelten die gleichen Annahmen wie bei Gasherden. Es wird unterstellt, dass die Effizienz bei den Biomasseherden wegen ihres geringen Marktanteils und dem daraus folgenden fehlenden Innovationsdruck bis 2050 nicht mehr

steigen wird. Die Herde werden oft auch in Kombination als Heizsystem betrieben, die dafür aufgewendete Endenergie wird im Bereich Raumwärme bilanziert.

2.1.2.4 Beleuchtung

Die Grundlage der Untersuchung bildet der Leuchtmittelbestand des Jahres 2003 (vgl. Bericht Teil 1). Auf die Beleuchtung entfielen im Jahr 2003 etwa 40,8 PJ, das sind lediglich knapp 1,5 % des gesamten Endenergieaufwands in den deutschen Haushalten.

Aus der Studie /FFE 08a/ stehen Daten zur Anzahl der Lampen und mittleren Lampenleistung in deutschen Haushalten zur Verfügung. Die Anteile der einzelnen Leuchtmittel am gesamten emittierten Lichtstrom sind in **Abbildung 2-14** dargestellt. Der Anteil der LED ist im Jahr 2003 vernachlässigbar.

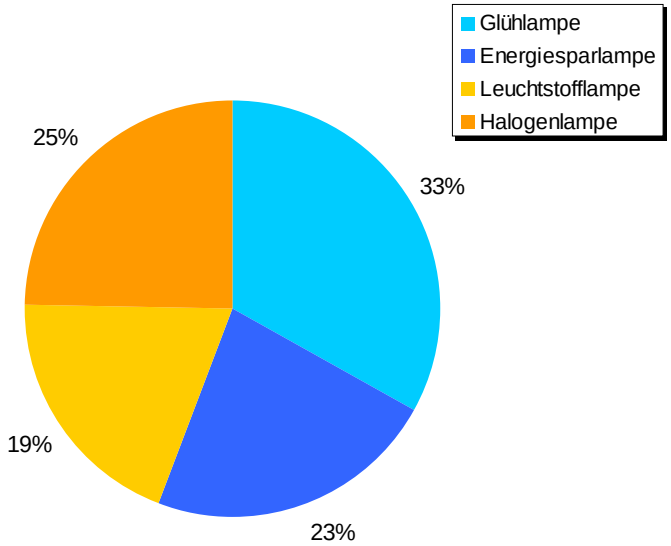

Abbildung 2-14: *Beleuchtungsmittelstruktur nach Anteilen am produzierten Lichtstrom*

Der Energiebedarf hängt nicht nur vom gesamten emittierten Lichtstrom ab, sondern auch von der Effizienz der eingesetzten Leuchtmittel, ausgedrückt in Lumen pro Watt.

Die Lichtausbeute der Glühlampe hat ihre technische Grenze erreicht, aus diesem Grund gibt es keinen Innovationsdruck mehr. Ihre Effizienz verbessert sich deshalb nicht mehr. Bei der Halogenlampe, die im Prinzip eine Weiterentwicklung der Glühlampe ist, ist Verbesserungspotenzial vorhanden. Die Lichtausbeute der Halogenlampe wird 2003 mit 20 lm/W angenommen. Durch die bereits serienreife IRC-Technologie (IRC – Infra-Red-Coating) sind bereits heute Werte um 30 lm/W möglich. Im Jahr 2050 wird deshalb von einem Wert von 35 lm/W ausgegangen.

Die Energiesparlampe ist bereits aufgrund ihrer hohen Lichtausbeute rentabler als die Glühlampe. Da sie durch ihre variablen Bauformen für verschiedenste Beleuchtungszwecke im Haushalt eingesetzt werden kann, ist Innovationsdruck gegeben, der zu einem Anstieg ihrer Lichtausbeute von 55 lm/Watt im Jahr 2003 auf 80 lm/Watt im Jahr 2050 führen sollte. Verbesserungspotenziale ergeben sich bezüglich der Elektronik, verbesserter Geometrie (Abstrahlcharakteristik) und bei den eingesetzten Leuchtstoffen.

Es existieren keine gesicherten Daten zum Verhältnis von Leuchstofflampen mit elektronischen Vorschaltgeräten (EVG) zu jenen mit konventionellen Vorschaltgeräten (KVG), deshalb wird der EVG-Anteil in Anlehnung der Untersuchungsergebnisse aus dem Sektor GHD mit 15 % angenommen. Der Rest von 85 % besteht, abgesehen von einem vernachlässigbaren Anteil an verlustarmen Vorschaltgeräten (VVG), aus KVG. Aufgrund dieser Überlegungen wird der Leuchstofflampe aus dem Jahr 2003 eine Effizienz von 70 lm/W zugewiesen, die sich bis 2050 auf 120 lm/W erhöht. Alle anderen Arten von Gasentladungslampen (z. B. Natriumdampflampen) spielen energetisch im Sektor Haushalte eine untergeordnete Rolle und werden deshalb nicht weiter betrachtet.

Für die heute existierenden LED-Lampen wird eine Effizienz von 50 lm/W angenommen. Die LED-Technologie unterliegt aufgrund des hohen Innovationsdrucks einer raschen Weiterentwicklung. Sie erscheint heute als die Technologie mit dem höchsten Potenzial. Im Jahr 2050 wird für LEDs eine Lichtausbeute von 150 lm/W angenommen.

Um den Verlauf der Übergänge hin zu höheren Effizienzen zu modellieren, wurden die eingangs erwähnten EVOLON-Funktionen herangezogen.

In **Abbildung 2-15** ist die Fortschreibung der Leuchtmitteleffizienz dargestellt.

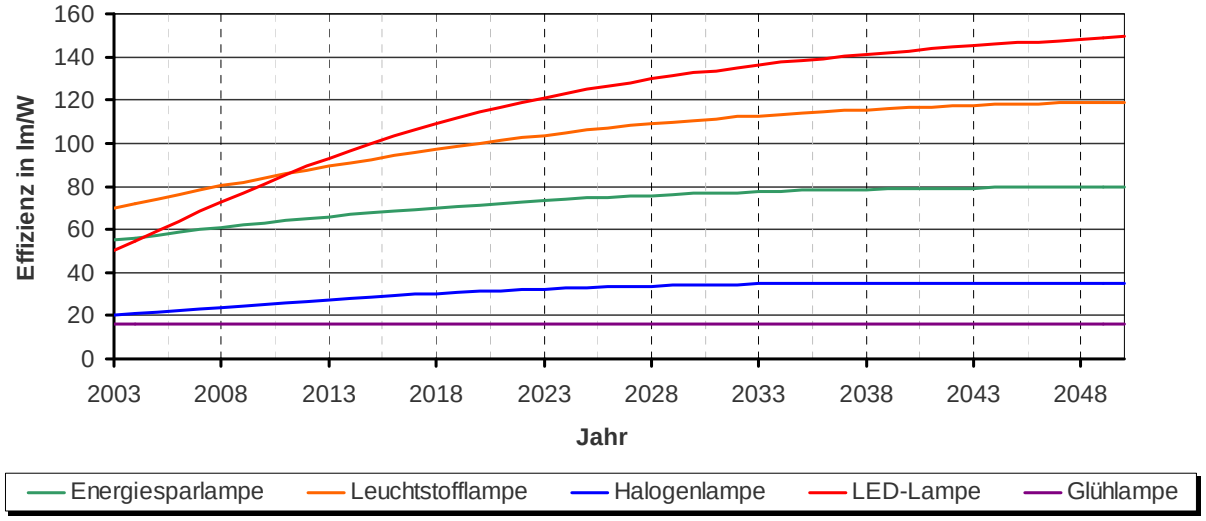

Abbildung 2-15: *Entwicklung der Effizienz der Leuchtmittel von 2003 bis 2050*

Der Energieverbrauch hängt nicht nur von der Effizienz der Leuchtmittel, sondern auch von deren Anteil am Lichtstrom ab (vgl. /FFE 08a/). Durch eine Veränderung dieses Lampenmixes verändert sich demzufolge der Energieverbrauch für die Bereitstellung der gleichen Lichtmenge (Lumenstunden). In der Vergangenheit haben sich zwei Tendenzen herausgebildet. Erstens werden ineffiziente Leuchtmittel durch effizientere ersetzt und zweitens nimmt die Effizienz bestehender Technologien bei genügend hohem Innovationsdruck weiter zu. Diese Überlegung bildet die Basis der Fortschreibung.

Es wurde ein Modell entwickelt, das einerseits den wechselnden Anteil der Leuchtmittel am Leuchtmittelmix (Leuchtmittelshift) und andererseits die Verbesserung der Leuchtmittel bzw. die Einführung neuer Leuchtmittel berücksichtigt.

In der folgenden **Tabelle 2-6** sind die Anteile am erzeugten Lichtstrom im Jahr 2003 und die Prognose für das Jahr 2050 gegenübergestellt.

Tabelle 2-6: *Gegenüberstellung der zu Grunde gelegten Leuchtmittel für das Betrachtungsjahr 2003 und prognostiziert für das Jahr 2050*

Lampentyp	Anteil am Lichtstrom in %	
Jahr	**2003**	**2050**
Glühlampe	33	0
Halogenlampe	25	1
Energiesparlampe	23	60
Leuchtstofflampe	19	19
LED	0	20

In der Fortschreibung berücksichtigt ist das EU-weite, schrittweise Verbot der Glühlampe ab dem 1.9.2009. Im Referenzszenario wird angenommen, dass der Anteil der Glühlampen am emittierten Lichtstrom im Jahr 2015 praktisch null ist.

Der Anteil der Halogenlampe wird ebenfalls stark zurückgehen, da sie im Vergleich über eine ähnlich schlechte Lichtausbeute verfügt und nach und nach durch LEDs ersetzt wird. Sie wird erst später als die Glühlampe aussterben, da sie zunächst noch in höherwertigen Lichtanwendungen (Spotbeleuchtung etc.) im Einsatz bleibt und die LEDs noch wesentlich teurer sind.

Der Anteil der Energiesparlampe wird im Jahr 2050 mit 60 % angenommen, da sie kostengünstiger als die LED ist und dies aller Voraussicht nach noch lange bleiben wird. Ein weiterer Vorteil ist auch, dass sie in bestehende Lampenfassungen passt. Der Anteil der Leuchtstofflampe wird konstant mit 19 % angenommen, da sie für Außenbeleuchtung, Gänge, Tiefgaragen und Allgemeinbereiche ein sehr preisgünstiges und effizientes Leuchtmittel darstellt. Die LED gilt zurzeit als die vielversprechendste Technologie für die Zukunft. Aktuell ist sie noch relativ teuer, doch es ist Innovationsdruck gegeben, weshalb angenommen wird, dass der Anteil der LED bis zum Jahr 2050 auf 20 % steigt.

Die Fortschreibung bzw. der Leuchtmittelshift, ausgedrückt in Anteilen am gesamten Lichtstrom, ist in der **Abbildung 2-16** dargestellt.

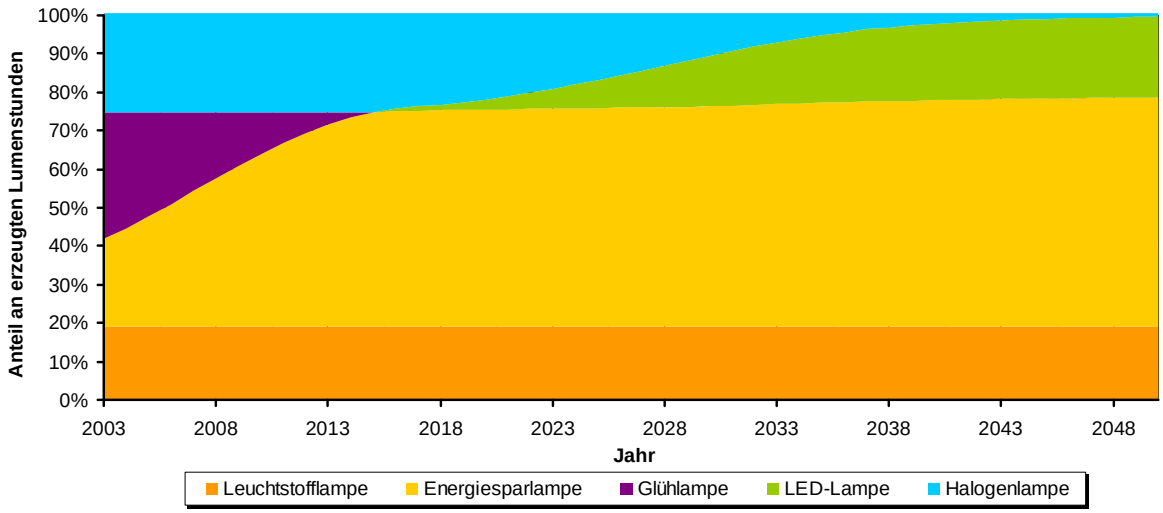

Abbildung 2-16: *Prognose des Anteils der Leuchtmittel am Lichtstrom (Leuchtmittel-mix) von 2003 bis 2050*

Das Modell konnte für das Jahr 2005 mit Daten von /IfE 08/ verifiziert werden. Es zeigt den Rückgang der Glühlampe bis 2015. Ab diesem Jahr steigt dem Modell zufolge der Anteil der LED an und verdrängt die Halogenlampe. Es wird unterstellt, dass die Energiesparlampe den größten Anteil am Lampenmix behält, da sie bereits heute wegen der eingesparten Kosten und die höhere Lebensdauer rentabel ist.

2.1.2.5 Mechanische Energie

Es werden wiederum die folgenden Arten von Verbrauchern betrachtet:

- Pumpen
- Aufzüge
- Hilfsenergie Kessel und Solarthermie
- Haushaltsgeräte (inkl. Kleingeräte)

Pumpen

Die Pumpen im Haushalt werden in zwei Kategorien eingeteilt: Zirkulationspumpen und Heizkreispumpen. Aus der Bottom-Up Analyse der Studie /FFE 08a/ ist bekannt, dass bei beiden Pumpenarten ein erhebliches Energieeinsparpotenzial besteht. Der gesamte Aufwand an mechanischer Energie betrug im Jahr 2003 ca. 53,2 PJ/a und somit 1,9 % des gesamten Endenergieverbrauchs von 2.828 PJ/a des Sektors Haushalte. Die **Tabelle 2-7** gibt einen Überblick über den Energiebedarf der Pumpen im Jahr 2003.

Tabelle 2-7: *Pumpenarten und deren Energieverbrauch im Jahr 2003 /FFE 08a/*

Pumpenart	Energiebedarf in PJ/a
Heizkreispumpe EFH	22,4
Heizkreispumpe MFH	9,7
Zirkulationspumpe EFH	13.6
Zirkulationspumpe MFH	7,5

In Anlehnung an /FFE 08a/ wird davon ausgegangen, dass ein EFH jeweils mit einer Heizkreis- und einer Zirkulationspumpe ausgestattet ist. Ein MFH verfügt durchschnittlich über eine Zirkulationspumpe und über drei Heizkreispumpen.

Zirkulationspumpen dienen dazu, das Warmwasser in der Zirkulationsleitung umzuwälzen, damit es im Bedarfsfall auf dem gewünschten Temperaturniveau zur Verfügung steht. Dabei entstehen einerseits elektrische Verluste durch den kontinuierlichen Pumpenbetrieb und andererseits Wärmeverluste durch das Auskühlen des umgewälzten Warmwassers. Diese Wärmeverluste liegen im Bereich von einem Viertel bis einem Drittel der Energie, die im Warmwasser vorhanden ist. Diese Wärme kann nur durch verbesserte Wärmedämmung der Rohre in den Mauern vermindert werden und kommt während der Heizperiode der Raumwärme zugute. Sie wird nicht gesondert bilanziert, da sie bereits in den Zahlen der Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen (AGEB) über die Raumwärme enthalten ist. Die Untersuchung konzentriert sich daher auf die elektrischen Verluste.

Es ist keine Abhängigkeit vom Warmwasserbedarf gegeben, da das Wasser unabhängig vom tatsächlichen Konsum umgewälzt werden muss. Es wird angenommen, dass sowohl die Effizienzsteigerung als auch der Ersatz der Pumpen am Ende ihrer Lebensdauer bis 2050 in Form einer EVOLON-Funktion erfolgt.

Heizkreispumpen sind ebenso wie Zirkulationspumpen überdimensioniert, von schlechter Qualität (AC) und schlecht geregelt, d. h. sie laufen vielfach das ganze Jahr durch (vgl. /FFE 08a/). Der Energieverbrauch der Heizkreispumpen wird auf die spezifische Fläche bezogen. Der gesamte Energieverbrauch der Heizkreispumpen macht etwa 32,1 PJ aus, das sind 1,5 % der Energie für die Raumwärme.

Aufzüge

Der Gesamtenergieverbrauch der ca. 530 Tsd. Aufzüge in Wohngebäuden in Deutschland im Jahr 2003 lag bei knapp 2,7 PJ für Standby und ca. 1,3 PJ für den Fahrbetrieb. Energieeinsparungen ergeben sich durch verbesserte Technologie (Seilaufzüge anstatt hydraulischer Aufzüge), Verminderung der Standby-Verluste und Energierekuperation.

Hilfsenergie Kessel und Solarthermie

Der Eigenbedarf der Kessel wurde aufgrund von Daten aus /SLM 04/ ermittelt und auf die durchschnittliche Größe eines EZH (1,25 Wohneinheiten) und MFH (6,81 Wohneinheiten) umgerechnet. Für das Jahr 2003 ergibt sich für die EZH ein Eigenbedarf von knapp 23,2 PJ und für die MFH ergeben sich ca. 7,3 PJ.

Es wird angenommen, dass pro Solarthermieanlage eine Umlaufpumpe eingebaut ist. Daten über Bestand und Zubau solarer Wärmeerzeugung entstammen /SLW 08/. Der Anteil der Hilfsenergie für Solarthermieanlagen betrug im Jahr 2003 lediglich 0,08 PJ, steigt aber in diesem Szenario auf etwa 0,7 PJ an. Die Fortschreibung richtet sich nach der Anzahl der Solaranlagen aus dem Berechnungsmodell für die Raumwärme. Im Szenario 1 steigt die Anzahl der Solaranlagen von ca. 550.000 im Jahr 2003 auf etwa 6,5 Mio. im Jahr 2050 an.

Haushaltsgeräte
Untersucht wurden die Geräte, die mechanische Energie verbrauchen (aufgeführt in **Tabelle 2-8**). Aus /FFE 08a/ stehen Daten zum Bestand, den Ausstattungsgraden und dem Energieverbrauch der Haushaltsgeräte zur Verfügung.

Tabelle 2-8: *Ausstattungsgrade der betrachteten Haushalts- und Kleingeräte /FFE 08a/*

Gerätetyp	Ausstattungsgrad
Haushaltsgeräte	
Gefriergerät	0,81
Kühlschrank	0,94
Kühl/Gefrierkombigerät	0,47
Kleingeräte	
Küchenmaschine	0,5
Rührgerät	0,5
Mixer	0,62
Staubsauger	1
Dunstabzugshauben	0,9

Dunstabzugshauben werden aufgrund ihrer geringen Stromeinsparmöglichkeiten den Kleingeräten zugerechnet.

2.1.2.6 Information und Kommunikation

2003 belief sich der Verbrauch im Sektor IuK auf etwa 49,8 PJ, das sind knapp 1,8 % des gesamten Endenergieverbrauchs von 2.828 PJ des Sektors Haushalte. Der Bereich IuK wird also selbst bei massiven Steigerungen des Verbrauchs immer nur einen geringen Anteil am Gesamtverbrauch haben. Dem steigenden Verbrauch durch die zunehmende Anzahl von Geräten (Ausstattungsgrade bzw. Haushaltsanzahl) wirken dabei die höhere Effizienz und die sinkende Bevölkerung entgegen. Bei Geräten, die aussterben, wird angenommen, dass deren Funktion von anderen, bereits jetzt bekannten Geräten übernommen wird (Beispiel: Kompaktanlage übernimmt die Funktion der Stereoanlage und des Kassettenrekorders).

Die Fernseher und die Fernseh-Infrastruktur haben den größten Anteil am Energieverbrauch im Sektor IuK, die betrachteten Geräte sind in Tabelle 2-3 aufgeführt. Im Folgenden werden kurz die Besonderheiten der einzelnen Gerätegruppen beschrieben.

Um eine detaillierte und vollständige Angabe zum Energieverbrauch zu machen, wurden bei allen Geräten Normalbetrieb, Standby und Schein-Aus getrennt betrachtet und daraus der Gesamtenergiebedarf jedes Gerätes ermittelt.

Audio
Audiogeräte sind Stereoanlagen, Kompaktanlagen, Radiowecker und Radiorekorder. Die Kompaktanlage verdrängt schon seit Jahren immer mehr die Stereoanlage. Kompaktanlagen bieten heute mp3-Eingänge und die gleiche Klangqualität wie Stereoanlagen.

Radiorekorder werden ebenfalls durch die Kompaktanlage verdrängt. Es wird angenommen, dass Radiorekorder 2013 und Stereoanlagen 2028 ausgestorben sind.

Fernseher inkl. Empfangsinfrastruktur

Der Fernsehgerätebestand in Deutschland setzt sich zurzeit aus CRT-, LCD- und Plasma-Fernsehern zusammen. CRT-Fernseher weisen den bei weitem größten Energieverbrauch im Sektor IuK auf (vgl. Tabelle 2-3). Gleichzeitig stirbt der CRT-Fernseher aus und wird durch die LCD bzw. Plasmatechnologie ersetzt. Dies ist jedoch nicht auf die erhöhte Energieeffizienz zurückzuführen, sondern auf die Tatsache, dass die Bildschirme flacher sind sowie eine größere Bildfläche ermöglichen. Es wird angenommen, dass sich dieser Trend in Zukunft fortsetzt und der CRT-Fernseher im Jahr 2023 praktisch ausgestorben sein wird. Der CRT-Fernseher unterliegt somit keinem Innovationsdruck mehr und es wird keine Effizienzsteigerung mehr angenommen.

Da viele Haushalte bereits ein Zweit- und sogar Drittgerät besitzen, wurden auch diese untersucht. Zu Beginn des Betrachtungszeitraumes (2003) sind neben den CRT-Geräten die leistungsstarken neuen LCD- und Plasma-Fernsehgeräte nur bei den Erstgeräten vertreten. Zweit- und Drittgeräte sind zu diesem Zeitpunkt nur CRT-Geräte, diese werden jedoch genauso wie die Erstgeräte durch die LCD und Plasmatechnologie verdrängt.

Es kann von der Annahme ausgegangen werden, dass LCD und Plasma in 2050 den gleichen Marktanteil haben, da sich die Bildqualität immer mehr angleicht und sich der Stromverbrauch bei beiden Geräten in etwa gleichem Maße immer mehr verringert.

Die Fernsehinfrastruktur setzt sich aus SAT-, DVB- und Kabel-Boxen zusammen. Der Verbrauch der Fernseh-Empfangsstruktur basiert auf der Studie /SCH 04/ und wurde mit den oben aufgeführten Bedarfsdeterminanten fortgeschrieben.

Player

Bei den Playern wird zwischen Video- und DVD-Playern unterschieden. Angenommen wird, dass, analog zu den CRT-Fernsehgeräten, die Video-Rekorder nach 10 Jahren aussterben und durch DVD-Player ersetzt werden.

Kommunikation

Zum Bereich Kommunikation gehören schnurlose Telefone, Handys, Anrufbeantworter und Faxgeräte. Festnetzapparate wurden nicht berücksichtigt, da sie in der Regel über die Telefonleitung mit Energie versorgt werden. Der Stromverbrauch für das Laden von Handys ist in Deutschland vernachlässigbar. Im Jahr 2000 betrug er lediglich etwa 0,01 PJ /STR 08/. Der Stromverbrauch für die Handy-Infrastruktur wird dem Bereich GHD zugeordnet.

Die Anzahl der schnurlosen Telefone wurde ebenso wie der Anrufbeantworter an der Haushaltsentwicklung fortgeschrieben. Die Anzahl der Faxgeräte ist von 2001 bis 2005 von ca. 5,3 Mio. auf knapp 4,9 Mio. Geräte zurückgegangen. Dies ist durch den verstärkten Einsatz des Internets im Bereich Haushalte zu erklären. Es wird angenommen, dass sich der Trend fortsetzt und das Faxgerät im Haushalt bis 2028 ausgestorben ist.

EDV inkl. Internetanschlüssen
In den Bereich EDV fallen PCs, Laptops und Scanner. Die Anzahl der PCs wurde an der Haushaltsentwicklung fortgeschrieben. Dies ist plausibel, da die Anzahl an PCs von 2001 bis 2005 von etwa 26,1 Mio. auf ca. 28,2 Mio. gestiegen ist. Die Anzahl der Laptops stieg im gleichen Zeitraum allerdings von ca. 2,6 Mio. auf über 4,5 Mio. an. Der Trend zum Laptop hält weiterhin an. Ein Laptop benötigt wesentlich weniger Energie als ein PC (mindestens 50 %), da das Gerät – wegen der Akkulaufzeit – auf Energieeffizienz ausgelegt ist.

Im Jahr 2003 betrug der Energiebedarf für die Verbindung mit dem Internet ca. 0,86 PJ /SCH 04/, /eigene Berechnungen/. Dieser Bedarf ist aber nach /SCH 04/ stark steigend. Im Jahr 2015 werden etwa 6,9 PJ erreicht. Begründet ist dies in erster Linie dadurch, dass immer mehr Haushalte an das Internet angeschlossen werden. Für den Beginn der Betrachtung (2003) wird von der Verwendung folgender Geräte für die Internetanschlüsse ausgegangen:

- DSL-Splitter
- DSL Modem
- DSL-Router/WLAN

Bereits heute zeichnet sich der Trend ab, dass diese Geräte in einem Gerät, in dieser Studie Internet-Connection-Box genannt, zusammengefasst werden, welches weniger Energie verbraucht. Für Szenario 1 wird angenommen, dass die Leistungsaufnahme der Internet-Connection-Box von 12 W auf 4 W absinkt und die Betriebsstunden von 1.500 h/a auf 8.760 h/a steigen. Die Anzahl der Geräte entwickelt sich in allen drei Szenarien von 4 Mio. auf knapp 44 Mio., was der Anzahl der HH entspricht. Der Energiebedarf der einzelnen Szenarien ergibt sich für das entsprechende Jahr aus dem Produkt der Leistung, den Betriebsstunden pro Jahr und der Anzahl der Geräte (Anzahl HH).

Drucker
Bei den Druckern gibt es im Haushalt den Tintenstrahl- und der Laserdrucker. Beide werden an der HH-Entwicklung fortgeschrieben, da es in der Regel nicht mehr als einen Drucker pro Haushalt gibt. Schein-Aus und Standby-Verluste machen in den Haushalten den bei Weitem größten Anteil aus, da die Anzahl an Dokumenten, die gedruckt werden, im Vergleich zu Büros relativ klein ist. Der Stromverbrauch der Drucker beinhaltet auch den Stromverbrauch für das Scannen, da im Haushalt diese Funktionen meist in einem Gerät vereint sind.

Monitore
Bei den Monitoren unterscheidet man CRT- und LCD-Monitore, wobei die CRT-Monitore aufgrund fehlenden Innovationsdrucks nicht mehr effizienter werden. Es wird unterstellt, dass ihr Anteil im Jahr 2013 praktisch null ist. Sie werden, analog zu den Fernsehgeräten, durch LCD-Monitore ersetzt, die an der HH-Entwicklung fortgeschrieben werden.

2.1.3 Endenergieverbrauch

Im Folgenden werden die Endenergieverbräuche der einzelnen Anwendungsbereiche aufgeführt.

2.1.3.1 Raumwärme

In der **Abbildung 2-17** ist die Prognose des Endenergieverbrauchs im Bereich Raumwärme dargestellt.

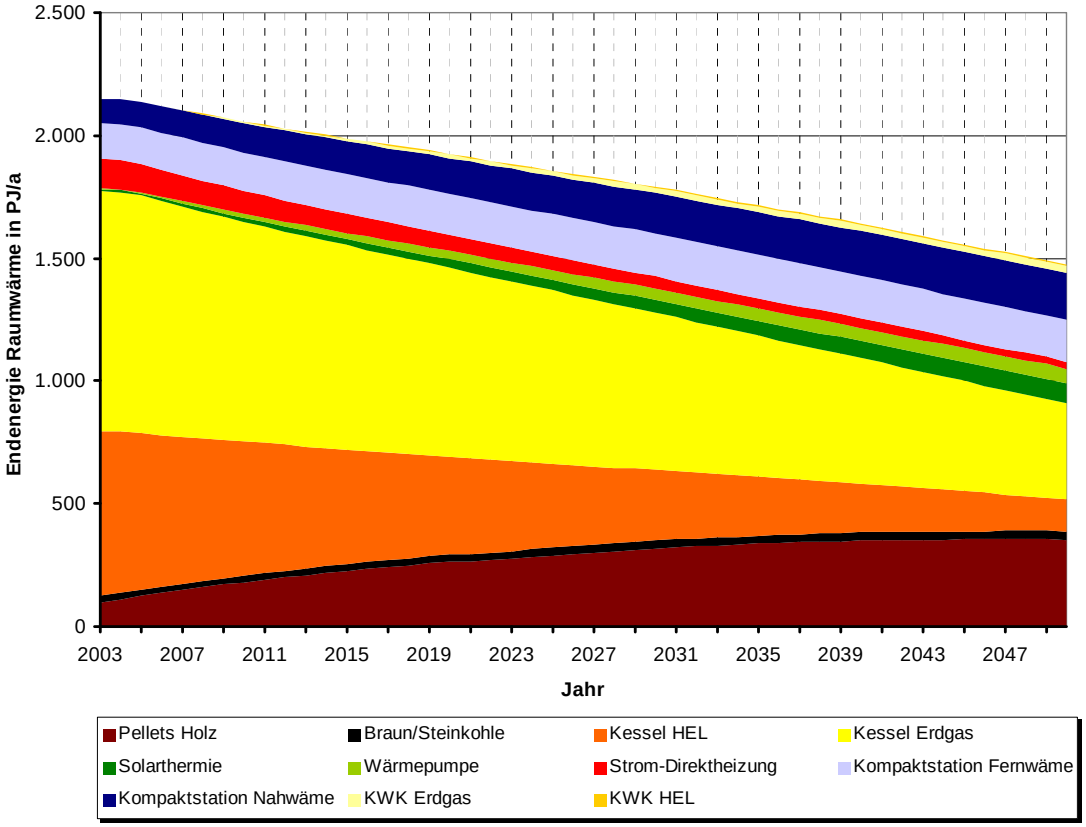

Abbildung 2-17: *Endenergiebedarf im Bereich der Raumwärme*

Nach dieser Prognose wird der Endenergiebedarf im Referenzszenario von etwa 2.148 PJ in 2003 auf etwa 1.474 PJ abnehmen. Durch Substitutionseffekte nimmt der Anteil der fossilen Energieträger beständig ab. Bei diesem Prozess spielt die Gesetzeslage eine Rolle. So kann z. B. durch die Anforderungen der EnEV 2009 der Grenzwert für den Primärenergiebedarf kaum mehr mit einem Ölkessel erreicht werden, bzw. nur mit einem entsprechend hohen Dämmaufwand, sodass ein Umstieg auf Holzpellets günstiger erscheint (Entscheidungskalkül). Wegen der dadurch bedingten höheren relativen Zubaurate der Holzpelletkessel, wird deren Anteil am gesamten Endenergieverbrauch in diesem Szenario beständig größer. Bei der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK Erdgas und KWK HEL) wird die Wärme bilanziert, der Strom wird dem Umwandlungssektor zugewiesen.

2.1.3.2 Endenergieverbrauch für Warmwasser

Warmwasserbereitung

In **Abbildung 2-18** ist die Fortschreibung der Endenergie für den Bereich Warmwasserbereitung dargestellt. Der Energiebedarf entwickelt sich, aufgrund der gleichen Kesselstruktur für Warmwasser, ähnlich zu jenem der Raumwärme.

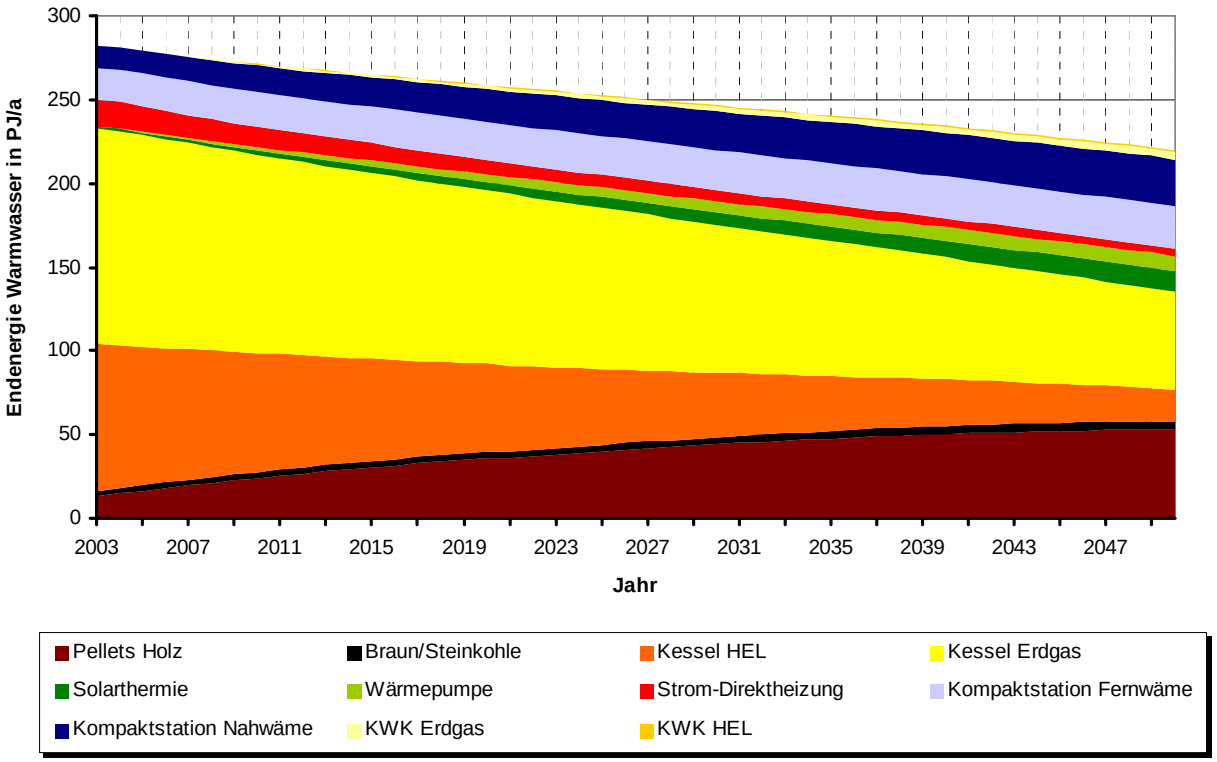

Abbildung 2-18: *Endenergiebedarf für Warmwasser (Brauchwasser)*

Nach dieser Prognose nimmt der Endenergiebedarf zwischen 2003 und 2050 von knapp 283 PJ auf etwa 220 PJ ab.

Endenergieverbrauch Waschmaschinen und Geschirrspüler

Der Endenergieverbrauch für Waschmaschinen und Geschirrspüler ist in **Abbildung 2-19** dargestellt. Der Bedarf nimmt bis etwa 2010 aufgrund der steigenden Haushaltszahlen, ausgehend von 33,4 PJ im Jahr 2003, bis auf ca. 33,7 PJ zu. Danach erfolgt durch die stetig steigende Geräteeffizienz bis 2050 eine kontinuierliche Abnahme bis auf etwa 28 PJ.

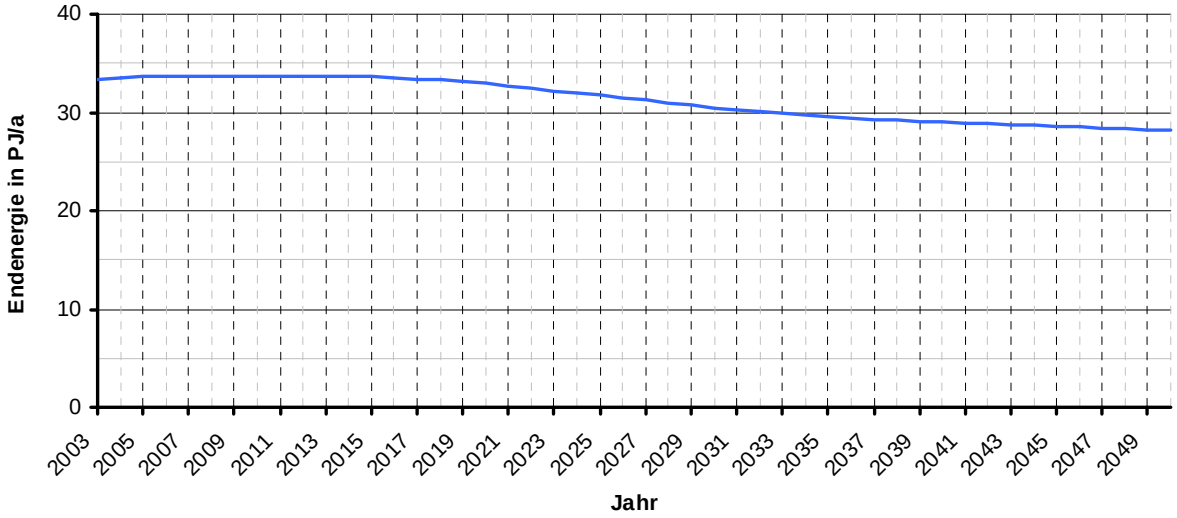

Abbildung 2-19: *Endenergiebedarf für Warmwasser, Waschmaschinen und Geschirrspüler*

2.1.3.3 Endenergieverbrauch bei der Prozesswärme

In der folgenden **Abbildung 2-20** ist der Endenergieverbrauch von Strom, Biomasse und Gas dargestellt.

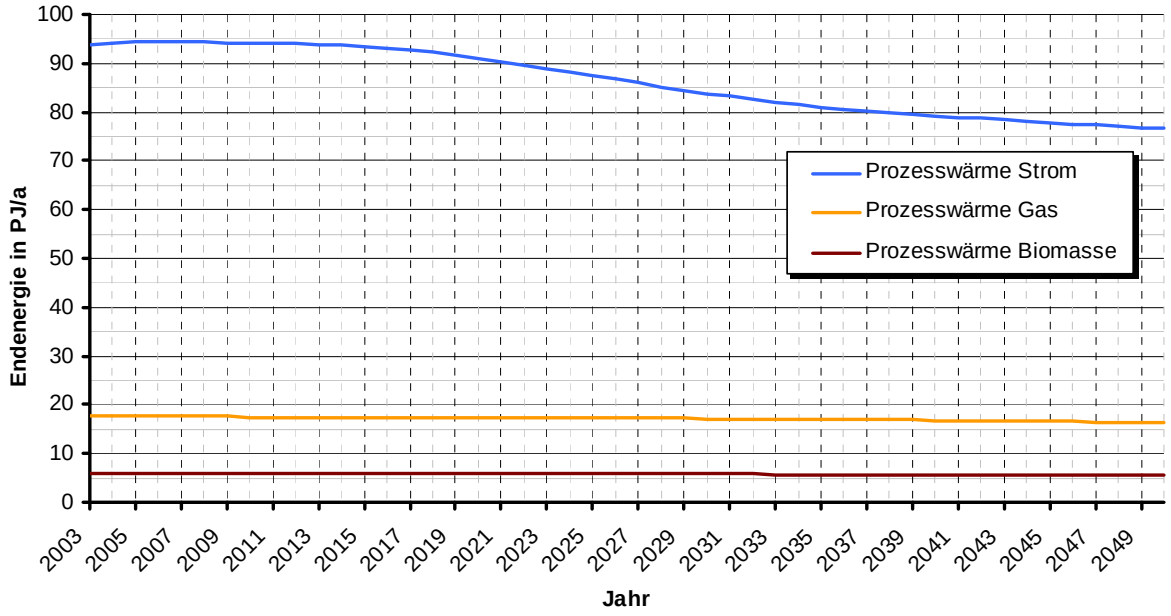

Abbildung 2-20: *Fortschreibung des Endenergieverbrauchs bei der Prozesswärme*

Bei der Prozesswärme auf Basis von Strom nimmt der Energieverbrauch von knapp 93,8 PJ im Jahr 2003 leicht bis auf etwa 94,3 PJ im Jahr 2007 zu. Danach sinkt der Anteil aufgrund der höheren Geräteeffizienz und der Bevölkerungsabnahme bis 2050 stetig auf ca. 76,7 PJ. Bei Gas ergibt sich aufgrund des Bevölkerungsrückgangs, ausgehend von 17,6 PJ im Jahr 2003, bis 2050 ein Rückgang auf 16,3 PJ. Bei Biomasse geht die Endenergie von ca. 5,9 PJ auf 5,5 PJ zurück. Die Minderung beim Kochen mit Gas und Biomasse geht in diesem Szenario allein auf die Bevölkerungsentwicklung zurück, die sich jedoch nicht direkt proportional auswirkt, weil z. B. eine Halbierung der Bewohnerzahl im Haushalt nicht heißt, dass sich die Energie für das Kochen ebenfalls halbiert. Gleiches gilt für Mehrpersonenhaushalte. Der Bevölkerungsrückgang wurde deshalb mit einem Umrechnungsfaktor abgemindert. Das heißt; ein Bevölkerungsrückgang von 10 % bewirkt einen Rückgang der Energie zum Kochen von ca. 7 %.

2.1.3.4 Endenergieverbrauch bei der Beleuchtung

Mit der aus dem Modell errechneten Leuchtmittelverteilung kann der Endenergiebedarf unter Berücksichtigung der folgenden maßgeblichen Bedarfsdeterminanten ermittelt werden:

- Bevölkerungsentwicklung.
- Entwicklung der spezifischen Wohnfläche.

Da die Bevölkerung, wie in Abbildung 2-2 dargestellt, bis 2050 abnehmen wird, wird auch die Anzahl der benötigten Lumenstunden mit dem gleichen Faktor abnehmen.

Verglichen mit dem gewerblichen Bereich ist im Haushalt die Abhängigkeit des Beleuchtungsbedarfs von der zu beleuchtenden Fläche nicht so stark ausgeprägt. Die

spezifische Wohnfläche der Haushalte steigt bis 2050 an (vgl. Abbildung 2-7). Eine größere Wohnung heißt in erster Linie mehr Räume, von denen in der Regel nur die benutzten Räume beleuchtet werden. In Altbauwohnungen werden in der Mehrzahl der Adaptierungen bzw. Sanierungen im Allgemeinen keine Wände herausgerissen, um Räume zusammenzufassen. Die Zunahme der spezifischen Wohnfläche bedeutet also nicht, dass der Raum größer wird. Aus diesen Gründen wird angenommen, dass der Anstieg der spezifischen Wohnfläche nur zu 20 % in den Beleuchtungsbedarf eingerechnet wird.

In **Abbildung 2-21** ist das Ergebnis der Berechnung – der prognostizierte Endenergiebedarf – dargestellt.

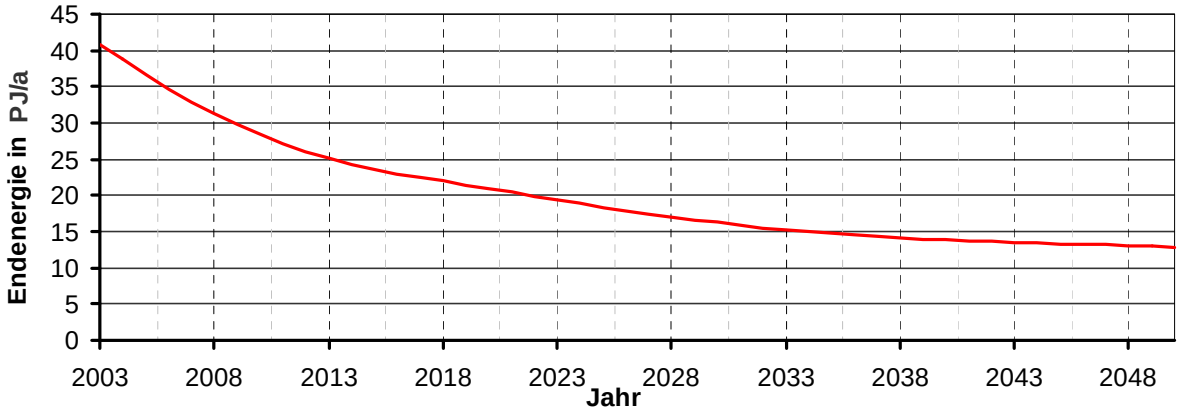

Abbildung 2-21: *Prognostizierte Entwicklung des Endenergieverbrauches 2003 für die Beleuchtung bis 2050*

Der Endenergiebedarf wird der Prognose zufolge in Szenario von 40,8 PJ auf etwa 12,9 PJ abnehmen, was eine Reduktion um etwa 68 % entspricht.

2.1.3.5 Endenergieverbrauch bei der mechanischen Energie

Pumpen

In der folgenden **Abbildung 2-22** ist die Prognose des Endenergieverbrauchs der mechanichen Energie unter Berücksichtigung der Bedarfsdeterminanten und Effizienzsteigerung dargestellt.

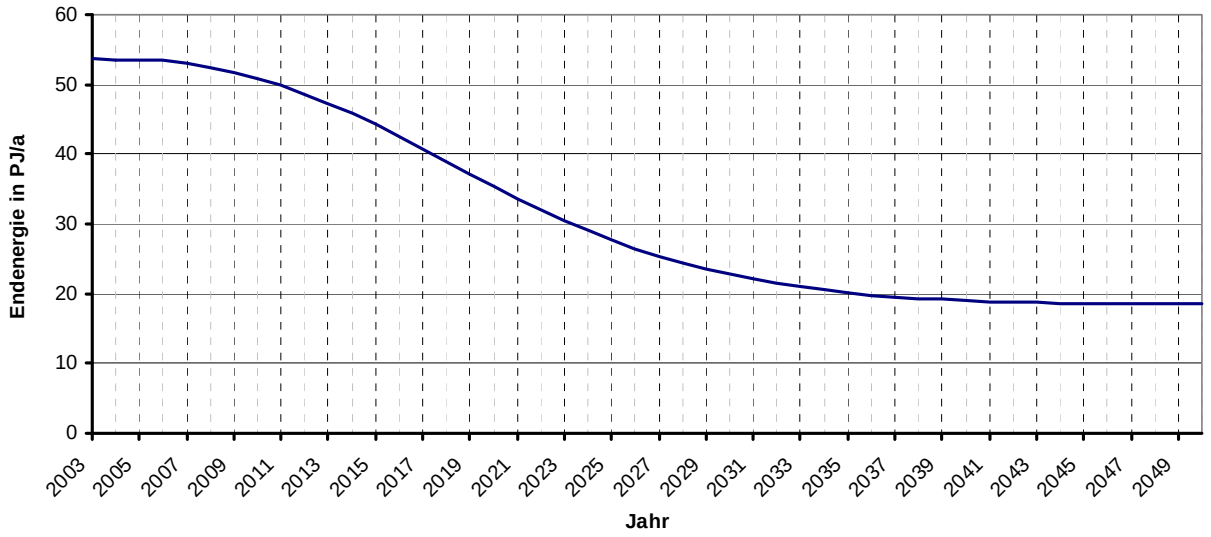

Abbildung 2-22: *Endenergiebedarf an mechanischer Energie bei den Pumpen*

Der Endenergiebedarf geht nach dieser Prognose von 53,6 PJ auf 18,6 PJ zurück, was in Anbetracht des überdimensionierten Pumpenbestands in Deutschland durchaus realistisch erscheint.

Aufzüge

Der Energieverbrauch, dargestellt in **Abbildung 2-23**, steigt durch die mit dem Gebäudeneubau stetig steigende Anzahl an Fahrstühlen an.

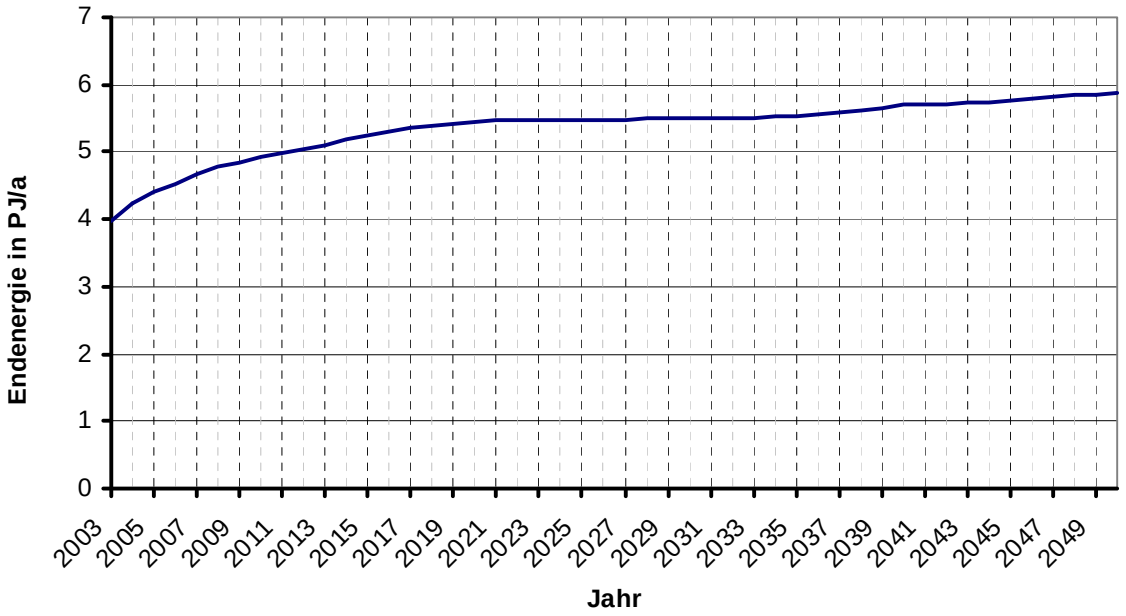

Abbildung 2-23: *Fortschreibung des Energieverbrauchs an mechanischer Energie der Aufzüge*

Durch die sich nach und nach verbessernde Effizienz wird der Anstieg etwa ab dem Jahr 2020 etwas gedämpft, aber die weiterhin steigende Gebäudeanzahl lässt den Energieverbrauch von 4 PJ im Jahr 2003 auf ca. 5,9 PJ im Jahr 2050 ansteigen.

Hilfsenergie

In der **Abbildung 2-24** ist der Energiebedarf für mechanische Energie für die Hilfsenergie der Solarthermieanlagen und der Heizkessel (Gebläse und Eigenbedarf) angegeben.

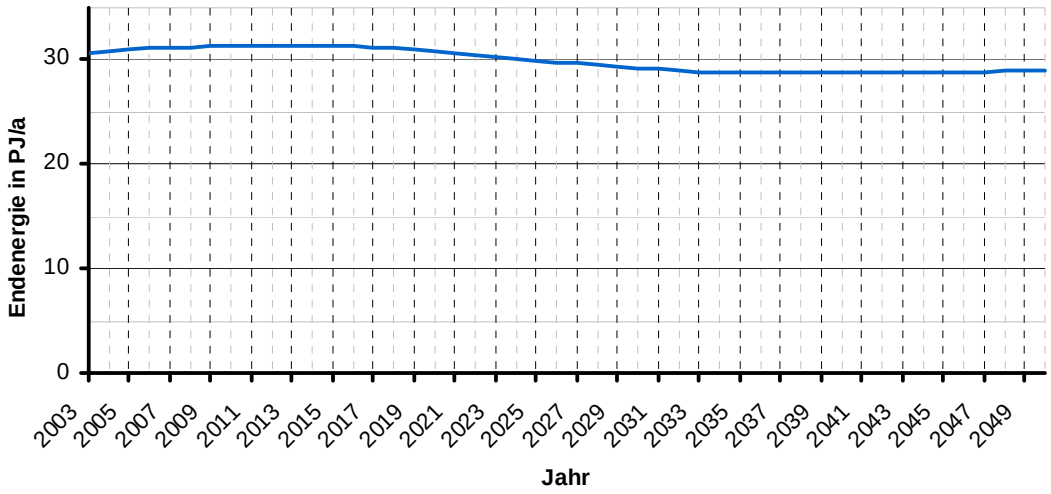

Abbildung 2-24: *Hilfsenergiebedarf (mechanisch) der Kessel und Solarthermie*

Ausgehend von ca. 30,5 PJ im Jahr 2003, steigt der Energiebedarf zunächst, wegen der ansteigenden Zahl der Heizsysteme, trotz Effizienzsteigerungen bei der Hilfsenergie für Kessel und Solarpumpen auf etwa 31,4 PJ im Jahr 2010 an. Der Energiebedarf nimmt danach wieder ab, da die Effizienzsteigerung nach einer EVOLON-Funktion um das Jahr 2025 stärker wird. Gegen Ende des Prognosezeitraums steigt der Energiebedarf, wegen der wachsenden Anzahl an Solarsystemen, wieder leicht auf knapp 29 PJ an.

Haushaltsgeräte

Mit den Bedarfsdeterminanten lässt sich der Gesamtenergieverbrauch fortschreiben. das Ergebnis der Berechnung ist in **Abbildung 2-25** dargestellt.

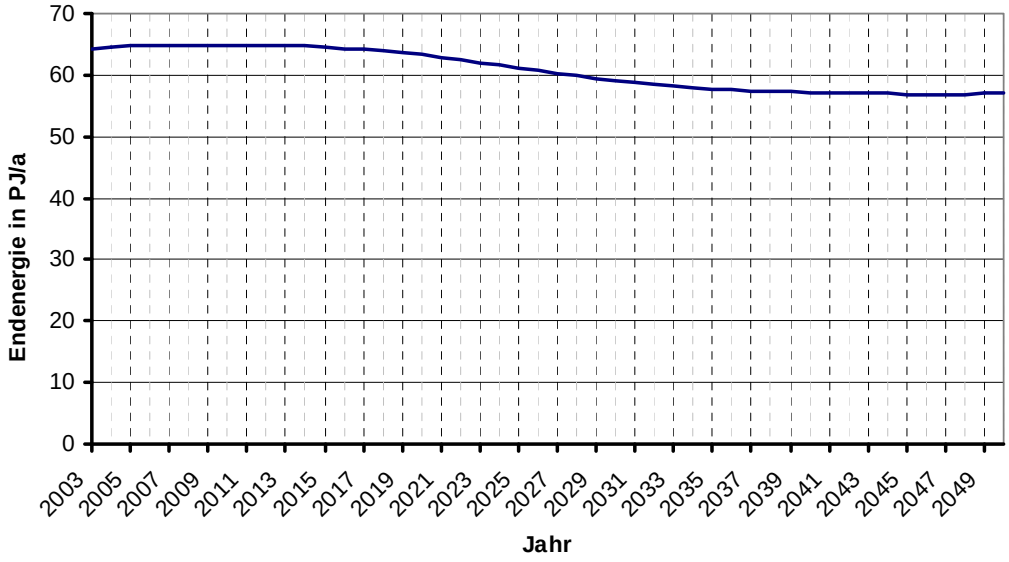

Abbildung 2-25: *Fortschreibung des Verbrauchs an mechanischer Energie der Haushalts- und Kleingeräte*

Nach einem leichten Anstieg des Energieverbrauchs von ca. 64,2 PJ im Jahr 2003 auf etwa 64,9 PJ im Jahr 2010 nimmt der Energieverbrauch, bedingt durch die höhere Geräteeffizienz und die Abnahme der Bevölkerung, bis zum Jahr 2050 auf knapp 57 PJ ab.

2.1.3.6 Information und Kommunikation

In der **Abbildung 2-26** ist der prognostizierte Endenergieverbrauch an Strom dargestellt.

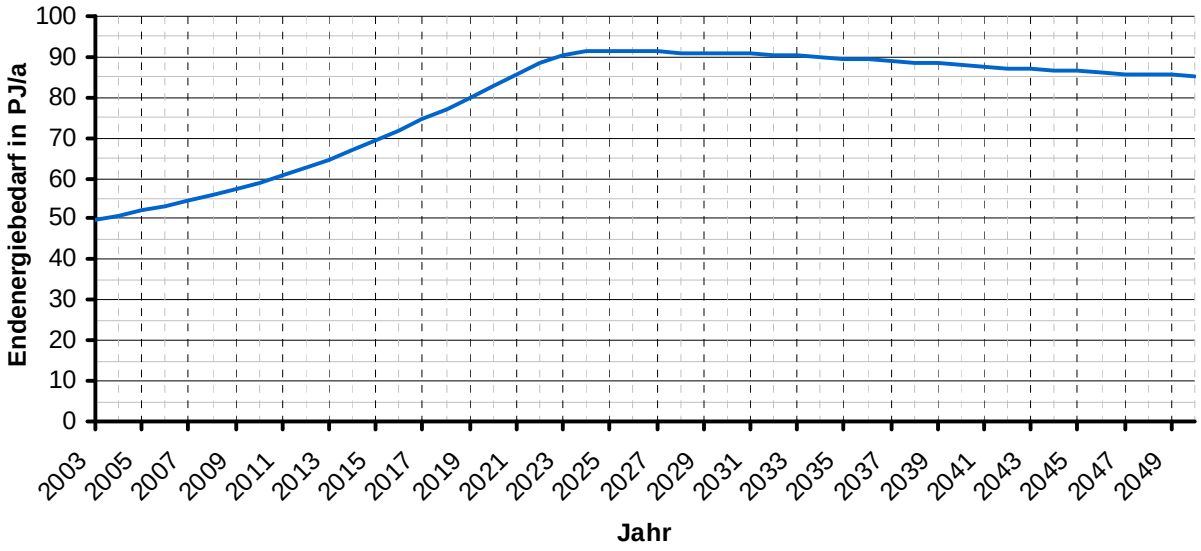

Abbildung 2-26: *Entwicklung des Energiebedarfs im Bereich IuK*

Der Endenergiebedarf steigt im Szenario 1 bis etwa zum Jahr 2025 an. Dies ist durch die steigenden Gerätezahlen bedingt. Auf der anderen Seite wird unterstellt, dass sich die Effizienz anfangs nur moderat steigert und später, etwa ab 2030 dem Energiebedarfsanstieg wirksam entgegenwirkt. Der Endenergiebedarf wird nach der Prognose von etwa 49,8 PJ in 2003 bis auf ca. 85,3 PJ in 2050 ansteigen.

2.2 Entwicklung im Sektor GHD

2.2.1 Maßgebliche Bedarfsdeterminanten

Im Folgenden sollen die grundlegendsten Bedarfsdeterminanten für den Sektor GHD kurz vorgestellt werden. Für detailliertere Ausführungen zu den sozioökonomischen Rahmendaten sei auf Kapitel 1 verwiesen, jedoch soll an dieser Stelle eine kompakte Gegenüberstellung von Bevölkerungs- und Beschäftigtenentwicklung vorgenommen werden (vgl. **Abbildung 2-27**). Die Entwicklung der Gesamtbeschäftigung in Deutschland (rote Linie) stellt für den Sektor GHD keine Bedarfsdeterminante dar, soll dem Betrachter jedoch als Hilfe dienen, um die zunehmende Bedeutung des Sektors für die deutsche Gesamtbeschäftigung einfacher erfassen zu können. Während diese im Betrachtungszeitraum um mehr als 17 % zurückgeht, nimmt die Anzahl der GHD-Beschäftigten nur um etwa 9,5 % ab. Der schraffierte Bereich markiert unter den Beschäftigten des Sektors jene, die in büroähnlichen Betrieben, dem beschäftigungsstärksten Teilbereich, tätig sind.

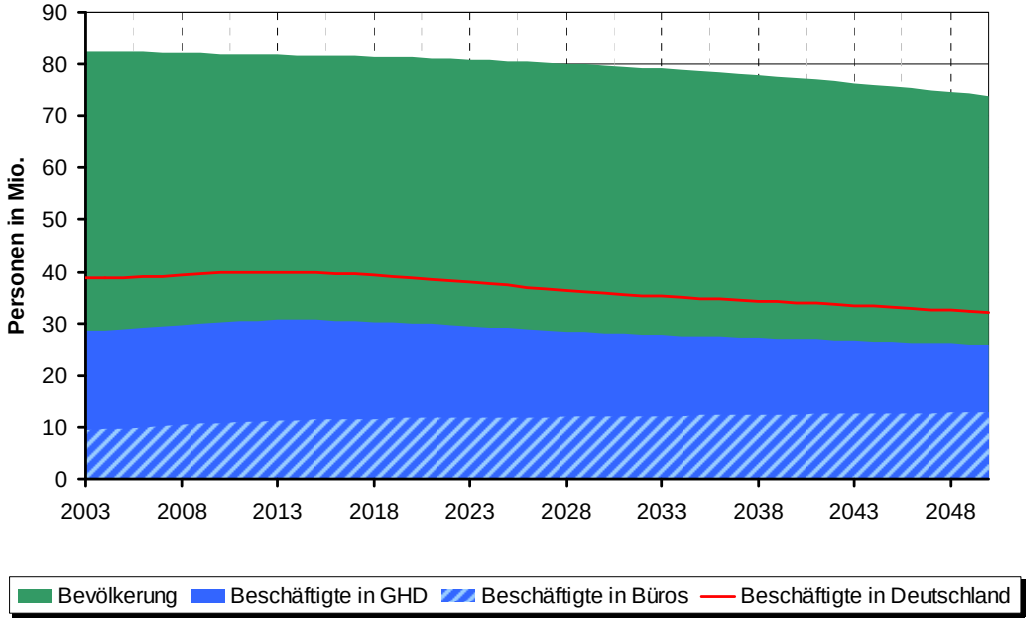

Abbildung 2-27: *Entwicklung der Bevölkerung und Beschäftigung in Deutschland bis 2050 /IFO 09/, /eigene Berechnungen/*

Neben Bevölkerungs- und Beschäftigtenentwicklung stellt vor allem die beheizte gesamtsektorale Fläche eine wichtige Bedarfsdeterminante dar. Diese findet in die Berechnungsmodelle fast aller Anwendungen Eingang.

Als Leitparameter für die Fortschreibung der sektoralen Gesamtfläche wird die Beschäftigtenentwicklung des Sektors GHD herangezogen. Der historische Verlauf der vergangenen Jahre zeigt, dass das Verhältnis Fläche/Beschäftigter weitestgehend auf gleichem Niveau bleibt – im Durchschnitt etwa 40,4 m²/Beschäftigter. Lediglich durch konjunkturelle Schwankungen ergeben sich geringe Abweichungen in beide Richtungen. Für das Referenzszenario wird daher angenommen, dass sich dieses Verhältnis auch in

Zukunft nicht ändern wird. Daraus folgt die in **Abbildung 2-28** dargestellte gesamtsektorale Flächenentwicklung.

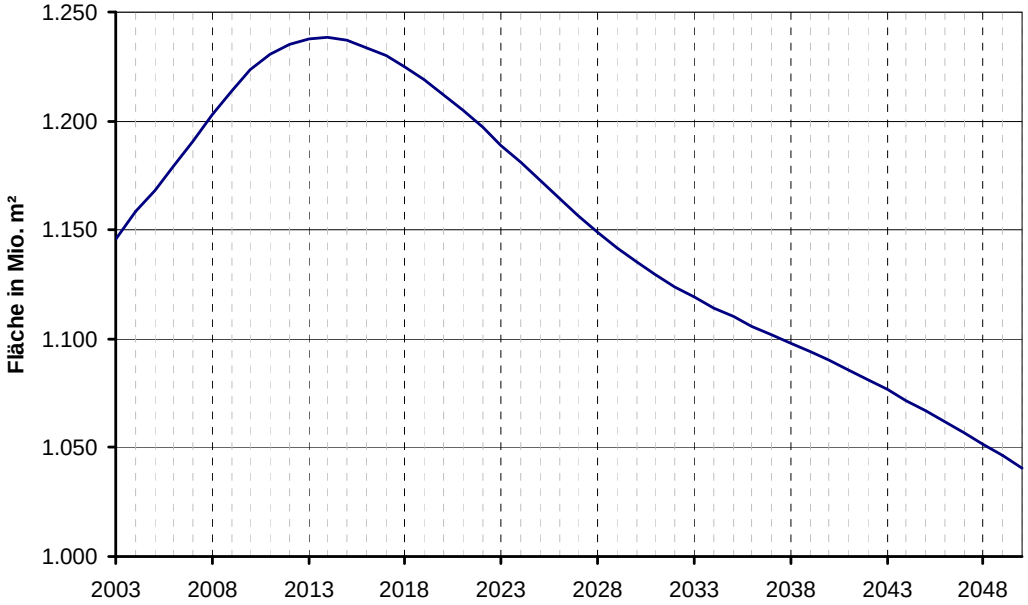

Abbildung 2-28: *Entwicklung der beheizten sektoralen Fläche*

Bezüglich der Entwicklung anwendungsspezifischer Bedarfsdeterminanten – ebenso hinsichtlich des Nutzerverhaltens und der Wirkungsweise der oben genannten Determinanten – sei an dieser Stelle auf das jeweils entsprechende Unterkapitel im direkten Anschluss verwiesen.

2.2.1.1 Raumwärme

Der Raumwärmebedarf ist die Differenz aus den Wärmeverlusten und den inneren und solaren Wärmegewinnen eines Gebäudes. Die Transmissions- und Lüftungswärmeverluste folgen aus dem im Gebäudemodell hinterlegten sektoralen Gebäudebestand und dessen bauphysikalischen Eigenschaften (vgl. Kapitel 2.2.2.0).

Die Wärmegewinne werden hinsichtlich ihrer Entstehung in innere und solare Wärmegewinne unterschieden. Hierbei folgen die solaren Gewinne aus den gerichteten Fensterflächen der Gebäude und entwickeln sich somit analog den Verlusten entsprechend dem Gebäudemodell. Die inneren Gewinne entsprechen den nutzbaren Wärmeeinträgen der übrigen Anwendungsbereiche (Prozesswärme/Warmwasser, mechanische Energie, IuK und Beleuchtung) sowie der von Menschen innerhalb der thermischen Hülle abgegebenen Wärme. Entsprechend finden neben der Beschäftigtenzahl auch indirekt alle Bedarfsdeterminanten der anderen Anwendungsbereiche in die Raumwärmebereitstellung Eingang.

Im Referenzszenario wird bis zum Ende des Untersuchungszeitraumes von einem unveränderten Nutzerverhalten bezüglich der Beheizung ausgegangen.

2.2.1.2 Beleuchtung

Die Entwicklung des Beleuchtungsbedarfs im Sektor GHD ist stark an die sektorale Flächenentwicklung gebunden. Für das Referenzszenario wird von unverändertem Nutzerverhalten ausgegangen.

2.2.1.3 Information und Kommunikation (IuK)

Der Bedarf des Anwendungsbereichs wird prinzipiell durch zwei unterschiedliche Entwicklungspfade bestimmt. Zum einen durch den sektoralen „Eigenbedarf", welcher im Wesentlichen durch die büroähnlichen Arbeitsplätze bedingt ist, zum anderen durch die Nachfrage der privaten Haushalte nach Informationsdienstleistungen, welche sich primär in einem Mehrbedarf an Serversystemen bemerkbar macht.

Bei den Bürogeräten ist der Bedarf an IuK-Dienstleistungen direkt von der Zahl der Beschäftigten in büroähnlichen Betrieben abhängig. Die Ausstattungsgrade im Bürobereich und deren weitere Entwicklung unterscheiden sich gerätespezifisch und sind über entsprechende Wachstumsfunktionen im Modell abgebildet. In **Abbildung 2-29** ist exemplarisch der Verlauf der Ausstattungsgrade für Arbeitsplatzrechner zusammengefasst.

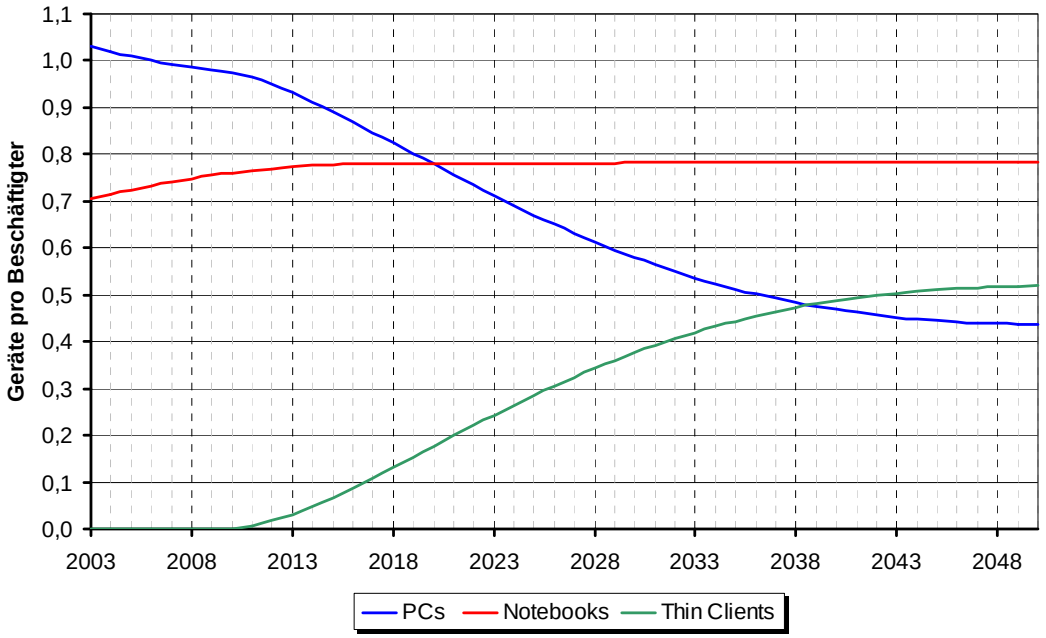

Abbildung 2-29: *Ausstattungsgrade für Arbeitsplatzrechner*

Im Serverbereich stellt die nationale Datennachfrage die Bedarfsdeterminante dar. Diese wird anhand einer geeigneten Wachstumsfunktion simuliert, wobei neben dem fortschreitenden Zugang zum Internet und der Zunahme der durchschnittlich verfügbaren Bandbreite, auch das Onlineverhalten sowie die zunehmende Anwendungsvielfalt bewertet werden müssen. Die Datennachfrage resultiert überwiegend aus dem Bedarf der privaten Haushalte und korreliert daher stark mit der Bevölkerungsentwicklung. Hinzu kommt das Nutzerverhalten der Konsumenten, das in den letzten Jahren durch einen stark steigenden Datenbedarf gekennzeichnet ist. Dieser Trend wird sich – gestützt durch den fortschreitenden Ausbau des Breitbandinternets – weiter fortsetzen. In 2050 ergibt sich im Referenzszenario der 20fache personenspezifische Datenbedarf des

Basisjahres, wobei dieser auch nach dem Ende des Betrachtungszeitraumes weiter zunehmen wird – wenn auch moderater.

2.2.1.4 Mechanische Energie

Haustechnik
Im Bereich der Haustechnik ergibt sich der Bedarf aus der Entwicklung des Gebäudemodells (vgl. Kapitel 2.2.2.0). Eine Fortschreibung anhand der Flächenentwicklung wäre hier unzureichend, da der flächenspezifische Energieverbrauch einer Anwendung – so z. B. bei Heizkreispumpen – in Abhängigkeit der Gebäudegröße mitunter großen Schwankungen unterliegen kann.

Hinsichtlich des Bedarfs raumlufttechnischer Anlagen sind im Gebäudemodell die gebäudespezifischen Luftwechselraten und der Einsatz mechanischer Lüftungsanlagen hinterlegt. Ergänzend zu den Daten aus IKARUS wird angenommen, dass in der ab 2025 eingeführten Baualtersklasse E flächendeckend Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung eingesetzt werden.

Der Bedarf an mechanischer Energie für die Warmwasserverteilung folgt ebenfalls aus dem Gebäudemodell, wobei das Nutzerverhalten über die Entwicklung des Warmwasserbedarfs (vgl. Kapitel 2.2.1.5) berücksichtigt wird.

Der Hilfsenergiebedarf für den Betrieb der Heizkessel ergibt sich aus dem Modell zur Beheizungsstruktur. Im Gegensatz zu einer Berechnung anhand der Heizlasten (Gebäudemodell) können so auch kessellose Systeme in fernwärme- oder elektrisch beheizten Gebäuden berücksichtigt und der sektorale Bedarf entsprechend gemindert werden.

Kältebereitstellung
Im Bereich der Serverkühlungen ist eine Bedarfsentwicklung proportional zum Energiebedarf der Server zu erwarten.

Ein weit verbreiteter Teilbereich der Kältenutzung ist die Nahrungs- und Arzneimittelkühlung. Die Bedarfsdeterminante stellt hier die Bevölkerungsentwicklung dar. Hinzu kommt die Entwicklung des Konsumverhaltens, welches durch einen Trend zur Tiefkühlkost gekennzeichnet ist. Bis 2050 kann mit einer spezifischen Nachfragezunahme von 20 % /IFO 09/ gerechnet werden.

Als bedarfsbestimmende Größe der energetischen Entwicklung sonstiger Kälteanwendungen wird die sektorale Flächenentwicklung herangezogen.

Große Pumpen
Große Pumpen finden sich im Bereich der Ver- und Entsorgung (z. B. Wasserwerke, Klärwerke) sowie in Bädern. Auch ist in diesem Bereich eine Korrelation des Bedarfs mit der Bevölkerungsentwicklung gegeben, weshalb diese als Proportionalfaktor Eingang in die Berechnung findet. Bezüglich des Nutzerverhaltens ist lt. /IFO 09/ beim Wasserbedarf von einer Erhöhung des spezifischen Verbrauchs um 15 % bis 2050 auszugehen (vgl. Kapitel 2.2.1.5), was sich vollumfänglich auf die zu leistende Pumparbeit auswirkt. Im gleichen Maße wird in Bädern zunehmend mehr Pumparbeit nachgefragt.

Sonstige mechanische Energie
Nebst oben aufgeführten Anwendungen findet mechanische Energie in vielen weiteren Bereichen Anwendung. Da sich diese in ihrer Gesamtheit einer detaillierten Analyse entziehen, wird der Bedarf hierfür anhand der sektoralen Flächenentwicklung fortgeschrieben. Eine Änderung des Nutzerverhaltens ist in diesem Bereich nicht absehbar und wird daher in die Berechnungen auch nicht einbezogen.

2.2.1.5 Prozesswärme/Warmwasser

Die Prozesswärme ist ein Anwendungsbereich mit sehr diversifizierter Technikstruktur. Innerhalb dieses Bereichs kann zwischen Warmwasserbereitstellung und sonstigen Prozesswärmeanwendungen unterschieden werden. Die Warmwassererzeugung stellt innerhalb der relativ inhomogenen Prozesswärmebereitstellung den größten Teilbereich dar, der sich darüber hinaus auch relativ homogen hinsichtlich des Wärmeniveaus und der verwendeten Technik zeigt.

Im Sektor GHD stellen die beiden Branchen Bäder und Beherbergung, Gaststätten, Heime mit Abstand die Verbrauchsschwerpunkte hinsichtlich des Warmwasserbedarfs dar. Da in beiden Branchen ein direkter Zusammenhang von Gästen und Verbrauch besteht, ist eine starke Korrelation von Warmwasserbedarf und Bevölkerungsentwicklung gegeben.

Zudem ist von einer Veränderung des Nutzerverhaltens auszugehen. So zeichnet sich ein allgemeiner Trend zu diversen Wellness-Anwendungen ab, der auch einen erhöhten Wasserbedarf mit sich bringt. Eine Erhöhung des Pro-Kopf-Verbrauchs von 15 % bis 2050 ist laut /IFO 09/ anzunehmen.

Die sonstige Prozesswärme entzieht sich einer detaillierten Untersuchung. Da diese jedoch tendenziell in enger Verbindung zum Konsumenten steht (z. B. Gastronomie, Frisöre etc.), wird die Bedarfsentwicklung anhand der Bevölkerungsentwicklung fortgeschrieben. In Szenario 1 wird ein unverändertes Nutzerverhalten angenommen.

2.2.2 Technikstruktur

2.2.2.0 Fortschreibung des sektoralen Modellgebäudebestandes bis 2050

Die Entwicklung des sektoralen Energiebedarfs ist im Wesentlichen mit der Entwicklung der Gebäudelandschaft verbunden. Insbesondere in den Anwendungsbereichen mechanische Energie, Beleuchtung und Raumwärme besteht ein direkter Zusammenhang zwischen der Entwicklung des Endenergieverbrauchs und der des sektoralen Gebäude- bzw. Flächenbestandes. Die Gebäudetypologie des IKARUS-Projektes und der darauf aufbauende GHD-Modellgebäudebestand stellen hierfür ein aussagekräftiges Analyseinstrument dar.

Die Fortschreibung des Modellgebäudebestandes bis 2050 lässt sich in vier aufeinander aufbauende Bearbeitungsschritte gliedern:

- Fortschreibung des gesamtsektoralen Flächenbestandes (vgl. Kap. 2.2.1)
- Fortschreibung des typgebäudespezifischen Flächenbestandes
- Fortschreibung des baualtersspezifischen Flächenbestandes je Typgebäude
- Sanierungsbetrachtung

Nachfolgend werden diese Bearbeitungsschritte im Einzelnen kurz erläutert.

Fortschreibung des gesamtsektoralen Flächenbestandes
Bezüglich der Ausführungen zur Fortschreibung des gesamtsektoralen Flächenbestandes sei auf Kapitel 2.2.1 verwiesen.

Fortschreibung des gebäudespezifischen Flächenbestandes
Die Bestände der Typgebäude weisen im Untersuchungszeitraum (1995 bis 2003) zum Teil sehr unterschiedliche Entwicklungstrends auf (vgl. Teilbericht I). Entsprechend der Gebäudeeigenschaften bzw. dem Gebäudestandort dominiert entweder der Gebäudezu- oder -rückbau. Bei den Typgebäuden 22 - 28, handelt es sich beispielsweise um DDR-typische Gebäude. Diese sind folglich ausschließlich auf dem Gebiet der neuen Bundesländer vertreten und weisen keine Zubauraten mehr auf. In **Abbildung 2-30** sind diese schraffiert gekennzeichnet.

Um das gebäudespezifische Zu- und Rückbauverhalten in der Szenarienentwicklung zu berücksichtigen, erfolgt zunächst eine Trendextrapolation für jedes der 28 Typgebäude auf Basis der unmittelbaren historischen Entwicklung.

Die so ermittelten Flächenbestände werden anteilig auf den ermittelten gesamtsektoralen Flächenbestand skaliert. In Abbildung 2-30 ist die Entwicklung der berechneten Flächenbestände graphisch dargestellt.

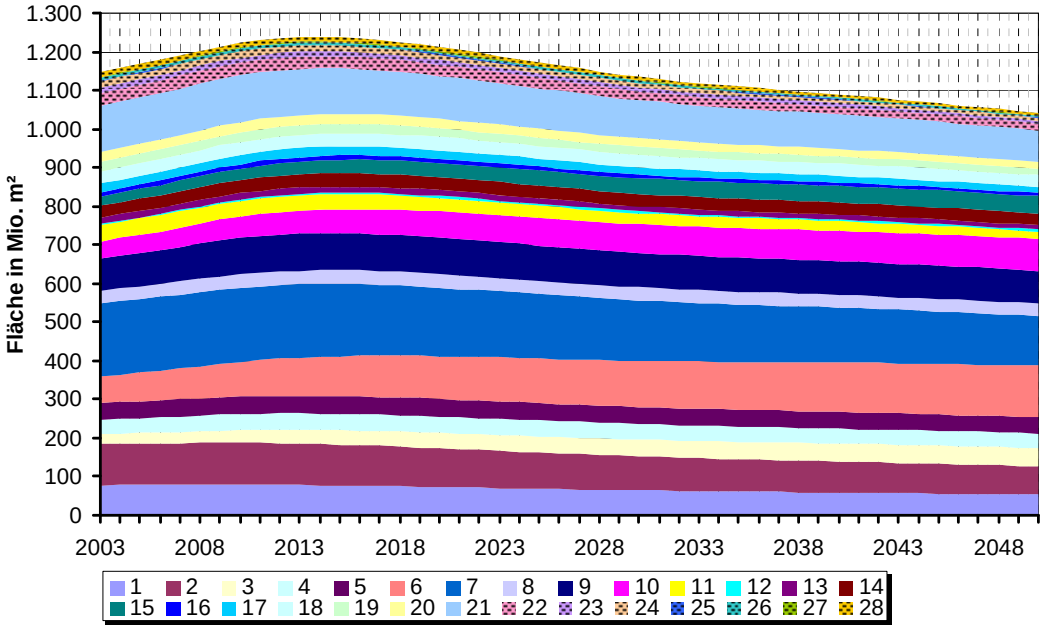

Abbildung 2-30: *Sektorale Flächenbestandsentwicklung nach Typgebäude*

Fortschreibung des baualtersspezifischen Flächenbestandes
Der Gebäudebestand setzt sich aus Bauwerken unterschiedlichen Baualters zusammen. Dies wird in der Gebäudetypologie des IKARUS-Projektes durch die Differenzierung in Baualtersklassen berücksichtigt (vgl. Teilbericht I). Die Zuordnung zu einer Baualtersklasse ist ein wesentliches Kriterium bei der energetischen Bewertung eines Gebäudes, da verschiedene Epochen verschiedene Baustandards, Baustoffe und damit auch unterschiedliche bauphysikalische Eigenschaften aufweisen.

Die Typgebäudebestände weisen bezüglich ihrer baualtersspezifischen Entwicklung mitunter sehr unterschiedliche Trends auf. Aus der Vergangenheitsentwicklung ist der Flächenrückbau der Typgebäude in den Baualtersklassen A bis C, also in den Gebäuden, die bis 1995 errichtet wurden, direkt ermittelbar und kann bis 2050 extrapoliert und auf die Flächenbestände skaliert werden. Die Differenz zur gebäudespezifischen Gesamtfläche sind demnach Bestände, die nach 1995 errichtet wurden und somit zunächst der Baualtersklasse D zugeordnet werden.

Als zeitliche Obergrenze für den Zubau von Gebäuden der Baualtersklasse D wird im Folgenden das Jahr 2024 festgelegt. Ab 2025 können Typgebäude der Baualtersklasse D nur noch zurückgebaut werden. Zweck dieser Festlegung ist es, auch zukünftige Baustandards in der energetischen Bewertung berücksichtigen zu können. In Anlehnung an die IKARUS-Gebäudetypologie erfolgt ab 2025 der weitere Zubau in der hier neu eingeführten Baualtersklasse E (2025-2050).

Abbildung 2-31 veranschaulicht den erläuterten Sachverhalt beispielhaft anhand der nach Baualtersklassen (BAK) differenzierten Flächenentwicklung des Typgebäudes 1 bis 2050.

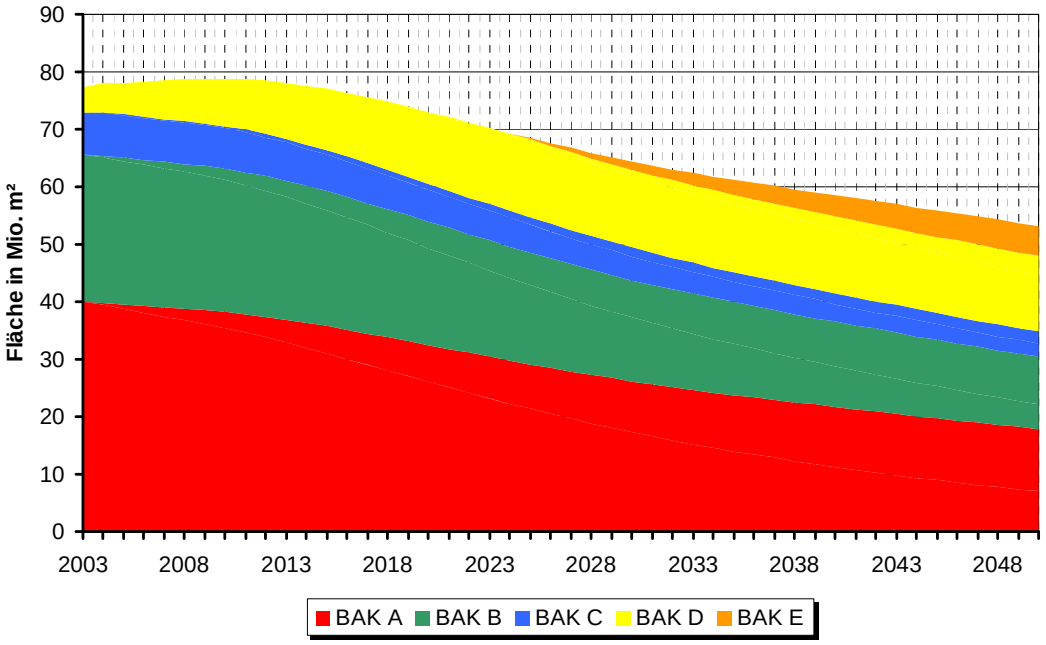

Abbildung 2-31: *Nach Baualtersklassen differenzierte Flächenentwicklung des Typgebäudes 1*

Sanierungsbetrachtung

Neben dem Baualter müssen die Gebäude- bzw. Flächenbestände auch dahingehend differenziert werden, ob sie sich im sanierten oder im unsanierten Zustand befinden, da dies entscheidenden Einfluss auf die energetische Charakteristik hat. Gewerbliche Gebäude unterliegen mitunter anderen, sehr viel heterogeneren, Lebens- und Sanierungszyklen als Wohngebäude. Dies liegt in der unterschiedlichen Nutzung sowie der Möglichkeit einer Nutzungsänderung der Gebäude begründet.

Gängige Sanierungszyklen, wie sie z. B. für Wohngebäude aus der baulichen Praxis existieren, liegen für den GHD-Gebäudebestand – wegen der unterschiedlichen Arten

der Gebäudenutzung und auch örtlich variierender Anforderungen der Nutzer – nicht vor. Für die durchzuführenden Betrachtungen wird aus diesem Grund auf Annahmen zurückgegriffen, die im Wesentlichen auf Expertenschätzungen und auf Hochrechnungen einzelner Fallbeispiele beruhen. Die wichtigsten Sachverhalte, die den Abschätzungen zugrunde gelegt werden, seien nachstehend kurz erläutert.

Die Sanierungs- und Rückbaurate eines Gebäudebestandes ist vor allem abhängig vom Baualter der Gebäude, und damit auch indirekt von der Qualität der baulichen Substanz. Je länger ein Gebäude steht, desto größer ist in der Regel die Wahrscheinlichkeit, dass entweder saniert oder abgerissen wird. In der Bundesrepublik besteht jedoch die Besonderheit, dass gerade Gebäude der ersten Nachkriegsjahre und der Wirtschaftswunderzeit zum Teil erhebliche bauliche Mängel aufweisen. Dies ist bei der Einschätzung der baualtersspezifischen Sanierungsentwicklung zu berücksichtigen.

Weitere Aspekte sind die rechtlichen Bestimmungen des Denkmalschutzes, die besonders die Gebäude der Baualtersklasse A betreffen. Oft wird bei diesen Gebäudearten von umfangreichen Sanierungsmaßnahmen abgesehen, da die zusätzlichen Kosten, die durch die verpflichtende Denkmalpflege entstehen, häufig keine vertretbaren Amortisationszeiten ermöglichen. Gebäudebestände auf dem Gebiet der neuen Bundesländer, die während der DDR Zeit errichtet wurden, weisen erfahrungsgemäß eigene Sanierungscharakteristiken auf, da diese im ursprünglichen Zustand häufig nicht dem Anforderungsprofil potenzieller Nutzer entsprechen.

Grundsätzlich wird davon ausgegangen, dass Gebäude eine Mindestnutzungsdauer von 25 Jahren aufweisen, bevor sie für eine Sanierung in Betracht kommen. Das heißt, dass die Gebäude der Baualtersklasse D erst ab 2021 saniert werden. Die Baualtersklassen A–C erfüllen diese Bedingung bereits im Ausgangsjahr 2003.

Für die Festlegung der Sanierungsraten werden das Baualter sowie der Standort der Typgebäude als Kriterium herangezogen (Gebiet der neuen Bundesländer). Eine Differenzierung hinsichtlich der Gebäudenutzung kann hierbei nicht erfolgen, da keine Aussagen bezüglich der wahren Nutzung existieren. Um auch das zunehmende Gebäudealter zu berücksichtigen, werden die Sanierungsraten der Gebäudebestände einer Baualtersklasse über den Betrachtungszeitraum stetig angehoben. Die Beschreibung auf Basis einer Verteilungsfunktion muss hierbei ausbleiben, da IKARUS keine jahresscharfen Informationen über Bauaktivitäten bereitstellt.

Ferner ist zu berücksichtigen, dass auch sanierte Gebäude im Betrachtungszeitraum einem Rückbau unterliegen werden. Da vermutet werden kann, dass die Qualität der baulichen Substanz sanierter Gebäude nicht an die neu errichteter Gebäude heranreicht, kann, im Gegensatz zu neu erbauten Gebäuden, davon ausgegangen werden, dass bereits 25 Jahre nach erfolgter Sanierung ein ca. fünfprozentiger Bestandsrückbau erfolgt ist. Unter Berücksichtigung dieser Hypothese wird das mittlere Rückbauverhalten sanierter Gebäudebestände durch eine geeignete Verteilungsfunktion modelliert.

Zur Veranschaulichung der vorangestellten Erläuterungen ist in **Abbildung 2-32** exemplarisch die Flächenentwicklung des Typgebäudes 1 nach Baualtersklassen grafisch dargestellt.

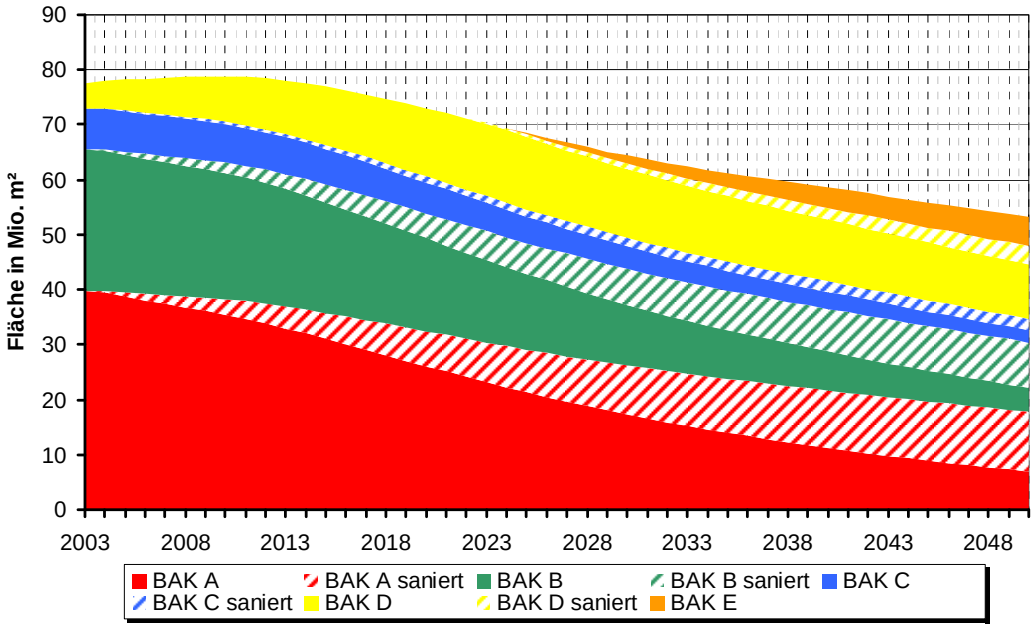

Abbildung 2-32: *Flächenentwicklung des Typgebäudes 1 unter Berücksichtigung der jeweiligen Gebäudesanierung in den Baualtersklassen*

Da die Entwicklung anwendungsspezifischer Eigenschaften des Gebäudebestandes nur im jeweiligen Kontext relevant ist, sei an dieser Stelle auf das jeweils entsprechende Unterkapitel im direkten Anschluss verwiesen.

2.2.2.1 Entwicklung der Beheizungsstruktur

Die Fortschreibung der sektoralen Beheizungsstruktur erfolgt analog der in Teilbericht I dargelegten Vorgehensweise auf Grundlage des Gebäudemodells. Das Modell liefert hierbei Aussagen über:

- Zuwachs von Heizlasten durch Zubau von Gebäuden
- Wegfall von Heizlasten durch Abriss von Gebäuden
- Änderung von Heizlasten durch Sanierung

Die Entwicklung der Heizlasten im Gebäudebestand ist in **Abbildung 2-33** graphisch dargestellt. Zu den Leistungsklassen LK 1 bis LK 5, die der Einteilung des Kaminkehrerhandwerks entsprechen, kommt ab 2025 noch die Leistungsklasse LK 0 hinzu. In diese fallen alle Gebäude mit einer Heizlast von unter 4 kW.

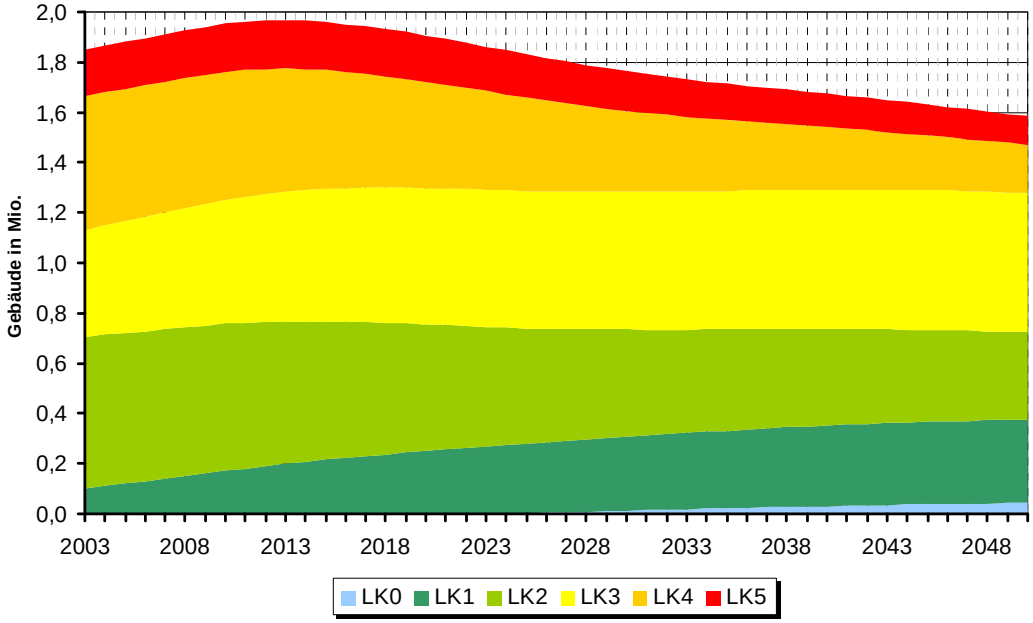

Abbildung 2-33: *Zeitliche Entwicklung der Heizlasten im Gebäudebestand*

Das technische Ausfallverhalten der Heizsysteme und die daraus resultierenden Neuinstallationen finden mittels typischer Verteilungsfunktionen, die aus den historischen Bestandszahlen abgeleitet sind, in das Modell der Beheizungsstruktur Eingang. Des Weiteren werden auch im Rahmen von energetischen Gebäudesanierungen auszutauschende Kessel gemäß den Vorgaben aus dem Gebäudemodell berücksichtigt.

Informationen zur Entwicklung der Marktanteile lassen sich aus der Historie der neu installierten Anlagen der letzten Jahre ableiten und unter Gesichtspunkten der Energieträgerverfügbarkeit fortschreiben.

Das sektorale Deckungspotenzial von Biomasse folgt der sukzessiven Erschließung bisher nicht genutzter Biomassepotenziale in Deutschland. In Kombination mit der rückläufigen Entwicklung des Raumwärmebedarfs nimmt der Anteil der Biomassekessel an den Systeminstallationen somit bis 2050 auf über 25 % zu. Da Biomasse vorrangig eingesetzt wird, beziehen sich die weiteren Angaben jeweils auf den verbleibenden, um den Anteil der Biomasse reduzierten Markt.

Für Fernwärme wird angenommen, dass sich die Installationen von derzeit 16 % auf einen Marktanteil (Systeme nach Abzug der Biomassekessel, vgl. oben) von 30 % ab 2020 erhöhen werden. Da der Urbanisierungsgrad auf den weiteren infrastrukturellen Ausbau einschränkend wirkt, ist von einem darüber hinaus gehenden Ausbau im Bestand trotz der Möglichkeit eines Anschluss- und Benutzungszwanges (EEWG) nicht auszugehen.

Der Anteil der elektrisch betriebenen Heizsysteme an den Neu- bzw. Ersatzinstallationen wird in den Leistungsklassen LK 1 bis LK 5 mit konstant 2 % (Systeme nach Abzug der Biomassekessel, vgl. oben) veranschlagt. In Leistungsklasse 0, also in Gebäuden mit einer maximalen Heizlast unter 4 kW, wird erwartet, dass aus ökonomischen Gründen in etwa der Hälfte der Fälle ein elektrisches Heizregister zur Deckung des verbliebenen Raumwärmebedarfs eingesetzt wird.

Bei Öl und (vor allem) Gas ist über alle Leistungsklassen hinweg ein – wenn auch unterschiedlich stark ausgeprägter – Trend zu Brennwertgeräten erkennbar. Bei Gas wird sich die Brennwerttechnik in Abhängigkeit der Leistungsklasse zwischen 2025 und 2040 vollständig gegen konventionelle Geräte durchgesetzt haben. Bei Öl hingegen ist aufgrund der wesentlich komplexeren Technik (saures Kondensat, Korrosion, …) von einer maximalen Marktdurchdringung mit Brennwertgeräten von etwa 50 % ab 2020 zu rechnen. Das Verhältnis von öl- zu gasbefeuerten Systemen variiert dabei je nach Leistungsklasse zwischen 1:4 und 1:1.

Unter Berücksichtigung der Installationszahlen und der Heizlastentwicklung im Bestand ergibt sich die in **Abbildung 2-34** dargestellte Entwicklung der Deckungsbeiträge der Energieträger am sektoralen Bedarf.

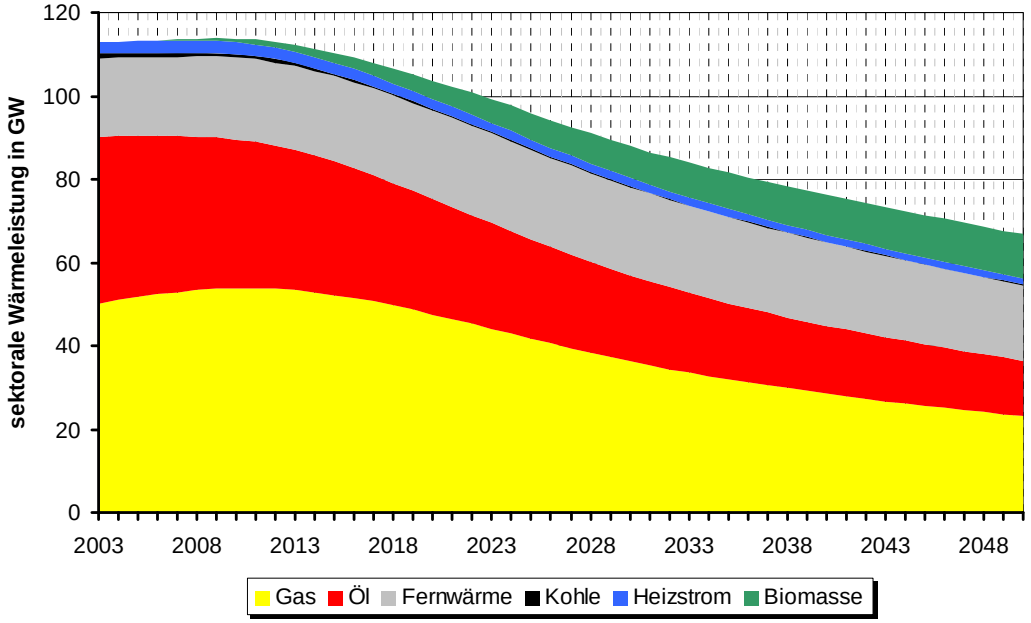

Abbildung 2-34: *Beiträge der Energieträger an der Deckung der sektoralen Heizlast*

Bei der technologischen Weiterentwicklung wird ebenfalls in die sechs Leistungsklassen unterschieden. Um die Weiterentwicklung der Heizsysteme in das Modell einzubinden, werden die Anlagennutzungsgrade der zu installierenden Heizsysteme anhand geeigneter Wachstumsfunktionen über den Untersuchungszeitraum entsprechend dem individuellen Entwicklungsstand der einzelnen Systeme und Leistungsklassen angehoben. Bis 2050 erhöht sich der Gesamtnutzungsgrad im Bestand von ca. 81 % (2003) auf 95 % (vgl. **Abbildung 2-35**). Diese Entwicklungstendenz ergibt sich im Wesentlichen aus dem verstärkten Einsatz von Brennwerttechnologie im Bereich der öl- und gasbefeuerten Heizsysteme.

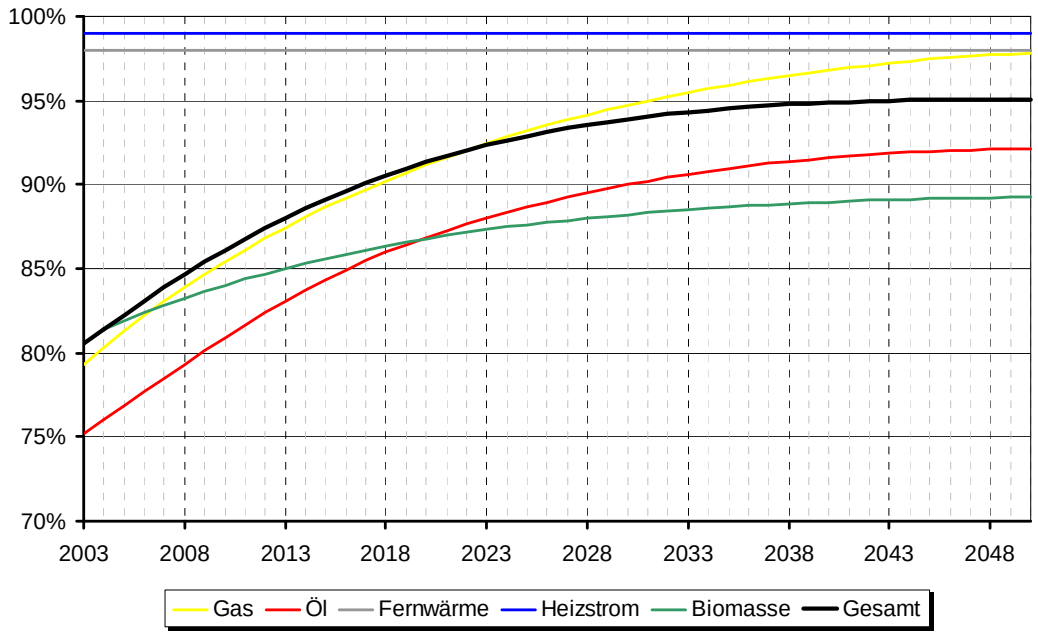

Abbildung 2-35: *Entwicklung der mittleren Energieträgernutzungsgrade im Bestand über den Betrachtungszeitraum*

2.2.2.2 Entwicklung der Beleuchtungstechnik und ihrer strukturellen Anteile

Um den Energieverbrauch für Beleuchtungsaufgaben abschätzen zu können, ist ein Ausblick in die zukünftige Technikstruktur des Anwendungsbereichs notwendig. Nachstehend wird hierzu zunächst auf ausgewählte Technologietrends und Optimierungsmöglichkeiten in diesem Anwendungsbereich eingegangen und deren jeweilige Potenziale erläutert.

Ausgewählte Optimierungsmöglichkeiten im Beleuchtungsbereich

Insbesondere im Bereich der glühfadenbasierten Leuchtmittel besteht erhebliches Optimierungspotenzial, welches durch den konsequenten Einsatz von Kompaktleuchtstofflampen kurzfristig erschlossen werden kann. Da die anfänglich vorhandenen Einschränkungen (Farbwiedergabe, Einbaugröße, Dimmbarkeit) inzwischen weitgehend überwunden sind, sind es derzeit vor allem psychologische Gründe, die den flächendeckenden Einsatz verschleppen. Im Vergleich zur klassischen Allgebrauchslampe benötigen Kompaktleuchtstofflampen nur rund ein Fünftel der Energie /WES 08/. Im Rahmen der Ökodesign-Richtlinie (EbP-RL) der Europäischen Union wurde das schrittweise Verkaufsverbot von Glühlampen ab September 2009 festgelegt. Demnach dürfen spätestens ab 2012 keine Allgebrauchslampen mehr in den Handel gebracht werden. Der durch Glühlampen gedeckte Beleuchtungsanteil wird in den kommenden Jahren daher rasch auf nahezu null zurückgehen.

Bei der Halogenbeleuchtung lassen sich durch die Substitution herkömmlicher Halogenlampen durch IRC-beschichtete[1] bis zu 30 % der elektrischen Energie einsparen. Bei IRC-Halogenlampen wird auf den Lampenkolben eine Beschichtung aufgebracht, die einen Teil der emittierten Infrarotstrahlung zurück auf die Wendel reflek-

[1] IRC = Infrared Reflective Coating.

tiert. Hierdurch muss weniger elektrische Energie zugeführt werden, um die Wendel auf der notwendigen Betriebstemperatur zu halten /OSR 08/.

Zukünftig kann auch mit einem verstärkten Einsatz von weißen LED-Leuchtmitteln gerechnet werden. Diese bieten zunächst Optimierungspotenzial in den Anwendungsgebieten, die derzeit den Glüh- und Halogenlampen vorbehalten sind. Später dürfte jedoch davon auszugehen sein, dass auch Flächenbeleuchtungen auf Leuchtdiodenbasis Anwendung finden werden. Weiße LEDs sind eine relativ neue Alternative im Beleuchtungsbereich. Derzeit sind Lichtausbeuten von über 80 lm/W möglich /BUT 08/. Aufgrund der raschen technologischen Entwicklung sind mittelfristig weitere Verbesserungen der Lichtausbeute zu erwarten.

Durch die Nutzung elektronischer Vorschaltgeräte (EVG) kann der Energieverbrauch von Beleuchtungssystemen mit Leuchtstofflampen reduziert werden. Im Gegensatz zu konventionellen Vorschaltgeräten (KVG) ermöglichen elektronische Vorschaltgeräte das Betreiben der Lampen mit hochfrequenter Wechselspannung. Dadurch wird neben einem flimmerfreien Betrieb auch eine höhere Lichtausbeute erreicht. Durch die drossellose Ausführung treten zudem deutlich weniger Verluste im Vorschaltgerät auf. Die Leistungsaufnahme der Systeme wird um mehr als 15 % reduziert. Die Vorschaltgeräte-Richtlinie der Europäischen Union regelte die stufenweise Rücknahme von konventionellen Vorschaltgeräten vom Markt, wodurch der Verkauf von konventionellen Vorschaltgeräten seit 2005 verboten ist /ZEE 01/. Aufgrund der langen Lebensdauern von 50.000 h und mehr ist jedoch anzunehmen, dass sich KVG-betriebene Leuchten noch einige Zeit im Bestand finden werden.

Auch werden derzeit noch nicht alle Leuchten mit Dreibandenleuchtstofflampen betrieben, die aufgrund besonderer Leuchtstoffe die in der Quecksilberentladung erzeugte UV-Strahlung besonders effektiv in Licht umsetzen. Dadurch erhöht sich die Lichtausbeute gegenüber Standard-Leuchtstofflampen um bis zu 35 % /TÖN 08/. Darüber hinaus weisen Leuchtstofflampen eine sehr gute Farbwiedergabe auf. Unter Berücksichtigung der technischen Lebensdauern von Leuchtstofflampen kann jedoch davon ausgegangen werden, dass innerhalb der nächsten 10 – 15 Jahre der Technologiewechsel nahezu vollständig erfolgt sein wird.

Neben der Effizienz der Leuchtmittel ist auch der Nutzungsgrad der Leuchten von großer Bedeutung, da durch verbesserte Lichtführung die Verluste in den Leuchten reduziert werden können. Moderne Mikroprismenleuchten erreichen Leuchtennutzungsgrade von über 95 % in Verbindung mit T5-Leuchtstofflampen, wodurch lediglich etwa 5 % des von den Leuchtmitteln emittierten Lichtes in der Leuchte in Wärme umgesetzt wird. Gegenwärtig werden jedoch zumeist noch Systeme mit Spiegelrasterleuchten standardmäßig installiert, deren Nutzungsgrad im Bereich von etwa 70 bis 80 % liegt.

Fortschreibung der sektoralen Beleuchtungsstruktur

Für die Modellbildung der zukünftigen Strukturen im Beleuchtungsbereich ist es erforderlich, die leuchtmittelspezifischen Anteile am sektoral bereitgestellten Licht zu isolieren, fortzuschreiben und mit den bedarfsbestimmenden, sozioökonomischen Rahmendaten zu verknüpfen. Die Fortschreibung geschieht auf Basis geeigneter Wachstumsmodelle, deren Parameter an die technischen Eigenschaften der Lampen und Leuchten angepasst sind. Für die Einführung und die Durchdringung des Bestandes mit

innovativen Technologien, deren Etablierung aus heutiger Sicht wahrscheinlich erscheint, müssen zur Bestimmung des Innovationspotenzials und der Entwicklungsdynamik geeignete Annahmen hinzugezogen werden, die auf einer objektiven Bewertung des aktuellen Entwicklungsstandes und der Historie basieren.

Grundsätzlich kann auch strukturell zwischen glühfadenbasierten (Temperaturstrahlern) und leuchtstoffbasierten Leuchtmitteln (Entladungslampen) unterschieden werden. Die Grundbeleuchtung, die etwa 86 % des Lichts in GHD bereitstellt, wird fast ausschließlich durch Leuchtstofflampen unterschiedlichster Bauformen und Größen erzeugt.

Da konventionelle Vorschaltgeräte seit 2005 nicht mehr vertrieben werden dürfen und im Bestand folglich sukzessiv durch elektronische Vorschaltgeräte ersetzt werden, ist – unter Berücksichtung der technischen Lebensdauern – damit zu rechnen, dass diese ab etwa 2030 praktisch keine Anwendung mehr finden.

Bei der Akzentbeleuchtung kommen überwiegend glühfadenbasierte Leuchtmittel zum Einsatz. Diese eignen sich aufgrund ihrer Strahlungscharakteristik (Spektralanteile) und der daraus resultierenden Farbwiedergabe sowie ihrer Leuchtdichteverteilung in vielen Einsatzgebieten besser als Leuchtstofflampen. Überwiegend werden hier Halogenlampen eingesetzt, jedoch liegen keine detaillierten Informationen über den sektoralen Anteil an der Lichtbereitstellung vor, so dass dieser unter Berücksichtigung der übrigen Beleuchtungssysteme auf 10 % abgeschätzt werden kann. Die verbleibenden ca. 4,1 % des sektoral bereitgestellten Lichtes (vgl. Teilbericht I) werden folglich durch Allgebrauchslampen erzeugt. Diese finden sich beispielsweise in der Gastronomie und Hotellerie in Bereichen, in denen durch gedämpftes Licht ein ruhiges, gemütliches Ambiente erzeugt werden soll.

Entsprechend den gesetzlichen Vorgaben wird die Allgebrauchslampe in den kommenden Jahren sukzessive weniger zur sektoralen Beleuchtung beitragen und schließlich bis etwa 2015 vollständig durch Kompaktleuchtstofflampen substituiert sein. Folglich steigt der Anteil leuchtstofflampenbasierter Systeme am bereitgestellten Licht auf rund 90 %.

Auch ist anzunehmen, dass sich LEDs im Bereich der Akzentbeleuchtung etablieren werden. Derzeit ist der Anteil von LED-Leuchtsystemen marginal, jedoch ist aufgrund der technologischen Entwicklung der letzten Jahre davon auszugehen, dass in absehbarer Zeit konkurrenzfähige Produkte auf dem Markt erhältlich sein und diese sukzessiv die heute vorherrschenden, energieintensiven Halogensysteme in der Akzentbeleuchtung verdrängen werden.

In **Abbildung 2-36** sind die leuchtmittelspezifischen Anteile am bereitgestellten Licht zur Visualisierung der erläuterten Veränderungen in der sektoralen Beleuchtungssituation für die Stützjahre graphisch dargestellt.

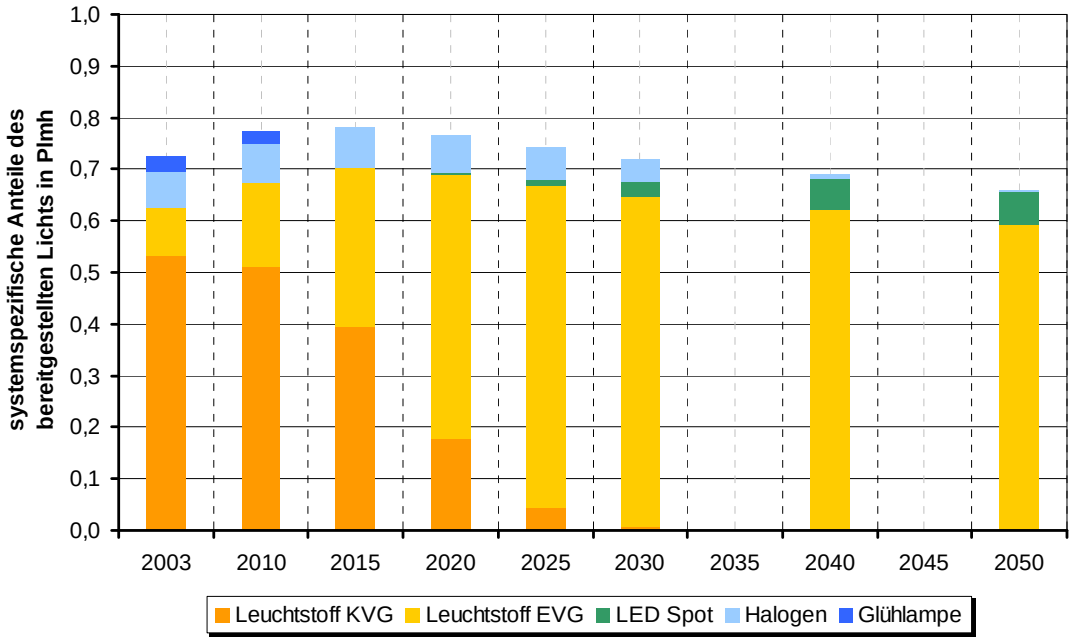

Abbildung 2-36: *Entwicklung der systemspezifischen Anteile des bereitgestellten Lichts*

2.2.2.3 Entwicklung von Informations- und Kommunikationstechnologien (IuK)

Der Bereich der Informations- und Kommunikationstechnologien ist gegenwärtig der Anwendungsbereich mit der größten Dynamik. Die Investitionszyklen sind kurz und die technologische Entwicklung schreitet äußerst zügig voran.

Grundsätzlich können im IuK-Bereich die folgenden drei technologischen Entwicklungstrends konstatiert werden, welche die zukünftige Entwicklung des Anwendungsbereichs dominieren werden:

- Steigerung der Rechenleistung
- Ausbau der IT-Systeme (insbesondere der Serversysteme) sowie
- Effizienzsteigerungen in der Systemtechnik

Um die energetische Entwicklung möglichst exakt abschätzen zu können, sind Kenntnisse über die Wirkungspotenziale derzeitiger und abzusehender Technologietrends erforderlich.

Die Diskussion jener, als signifikant identifizierten Technologiepfade des Anwendungsbereichs hinsichtlich der Substitutions- und Entwicklungspotenziale führte zu den in **Tabelle 2-9** zusammengefassten Systemlösungen, die als relevant eingeschätzt werden.

Tabelle 2-9: *Relevante Technologiepfade im Anwendungsbereich IuK*

	Systemlösungen		
	hardwaretechnisch	softwaretechnisch	strukturell
Server	- energieoptimierte Komponenten (z. B. Mehrkernprozessoren, SSDs, teillastoptimierte Netzteile)	- Virtualisierung	- Einsatz von Blade-Servern - Konsolidierung
Clientsysteme	- energieoptimierte Komponenten (z. B. Mehrkernprozessoren, SSDs, teillastoptimierte Netzteile) - Verringerung der Leerlauf und Standby-Verluste durch technische Optimierung	- Energiesparmodi	- Einsatz von Notebooks - Server-Based-Computing
Übrige IuK-Geräte	- Energieoptimierte Komponenten	- Energiesparmodi	- Einsatz von Multifunktions- und Gruppengeräten - Etablierung neuer System-lösungen (z. B. LCD-Monitore)

Auf eine ausführlichere Darstellung der aufgezeigten Technologietrends soll an dieser Stelle verzichtet werden, da diese für das grundlegende Verständnis und die Nachvollziehbarkeit der weiteren Ausführungen entbehrlich ist. Vor dem Hintergrund des wachsenden Informationsflusses sei jedoch erwähnt, dass insbesondere der Servervirtualisierung und -konsolidierung ein hohes Innovations- und Einsparpotenzial zugeschrieben werden kann.

In **Abbildung 2-37** ist die Vorgehensweise für die Modellierung der Technikstruktur im Anwendungsbereich IuK schematisch dargestellt. Die technische Entwicklung der Systeme und Komponenten sowie die Etablierung innovativer Technologien werden anhand geeigneter Wachstumsfunktionen abgebildet, wobei der individuelle Entwicklungsstand eines jeden Systems berücksichtigt wird.

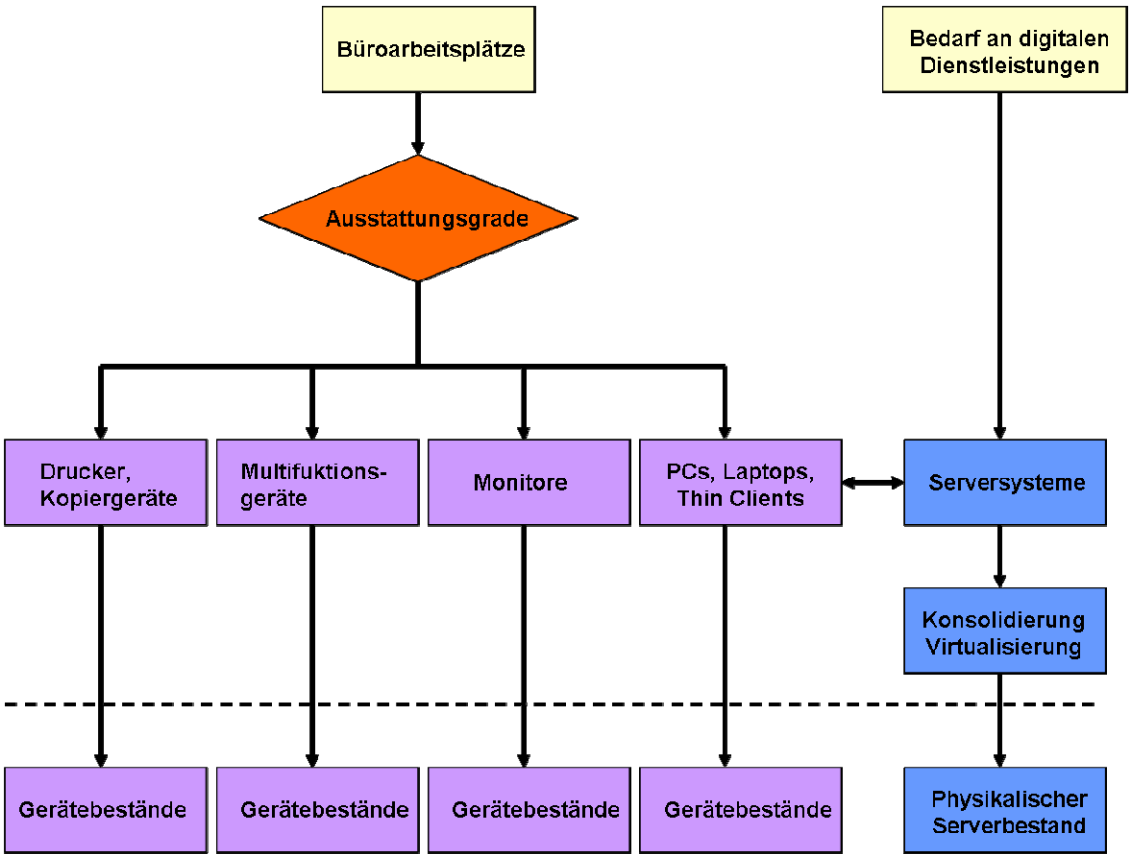

Abbildung 2-37: *Vorgehensweise für die Modellierung der Technikstruktur im Anwendungsbereich IuK*

In **Abbildung 2-38** ist die Bestandsentwicklung von Druckern und Kopiergeräten dargestellt. Deutlich zu erkennen ist die zunehmende Verdrängung von Tintenstrahldruckern durch günstige Laserdrucker, so dass diese bis 2020 auf Nischenanwendungen zurückgedrängt werden und ihre energetische Relevanz verlieren. Auch reine Kopiergeräte ohne Mehrfachfunktion werden bis 2025 aus dem Büroumfeld in erster Näherung verschwunden sein. Folglich werden ab 2025 nur noch Laserdrucker und Multifunktionsgeräte von energetischer Relevanz sein. Ein Trend zur Zentralisierung spiegelt sich darin wider, dass das Verhältnis von kleinen Tischgeräten zu großen Multifunktionsgeräten abnimmt. Absolut steigen die Zahlen beider Gerätegruppen – aufgrund der Beschäftigungsentwicklung im Bürobereich – an.

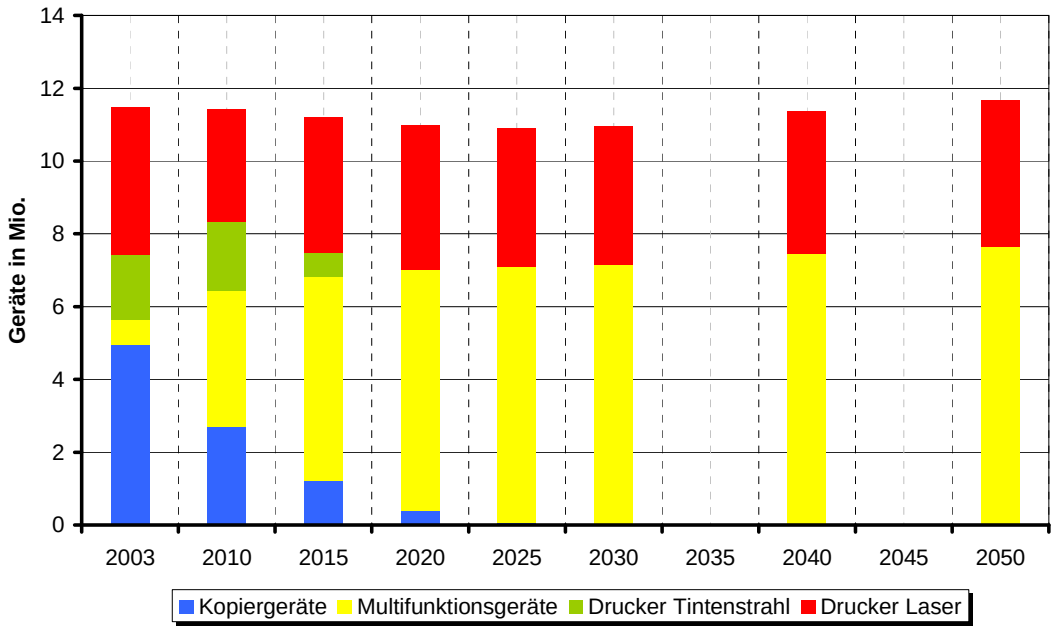

Abbildung 2-38: *Bestandsentwicklung von Druckern und Kopiergeräten*

Abbildung 2-39 zeigt die Entwicklung der Serverbestände unter Annahme eines konservativen Konsolidierungsprozesses (Konsolidierungsrate = 3). Über 90 % der Server im Bestand sind Volume-Server. High-End-Serversysteme stellen dagegen weniger als 1 % des Bestandes. Ab etwa 2015 ist von einer erhöhten Konsolidierungsaktivität auszugehen. Der markante Anstieg der Serverzahlen im ersten Teil des Betrachtungszeitraumes ist insbesondere auf den schnellen Etablierungsprozess des Breitbandinternets zurückzuführen. Eine Entwicklung, die auch in den vergangenen Jahren bereits zu beobachten war. Ferner wird auch durch Server-Based-Computing ein Mehrbedarf an Serversystemen verursacht.

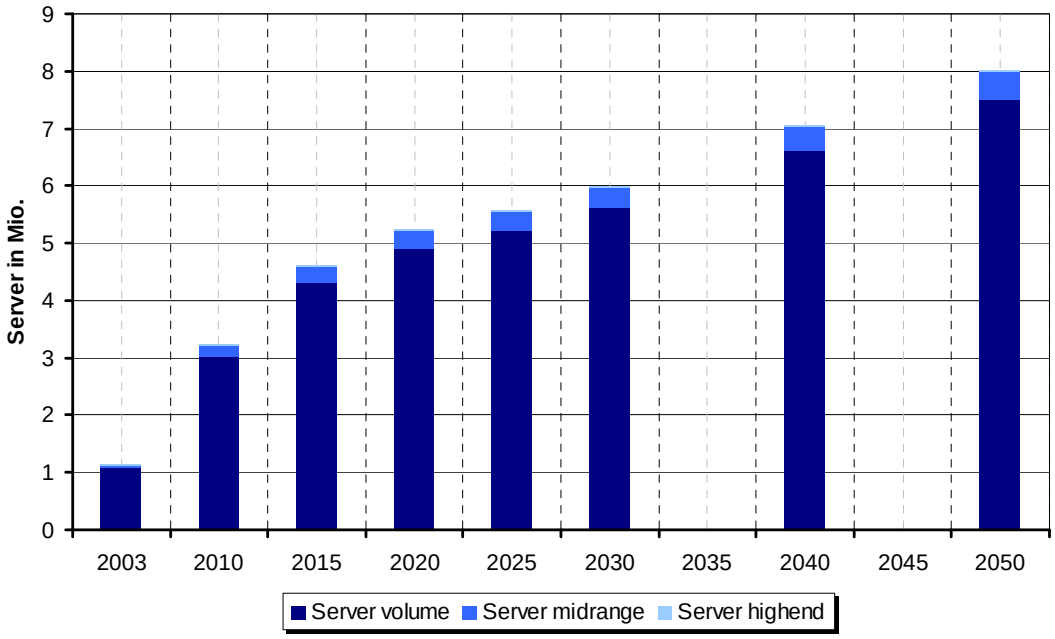

Abbildung 2-39: *Bestandsentwicklung der Serversysteme*

Der strukturelle Entwicklungsprozess im Bereich der Individualrechner und Bildschirme ist aus **Abbildung 2-40** und **Abbildung 2-41** ersichtlich. Der Substitutionsprozess von CRT- durch LCD-Monitore ist beispielhaft für die außergewöhnliche Dynamik des gesamten Anwendungsbereichs. Ein weiterer Substitutionsprozess, der sich in der Darstellung wieder findet, ist die zunehmende Etablierung von Thin Clients, die im Bestand klassische Desktop-PCs verdrängen. Jedoch werden Desktop-PCs nicht vollständig aus dem Bürobereich verbannt werden, da der Einsatz von Thin-Client-Systemen für Unternehmen erst ab einer gewissen Mindestgröße ökonomisch ist. Die Summe aller Individualsysteme wird sich – in der Zunahme von Büroarbeitsplätzen begründet – bis 2050 um etwa 5 Millionen erhöhen.

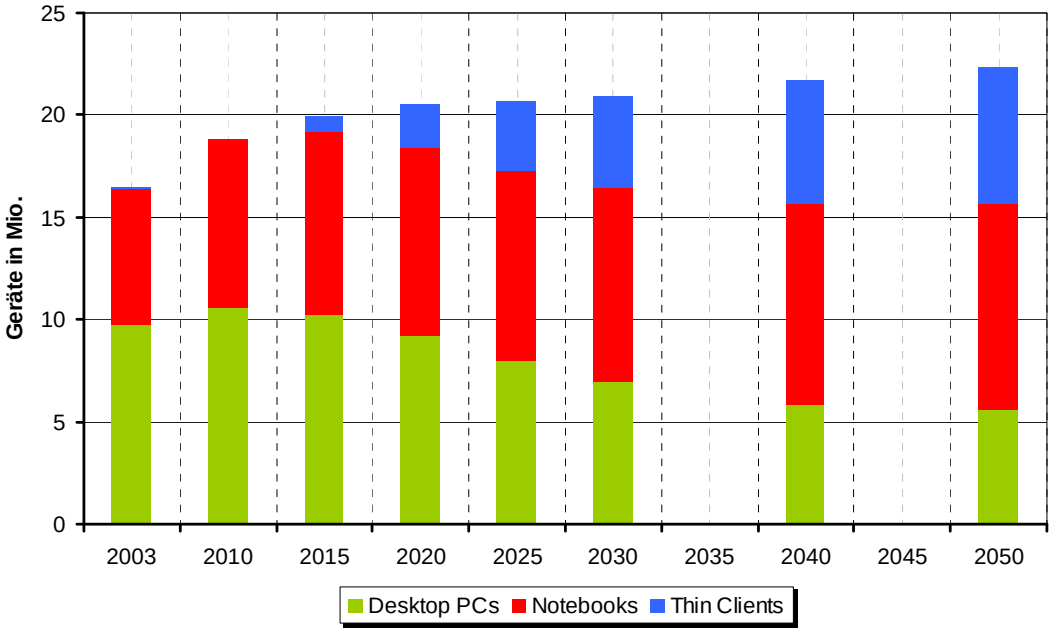

Abbildung 2-40: *Bestandsentwicklung von Individualrechnern*

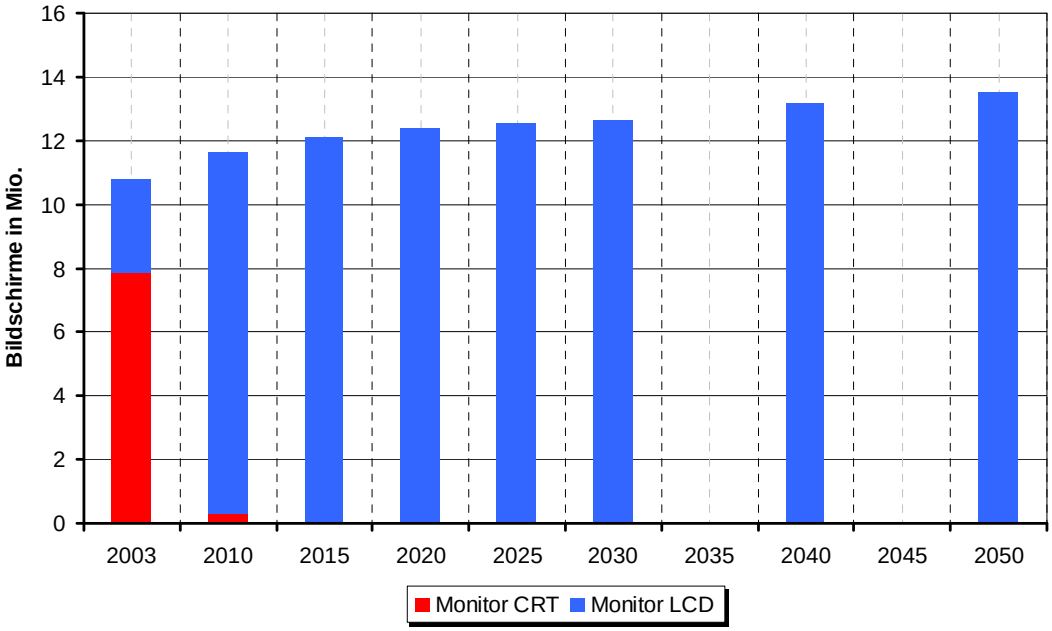

Abbildung 2-41: *Bestandsentwicklung von Bildschirmen*

2.2.2.4 Entwicklung der Technik im Bereich der mechanischen Energie

Im Gegensatz zu den in den Kapiteln 2.2.2.1 und 2.2.2.2 erläuterten Anwendungsbereichen Beleuchtung und IuK sind bei den stationären mechanischen Energieverbrauchern (elektromotorische Anwendungen) derzeit keine grundlegenden Technologieumwälzungen abzusehen. Jedoch ist generell zu erwarten, dass etablierte Systemlösungen stetig weiterentwickelt werden und damit eine erhöhte Energieeffizienz im Verlauf des Betrachtungszeitraums erreicht wird.

Für die Fortschreibung des Energieverbrauchs ist damit primär die Kenntnis über den Umfang der installierten Systeme von Bedeutung. Die Erhöhung der Geräteeffizienz muss anwendungsspezifisch – auf Basis der vorliegenden Potenziale – bewertet werden. Da die eingesetzte Technik in Alter und Struktur zum einen auch innerhalb einer Anwendung mitunter stark differiert und zum anderen auf sektoraler Ebene keine detaillierten Informationen über die jeweiligen Strukturen vorliegen, kann je Anwendung nur eine durchschnittliche Effizienzsteigerung im Bestand angesetzt werden.

Innerhalb der mechanischen Energie kann primär in die Anwendungsbereiche Haustechnik (Raumlufttechnik, Heizkreis- und Warmwasserpumpen sowie Hilfsenergiebedarf für Kessel), Kälteerzeugung (Kühlung von Nahrungsmitteln, Serverkühlung und sonstige Prozesskälte) sowie Großpumpensysteme (öffentliche Bäderbetriebe, Ver- und Entsorgung) differenziert werden. Da jedoch nicht alle motorischen Anwendungen methodisch erfasst werden können, wird für das Verbrauchsspektrum „Sonstige mechanische Energie“, welches sich einer detaillierten Erfassung entzieht, ein durchschnittlicher Entwicklungsverlauf angenommen.

Im Bereich der Haustechnik kann zwar der Bedarf anhand des Gebäudemodells detailliert analysiert und fortgeschrieben werden, hinsichtlich der Alterstruktur der verwendeten Pumpen, Lüfter und Antriebe kann jedoch keine detaillierte Aussage getroffen werden. Daher wird für die energetischen Betrachtungen von einer durchschnittlichen jährlichen Effizienzsteigerung von 0,5 % im Bestand ausgegangen.

Im Bereich der Kältebereitstellung kann ebenfalls in mehrere Teilbereiche unterschieden werden. Im Bereich der Serverkühlung ist eine detaillierte Fortschreibung der Effizienzentwicklung nicht möglich, da in Rechenzentren oftmals Speziallösungen erforderlich sind oder die eingesetzten Systeme im Laufe der Zeit stets erweitert bzw. provisorisch angepasst wurden. Allgemein lässt sich für Rechenzentren jedoch attestieren, dass die Kühlung nur unzureichend an die jeweilige Aufgabe angepasst ist. Hieraus resultiert hinsichtlich der Effizienz ein großes Optimierungspotenzial, was im Modell in einer jährlichen Effizienzsteigerung des gesamten Bestandes von 1 % Berücksichtigung findet.

Ein weiterer Teilbereich der Kälteanwendung ist die Nahrungs- und Arzneimittelkühlung. Die ausschöpfbaren Effizienzpotenziale werden durch die im Vordergrund stehende Nutzerfreundlichkeit und den ständigen Kundenbetrieb stark reduziert, was sich hemmend auf eine Energieoptimierung auswirkt. Dennoch werden sich auch hier im Verlauf des Betrachtungszeitraums sukzessiv Teile des an sich großen theoretischen Optimierungspotenzials erschließen, weshalb eine jährliche Effizienzsteigerung von 0,5 % unter Berücksichtigung der technischen Nutzungsdauern plausibel erscheint.

Bei den sonstigen Kälteanwendungen ist eine Analyse und Fortschreibung des Energieverbrauchs schwierig, da zwar der Energieverbrauch, nicht jedoch dessen anwendungs-

spezifische Zusammensetzung bekannt ist. Folglich fällt es auch schwer, etwaige Optimierungsmöglichkeiten zu quantifizieren. Hinsichtlich der Effizienz wird im Rahmen eines konservativen Ansatzes von einer moderaten Entwicklung ausgegangen, die mit einer jährlichen Effizienzsteigerung von 0,5 % berücksichtigt wird.

Große Pumpensysteme, welche vornehmlich Einsatz in Bäderbetrieben und in der öffentlichen Ver- und Entsorgung (z. B. Klär- und Wasserwerke) finden, bilden den dritten großen thematischen Anwendungsbereich innerhalb der mechanischen Energieanwendung. Hinsichtlich der Effizienzoptimierung kann davon ausgegangen werden, dass größere Pumpensysteme bereits weitestgehend energieoptimiert sind und daher ein geringeres Optimierungspotenzial bergen als beispielsweise die Pumpen der Haustechnik. Dennoch kann durch verbesserte Regelung auch hier eine moderate Effizienzsteigerung von jährlich 0,25 % erreicht werden.

In 2003 können rund 35 % des Energieverbrauchs im Anwendungsbereich der mechanischen Energien keiner der drei vorgenannten Gruppen direkt zugeordnet werden. Hierbei handelt es sich um Anwendungen im öffentlichen und infrastrukturellen Bereich, wie z. B. Rolltreppen, automatische Türen oder auch Aufzugsanlagen. Da sich solche Systeme in der Regel durch eine relativ lange technische Lebensdauer charakterisieren, ist auch nur eine moderate Effizienzsteigerung von jährlich 0,5 % zu erwarten.

2.2.2.5 Entwicklung der Technik zur Prozesswärme-/Warmwasserbereitstellung

Die Prozesswärme ist ein Anwendungsbereich mit sehr diversifizierter Technikstruktur. Innerhalb dieses Bereichs kann zwischen Warmwasserbereitstellung und sonstigen Prozesswärmeanwendungen unterschieden werden. Die Warmwassererzeugung stellt innerhalb der relativ inhomogenen Prozesswärmebereitstellung den größten Teilbereich dar, der sich darüber hinaus auch relativ homogen hinsichtlich des Wärmeniveaus und der verwendeten Technik zeigt.

Die Warmwassererzeugung lässt sich in zentrale und dezentrale Erzeugungssysteme einteilen. Deren Differenzierung ist bezüglich des Einflusses auf die eingesetzten Energieträger von großer Bedeutung. An dieser Stelle sei auf die Ausführungen in Teilbericht I verwiesen.

Auch in Zukunft werden dezentrale elektrische Systeme weiter ihre Stellung bei der Warmwasserbereitung behaupten können, da sie, gerade bei großen Leitungslängen und geringer Zapfung, eine ökonomisch und ökologisch sinnvolle Alternative darstellen.

Die zentrale Warmwasserbereitstellung erfolgt in den meisten Fällen durch dieselben Kessel wie die Raumwärmebereitstellung, sodass die eingesetzte Technik als identisch betrachtet werden kann. Durch Gewichtung auf die Energieträgerverwendung der zentralen Systeme lässt sich die Erzeugerstruktur entsprechend abbilden und fortschreiben.

Für die Fortschreibung wird ergänzend angenommen, dass bis zur Mitte des Jahrhunderts 5 % des Warmwassers aus zentralen Systemen (ausgenommen Fernwärme) solarthermisch bereitgestellt wird.

Bei der Bereitstellung von Warmwasser muss neben der Erzeugung auch die Entwicklung der verwendeten Speicher und der Verteilung des Warmwassers bewertet werden, da hier nennenswerte Verluste auftreten. Abhängig vom Zapfungsverhalten variieren

die Wärmeverluste in einem weiten Bereich und können im ungünstigsten Fall auch über 80 % betragen. Andererseits finden sich beispielsweise in Bädern auch große Wärmelasten mit relativ effizienten Speicher- und Verteilsystemen. Die derzeitigen Verluste werden daher im Mittel zu 25 % abgeschätzt. Aufgrund der stetigen Verbesserung der Qualität der Speichersysteme und Leitungsnetze im Bestand (durch Sanierung und Neubau), wird für das Referenzszenario eine Verbesserung des Speicher- und Verteilnutzungsgrades auf 80 % bis 2050 angenommen.

Bei den übrigen Prozesswärmeanwendungen ist eine fundierte Analyse der Energieträgerentwicklung aufgrund fehlender Kenntnisse über die Technikstruktur nicht möglich, weshalb in erster Näherung davon ausgegangen wird, dass sich während des Betrachtungszeitraums keine Verschiebungen in der Brennstoffcharakteristik einstellen. In energetischer Hinsicht ist eine proportionale Entwicklung zur Bevölkerung zu erwarten. Um auch die technische Weiterentwicklung der Wärmeerzeuger zu berücksichtigen, wird eine pauschale jährliche Effizienzsteigerung von 0,25 % angenommen.

2.2.3 Endenergieverbrauch

Der sektorale Endenergieverbrauch in GHD nimmt im Betrachtungszeitraum um mehr als 1/3 von 1.540 PJ in 2003 auf knapp unter 1.000 PJ im Jahr 2050 ab. Die größten relativen Einsparungen stellen sich erwartungsgemäß bei der Beleuchtung, dem Anwendungsbereich mit den größten Effizienzpotenzialen, ein. Hier geht der jährliche Energiebedarf um über 70 % zurück.

Absolut geht der Energieverbrauch bei der Raumwärmebereitstellung am stärksten zurück, was schon allein daher rührt, dass die Raumwärmebereitstellung mit Abstand den sektoralen Verbrauchsschwerpunkt bildet (vgl. **Abbildung 2-42**).

Der Rückgang des Energieeinsatzes wirkt sich am stärksten auf die fossilen Energieträger Öl und Gas aus. Diese verlieren im Energieträgermix überproportional, da sie ausschließlich für Wärmeanwendungen genutzt werden und hier in Konkurrenz zu den Regenerativen einer teilweisen Substitution unterliegen. Elektrische Energie wird hingegen auch in weiteren Anwendungen, wie Beleuchtung, IuK und zur stationären Bereitstellung mechanischer Energie (mE) eingesetzt, wo sie nicht sinnvoll durch andere Energieträger substituiert werden kann. Daher geht der Einsatz elektrischer Energie sektoral nur um knapp 16 % auf 410 PJ in 2050 zurück (vgl. **Abbildung 2-43**).

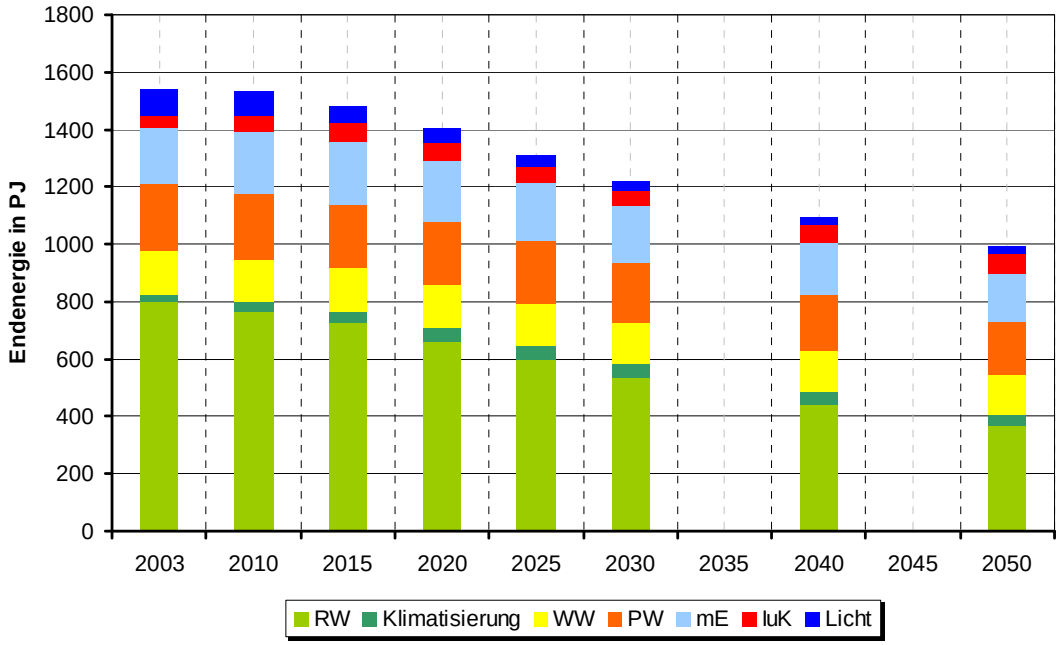

Abbildung 2-42: *Entwicklung des sektoralen Endenergieverbrauchs (nach Anwendungen)*

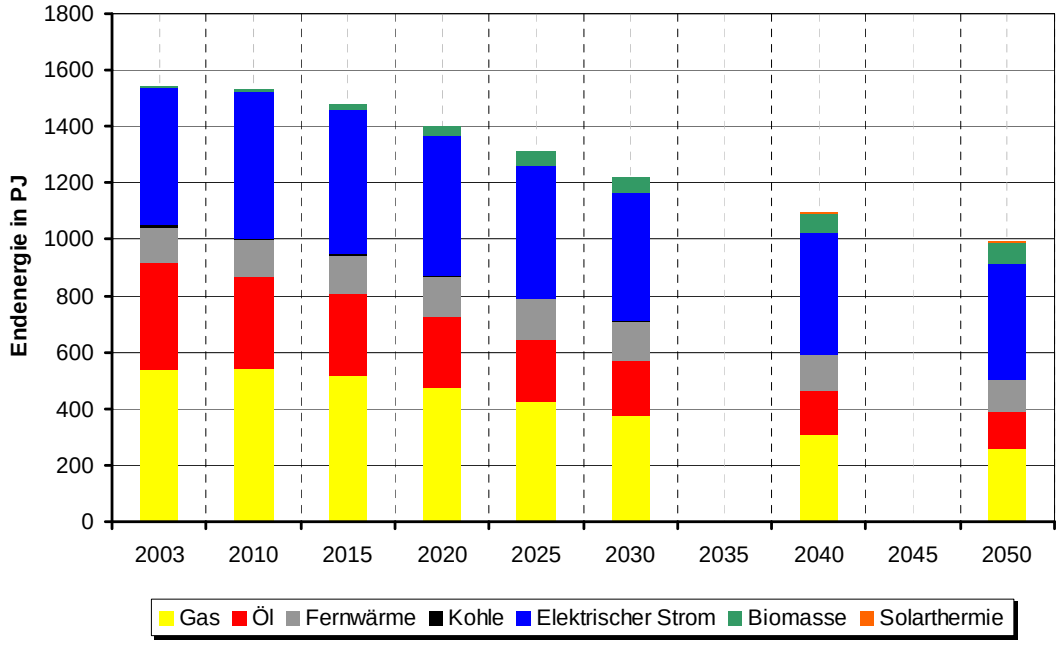

Abbildung 2-43: *Entwicklung des sektoralen Endenergieverbrauchs (nach Energieträgern)*

2.2.3.1 Anwendungsbereich Raumwärme

Der Energieverbrauch für die Raumwärmebereitstellung liegt in 2050 etwa 435 PJ unter dem des Jahres 2003, wie **Abbildung 2-44** zu entnehmen ist. Dieser große absolute Rückgang resultiert zum einen aus der großen energetischen Bedeutung dieses Anwendungsbereichs für den gesamten Sektor. Zum anderen – und darin liegt auch der Grund für den hohen anteiligen Rückgang von mehr als 54 % – wirkt die ständige

Verbesserung des baulichen Wärmeschutzes und der Qualität der Heizsysteme im Bestand stark verbrauchsmindernd, da die Wärmeverluste durch deren Kombination nicht nur einem einzelnen Reduktionsfaktor unterliegen. Ebenso trägt der Rückgang der beheizten sektoralen Fläche um etwa 10 % im Betrachtungszeitraum seinen Teil zur Verbrauchsminderung bei.

Den größten Rückgang unter den eingesetzten Energieträgern verzeichnen mit Abstand Öl und Gas, wohingegen die – in 2003 nicht nennenswert vertretene – Biomasse in 2050 mit ca. 60 PJ zur Raumwärmebereitstellung beiträgt.

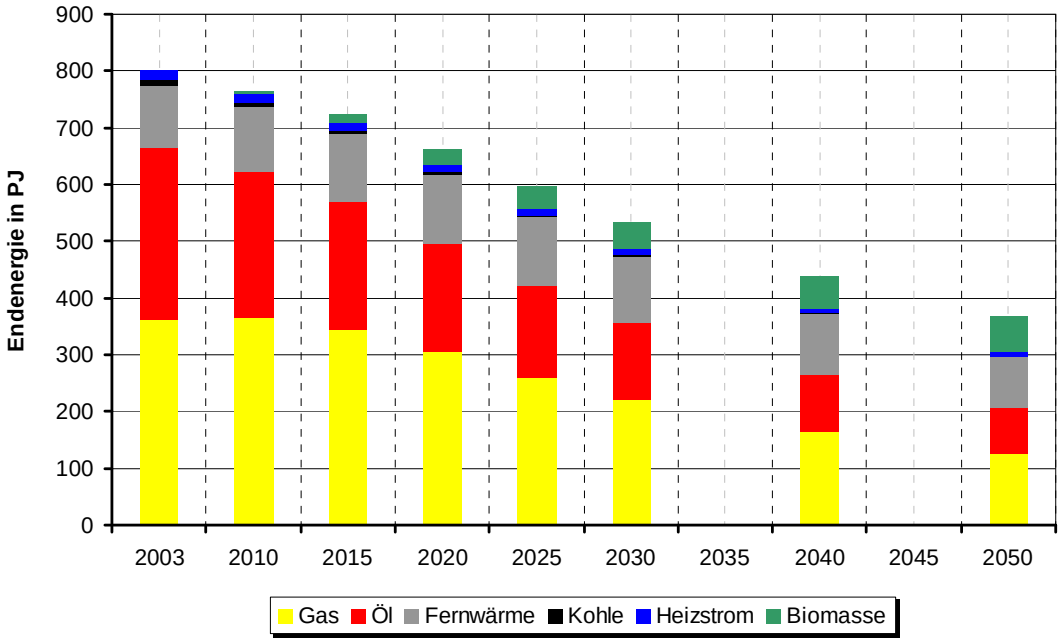

Abbildung 2-44: *Entwicklung des Endenergieverbrauchs für Raumwärme (nach Energieträgern)*

2.2.3.2 Anwendungsbereich Beleuchtung

In **Abbildung 2-45** ist die Entwicklung des Strombedarfs für Beleuchtungsaufgaben aufgetragen. Im Beleuchtungsbereich zeichnet sich im Betrachtungszeitraum ein besonders starker Rückgang des Energieverbrauchs ab. Die signifikante Reduktion in der ersten Hälfte des Betrachtungszeitraumes ist primär der Durchdringung des Bestandes mit effizienterer Technik zuzuschreiben. Gerade in den ersten Jahren resultiert aus dem „Glühlampenausstieg“ ein entsprechend großer Rückgang des Energiebedarfs.

In der zweiten Hälfte des Betrachtungszeitraumes gewinnt – neben der weiter steigenden Effizienz im Bestand – auch der Rückgang der sektoralen Fläche zunehmend an Bedeutung für die Entwicklung des Energieverbrauchs.

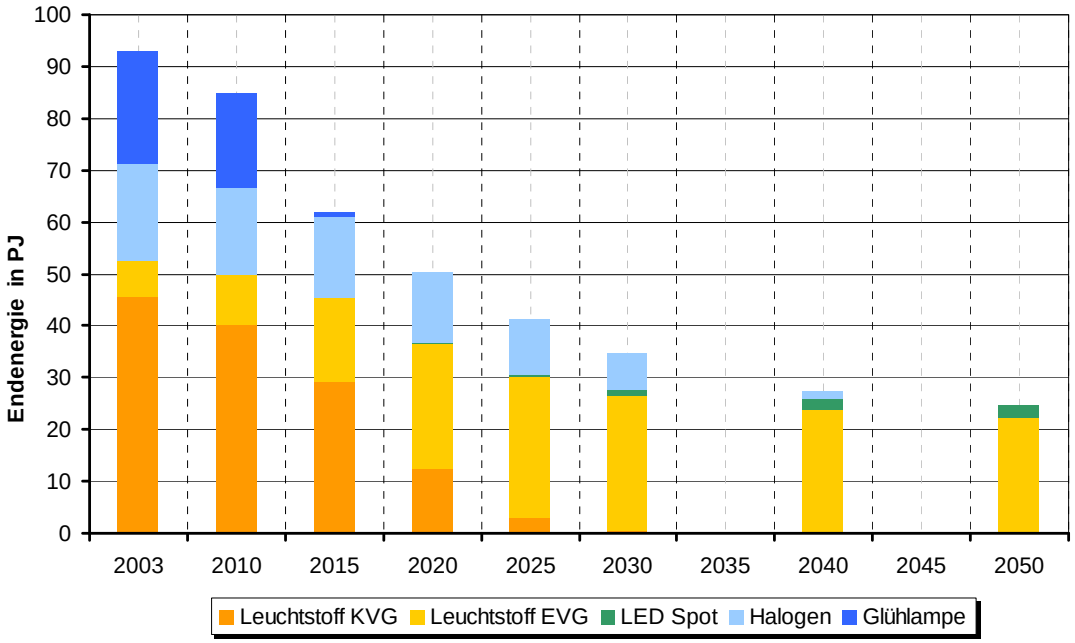

Abbildung 2-45: *Entwicklung des Endenergieverbrauchs für Beleuchtung*

2.2.3.3 Anwendungsbereich IuK

Abbildung 2-46 zeigt die Entwicklung des Endenergieverbrauchs im Anwendungsbereich IuK. Es ist deutlich zu erkennen, dass der Energiebedarf im Wesentlichen vom Einsatz der Serversysteme bestimmt sein wird. Auffällig hierbei ist, dass im ersten Teil des Betrachtungszeitraums ein deutlicher Verbrauchsanstieg auf rund 60 PJ zu erwarten ist. Aufgrund der zunehmenden Konsolidierung des Serverbestandes, die erst ab etwa 2015 zunehmend an Bedeutung gewinnt, stagniert die Verbrauchsentwicklung ab etwa 2020 auf einem Niveau von ca. 60 PJ. Durch die starke Konsolidierung des Bestandes zwischen 2020 und 2030 ist mittelfristig sogar mit einem leichten Rückgang des Verbrauchs zu rechnen. Erst gegen Ende der Konsolidierungsphase steigt der Verbrauch aufgrund der stetig steigenden Datennachfrage weiter an.

Übrige IuK-Geräte spielen in der gesamtenergetischen Bewertung dagegen nur eine untergeordnete Rolle. Ihr Bedarf bleibt über den Betrachtungszeitraum nahezu konstant und ist lediglich minimalen Schwankungen unterworfen. Die im Rahmen des technologischen Fortschritts erzielten Effizienzgewinne der Geräte werden durch die Expansion des Geräteparks stets in etwa kompensiert.

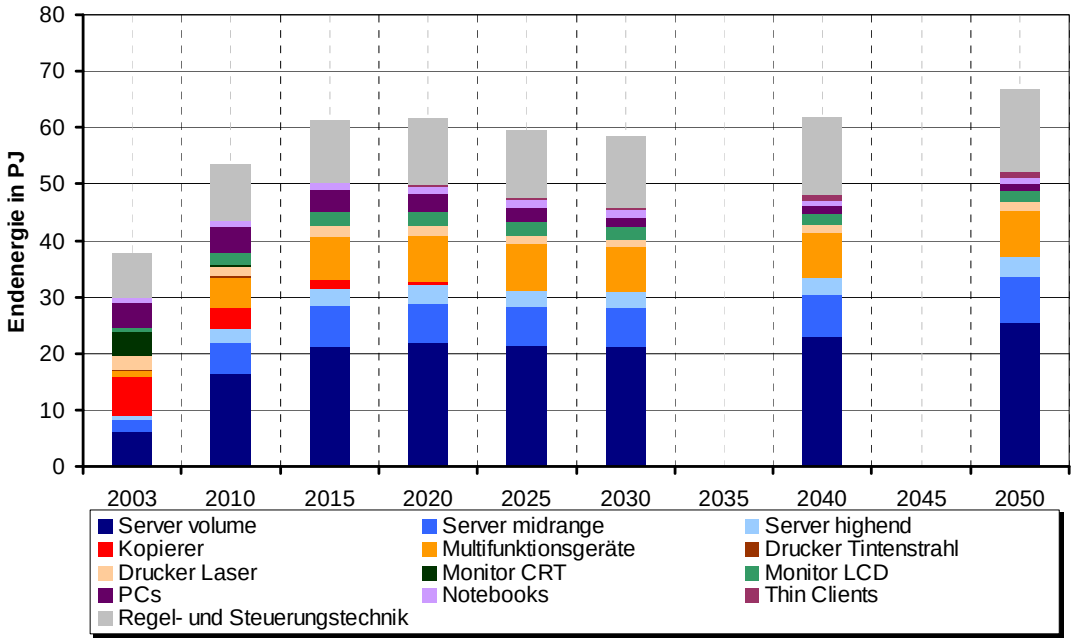

Abbildung 2-46: *Entwicklung des Endenergieverbrauchs für IuK*

2.2.3.4 Anwendungsbereich mechanische Energie

Der Endenergieverbrauch für mechanische Anwendungen steigt in den ersten Jahren, bedingt durch die rasche Expansion im Serverbereich und die erforderliche Kühlung, um knapp 20 PJ bzw. 10 % an. Erst in der Folge zeigt sich eine rückläufige Verbrauchsentwicklung durch effizientere Technik in Kombination mit den beiden rückläufigen Entwicklungen von Bevölkerung und Fläche. Der Verbrauch erreicht in 2050 einen Wert von knapp unter 170 PJ und liegt somit ca. 15 % unter dem Wert des Basisjahres bzw. 23 % unter dem Höchstwert im Jahr 2015 (vgl. **Abbildung 2-47**). Damit verläuft die Entwicklung weit weniger dynamisch als in den vorgenannten Anwendungsbereichen.

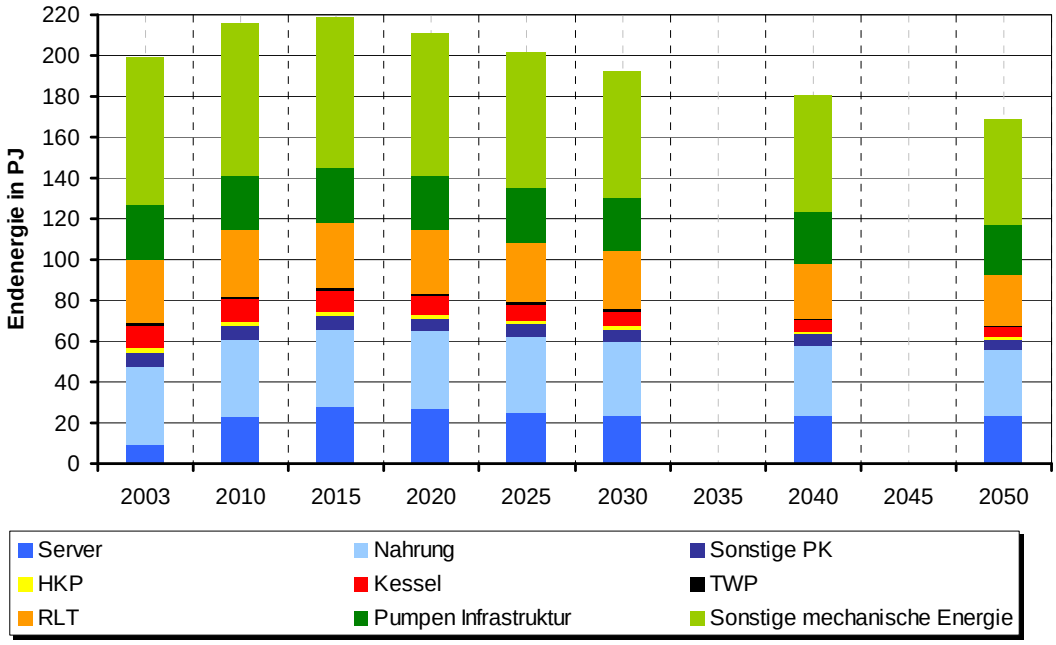

Abbildung 2-47: *Entwicklung des Endenergieverbrauchs für mechanische Energie*

2.2.3.5 Anwendungsbereich Prozesswärme/Warmwasser

Einen noch moderateren Verlauf als der Endenergieverbrauch für mechanische Energie zeigt jener für die Bereitstellung von Warmwasser. Im Betrachtungszeitraum sinkt dieser, trotz steigenden personenspezifischen Wasserbedarfs, kontinuierlich (vgl. **Abbildung 2-48**). In 2050 erreicht er schließlich einen Wert von etwa 136 PJ, womit er gut 10 % unterhalb des Startwertes liegt. Der stärkste Verbrauchsrückgang mit über 50 % ist bei Öl zu verzeichnen, gefolgt von Gas mit knapp 40 %. Der Verbrauchsrückgang bei elektrischer Energie liegt mit nur etwa 7 % unter dem des gesamten Anwendungsbereiches. Dies liegt darin begründet, dass bei der dezentralen elektrischen Wassererwärmung eine Substitution durch andere Energieträger nur dann stattfindet, wenn (z. B. im Rahmen einer Gebäudesanierung) eine zentrale Warmwasserversorgung installiert wird. Entsprechend den Ausführungen zur Technikstruktur (vgl. Kapitel 2.2.2.5) ist dies bei Gebäuden mit großen Leitungslängen und geringer Zapfung jedoch meist nicht sinnvoll. Ein zunehmender Anteil am Verbrauch wird hingegen von den erneuerbaren Energien, die im Basisjahr so gut wie noch nicht vertreten waren, sowie von der Fernwärme gedeckt.

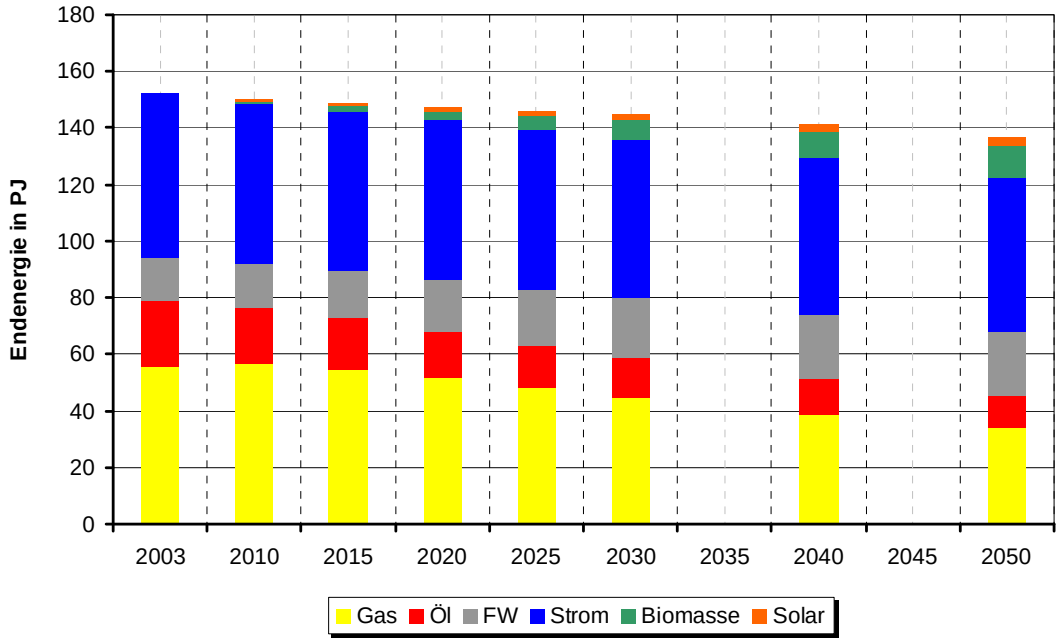

Abbildung 2-48: *Entwicklung des Endenergieverbrauchs für Warmwasser (nach Energieträgern)*

Ein etwas stärkerer, wenn auch ebenso kontinuierlicher, Verbrauchsrückgang zeigt sich bei der energetischen Entwicklung der Prozesswärmeanwendung. Hier ist ein Verbrauchsrückgang um etwa 20 % zu verzeichnen (vgl. **Abbildung 2-49**). Da Fernwärme zur Bereitstellung von Prozesswärme bisher keinen nennenswerten Beitrag liefert und auch Solarthermie in Deutschland lediglich in Nischenanwendungen – und hier nur als Zweitsystem – denkbar ist, findet durch diese keine Energieträgersubstitution statt und der Verbrauchsrückgang verteilt sich nahezu gleichmäßig auf die genutzten Energieträger.

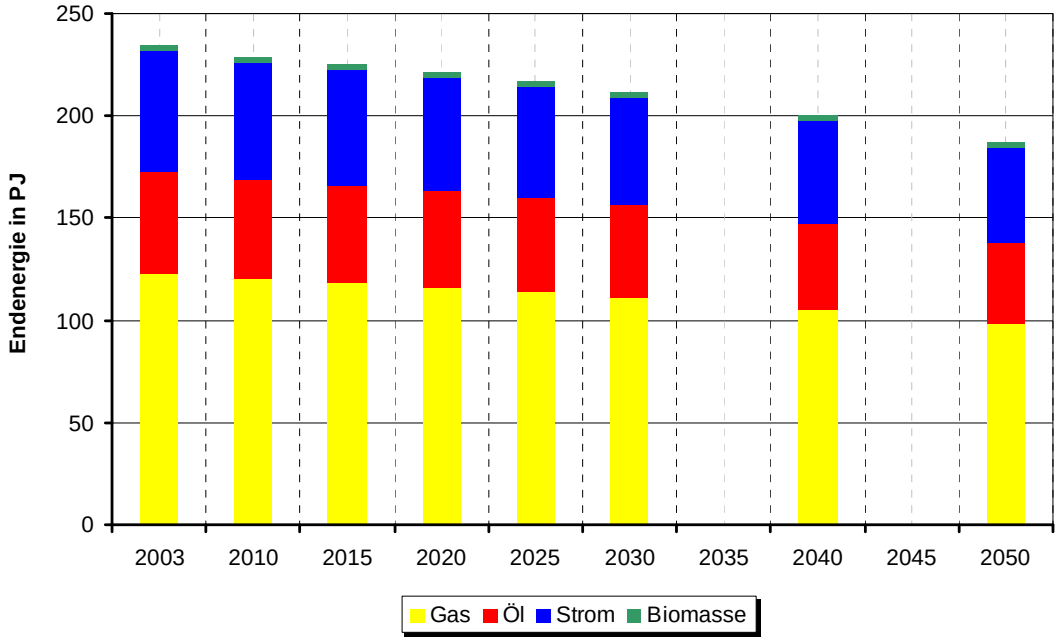

Abbildung 2-49: *Entwicklung des Endenergieverbrauchs für (sonstige) Prozesswärme (nach Energieträgern)*

2.3 Entwicklung im Sektor Industrie

Zur Fortschreibung der Energieverbrauchsstruktur in diesem Sektor wurden der Produktionsindex (PI) und die Produktionsmengen genutzt. Da diese statistisch erfassten Größen den gesamten Sektor umfassen, eignen sie sich deutlich besser als Fortschreibungen auf Basis einzelner Anlagen.

2.3.1 Maßgebliche Bedarfsdeterminanten

2.3.1.1 Methodik der Fortschreibung

Die Fortschreibung basiert auf Daten, die den Energieverbrauch der Industriesektoren in den Jahren von 1995 bis 2004 abbilden. Neben dem Energieeinsatz ist die zweite wichtige Größe der Produktionsindex. Dieser beschreibt die Produktion des jeweiligen Industriesektors. Um den Energieverbrauch für die Zukunft bis in das Jahr 2050 fort zu schreiben, muss zuerst der PI für diesen Zeitraum abgeschätzt werden. Für die Fortschreibung wird er in den Basisdaten jährlich und ab 2005 fünfjährlich ermittelt.

Um den Energieverbrauch bis zum Jahr 2050 prognostizieren zu können, muss zuerst für die vorhandenen Daten eine Ausgleichskurve ermittelt werden. Hierfür wurden drei Möglichkeiten näher betrachtet:

- Die einfachste Methode ist die Beschreibung der Basisdaten mittels spezifischer Energieverbräuche. Diese beinhaltet neben dem Energieverbrauch je produzierter Einheit (b) nur den PI und wird mit der Formel y = b*PI berechnet.
- Die nächste Stufe ist die Aufteilung des Energieverbrauches in einen variablen (b) und einen Grundlastanteil (a). Hier wird dem Umstand Rechnung getragen, dass neben dem Energieverbrauch, der bei der Herstellung eines Produktes auftritt, auch der Verbrauch für Heizung, Kühlung, Warmhaltung etc. berücksichtigt werden muss. Die Formel für diese Ausgleichsgerade lautet: y = a+b*PI. Dieser Term spiegelt jedoch die ständig auftretenden Effizienzveränderungen (c) im Produktionsprozess nicht wider, welche durch Energieeinsparungen, aber auch einen auftretenden Mehrverbrauch durch die Produktion eines qualitativ höherwertigen Produktes hervorgerufen werden. Um diese Vorgänge darzustellen, wird die Formel y = a+b*PI um zwei Komponenten erweitert.
- Es wird ein Effizienzfaktor (1-c) eingeführt, der die jährliche Veränderung im Energieverbrauch abbildet. Je größer c, desto höher ist die jährliche Effizienzverbesserung. Weiter wird davon ausgegangen, dass diese Effizienzveränderung ab dem Jahr 1995 weiterhin jedes Jahr stattfindet (aktuelles Jahr – 1995).

Somit ergibt sich folgende Formel:

$$y = (a + b \cdot PI) \cdot (1 - c)^{(Jahr - Bezugsjahr)}$$

a	Grundlastanteil
b	variabler Anteil
PI	Produktionsindex
c	Effizienzänderung
Jahr	aktuelles Jahr
Basisjahr	Bezugsjahr, ab dem die Effizienzänderung berücksichtigt wird

Die Parameter werden dabei mit der Methode der kleinsten Fehlerquadrate so angepasst, dass die Abweichung zwischen den berechnten Ausgleichskurven und den statistischen Werten minimal wird. Durch die hohe Anzahl an Einflussgrößen auf den Energieverbrauch bzw. die wirtschaftliche Entwicklung gab es teilweise unplausible Ergebnisse. Diese wurden im Rahmen der Validierung manuell auf Basis von Erfahrungswerten angepasst.

In **Abbildung 2-50** sind die verschiedenen Ausgleichskurven (Zeitraum 1995 bis 2004) und der PI dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass nur die Kurve, welche die Effizienzänderung beinhaltet, in guter Näherung und etwas gedämpft, dem tatsächlichen Verlauf des Energieverbrauchs folgt. Die beiden anderen Ausgleichsfunktionen hingegen folgen dem PI, sie würden somit den zeitlichen Verlauf des Energieverbrauchs sehr schlecht wiedergeben.

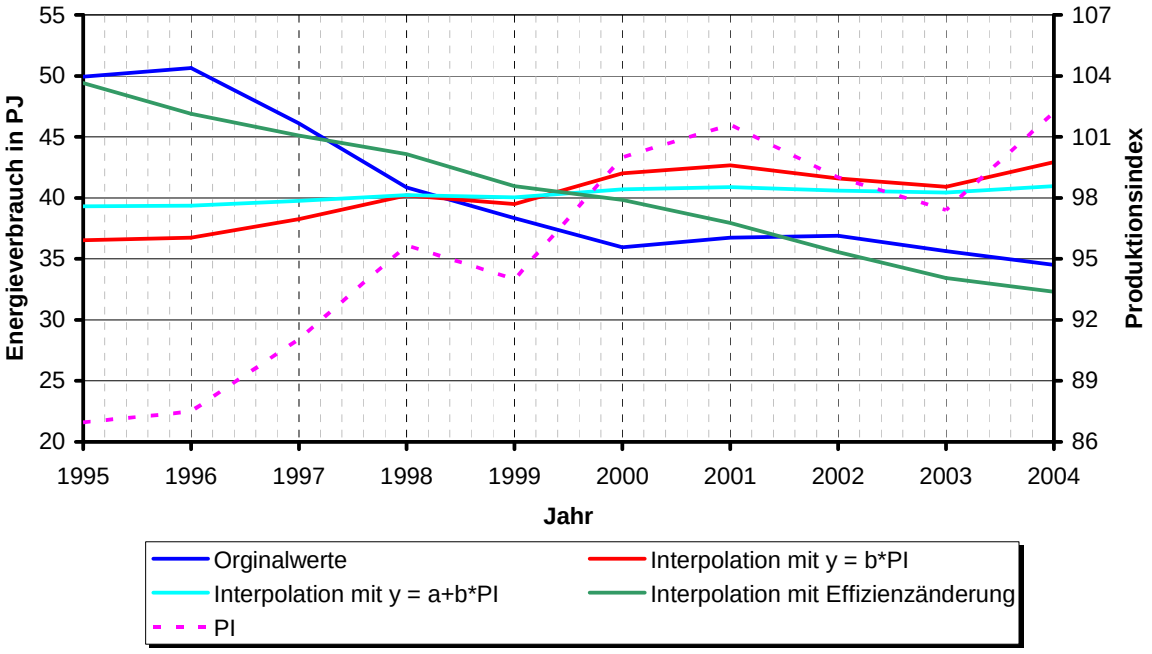

Abbildung 2-50: *Ausgleichskurven im Zeitraum der zur Verfügung stehenden Daten*

Der Trend, der sich in Abbildung 2-50 bereits abgezeichnet hat, setzt sich in der Fortschreibung bis in das Jahr 2050 fort (siehe **Abbildung 2-51**). Sowohl die Interpolation mit y = b*PI, als auch der Fortschreibung mit y = a+b*PI, folgen dem Verlauf des PI, wobei Letztere die Steigung des PI nur in stark abgeschwächter Form verfolgt.

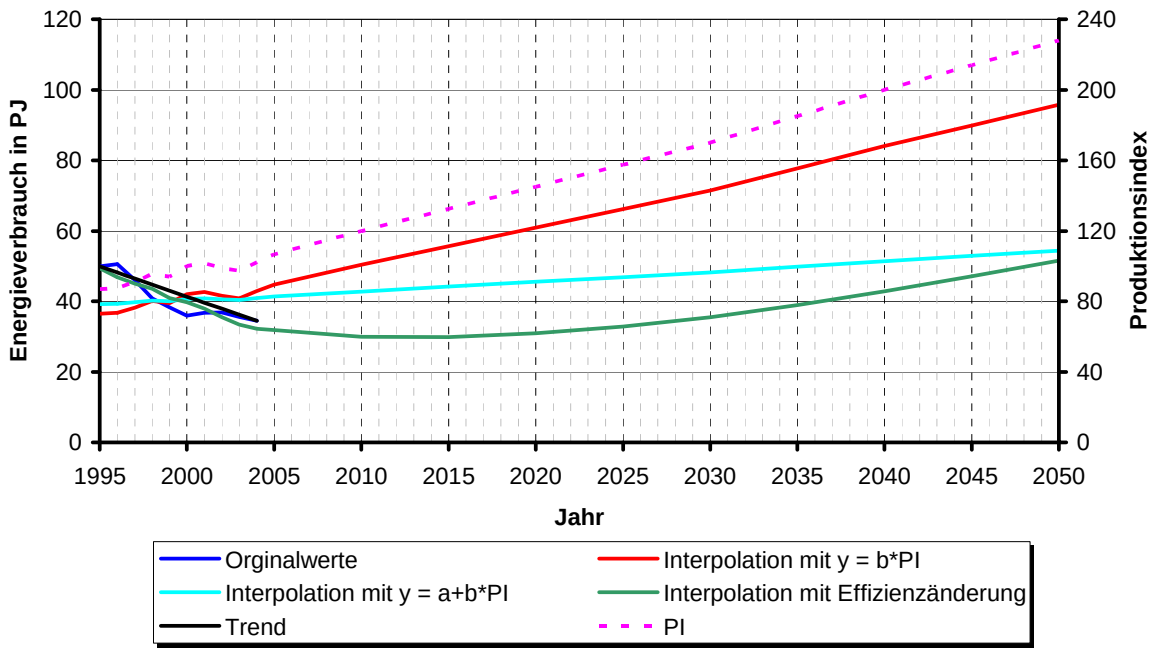

Abbildung 2-51: *Fortschreibung der verschiedenen Ausgleichskurven*

Bei der Fortschreibung, welche die Effizienzänderung berücksichtigt, haben die ersten Ergebnisse gezeigt, dass die in den Jahren 1995-2004 berechnete jährliche Effizienzänderung über den gesamten Betrachtungszeitraum das Ergebnis sehr stark beeinflusst. Da eine stetige Erhöhung der Effizienz immer aufwändiger wird, und somit erfahrungsgemäß die Effizienzänderung mit steigender Anlagengüte immer geringer ausfällt, wird als weitere Variable die Abschwächung (d) dieser Effizienzänderung, eingeführt. Ebenso fließt ein einmaliger Effizienzsprung (e), sei es eine Verbesserung durch einen innovativen Produktionsweg oder eine Verschlechterung durch gesetzlich vorgeschriebene Umweltschutzmaßnahmen, in die Berechnung mit ein. Abschließend ergibt sich die Formel zur Erstellung der Fortschreibung wie folgt:

$$y = (a + b \cdot PI) \cdot (1 - c \cdot (1 - d) - e)^{(Jahr - Bezugsjahr)}$$

d	jährliche Abschwächung der Effizienzänderung mit d = (1–Abschwächungsfaktor)^(Jahr–Beginn_Fortschreibung)
e	einmaliger Effizienzsprung

Abbildung 2-51 zeigt, dass nur die Kurve, welche die Fortschreibung unter Berücksichtigung der Effizienzänderung darstellt, bis zum Jahr 2005 dem Trend der Originaldaten folgt. In diesem Zeitraum überwiegt die jährliche Energieeinsparung gegenüber dem Anstieg des PI. Durch die aufgeprägte Abschwächung der jährlichen Effizienzverbesserung steigt der Verbrauch an Energie ab 2015 auf Grund des konstant zunehmenden PI wieder an. Dieser Verlauf spiegelt die Tatsache wider, dass die ersten Verbesserungsmaßnahmen in der Industrie mit geringem finanziellen Aufwand zu realisieren sind, es aber immer schwerer wird, weitere Effizienz steigernde Maßnahmen

durchzuführen. Im umgekehrten Fall bedeutet dies, dass ein anfänglich starker Anstieg des Energieeinsatzes durch Verbesserungsmaßnahmen über die Jahre abgeschwächt wird.

Über die abschließend ermittelte Formel und die abgeschätzten Produktionsindizes können die einzelnen Energieverbräuche bis zum Jahr 2050 fortgeschrieben werden. Da die Datenbasis sehr breit ist, können Einflüsse wie z. B. die kurzzeitige Verlagerung eines Produktionsschrittes in das Ausland, was zu einer Verringerung des Energieverbrauches, aber nicht zu einem sinkenden PI führt, zum großen Teil ausgeblendet werden. Unter Berücksichtigung weiterer Einflüsse, wie etwa dem Umstieg eines Industriesektors von Heizöl auf Erdgas, wird versucht, den Energieverbrauch der Zukunft genau abzubilden. Ohne eine Korrektur würde ein sinkender Heizölanteil bei gleichzeitig steigendem PI eine Effizienzverbesserung bedeuten. Hierbei muss jedoch genau analysiert werden, ob es sich, wie im genannten Beispiel, nicht um eine Substitution eines Energieträgers handelt. Da ein Energieträger aber meist nur bis zu einem bestimmten Maß ersetzt werden kann, muss in diesem Fall die ermittelte Effizienzverbesserung während der Fortschreibung auf einen plausiblen Wert für den gesamten Zeitraum reduziert werden. Vor allem die steigenden Energiepreise, politische Vorgaben und der internationale Konkurrenzdruck werden Einfluss auf diese Effizienzänderungen nehmen. Sie finden in der Fortschreibung Berücksichtigung. Über diese Stellschrauben können auch die drei Szenarien „Referenz“, „Erhöhte Technikeffizienz“ und „Umweltbewusstes Handeln“ generiert werden.

2.3.1.2 Unterteilung

Die Fortschreibungen werden in drei Teile gegliedert. Im ersten Teil wird der gesamte Energieverbrauch eines Industriesektors fortgeschrieben. Er enthält den verbrauchten Strom, den fossilen Brennstoffbedarf, den Einsatz von KWK-Anlagen zur Wärmeerzeugung und die sonstigen Energieträger (z. B. regenerative Energien). Der Strom geht dabei mit dem Primärenergieeinsatz in die Bilanz ein, um bei Substitutionseffekten den Zusammenhang zwischen der Kostenstruktur und den Einspareffekten besser abzubilden. Der aufgeführte Brennstoffverbrauch enthält nicht den in KWK-Anlagen eingesetzten Brennstoff, da sonst eine Doppelbilanzierung erfolgen würde. Die ausgewiesene Wärme aus KWK-Anlagen spiegelt den Brennstoffeinsatz in diesem Segment nur zum Teil wider, da der Mehraufwand durch die Stromerzeugung nicht berücksichtigt wurde. Der für die Stromerzeugung notwendige Energieaufwand wird nicht berücksichtigt, da dieser nicht direkt in die Produkte mit einfließt. Der Strom aus KWK-Anlagen ist Teil des gesamten Strombedarfs in der Industrie. Exemplarisch ist in **Abbildung 2-52** die Fortschreibung für den Ernährungssektor dargestellt. Diese Fortschreibung veranschaulicht die Entwicklung des Energieverbrauches des gesamten Industriesektors in Abhängigkeit vom Produktionsindex. Eine nähere Erläuterung dieses Diagramms erfolgt in den jeweiligen Unterpunkten zu den Industriesektoren.

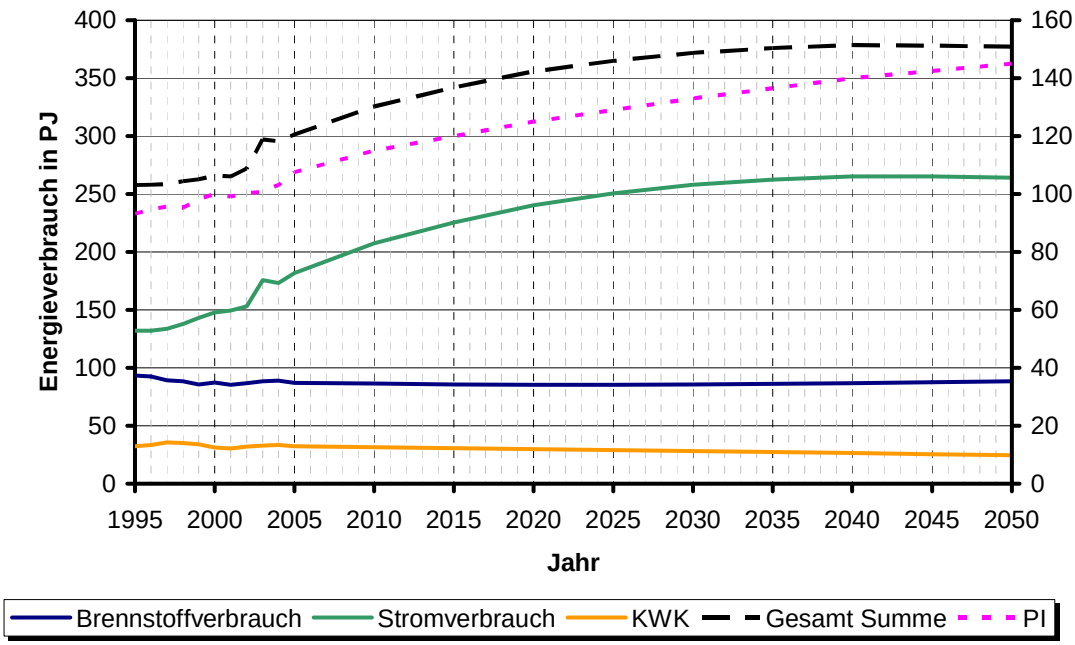

Abbildung 2-52: *Fortschreibung des Industriesektors Ernährung*

Im zweiten Teil wird der Bereich der Brennstoffe in die einzelnen Energieträger unterteilt. In dieser Fortschreibung (siehe **Abbildung 2-53**) können Substitutionseffekte der einzelnen Brennstoffe ermittelt werden. Berücksichtigt wird auch die Preisentwicklung für die einzelnen Energieträger bis in das Jahr 2050.

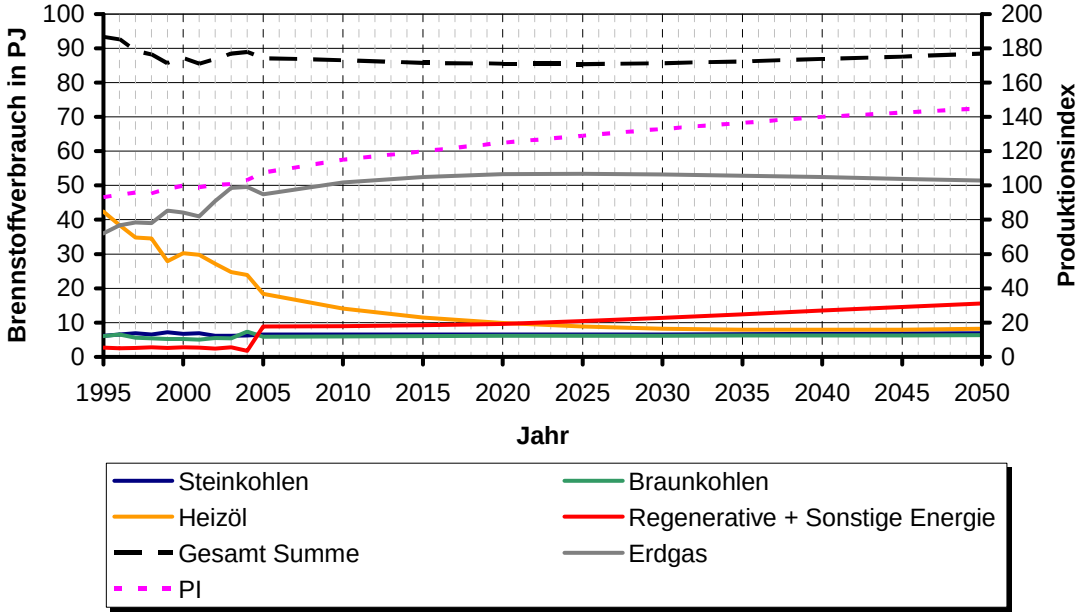

Abbildung 2-53: *Fortschreibung des Brennstoffverbrauchs der Branche „Ernährung“*

2.3.2 Technikstruktur

2.3.2.1 Die Rolle der KWK in der Industrie

Im diesem Abschnitt wird der KWK-Anteil in den für einen KWK-Ausbau relevanten Industrien gesondert untersucht. Die Fortschreibung beschränkt sich auf die Sektoren

Chemie, Ernährung und Papier. Die prozentuale Verteilung der ermittelten elektrischen KWK-Leistung erfolgt auf Basis der im Jahr 2005 mittels KWK erzeugten Wärmemenge in den einzelnen Industriesektoren. Es wird dabei von einer konstanten Stromkennzahl von 0,36 /BEE 07/ und einer einheitlichen Ausnutzungsdauer von 5.000 h/a über alle Sektoren ausgegangen. Der Wert der jährlichen Betriebsstunden wurde anhand von Daten vorhandener Anlagen abgeschätzt. Die nicht einzeln berücksichtigten Industriezweige werden unter dem Punkt „Rest“ zusammengefasst. Durch den massiven Eingriff über Förderungen wird davon ausgegangen, dass sich der KWK-Anteil nicht mehr über den PI beschreiben lässt. Für die Prognose wird deshalb in erster Linie das aus dem IEKP übernommene Ziel, die KWK-Stromerzeugung bis 2020 zu verdoppeln, herangezogen. Weitere Einflussgrößen sind die Laufzeiten der bereits installierten KWK-Anlagen, die Reinvestitionen, der Zubau bis 2020 und der Zubau ab 2020 bis 2050. In **Abbildung 2-54** ist die Fortschreibung für das Szenario 1 bis in das Jahr 2050 dargestellt.

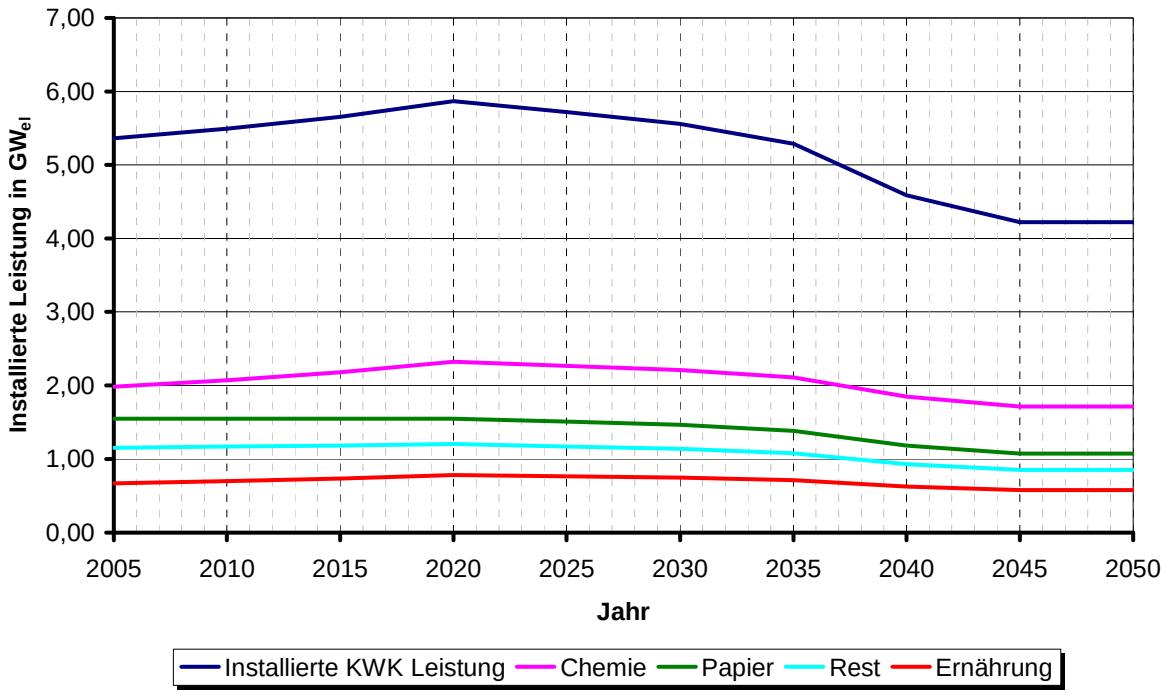

Abbildung 2-54: *Fortschreibung KWK für das Szenario 1*

Da sowohl die KWK als auch die regenerativen und sonstigen Energieträger eine gesonderte Rolle spielen, werden die einzelnen Sektoren im Folgenden zusammengefasst betrachtet. Der Ausbau der KWK-Anlagen wird sich, auf Grund der im jeweiligen Industriesektor vorherrschenden Prozesstemperaturen, auf einzelne Industriezweige beschränken. Diese sind der Chemiesektor, der Ernährungssektor und die Papierindustrie, wobei letztere nochmals einen Sonderstatus einnimmt. Alle übrigen Industriesektoren werden unter „restliche Industrie“ zusammengefasst.

Der Chemiesektor ist neben der Ernährungsindustrie einer der Industriezweige, in welchen noch ein nennenswertes unerschlossenes KWK-Potenzial vorhanden ist. Nach /BEE 07/ betrug der Brennstoffeinsatz zur Wärmeerzeugung im Jahr 2002 in der Chemieindustrie im KWK relevanten Temperaturbereich (0 °C bis 400 °C) ca. 55 TWh. Im Jahr 2002 wurde in der Chemieindustrie aus eigenen KWK-Anlagen eine Wärme-

menge von 110 PJ (30 TWh) erzeugt. Dies bedeutet, dass in der Chemieindustrie etwa 55 % der Wärme im Temperaturbereich von 0 °C bis 400 °C bereits durch KWK erzeugt wurden. Erklären lässt sich dieser Umstand damit, dass sich die Temperaturanforderungen über einen sehr weiten Bereich erstrecken (0 °C bis 1.200 °C). Die anfallende Abwärme aus Hochtemperaturprozessen kann zum Beispiel in einem Dampfturbinenprozess genutzt werden. Dadurch kann ein deutlich höheres KWK-Potenzial erschlossen werden als in den anderen Industriesektoren. Dargestellt ist der Prozesstemperaturverlauf der einzelnen Industriesektoren in **Abbildung 2-55**.

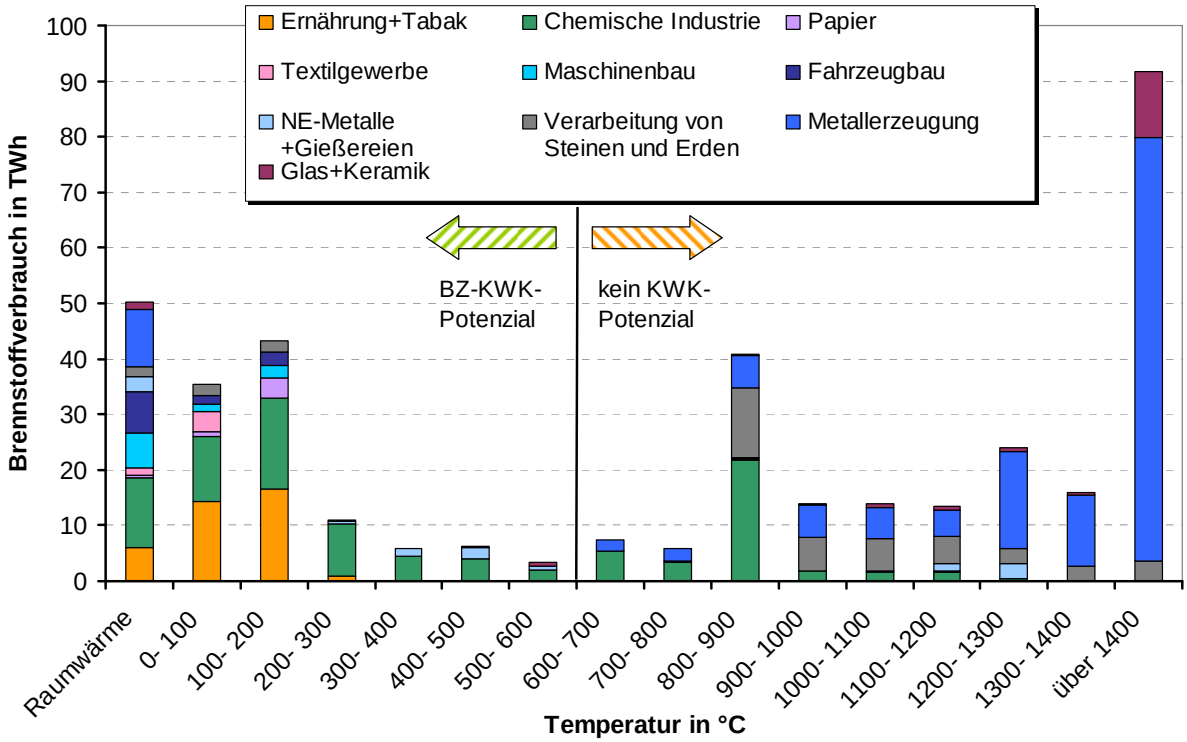

Abbildung 2-55: *Prozesstemperaturverlauf in den Industriesektoren /BEE 07/*

Anders stellt sich die Situation in der Metallindustrie dar. Auch hier fällt Abwärme auf einem hohen Temperaturniveau an. Aber anders als in der chemischen Industrie besteht kein Prozesswärmebedarf im mittleren und unteren Temperaturbereich. Aus der anfallenden Abwärme wird deshalb in einem Kraftwerksprozess ausschließlich Strom erzeugt. Die Forderung aus dem IEKP, die Stromproduktion aus KWK-Anlagen bis 2020 zu verdoppeln, stellt in der Chemieindustrie durch den steigenden PI und das noch zu erschließende Potenzial, zumindest aus technischer Sicht, kein Problem dar. Das wirtschaftlich zu erschließende Potenzial liegt jedoch deutlich unter dem technischen, was dazu führt, dass im Szenario 1 zwar die alten Anlagen zu 100 % reinvestiert werden, aber nur ein geringer Anteil neuer KWK Anlagen installiert wird.

Wie schon in der chemischen Industrie existiert auch im Ernährungssektor ein großes Potenzial zum Ausbau der durch KWK erzeugten Wärme. Im Jahr 2004 wurden 33 PJ an Wärme aus KWK-Anlagen für die Raum- und Prozesswärmeerzeugung in der Ernährungsindustrie genutzt. Nach /BEE 07/ liegt das noch unerschlossene Potenzial bei 27 PJ. Legt man das neu entworfene KWK-Gesetz zu Grunde, welches verbesserte Einspeisebedingungen für den erzeugten Strom garantiert, ist auch im Szenario 1 mit einem Anstieg der aus KWK erzeugten Strommenge zu rechnen. Das von der Bundes-

regierung angestrebte Ziel, bis 2020 die aus KWK generierte elektrische Energie zu verdoppeln, wird jedoch erst im Szenario 2 zu realisieren sein.

Die KWK-Versorgung in der Papierindustrie nimmt gegenüber den anderen Industriesektoren insofern eine Sonderstellung ein, als dass sie der einzige Sektor ist, in welchem der KWK-Anteil in den Jahren 1995 bis 2004 zugenommen hat. Er stieg von 61 PJ im Jahr 1995 auf 69 PJ im Jahr 2004. Erklärt werden kann dieser Anstieg durch die verstärkte energetische Nutzung der anfallenden Abfallprodukte, wie z. B. Rinde. Für die Zukunft ist jedoch nur ein geringer Ausbau der KWK-Nutzung zu erwarten, da der Großteil der vorhandenen Potenziale bereits erschlossen ist. Die Reinvestitionen in alte KWK-Anlagen liegen im Papiersektor bei 100 %, da die Systeme bereits wirtschaftlich betrieben werden können. Das bedeutet, dass alle KWK-Anlagen am Ende ihrer Laufzeit gegen neue Systeme mit gleicher Leistung ersetzt werden.

Es wird davon ausgegangen, dass die installierte elektrische KWK-Leistung in der restlichen Industrie über den gesamten Betrachtungszeitraum nahezu konstant bleibt. Die zum heutigen Stand wirtschaftlichen KWK-Anlagen werden auf Grund staatlicher Förderungen auch in Zukunft über Reinvestitionen erneuert, aber es findet kein weiterer Zubau statt. Für die Zeit nach 2020 wird angenommen, dass die Installation von KWK-Anlagen nicht mehr gefördert wird und somit die Reinvestitionen, bei aus ökonomischer Sicht nicht sinnvollem Betrieb, ab diesem Zeitpunkt ausbleiben.

2.3.2.2 Erneuerbare Energien in der Industrie

Ein großflächiger Einsatz erneuerbarer Energien wird in der Industrie im Szenario 1 nicht prognostiziert. Wie schon beim Einsatz der KWK spielt auch hier die nötige Prozesstemperatur in den einzelnen Industriesektoren die wichtigste Rolle. Einzig durch den Einsatz von Biogas könnten Verbrennungstemperaturen von über 800 °C erzeugt werden. Der Einsatz von Solarthermie und die Verbrennung von fester Biomasse werden sich hauptsächlich auf die Bereitstellung von Raumwärme und -kälte sowie Niedertemperatur-Prozesswärme beschränken. Erst im zweiten Szenario, welches die Verwendung der besten Technik zu Grunde legt, kann von einem signifikanten Ausbau der erneuerbaren Energien ausgegangen werden. Der Einsatz von Windenergie und PV fließt nicht in die Betrachtung der erneuerbaren Energien mit ein, da nur die in der Industrie aus regenerativen Energiequellen erzeugte Wärme berücksichtigt wird. Windenergie und PV werden im Umwandlungssektor behandelt.

2.3.3 Endenergieverbrauch

2.3.3.1 Metallindustrie

Fortschreibung gesamt

Der Energieverbrauch in der Metallindustrie wird hauptsächlich durch die energieintensiven Prozesse der Stahlerzeugung bestimmt. Die Umwandlungsschritte finden meist auf einem Temperaturniveau zwischen 800 °C und über 1.400 °C statt. In **Abbildung 2-56** ist die Fortschreibung für den gesamten Industriesektor der Metallherstellung dargestellt. Bis 2004 kann dabei auf eine gesicherte Datenbasis zurückgegriffen werden. Ab diesem Zeitpunkt werden die einzelnen Bereiche nach der in Kapitel 2.3.1.1 beschriebenen Methode weitergeführt. Bestimmend ist hierbei der

Produktionsindex. Dieser steigt im betrachteten Zeitraum um 77 Punkte auf einen Wert von 169 im Jahr 2050 an.

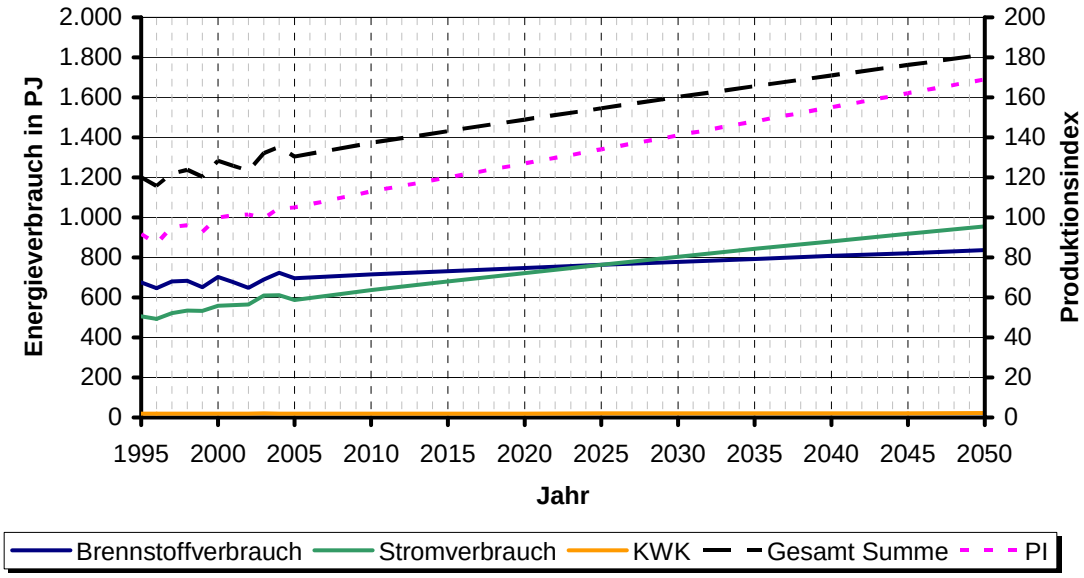

Abbildung 2-56: *Gesamtfortschreibung der Metallindustrie*

Der Strom- und der Brennstoffverbrauch erhöhen sich ebenfalls. Bei der Erstellung der Ausgleichsgeraden für die Energieverbräuche der Jahre 1995 bis 2004 ergibt sich für den Brennstoffverbrauch eine leichte Effizienzverbesserung von 0,11 % jährlich, während beim Stromverbrauch ein Rückgang der Effizienz von jährlich 0,88 % berechnet wird. Dies ist plausibel, da in Deutschland durch die internationale Konkurrenz einfacher Stähle ein Trend zu hochqualitativen Stählen festzustellen ist, welche in der Herstellung energieintensiver sind. Es wird davon ausgegangen, dass eine ständige Effizienzabnahme von 0,88 % für die Dauer von 50 Jahren nicht anhalten wird. Im Fall der Metallindustrie wird angenommen, dass im Jahr 2005 eine zusätzliche Verbesserung der Effizienz von 0,5 %-Punkten realisiert werden kann. Dadurch wird die anfängliche jährliche Effizienzverschlechterung auf 0,38 % pro Jahr verringert. Da davon ausgegangen wird, dass sich dieser Wert durch kontinuierliche Effizienzverbesserungen absenkt, reduziert er sich ab 2005 um 2 % pro Jahr auf 0,15 % in 2050. Der durch KWK-Anlagen verbrauchte Brennstoffanteil nimmt nur einen sehr kleinen Teil an der Gesamtsumme ein. Dieser Umstand ändert sich bis in das Jahr 2050 auch nicht nennenswert, da die KWK nicht zur Wärmeerzeugung für in der Metallindustrie vorherrschende Temperaturniveaus eingesetzt werden kann. Mit dem Einsatz neuer Technologien, wie dem Kalina- oder dem ORC-Prozess, kann die anfallende Abwärme in KWK-Anlagen genutzt werden. Dies wird im zweiten Szenario „Erhöhte Technikeffizienz“ genauer untersucht.

Fortschreibung Brennstoffe

Eine detaillierte Betrachtung der in der Metallindustrie eingesetzten Brennstoffe zeigt einen Trend hin zum Erdgas. Heizöl wird weiter Einfluss verlieren und bis zum Jahr 2050 keine Rolle zur Energieerzeugung mehr spielen, auch die regenerativen- und sonstigen Energien erlangen in diesem Zeitraum keine große Bedeutung bei der Energiebereitstellung. Grund hierfür sind die hohen Prozesstemperaturen, die nur über

Strom oder fossile Energieträger problemlos erzeugt werden können. Einen leichten Anstieg verzeichnen die Steinkohlen, deren Einsatz bei der Eisenerzeugung im Hochofen weiter an Bedeutung gewinnt. Die Braunkohlen leisten im gesamten Betrachtungszeitraum keinen nennenswerten Beitrag zur Wärmeerzeugung in der Metallindustrie.

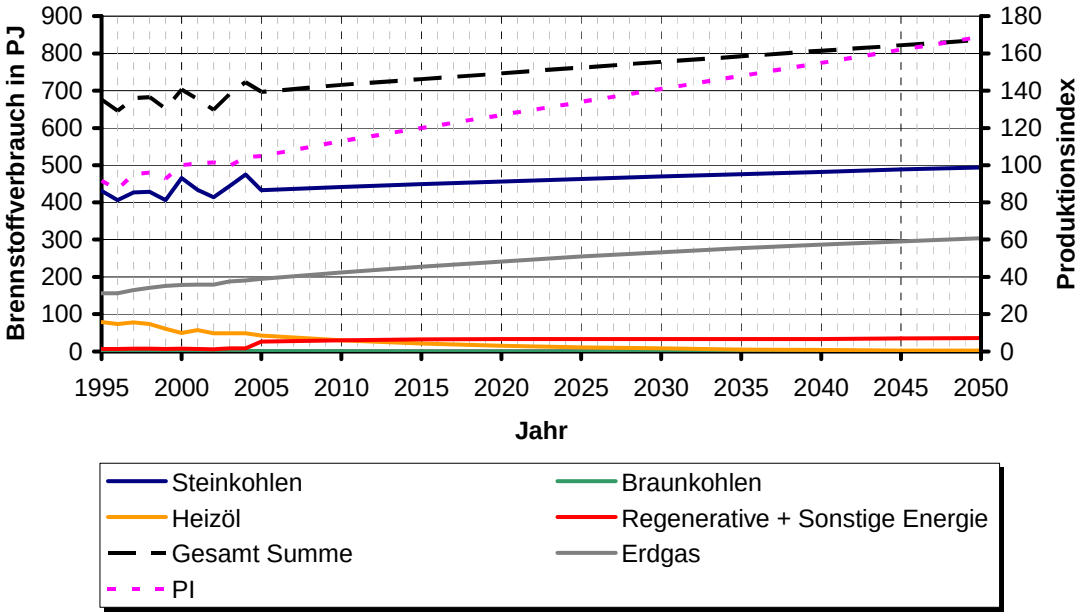

Abbildung 2-57: *Fortschreibung Brennstoffe der Metallindustrie*

2.3.3.2 Chemieindustrie

Fortschreibung gesamt

Im Zeitraum von 1995 bis zum Jahr 2050 steigt der Produktionsindex um 137 Punkte von 86 auf einen Wert von 223. Das entspricht einer Erhöhung von 160 %. Die errechnete Effizienzänderung ergibt eine Verbesserung von jährlich 3,25 %, was in einem Zeitraum von 45 Jahren zu einem Wert von 422 % führen würde. Es wird davon ausgegangen, dass Einflüsse wie die Verlagerung der Grundstoffproduktion in das Ausland und Brennstoffsubstitution durch Strom zu einer übermäßig hohen Reduktion des Brennstoffverbrauches in den Jahren 1995 bis 2004 geführt haben. Diese Effekte schwächen sich mit der Zeit jedoch merklich ab. So wird der Fortschreibung eine Reduktion der Effizienzverbesserung von 3,5 % jährlich zu Grunde gelegt. Damit reduziert sich die Steigerung der Effizienz im Jahr 2050 auf einen Wert von 0,56 %. Selbst durch diese Anpassung ist die Veränderung im Brennstoffverbrauch im Vergleich zum Anstieg des PI noch auf sehr geringem Niveau (siehe **Abbildung 2-58**). Der Stromverbrauch steigt trotz eines positiven Wertes der Effizienzsteigerung, also einer jährlichen Verbesserung von 0,9 %, von 498 PJ im Jahr 1995 auf 737 PJ in 2050 an. Der Anteil der Kraft-Wärme-Kopplung reduziert sich in diesem Szenario bis in das Jahr 2025 auf einen Grundanteil von knapp 60 PJ, welcher bis zum Jahr 2050 stagniert.

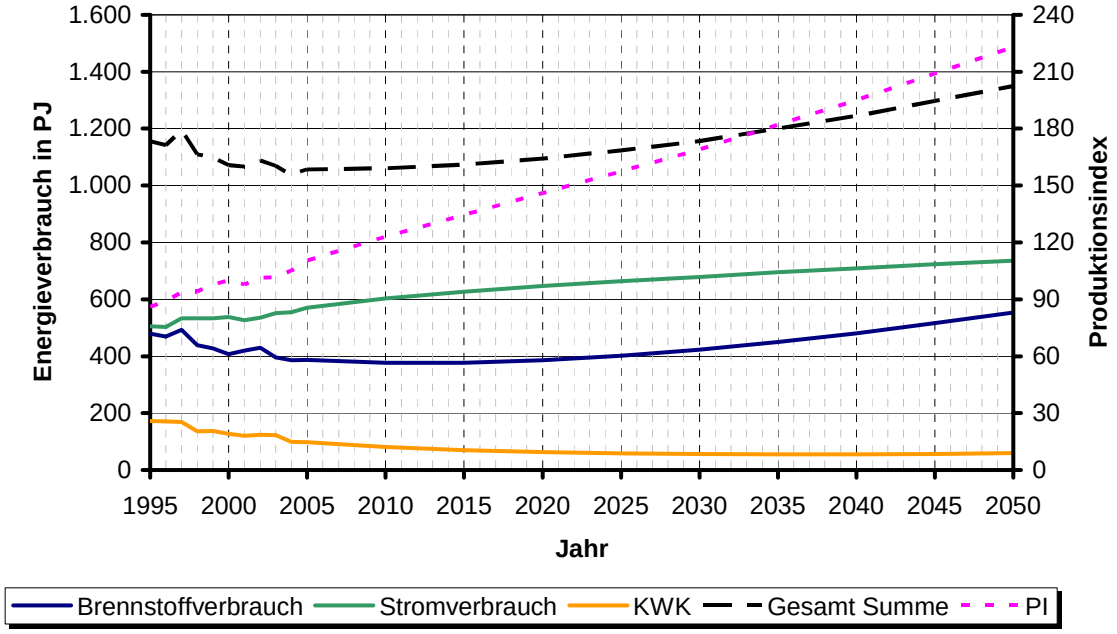

Abbildung 2-58: *Gesamtfortschreibung der Chemieindustrie*

In den Jahren 1995 bis 2004 sank der Energieverbrauch, während der PI stieg. Dies bedeutet aber nicht, dass bei steigender Produktion weniger Energie benötigt wird. Wahrscheinlicher sind eine Änderung der Produktion, die Auslagerung der Produktion energieintensiver Produkte ins Ausland und steigende Preise.

Fortschreibung Brennstoffe

Wie schon in der Metallindustrie zeigt sich auch im Brennstoffeinsatz der chemischen Industrie die Abkehr vom Heizöl hin zum Erdgas. Wie in **Abbildung 2-59** dargestellt, verringert sich der Heizölverbrauch von 133 PJ im Jahr 1995 auf 15 PJ in 2050. Im gleichen Zeitraum steigt der Einsatz an Erdgas von 249 PJ auf 349 PJ an. Der ab 2015 stetig wachsende Brennstoffanteil an Steinkohlen, regenerativen und sonstigen Energien deckt den durch den steigenden PI verursachten Mehrverbrauch.

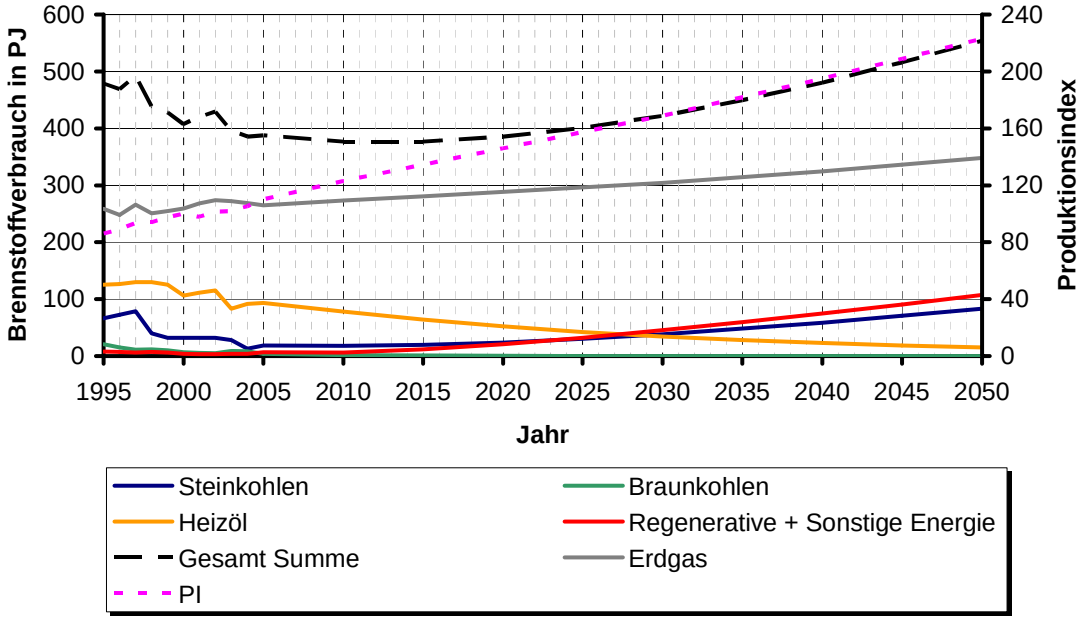

Abbildung 2-59: *Fortschreibung Brennstoffe der Chemieindustrie*

Fortschreibung KWK

Der Chemiesektor ist neben der Ernährungsindustrie einer der Industriezweige, in welchem noch ein nennenswertes unerschlossenes KWK-Potenzial vorhanden ist. Nach /BEE 07/ betrug der Brennstoffeinsatz zur Wärmeerzeugung im Jahr 2002 in der Chemieindustrie im KWK relevanten Temperaturbereich (0 °C bis 400 °C) ca. 55 TWh. Es wird davon ausgegangen, dass ca. 20 % dieses Wärmebedarfes über KWK-Anlagen gedeckt werden können, was einem Wert von 11 TWh oder 39,6 PJ entspricht. Im Jahr 2002 wurde in der Chemieindustrie aus eigenen KWK-Anlagen eine Wärmemenge von 110 PJ erzeugt. Die Forderung aus dem IEKP, die Stromproduktion aus KWK-Anlagen bis 2020 zu verdoppeln, stellt in der Chemieindustrie durch den steigenden PI und das noch zu erschließende Potenzial zumindest aus technischer Sicht kein Problem dar.

2.3.3.3 Glasgewerbe, Verarbeitung von Steinen und Erden

Fortschreibung gesamt

In der Glasproduktion steigt der PI im Vergleich zu den anderen Industriezweigen nur sehr schwach um ca. 10 % an. Dadurch reduziert sich der Energieverbrauch durch Verbesserungsmaßnahmen in der Produktion von 409 PJ im Jahr 1995 auf 388 PJ in 2050. Auch im Glassektor ist in **Abbildung 2-60** ein deutlicher Anstieg des Stromverbrauches und eine gleichzeitige Reduktion des Brennstoffverbrauches zu erkennen. Die für energieintensive Schmelzprozesse eingesetzten Brennstoffe werden durch elektrische Energie ersetzt. KWK-Anlagen werden in diesem Sektor nicht zur Prozesswärmebereitstellung verwendet, dies ist auf die hohen Prozesstemperaturen in der Glasherstellung zurückzuführen. Damit ergeben sich auch für die Zukunft nur sehr geringe Potenziale im Bereich der Raumwärmebereitstellung. Jedoch wird auch hier die Abwärme aus den industriellen Prozessen bereits zur Beheizung genutzt.

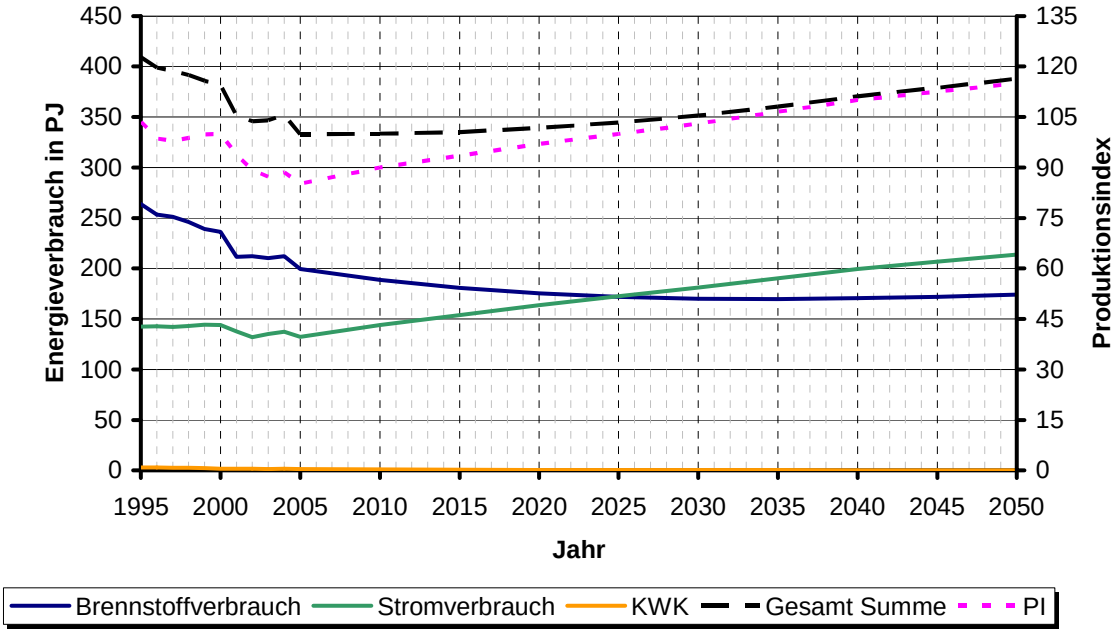

Abbildung 2-60: *Gesamtfortschreibung der Glasindustrie*

Fortschreibung Brennstoffe

Abbildung 2-61 zeigt den Verlauf des Brennstoffeinsatzes im Referenzszenario. Der Brennstoffverbrauch sinkt im betrachteten Zeitraum von 260 PJ auf 175 PJ. Während der Einsatz von Erdgas und Braunkohlen nur geringfügig rückläufig ist, nimmt der Verbrauch an Heizöl und Steinkohlen deutlich ab. Dies liegt zum einen am niedrigeren Preis von Braunkohlen gegenüber Steinkohlen und Heizöl und zum anderen an der besseren CO_2-Bilanz des Erdgases, das als Substitut für Steinkohlen und Heizöl eingesetzt werden kann. Auf Grund der hohen Prozesstemperaturen ist bei den sonstigen und regenerativen Energieträgern kein Anstieg zu verzeichnen.

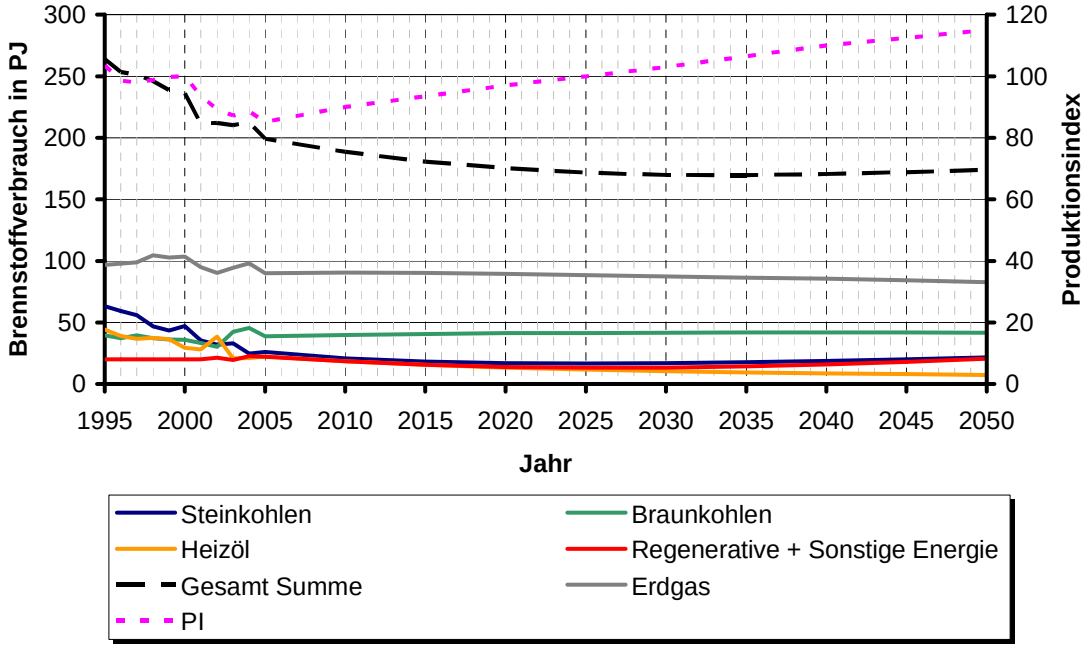

Abbildung 2-61: *Fortschreibung Brennstoffe der Glasindustrie*

2.3.3.4 Papier-, Verlags- und Druckgewerbe

Fortschreibung gesamt

Auch in der Papierindustrie fand in den Jahren 1995 bis 2004 eine teilweise Substitution der eingesetzten Brennstoffe durch elektrische Energie statt. Das zeigt der gegenläufige Verlauf von PI und Stromverbrauch gegenüber dem Brennstoffeinsatz in **Abbildung 2-62**. Im 1. Szenario wird davon ausgegangen, dass sich dieser Trend weiter fortsetzt. Dies führt dazu, dass der Stromverbrauch bis zum Jahr 2050 um 55 % auf 280 PJ steigt, während der Brennstoffverbrauch um 27 % auf 81 PJ fällt. Der PI steigt im betrachteten Zeitraum um 50 % von 87 auf 130. Der KWK-Einsatz hat bereits 2004 seinen Höhepunkt erreicht, da die vorhandenen Potenziale bereits nahezu ausgeschöpft sind.

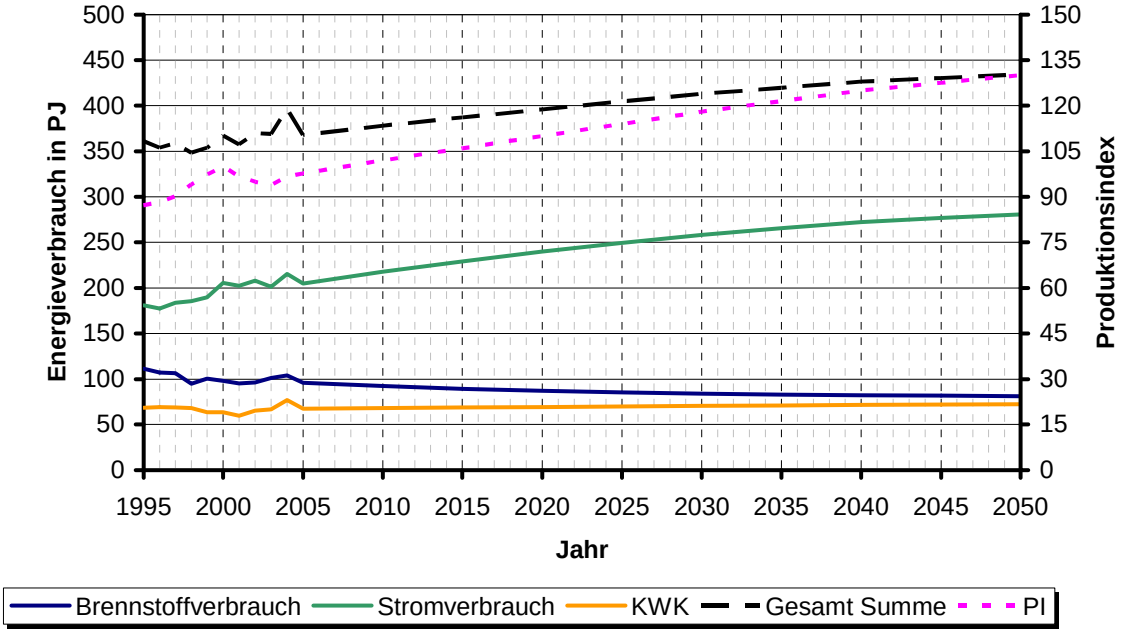

Abbildung 2-62: *Gesamtfortschreibung der Papierindustrie*

Fortschreibung Brennstoffe

Die Papierindustrie zeigt bereits in den Jahren 1995 bis 2004 einen starken Rückgang der Brennstoffe Heizöl und Steinkohlen, der sich bis zum Ende des Betrachtungszeitraumes fortsetzt. Im Jahr 2050 sind nur noch Erdgas, sonstige und regenerative Energieträger von Bedeutung, deren Einsatz bereits in den Jahren 1995 bis 2004 deutlich ansteigt (siehe **Abbildung 2-63**). Zu erklären ist dieser Verlauf durch die CO_2-Diskussion und die damit verbundenen Maßnahmen der Regierung, die stark CO_2-emittierenden Brennstoffe durch „sauberere“ zu ersetzen. Der bereits im Jahr 1995 sehr hohe Anteil (ca. 20 %) an sonstigen und regenerativen Brennstoffen am Brennstoffmix ist auf den Einsatz der bei der Papierherstellung anfallenden Reststoffe (z. B. Rinde) zurückzuführen.

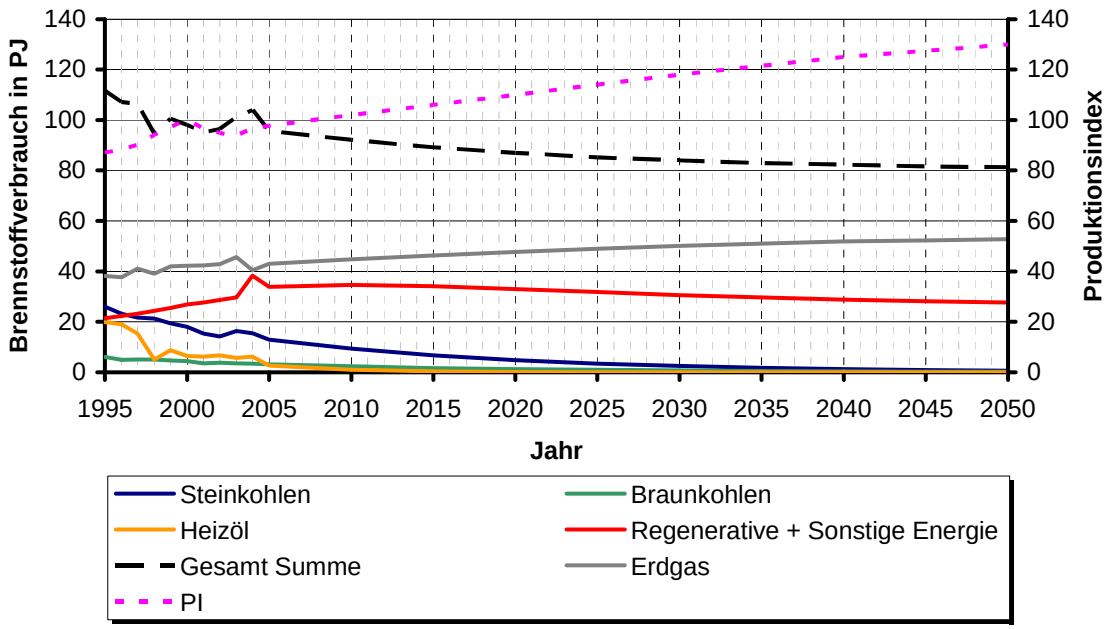

Abbildung 2-63: *Fortschreibung Brennstoffe der Papierindustrie*

Fortschreibung KWK

Die KWK-Versorgung in der Papierindustrie nimmt gegenüber den anderen Industriesektoren insofern eine Sonderstellung ein, als dass er der einzige Sektor ist, in welchem der KWK-Anteil in den Jahren 1995 bis 2004 zugenommen hat. Er stieg von 61 PJ im Jahr 1995 auf 69 PJ im Jahr 2004. Erklärt werden kann dieser Anstieg durch die verstärkte energetische Nutzung der anfallenden Abfallprodukte, wie z. B. Rinde. Für die Zukunft ist jedoch nur ein geringer Ausbau der KWK-Nutzung zu erwarten, da der Großteil der vorhandenen Potenziale bereits erschlossen ist.

2.3.3.5 Ernährungsgewerbe

Fortschreibung gesamt

Der zukünftige Energieverbrauch im Ernährungssektor ist durch einen starken Anstieg des Stromverbrauches geprägt (siehe **Abbildung 2-64**). Im Betrachtungszeitraum steigt der Bedarf von 132 PJ in 1995 auf 264 PJ im Jahr 2050. Bereits in den Basisdaten steigt der Stromeinsatz (+31 %) im Vergleich zum PI (+11 %) überproportional an. Für diesen Anstieg gibt es mehrere Erklärungen. Eine Ursache ist die Substitution von Brennstoffen durch Strom, die durch die Umstellung der Prozessführung, aus ökonomischen oder ökologischen Aspekten vollzogen wird. Ein weiterer Grund ist die zunehmende Umstellung auf Tiefkühlkost, zu deren Herstellung (Gefrieren und Kühlung), ein hohes Maß an elektrischer Energie aufgewendet werden muss. In Zukunft wird sich dieser Trend hin zu Fertiggerichten noch weiter verstärken. Der Brennstoffverbrauch und der Einsatz an aus KWK erzeugter Wärme bleibt durch Effizienzverbesserungen und der Substitution durch Strom trotz des steigenden PI's über die gesamte Zeit nahezu konstant.

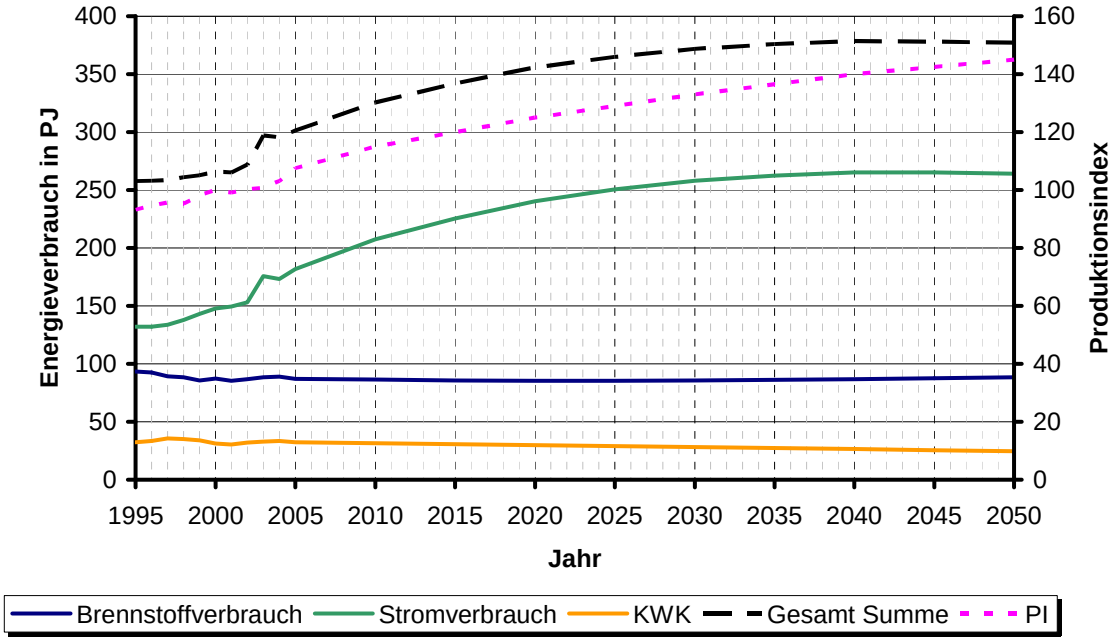

Abbildung 2-64: *Gesamtfortschreibung der Ernährungsindustrie*

Fortschreibung Brennstoff

Abbildung 2-65 zeigt den Verlauf der Entwicklung des Brennstoffverbrauches bis zum Jahr 2050. Stark rückläufig ist der Einsatz von Heizöl in diesem Industriesektor. Alleine im Zeitraum von 1995 bis 2004 sank der Verbrauch von 42 PJ auf 24 PJ, bei einem gleichzeitigen Anstieg des PI um 10 Punkte. Mögliche Gründe für den Rückgang sind der gestiegene Preis für Heizöl, der erhöhte CO_2-Ausstoß gegenüber Erdgas, die bessere Verfügbarkeit von Erdgas und die Substitution durch elektrische Energie. Der Stein- und Braunkohleneinsatz bleibt über den gesamten Zeitraum konstant, was auf eine Grundlastdeckung durch diese Brennstoffe hindeutet. Die sonstigen und regenerativen Energieträger verzeichnen einen Anstieg auf ca. 16 PJ im Jahr 2050. Eingesetzt werden diese Energien sowohl zur Raumklimatisierung – v. a. Solarthermie zur Raumheizung und -kühlung – als auch zur Generierung von Prozesswärme, die in der Ernährungsindustrie in einem Band von 20 °C bis 200 °C liegt.

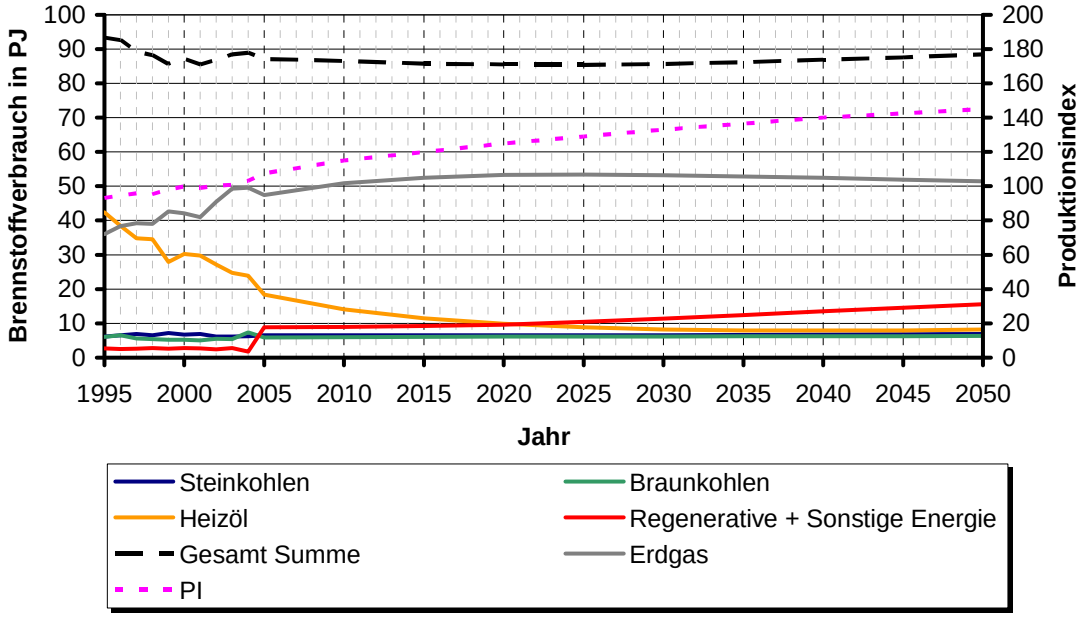

Abbildung 2-65: *Fortschreibung Brennstoffe in der Ernährungsindustrie*

Forschreibung KWK

Wie schon in der chemischen Industrie existiert auch im Ernährungssektor ein großes Potenzial zum Ausbau der durch KWK erzeugten Wärme. Im Jahr 2004 wurden 33 PJ an Wärme aus KWK-Anlagen für die Raum- und Prozesswärmeerzeugung in der Ernährungsindustrie genutzt. Nach /BEE 07/ liegt das noch unerschlossene Potenzial bei 27 PJ. Legt man das neu entworfene KWK-Gesetz zu Grunde, in welchem der Ausbau von Wärmenetzen gefördert wird, kann es durchaus gelingen, die von der Regierung geforderte Verdoppelung der Stromerzeugung durch KWK-Systeme, zumindest in diesem Industriezweig, zu realisieren. Da der Einsatz von KWK-Anlagen erst im Szenario II betrachtet wird, ist in Szenario I noch ein leichter Rückgang der aus KWK erzeugten Wärme zu erkennen.

2.3.3.6 Automobilindustrie

Fortschreibung gesamt

Wie **Abbildung 2-66** zeigt, nimmt der Stromverbrauch bereits im Jahr 1995 am Gesamtverbrauch einen Anteil von ca. 73 % (133 PJ) ein. Bis 2050 erhöht sich dieser um weitere 14 %-Punkte auf ca. 87 %. Dies entspricht einem Einsatz an elektrischer Energie für z.B. Schweißroboter, Fertigungsstraßen, Lackierung von 227 PJ. Der Verbrauch an Brennstoffen und die aus KWK erzeugte Wärme spielen in der Automobilindustrie nur eine untergeordnete Rolle. Eine mathematische Fortschreibung ist für den Automobilsektor auf Basis der Ausgangsdaten aus den Jahren 1995 bis 2004 nur sehr schwer durchführbar. Ursache hierfür ist die zum starken Anstieg des PI (+ 66 %) vergleichsweise moderat ausfallende Erhöhung des Gesamtenergieverbrauches (+ 23 %). Eine Erklärung für diese Diskrepanz kann das zunehmende Outsourcing von Produktionsschritten in der Kfz-Herstellung sein, was den Energieeinsatz weg von der Automobilindustrie hin zu anderen Sektoren oder ins Ausland verlagert. Da aber das gesamte hergestellte Kfz als ein Produkt betrachtet wird, nimmt durch dieses „Verschieben“ der Einzelteil-Produktion der spezifische Energieverbrauch je produ-

ziertem Kfz ab. Als Folge steigt der PI stärker an als der Energieverbrauch in diesem Sektor.

Der zukünftig sehr wahrscheinliche Umstieg von Verbrennungsmotoren auf Elektromotoren, die von Batterien oder Brennstoffzellen gespeist werden, ist kaum zu quantifizieren. Werden die Batteriesysteme, Brennstoffzellen und Elektromotoren von der Automobilindustrie hergestellt, würde sich der Energieaufwand erhöhen. Werden diese Komponenten, so wie heutzutage Lichtmaschinen oder Getriebe, von der Zulieferindustrie produziert, bleibt der Energieaufwand gleich oder sinkt durch den Wegfall der Produktion von Verbrennungsmotoren. Es stellt sich auch die Frage, in welchem Sektor der Energiebedarf der Komponenten quantifiziert wird. Reine Kfz-Zulieferbetriebe werden der Automobilindustrie zugeschrieben, während Unternehmen mit breitem Produktionsspektrum, wie z. B. Bosch, anderen Branchen zugerechnet werden.

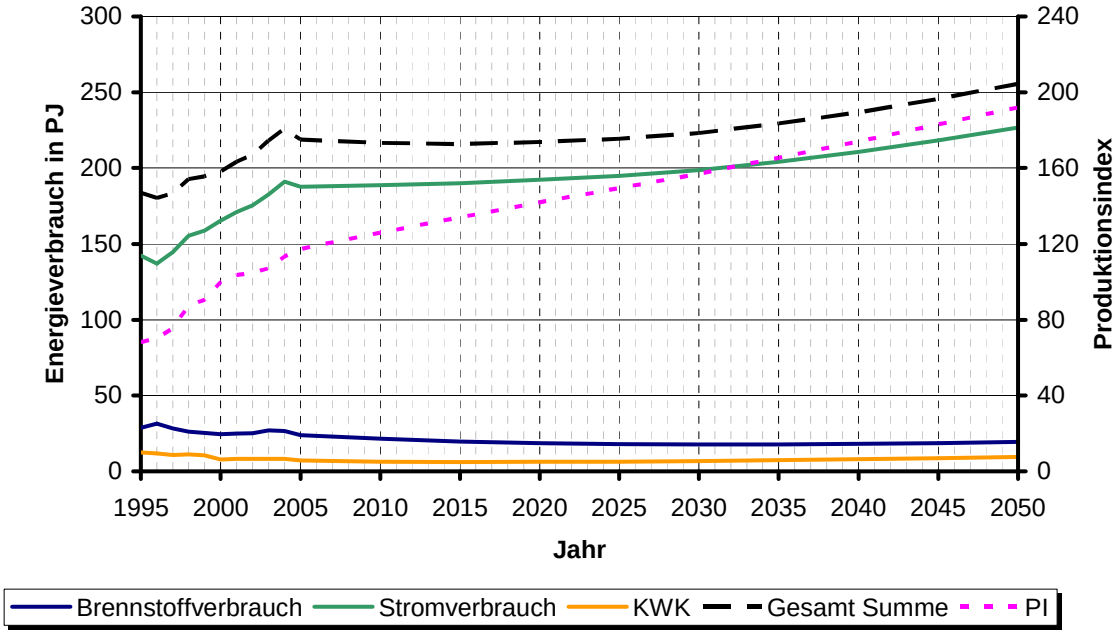

Abbildung 2-66: *Gesamtfortschreibung der Automobilindustrie*

Fortschreibung Brennstoff

Der Brennstoffeinsatz hat in der Automobilindustrie nur einen Anteil von ca. 12 % am gesamten Energieverbrauch. Zur Wärmebereitstellung findet fast ausschließlich Erdgas Verwendung, welches hauptsächlich zur Erzeugung von Raumwärme und für produktspezifische Prozesse wie die Lacktrocknung eingesetzt wird. Für die Zukunft wird ein Rückgang des Brennstoffverbrauches erwartet (siehe **Abbildung 2-67**), da ein steigender PI praktisch keine Auswirkungen auf den Raumwärmebedarf hat und der Anstieg des PI durch verbesserte Prozessführung, neben dem Einsatz innovativer Materialien, überkompensiert wird. Ab 2010 ist ein Anstieg der erneuerbaren Energieträger zu erkennen, die im Jahr 2050 einen Anteil von ca. 25 % am Gesamtverbrauch decken. Der Großteil des Zubaus an erneuerbaren Energien wird im Bereich der Raumwärme und -kühlung stattfinden. Im Vergleich zu den übrigen Industriesektoren ist der prozentuale Anstieg sehr deutlich – bedingt durch den geringen Gesamtbrennstoffverbrauch.

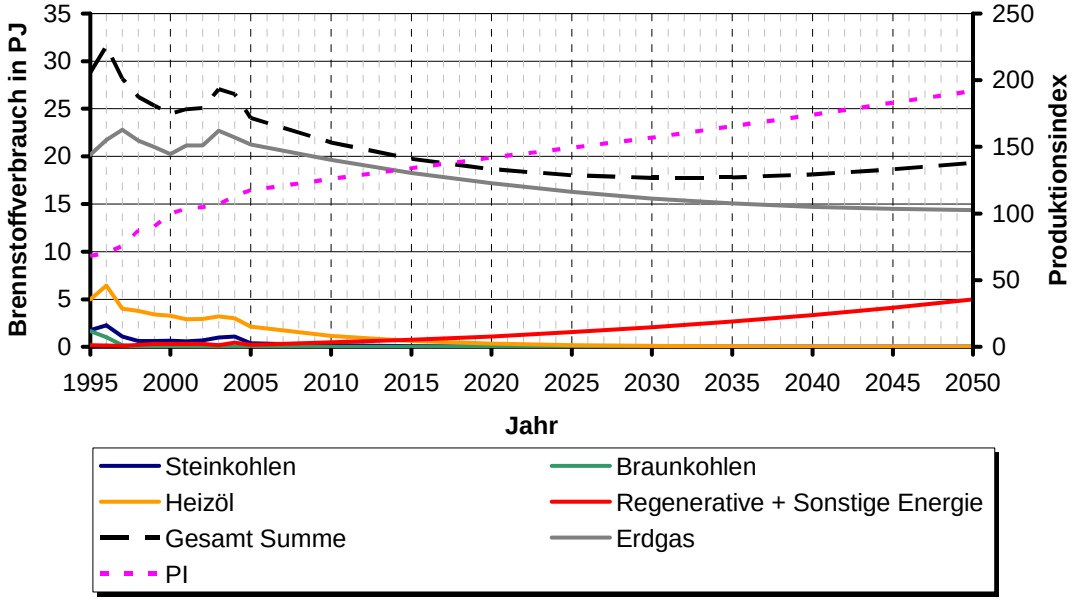

Abbildung 2-67: *Fortschreibung Brennstoffe in der Automobilindustrie*

2.3.3.7 Maschinenbau

Fortschreibung gesamt

Wie schon im Automobilsektor zeigt auch die Fortschreibung der Maschinenbauindustrie, dargestellt in **Abbildung 2-68**, einen starken Anstieg des Stromverbrauches (1995: 93 PJ) bis in das Jahr 2050 (234 PJ). Die Zunahme erfolgt etwa in dem Maße, in welchem der PI von 87 Punkten im Jahr 1995 auf 228 in 2050 ansteigt. Auffällig in der Fortschreibung des Maschinenbausektors ist, trotz eines Anstieges des PI von 87 auf 102 Punkte, dass der Brennstoffverbrauch von 50 PJ im Jahr 1995 auf 35 PJ in 2004 zurückging. Ähnlich den Vorgängen in der Automobilindustrie kann dieser Bedarfsverlauf mit einer steigenden Effizienz im Brennstoffeinsatz und einer Substitution der Brennstoffe durch Strom erklärt werden. Etwa 5 PJ des Gesamtverbrauches entfallen auf KWK-Anwendungen, deren Wert sich über den gesamten Betrachtungszeitraum praktisch nicht verändert.

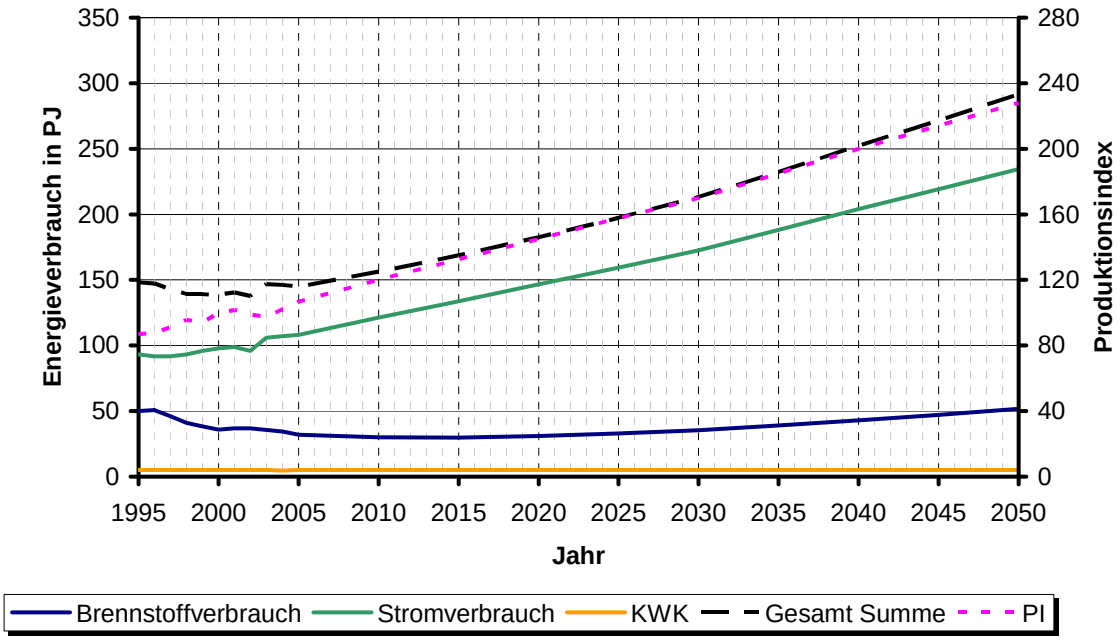

Abbildung 2-68: *Gesamtfortschreibung des Maschinenbaus*

Fortschreibung Brennstoff

Auch in der Fortschreibung des Brennstoffbedarfes der Maschinenbauindustrie zeigt sich ein im Vergleich zum Automobilsektor ähnliches Bild (**Abbildung 2-69**). Trotz des steigenden PI's nimmt der Verbrauch an eingesetzten Brennstoffen bis zum Jahr 2015 auf ca. 30 PJ ab. Erklärbar ist diese rückläufige Entwicklung mit der Verlagerung von energieintensiven Produktionsschritten in das Ausland, der Substitution der Brennstoffe durch Strom und der stetigen Effizienzverbesserung in der Energienutzung. Durch den starken Anstieg des PI schwächen sich diese Effekte jedoch immer weiter ab. So überwiegt ab dem Jahr 2015 die Erhöhung des PI's den Einfluss der Verbrauchsreduktionen und der gesamte Verbrauch an Brennstoffen beginnt wieder zu steigen. Im Jahr 2050 erreicht er demnach einen Wert von knapp 52 PJ, was leicht über dem Verbrauch von 1995 (50 PJ) liegt. Der Mehrverbrauch wird zunehmend durch regenerative Energieträger übernommen. Es ist aber auch eine Zunahme des Erdgas- und Heizölverbrauches ab 2015 zu erwarten, da in einigen Anwendungsbereichen der Einsatz erneuerbarer Energieträger nicht möglich ist und somit auf die fossilen zurückgegriffen werden muss. Bis 2050 wird die Verwendung der beiden Energieträger jedoch unter dem Niveau von 1995 bleiben.

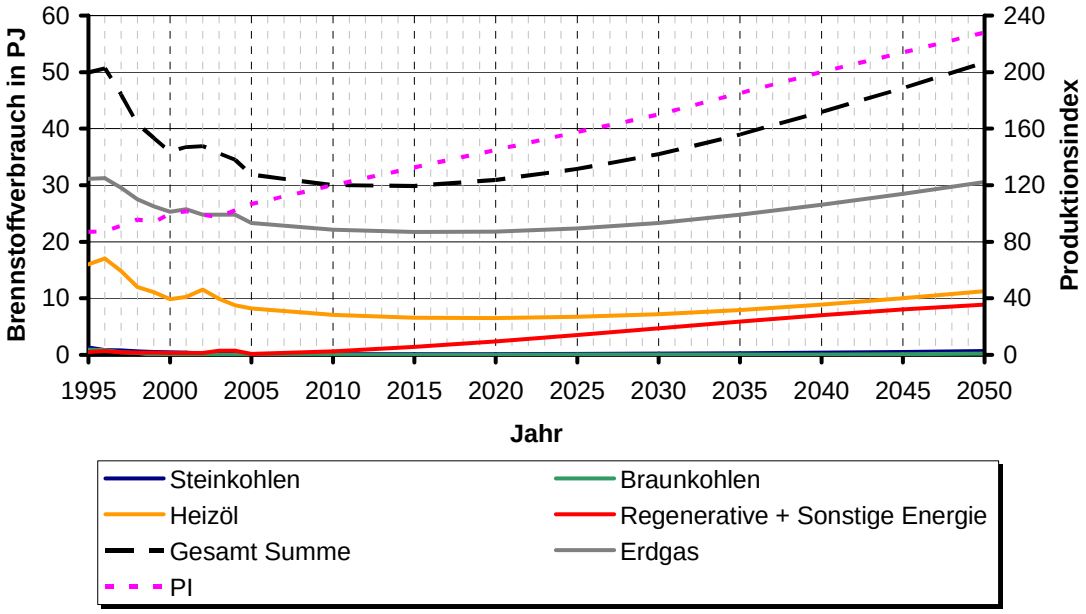

Abbildung 2-69: *Fortschreibung des Brennstoffverbrauches im Maschinenbau*

2.3.3.8 Restliche Sektoren

Fortschreibung gesamt

In **Abbildung 2-70** ist der Verlauf des Energieverbrauches der nicht explizit betrachteten Industriesektoren zusammengefasst. Durch gegenseitige Wechselwirkungen unter den Industriezweigen spielen Einflüsse wie Substitutionen oder Produktionsverlagerungen in dieser Fortschreibung keine Rolle, da sie sich gegenseitig neutralisieren. Der Verbrauch an Strom und Brennstoffen steigt in gleichem Maße mit zunehmendem PI an. Dies ist sowohl im Abschnitt der Basisjahre (1995-2004) als auch in der weiteren Betrachtung bis 2050 der Fall. Der Verbrauch der gesamten Restindustrie steigt demnach von ca. 870 PJ auf 2.000 PJ, während der PI von 84 auf 201 Punkte zunimmt.

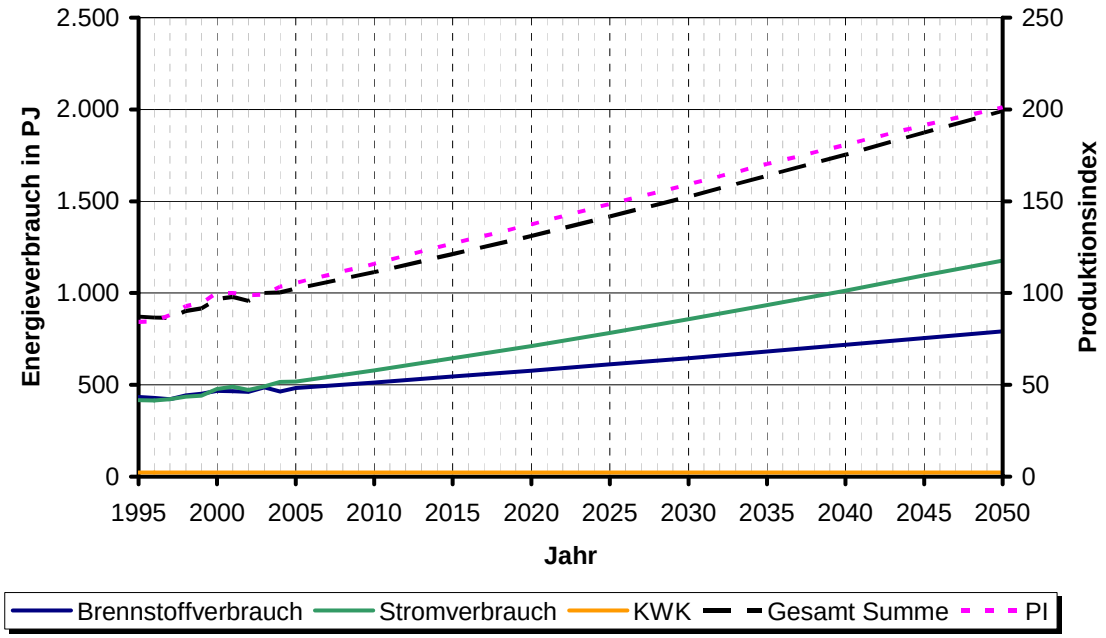

Abbildung 2-70: *Gesamtfortschreibung der restlichen Industriesektoren*

Fortschreibung Brennstoff

Die einzelnen Energieträger steigen in Summe mit dem PI an, wobei der Hauptteil der Zunahme des Energieverbrauches auf das Heizöl entfällt. Der Brennstoffverbrauch erhöht sich im betrachteten Zeitraum von ca. 430 PJ im Jahr 1995 auf 790 PJ im Jahr 2050. Auch hier kann keine Aussage über die Veränderung getroffen werden, da sich durch den Mix der verschiedenen Industriesektoren Einflüsse gegenseitig aufheben. Es wird daher angenommen, dass mit steigendem PI auch der Energieverbrauch zunimmt. Dargestellt ist der fortgeschriebene Brennstoffverbrauch der restlichen Industrie in **Abbildung 2-71**.

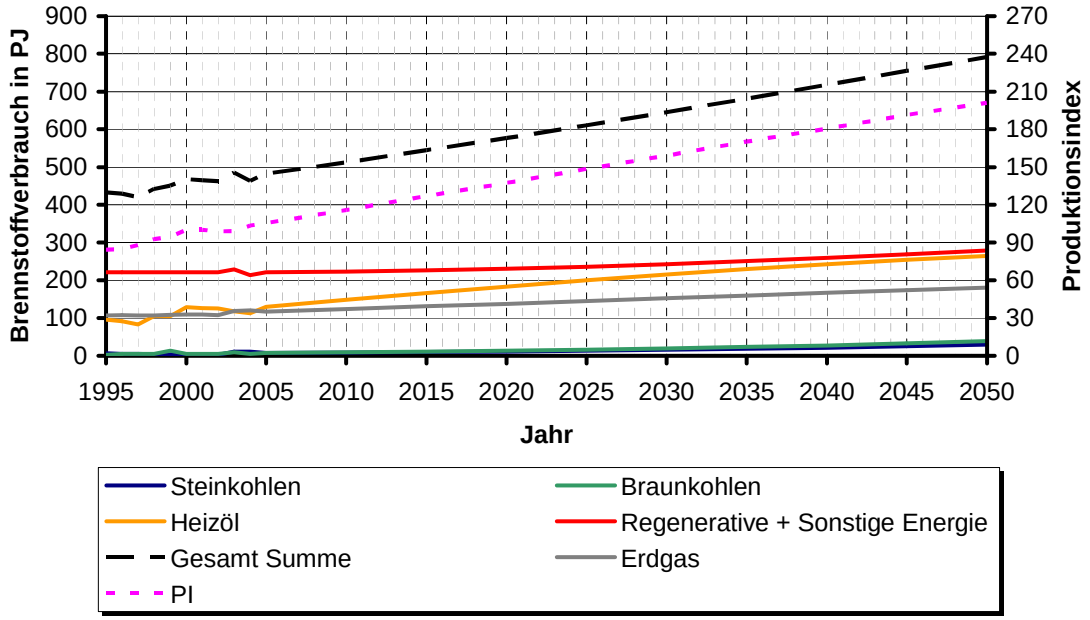

Abbildung 2-71: *Fortschreibung Brennstoffverbrauch der restlichen Industriesektoren*

2.3.3.9 Zusammenfassung Industrie – Szenario 1

Der in **Abbildung 2-72** dargestellte Gesamtenergieverbrauch der Industriesektoren zeigt auf Grund des stetig steigenden PI auch einen Anstieg des Gesamtverbrauches von ca. 3.100 PJ auf knapp 4.200 PJ im Jahr 2050. Zwei weitere Merkmale, die den gesamten Industriesektor prägen, sind der verstärkte Einsatz von elektrischer Energie und die Substitution der bei der Verbrennung stark CO_2-emittierenden Energieträger Heizöl, Braunkohlen und Steinkohlen durch Erdgas und den damit verbundenen Anstieg des Gasverbrauches. Neben der restlichen Industrie sind die Sektoren Chemie und Metall die bestimmenden Verbraucher.

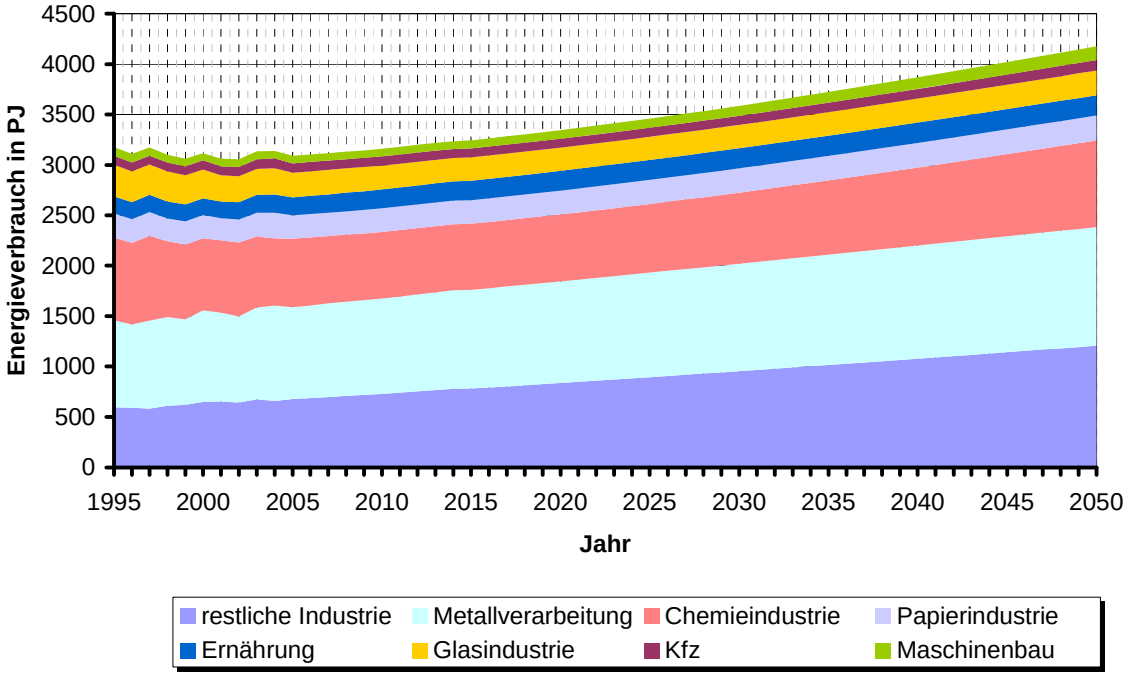

Abbildung 2-72: *Fortschreibung der Gesamtverbräuche in den Industriesektoren*

Im betrachteten Zeitraum steigt der Stromverbrauch (siehe **Abbildung 2-73**) um nahezu 100 % von ca. 700 PJ auf knapp 1.400 PJ im Jahr 2050 an. Zu erklären ist der Anstieg zum einen mit dem wachsenden PI und dem damit verbundenen erhöhten Energiebedarf. Der zweite Grund ist die Substitution fossiler Brennstoffe durch elektrische Energie. Der Brennstoffverbrauch, dargestellt in **Abbildung 2-74**, steigt im Vergleich zum Strombedarf nur moderat von etwas über 2.000 PJ im Jahr 1995 auf ca. 2.600 PJ im Jahr 2050 an. Der durch die Erhöhung des PI bedingte, steigernde Effekt auf den Bernnstoffverbrauch wird durch den vorher genannten Substitutionseffekt gedämpft.

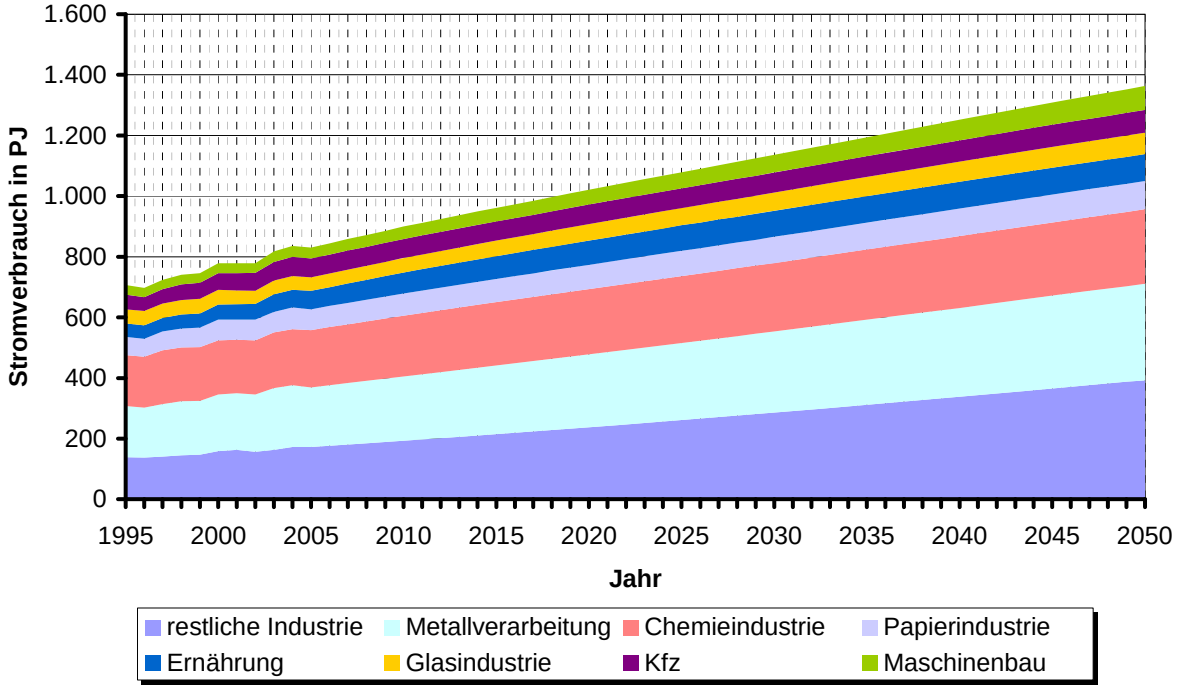

Abbildung 2-73: *Fortschreibung des Stromverbrauches im Industriesektor*

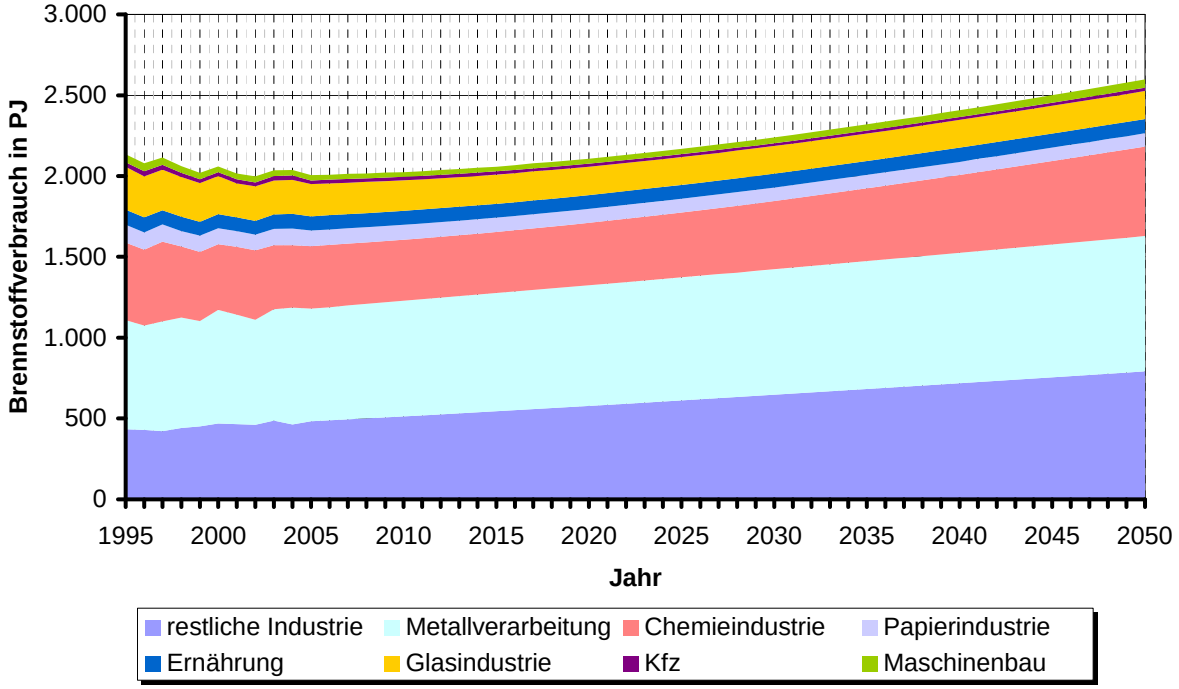

Abbildung 2-74: *Fortschreibung des Brennstoffverbrauches im Industriesektor*

2.4 Entwicklung im Sektor Verkehr

2.4.1 Maßgebliche Bedarfsdeterminanten

Straßenverkehr

Der Straßenverkehr ist hinsichtlich der Verkehrsleistung und des Energieeinsatzes die bedeutendste Verkehrsart. Der Personenstraßenverkehr (**Abbildung 2-75**) kann durch die individuelle und die kumulierte Verkehrsleistung charakterisiert werden. Die individuelle Verkehrsleistung gibt an, wie viele Kilometer ein Bundesbürger durchschnittlich im Jahr zurücklegt, die kumulierte Verkehrsleistung dagegen, welche Strecke von allen Bundesbürgern gemeinsam bewältigt wird.

Die individuelle Verkehrsleistung ist seit 1995 von rund 10.800 km je Bundesbürger und Jahr auf 11.600 Pkm/(P•a) gestiegen und verringert sich bis 2050 moderat auf 11.000 Pkm/(P•a). Zum einen verstärkt das steigende Mobilitätsbedürfnis diese Rate, zum anderen dämpfen die Altersentwicklung und die Urbanisierung die Fahrleistung mit privaten Straßenfahrzeugen. Die kumulierte Verkehrsleistung aller Bundesbürger spiegelt die rückläufige Bevölkerungsentwicklung wider. Im Jahr 2000 wurden im motorisierten Individualverkehr (MIV) 857 Mrd. Pkm zurückgelegt, im öffentlichen Personenverkehr (ÖPV) 45 Mrd. Pkm. Bis 2030 fällt die private Beförderungsrate (MIV 842 Mrd. Pkm), während die öffentliche steigt (ÖPV Straße: 61 Mrd. Pkm). Bis zum Jahr 2050 setzt sich dieser Trend fort (MIV 752 Mrd. Pkm, ÖPV Straße: 65 Mrd. Pkm). Der Anteil des öffentlichen Personenstraßenverkehrs erhöht sich von 5 % (2000) auf 8 % (2050), nimmt aber weiterhin eine untergeordnete Rolle ein. Der Besetzungsgrad im MIV bewegt sich seit 1995 im Bereich von 1,5 Personen je Fahrzeug mit fallender Tendenz und spiegelt zusammen mit dem wachsenden Pkw-Bestand das steigende Mobilitätsbedürfnis wider. Höhere Belastungen aus den Kraftstoffkosten werden allerdings einer weiter sinkenden Fahrzeugbesetzung entgegen wirken.

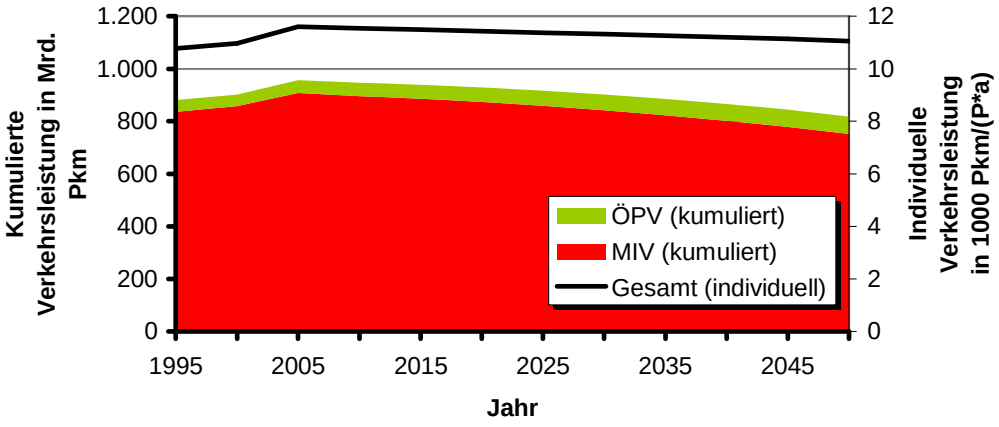

Abbildung 2-75: *Verkehrsleistung des Personenstraßenverkehrs*

/IFEU 05a/ gibt die Verkehrsleistung des MIV in Fahrzeugkilometern (Fkm) an und geht von einer Reduzierung der Besetzung von 1,5 (1995) auf 1,4 (2030) aus. Die Verkehrsleistung der Pkw und motorisierten Zweiräder bewegt sich in der gleichen Größenordnung wie das FfE-Referenzszenario, erreicht aber in der Prognose höhere

Werte: Im Jahr 1995 ca. 550 Mrd. Fkm (entsprechend 825 Mrd. Pkm), im Jahr 2030 etwa 700 Mrd. Fkm (entsprechend 980 Mrd. Pkm).

/LIN 06/ nennt für das Jahr 2030 im MIV 783 Mrd. Pkm (Ölpreisszenario) bzw. 831 Mrd. Pkm (Referenzszenario), im ÖPV 69 Mrd. Pkm (Ölpreisszenario) bzw. 67 Mrd. Pkm (Referenzszenario). Das Referenzszenario deckt sich somit weitgehend mit dem FfE-Referenzfall.

Der Güterstraßenverkehr verhält sich weitgehend unabhängig von der Bevölkerungsanzahl. Entscheidend für die Entwicklung des Gütertransports ist das deutsche und europäische Wirtschaftswachstum. **Abbildung 2-76** zeigt eine stetige Zunahme von 284 Mrd. tkm (2000) auf 650 Mrd. tkm (2030) bzw. 782 Mrd. tkm (2050) und setzt die historische Kopplung des Güterverkehrs an das Wirtschaftswachstum fort.

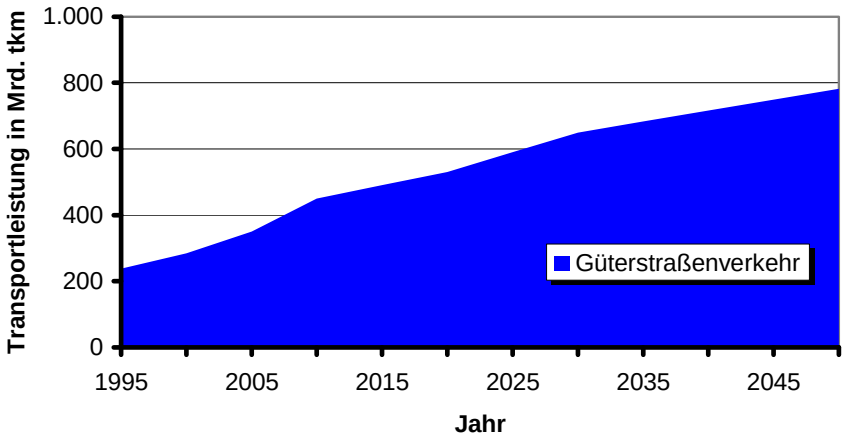

Abbildung 2-76: *Verkehrsleistung des Güterstraßenverkehrs*

/IFEU 05a/ sieht eine Zunahme des Straßengüterverkehrs auf 604 Mrd. tkm in 2030 voraus. /LIN 06/ geht für 2030 von einer schwächeren Zunahme auf 544 Mrd. tkm (Ölpreisszenario) bzw. 560 Mrd. tkm (Referenzszenario) aus.

Luftverkehr

Bei der Bilanzierung des Luftverkehrs kann das Inland- und das Standortprinzip verfolgt werden /IFEU 05a/. Während das Inlandprinzip lediglich Verkehr über dem deutschen Bundesgebiet erfasst, werden beim Standortprinzip die abgehenden Flüge bis zur nächsten Landung bilanziert. Einem Flug von Frankfurt nach New York werden nach dem Inlandprinzip nur wenige hundert Kilometer bis zur Grenze, nach dem Standortprinzip die volle Flugstrecke zugeordnet. Für eine energetische Betrachtung bietet sich das Standortprinzip an, da die so ermittelten Flugstrecken weitgehend mit dem in Deutschland getanktem Flugtreibstoff korrespondieren.

Abbildung 2-77 zeigt die kumulierte und die individuelle Verkehrsleistung aller in Deutschland abgehenden Flugreisen. Für Flüge ins Ausland bedeutet dies, dass nur der Hinflug bewertet wird. Die jährliche durchschnittliche Reiseweite liegt demnach höher als die hier angegebenden Werte von 1.720 km pro Person im Jahr 2000. Diese Beförderungsleistung wird sich bis 2030 verdoppeln (3.450 Pkm/(P•a)) und bis 2050 verdreifachen (5.270 Pkm/(P•a)). Die gesamte Verkehrsleistung im Luftverkehr erhöht sich entsprechend von rund 142 Mrd. Pkm auf 275 Mrd. Pkm in 2030 und auf 390 Mrd. Pkm in 2050.

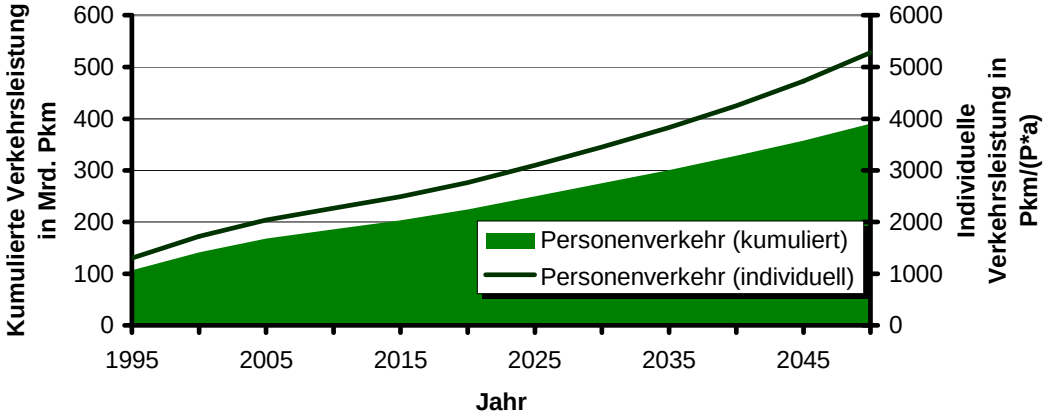

Abbildung 2-77: *Verkehrsleistung des Personenluftverkehrs*

/WI 08/ geht von einer deutlich höheren Steigerung aus und erreicht bereits in 2030 bereits ca. 580 Mrd. Pkm. Da /LIN 06/ nach dem Inlandsprinzip bilanziert, sind die Werte nicht direkt vergleichbar. Dort wird eine Steigerung der Verkehrsleistung bis 2030 um den Faktor 1,64 angegeben.

Der Güterverkehr zeigte in der Vergangenheit einen parallelen Verlauf zum Personenflugverkehr. Es wird jedoch davon ausgegangen, dass der Güterverkehr in Zukunft deutlich stärker ansteigt und in 2030 ca. 20 Mrd. tkm, in 2050 etwa 36 Mrd. tkm erreicht (2000: 4,5 Mrd. tkm, vgl. **Abbildung 2-78**). Dies entspricht einer Steigerung gegenüber 2005 (7,2 Mrd. tkm) um den Faktor 2,8 (2030) bzw. 5,0 (2050). /LIN 06/ weist eine Steigerung bis 2030 um den Faktor 1,72 (Ölpreisszenario) bzw. 1,79 (Referenzszenario) aus.

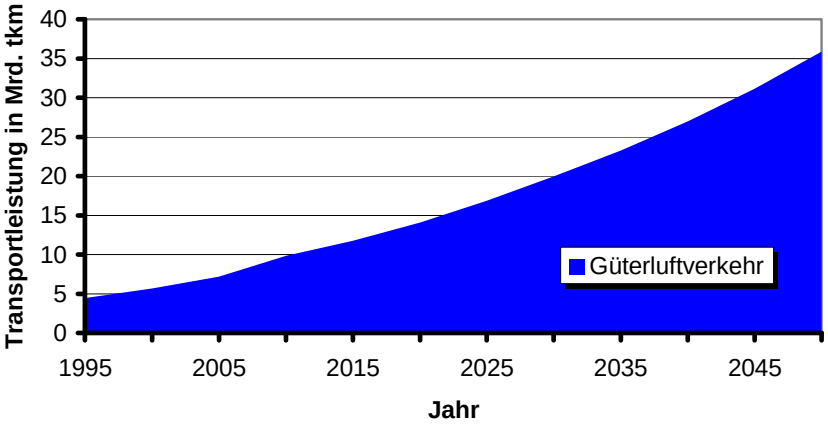

Abbildung 2-78: *Verkehrsleistung des Güterluftverkehrs*

Schienenverkehr

Der Ist-Zustand wird im Personennahverkehr über die Anzahl der beförderten Personen und die mittlere Wegstrecke abgeschätzt, da nicht alle Fahrkartenarten (Zeit- oder Zonenkarten) Rückschlüsse auf die Reiseweite erlauben. Die Deutsche Bahn AG /DBAG 01/, /DBAG 06a/ veröffentlicht die Beförderungsleistung des DB Regio einschließlich der deutschen S-Bahnen. /VDV 08/ nennt höhere Verkehrsleistungen, da zusätzlich die privaten Bahnunternehmen, die Mitglied im Verband Deutscher Verkehrsunternehmen sind, berücksichtigt werden. Das Statistische Bundesamt

/StBu 08b/ weist die höchsten Werte für die Beförderung im Nahverkehr aus. Diese Werte bilden die Basis dieser Studie, da sich die Bundesbehörde auf die Erhebungen aller Verkehrsbetriebe stützen kann.

Die Beförderungsleistung im Schienenverkehr ist in **Abbildung 2-79** dargestellt. Es wird davon ausgegangen, dass die durchschnittliche, jährlich zurückgelegte Strecke jedes Bundesbürgers (Individuelle Verkehrsleistung) von 910 km (2000) bis zum Jahr 2050 auf 1.300 km steigt (2030: 1.180 km). Der Schienenverkehr setzt sich aus dem Fern- und Nahverkehr sowie aus den urbanen S-, Straßen- und U-Bahnen (SSU) zusammen. Folgende Gründe sind für den Anstieg der Mobilität im Personenschienenverkehr verantwortlich:

- Steigende Mobilität in allen Verkehrsbereichen
- Zunehmende Urbanisierung und damit vermehrte Nutzung der SSU
- Verbesserte Konkurrenzfähigkeit der öffentlichen Verkehrsmittel bei steigenden Energiepreisen
- Demographische Entwicklung (Ältere Menschen nutzen mehr öffentliche Verkehrsmittel und weniger Privat-Pkw /DIW 03/)

Bedingt durch die Bevölkerungsentwicklung steigt die gesamte, in Schienenfahrzeugen geleistete Beförderung (kumulierte Verkehrsleistung) schwächer an und erreicht 2050 einen Wert von 96 Mrd. Pkm (2000: 75 Mrd. Pkm; 2030: 93 Mrd. Pkm).

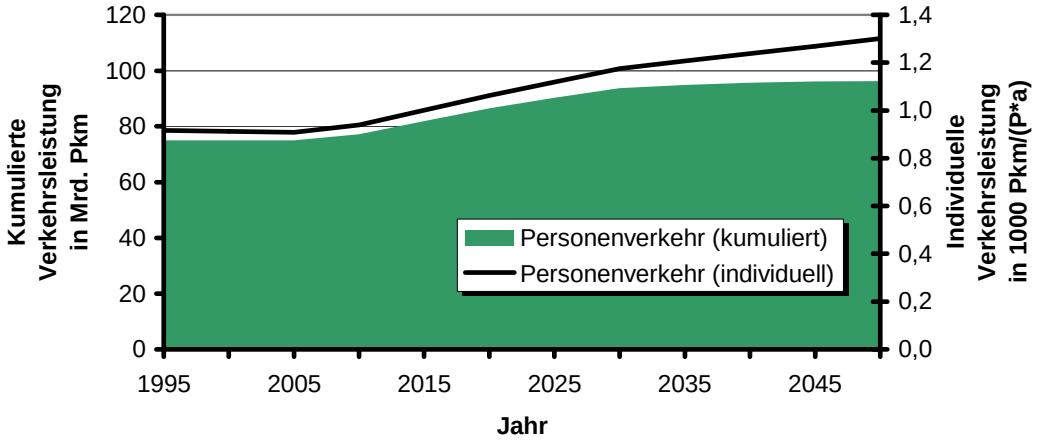

Abbildung 2-79: *Verkehrsleistung des Personenschienenverkehrs*

/IFEU 05a/ nennt eine Prognose der Beförderungsleistung der Deutschen Bahn und geht von einer individuellen Verkehrsleistung von 1.081 Pkm/(P•a) und einer Gesamtbeförderungsleistung von 88 Mrd. Pkm in 2030 aus und unterschreitet dadurch das FfE Referenzszenario um 5 %.

/LIN 06/ gibt für die Eisenbahnen und Stadtbahnen eine geringere Beförderungsleistung an (2030: 85 Mrd. km) als das Ölpreisszenario (2030: 108 Mrd. km). /SCH 07/ gibt für 2020 eine Verkehrsleistung von rund 90 Mrd. km (FfE: 86 Mrd. km).

Die Entwicklung im Güterschienenverkehr (**Abbildung 2-80**) verläuft stetig steigend von 95 Mrd. tkm (2005) auf 155 Mrd. tkm (2050). Gründe dafür sind die in allen Verkehrsbereichen steigende Transportleistung. Im Vergleich zu den anderen

Verkehrsarten Straßen-, Schiff- und Flugverkehr zeigt der Schienenverkehr, bedingt durch die hohen Investitionskosten eines Netzausbaus, nur moderate Zuwachsraten.

/LIN 06/ schätzt die Zuwachsraten der Transportleistung im Schienenverkehr höher ein als das FfE-Referenzszenario. Für 2020 wird sie dort auf 114 Mrd. tkm im Ölpreisszenario bzw. auf 115 Mrd. tkm im Referenzszenario (FfE, 2020: 112 Mrd. tkm) angegeben, bei /SCH 07/ auf 135,2 Mrd. tkm. Im Jahr 2030 werden bei /LIN 06/ in beiden Szenarien rund 133 Mrd. tkm (FfE, 2030: 126 Mrd. tkm) angegeben. Grundlage sind durchschnittliche, jährliche Zuwachsraten von ca. 2 % (FfE 1 %).

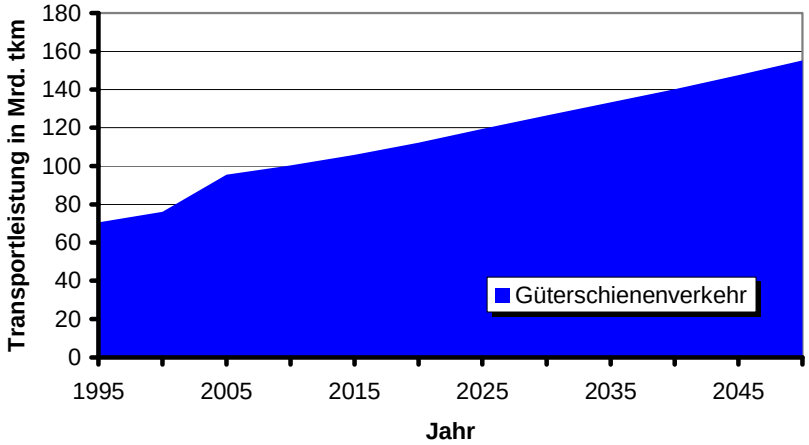

Abbildung 2-80: *Transportleistung des Güterschienenverkehrs*

Schiffsverkehr

Im Schifffahrtsverkehr nimmt die Personenbeförderung eine geringe Bedeutung ein. Im gemischten Fährbetrieb von Passagieren und Fahrzeug oder Frachtgut spielt die Energiemenge für die Personenbeförderung eine untergeordnete Rolle. Die Personenbeförderung sowie der Betrieb von Ausflugsschiffen werden in dieser Studie vernachlässigt.

Im Güterschiffsverkehr wird zwischen Binnen- und Seeschifffahrt unterschieden. Während die Transportleistung des Binnenverkehrs in Tonnenkilometer ausgewiesen wird /StBu 08b/, ist für den Seeverkehr nur die Beladung statistisch erfasst, nicht aber die zugehörige Entfernung. Beide Größen sind in **Abbildung 2-81** in ihrer Entwicklung bis 2050 abgebildet. Es wird erwartet, dass sich sowohl die Transportleistung des Binnenverkehrs als auch der Güterumschlag des Seeverkehrs jährlich um 1 bis 1,5 % erhöhen.

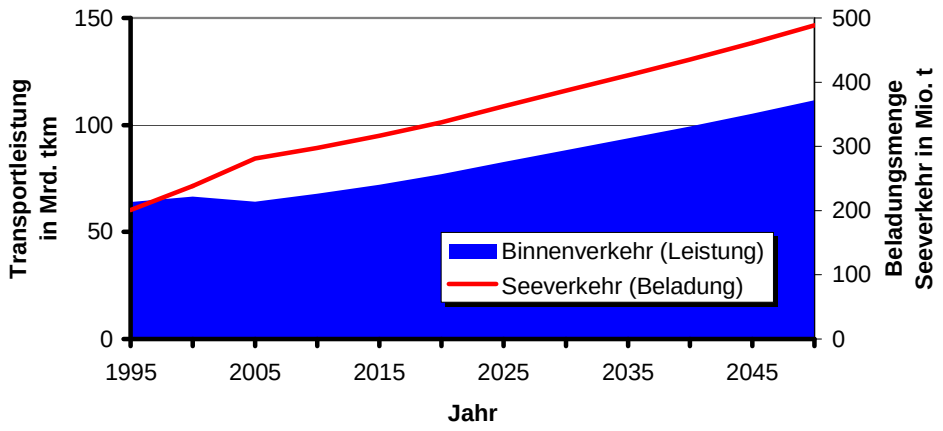

Abbildung 2-81: *Transportleistung des Güterschiffsverkehrs*

2.4.2 Technikstruktur

Straßenverkehr

Die zukünftige Technikstruktur im Straßenverkehr ist heftig umstritten. Daimler-Chrysler /KOH 06/ sieht die Zukunft in weiterhin flüssigen, jedoch synthetisch erzeugten Kraftstoffen mit fossilem und biogenem Ursprung. Die bestehenden Fahrzeuge und die Infrastruktur könnten so weiter genutzt werden. Durch die Erzeugung eines synthetischen Kraftstoffes aus Biomasse kann der regenerative Anteil ohne Motoranpassung beliebig variiert werden.

Der vermehrte Einsatz von Biokraftstoffen ist gegenwärtig ein Teil der deutschen Energiepolitik /IEKP-01 07/, Biodiesel erreichte 2006 bereits 12 % am gesamten Dieselabsatz im Straßenverkehr /DIW 07/.

Erd- oder Flüssiggas betriebene Fahrzeuge sind schon seit langem auf dem Markt verfügbar und ihr Einsatz wird durch die hohen Diesel- und Benzinpreise zunehmend attraktiver. Dennoch ist ihr Anteil am gesamten Kraftfahrzeugbestand mit 71.000 Pkw (0,2 %) noch sehr gering /DIW 07/.

Fahrzeuge, die ihre Energie aus Wasserstoff über einen Verbrennungsmotor oder eine Brennstoffzelle beziehen, gelten schon seit Jahren als Hoffnungsträger. Einzelne Testbetriebe werden durchgeführt, eine relevante Marktdurchdringung wurde jedoch noch nicht erreicht. /EUCO 03/

Das Elektrostraßenfahrzeug (ESF) hat sein Image als langsamer und nicht vollwertiger Kleinstwagen durch den Prototyp des „Tesla“ weitgehend korrigieren können /EBE 06/. Für eine Marktdurchdringung von ESF sprechen die Pilotvorhaben in Israel /FAZ 08/, Berlin /RWE 08/ und anderen Standorten. In /FFE 07/ wird die elektrizitätswirtschaftliche Einbindung in Form regelbarer Lasten als weiterer Vorteil der Elektrostraßenfahrzeuge hervorgehoben.

Besonders die hohen Kraftstoffpreise und eine mögliche Ausdehnung des CO_2-Handels auf den Verkehrssektor sind Triebfedern für einen Umbruch im Straßenverkehr. Zwar sprechen die hohen Kosten der Infrastruktur gegen die Etablierung mehrerer verschiedener Antriebskonzepte, allerdings wird erst die Praxis zeigen, welche Technik sich durchsetzen wird. Das Referenzszenario geht von einem breiten Kraftstoffmix aus, der in **Abbildung 2-82** für den MIV dargestellt ist. Gezeigt ist der Kraftstoffanteil bezüg-

lich der Verkehrsleistung. Das Diagramm gibt somit den Anteil der Personenkilometer an, die in einem Fahrzeug mit dem entsprechenden Kraftstoff zurückgelegt werden. Die Dominanz des Kraftstoffs Benzin wird stetig durch Biokraftstoffe, Erd- und Flüssiggas sowie Strom geschmälert. Ab 2020 verzeichnet Wasserstoff höhere Zuwachsraten. In 2050 werden folgende Anteile im MIV erreicht: Benzin 33 %, Biokraftstoffe 20 %, Diesel 17 %, Erd- und Flüssiggas 10 %, Strom 10 % und Wasserstoff 10 %.

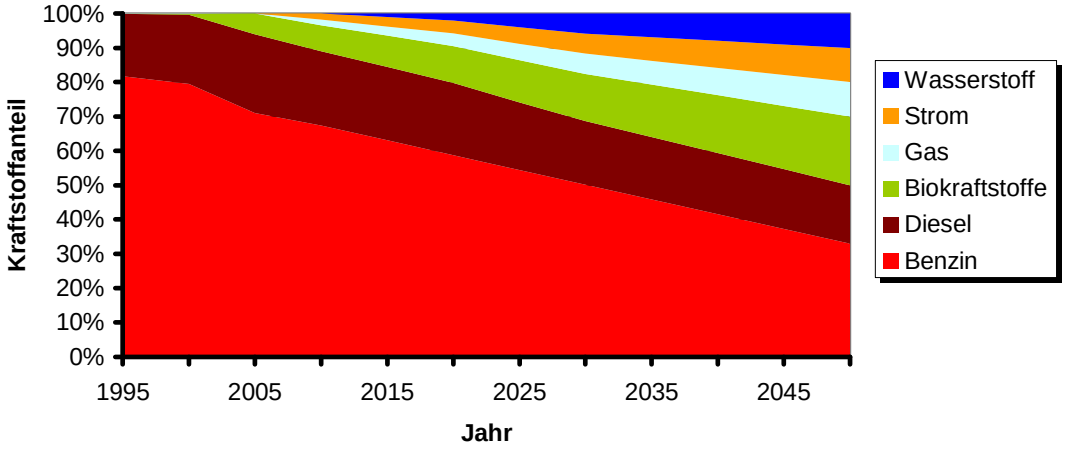

Abbildung 2-82: *Kraftstoffanteil bezüglich der Verkehrsleistung im motorisierten Individualverkehr (MIV)*

Im ÖPV (**Abbildung 2-83**) wird Benzin nur in unbedeutenden Mengen eingesetzt. Ansonsten bieten sich wegen hoher Fahrleistungen teurere Anfangsinvestitionen an, die mit geringeren Betriebskosten verbunden sind. Im innerstädtischen Verkehr haben Elektrofahrzeuge wegen der möglichen Rückspeicherung der Bremsenergie zusätzliche Vorteile. In 2050 werden folgende Anteile im ÖPV erreicht: Diesel 25 %, Strom 30 %, Biokraftstoffe 25 %, Wasserstoff 15 % sowie Erd- und Flüssiggas 5 %.

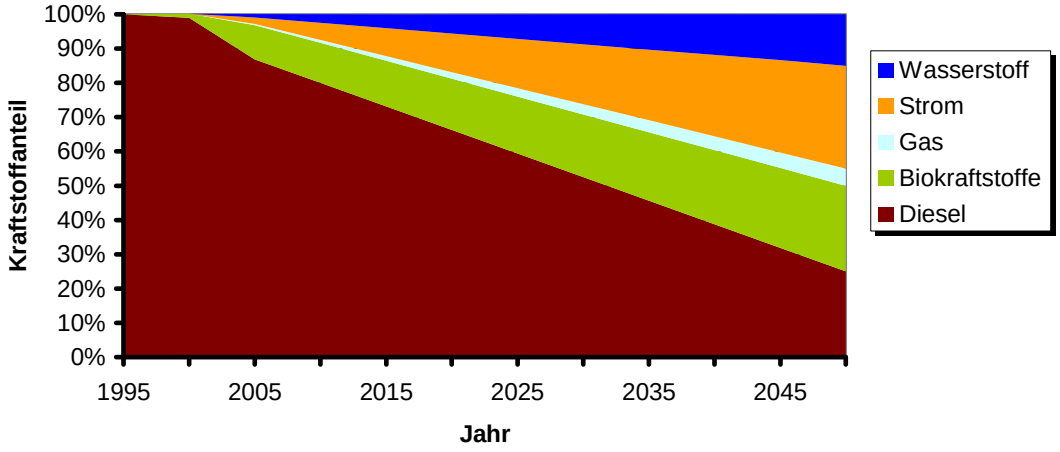

Abbildung 2-83: *Kraftstoffanteil bezüglich der Verkehrsleistung im öffentlichen Personenverkehr (ÖPV)*

Im Güterverkehr (**Abbildung 2-84**) wird die Dominanz des Diesels durch Biokraftstoffe und Wasserstoff gebrochen, Strom, Benzin und Erd- oder Flüssiggas können keine

Marktstellungen erobern. In 2050 ergeben sich folgende Anteile an der Transportleistung: Diesel 54 %, Biokraftstoffe 25 %, Wasserstoff 20 % und Strom 1 %.

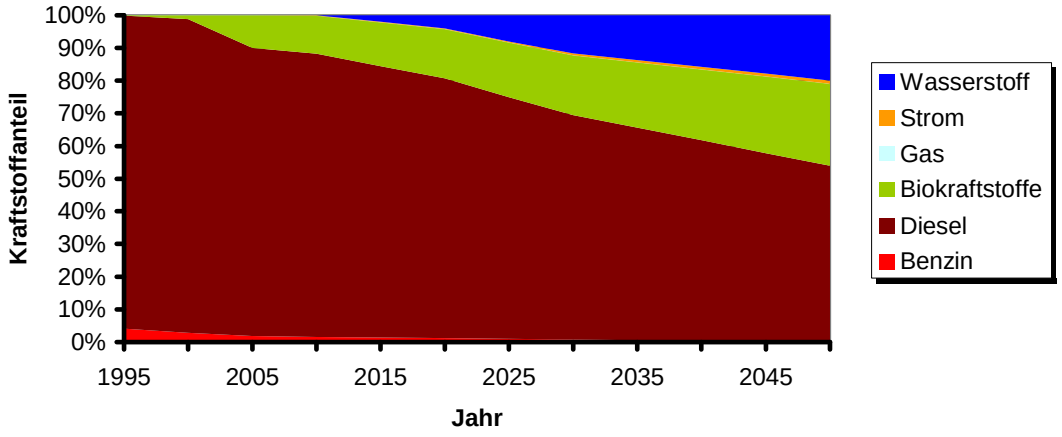

Abbildung 2-84: *Kraftstoffanteil bezüglich der Verkehrsleistung im Güterstraßenverkehr*

Die Energieeffizienz im Straßenverkehr wird sich in Zukunft weiter verbessern. Der durchschnittliche Kraftstoffverbrauch aller zugelassenen Pkw mit Ottomotoren ging zwischen 1994 (9,2 l/100 km) und 2006 (8,3 l/100 km) um knapp 10 % zurück. Bei Dieselfahrzeugen ist im gleichen Zeitraum ein Rückgang um 8 % festzustellen (1994: 7,5 l/100 km; 2006: 6,9 l/100 km) /DIW 07/.

Wasserstofffahrzeuge stellen interessante Alternativen zu konventionellen Fahrzeugen dar, da sie einen universellen Energieträger verwenden und bei Einsatz einer Brennstoffzelle das Potenzial zu hohen Wirkungsgraden haben. Der Einsatz von Wasserstoff in Verbrennungsmotoren, der von der BMW AG verfolgt wird, wird in dieser Studie nicht betrachtet, da bei dieser Variante der Effizienzvorteil ungenutzt bleibt. Ein aktuelles Brennstoffzellenfahrzeug (B-Klasse F-CELL von Daimler /DAI 08b/) verbraucht nach Herstellerangaben 2,9 l Dieseläquivalent pro 100 km.

/LIN 06/ nennt für 2030 folgende Kraftstoffverbräuche:

- Dieselfahrzeuge 5,3 l/100 Fkm (1,36 MJ/Pkm)
- Ottofahrzeuge 6,2 l/100 Fkm (1,33 MJ/Pkm)
- Wasserstofffahrzeuge (Brennstoffzelle) 1,3 kg/100 Fkm (1,11 MJ/Pkm)
- Elektrostraßenfahrzeuge 50 kWh/100 Fkm (1,29 MJ/Pkm)

Die Angaben der Wasserstoff- und Elektrostraßenfahrzeuge wurden bereits von aktuellen Entwicklungen unterboten /DAI 08b/, /EBE 06/.

Der spezifische Kraftstoffverbrauch von Elektrostraßenfahrzeugen wird in /FFE 07/ für einen Kompaktwagen mit rund 20 kWh je 100 Fahrzeugkilometer angegeben. Das Elektrostraßenfahrzeug Smart von Daimler verbraucht laut Herstellerangaben 13,5 kWh/100km /DAI 08a/, der Elektrosportwagen Tesla laut Herstellerangaben 11 kWh/100km /EBE 06/. Bei einem durchschnittlichen Besetzungsgrad von 1,2 Personen ergibt sich für diese Zweisitzer ein spezifischer Kraftstoffverbrauch von 0,32 bis 0,47 MJ/Pkm. Noch weitere Effizienzsteigerungen könnten durch eine Gewichts-

reduzierung der elektrischen Speicher, eine Verbesserung der Bremsenergierückgewinnung sowie eine Optimierung der Antriebstechnik erreicht werden.

In **Abbildung 2-85** sind die spezifischen Kraftstoffverbräuche bezogen auf einen Personenkilometer angegeben.

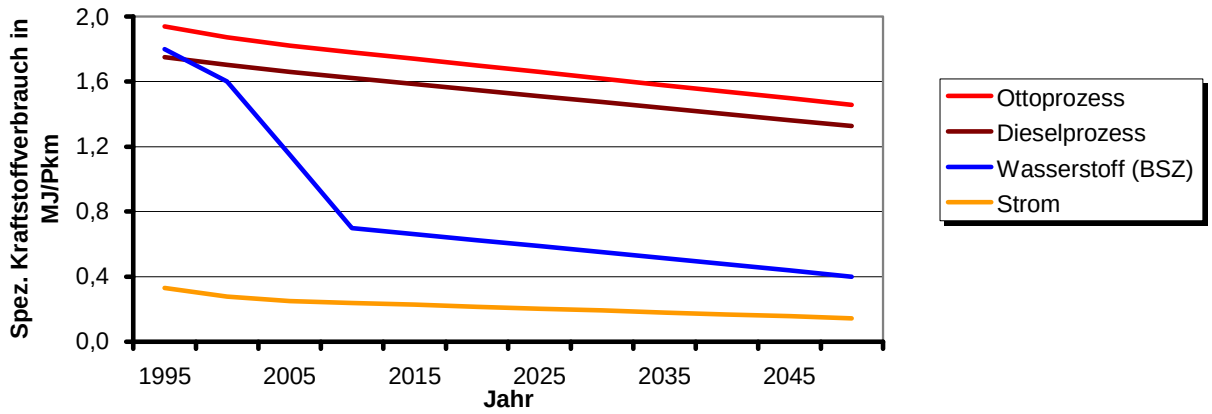

Abbildung 2-85: *Spezifischer Kraftstoffverbrauch im motorisierten Individualverkehr*

Im öffentlichen Personenverkehr sind die Verbrauchswerte je Pkm durch die höhere Anzahl der Fahrgäste deutlich geringer als in Pkws. Im Nahverkehr ergibt sich aus dem Rückspeichern der Bremsenergie ein weiterer Vorteil. Die verwendeten spezifischen Kraftstoffverbräuche des ÖPV sind in **Abbildung 2-86** dargestellt.

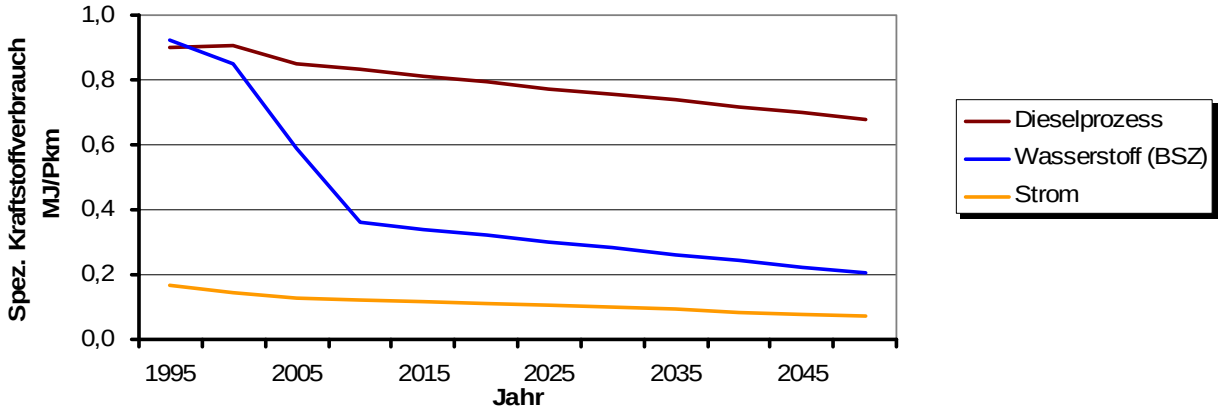

Abbildung 2-86: *Spezifischer Kraftstoffverbrauch im öffentlichen Personenverkehr*

Bei Güterstraßenfahrzeugen ist der Verbrauch stark von der Beladung und dem Fahrzyklus abhängig. Laut /DIW 07/ beträgt der durchschnittliche Verbrauch aller in Deutschland zugelassenen Lastkraftwagen im Jahr 1994 22,5 l/100 km, im Jahr 2006 20,3 l/100 km. Der Verbrauch der Zugmaschinen sank von 37,1 l/100 km (1994) auf 36,3 l/100 km (2006). Moderne 40-Tonner verbrauchen laut /VDA 08/ nur 32 l/100km. Positiv auf den spezifischen Kraftstoffverbrauch je Tonnenkilometer wirkt sich die Beladungsrate aus. /VDA 08/ meldet, dass die Anzahl der Leerfahrten von 27,6 % (1997) auf 19,7 % (2006) zurückging. Die verwendeten spezifischen Kraftstoffverbräuche des Güterstraßenverkehrs sind in **Abbildung 2-87** dargestellt.

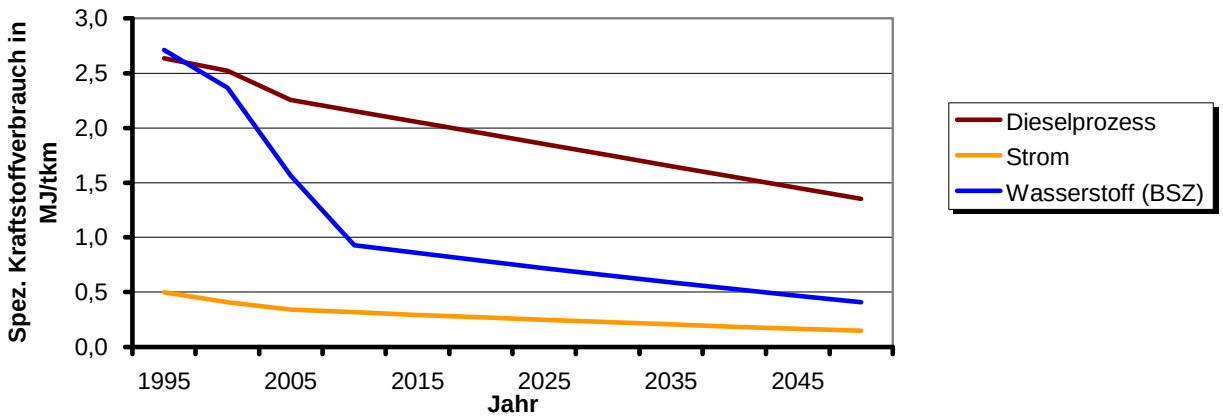

Abbildung 2-87: *Spezifischer Kraftstoffverbrauch im Güterstraßenverkehr*

/LIN 06/ stellt die Kraftstoffverbräuche aller Güterverkehrsfahrzeuge für 2030 wie folgt dar:

- Ottofahrzeuge 11,5 l/100 Fkm
- Dieselfahrzeuge 18,7 l/100 Fkm
- Elektrostraßenfahrzeuge 125 kWh/100 Fkm

Eine Umrechnung der Angaben in massenbezogene Verbräuche kann aus den veröffentlichten Zahlen nur für Dieselfahrzeuge abgeschätzt werden und beträgt für 2030 rund 1,33 MJ/tkm und erreicht somit deutlich günstigere Werte als in dieser Studie (2030: 1,75 MJ/tkm) angesetzt werden.

Luftverkehr

Abbildung 2-88 zeigt den spezifischen Verbrauch im Flugverkehr. Der Gütertransport erfolgt entweder in Frachtmaschinen oder als Begleitfracht in Passagiermaschinen. Eine Zuordnung des Flugkraftstoffverbrauchs auf den Güter- und den Personenverkehr ist somit nur schwer möglich. In dieser Studie wird die Beförderung von einem Fluggast inkl. Gepäck unter energetischen Gesichtspunkten gleich gesetzt mit dem Transport von 100 kg Fracht. Der spezifische Verbrauch errechnet sich aus der Beförderungs- und Transportleistung aller in Deutschland abgehender Flüge und aus der Menge des in Deutschland getankten Flugtreibstoffs. Demnach beträgt der spezifische Kraftstoffverbrauch im Jahr 2000 1,5 MJ/Pkm (Güter: 15,5 MJ/tkm) und sinkt bis 2030 auf 1,38 MJ/Pkm (Güter: 13,8 MJ/tkm) und bis 2050 auf 1,3 MJ/Pkm (Güter: 13,8 MJ/tkm). Vergleichbare Werte nennt /WI 08/ für das Jahr 2000 mit 40-50 g „Öleinheiten" je Pkm, oder entsprechend 1,72 bzw. 2,15 MJ/Pkm. Die leicht höheren Werte ergeben sich aus einer veränderten Zuordnung des Personen- und Frachtverkehrs.

Die Effizienzverbesserungen werden in /WI-01 08/ mit 1,5 % je Jahr, in /IFEU 05a/ mit jährlichen Verbesserungsraten zwischen 2,5 und 5,5 % angesetzt. Das FfE-Referenzszenario verwendet hingegen eine weniger optimistische Effizienzverbesserung von 0,5 % pro Jahr.

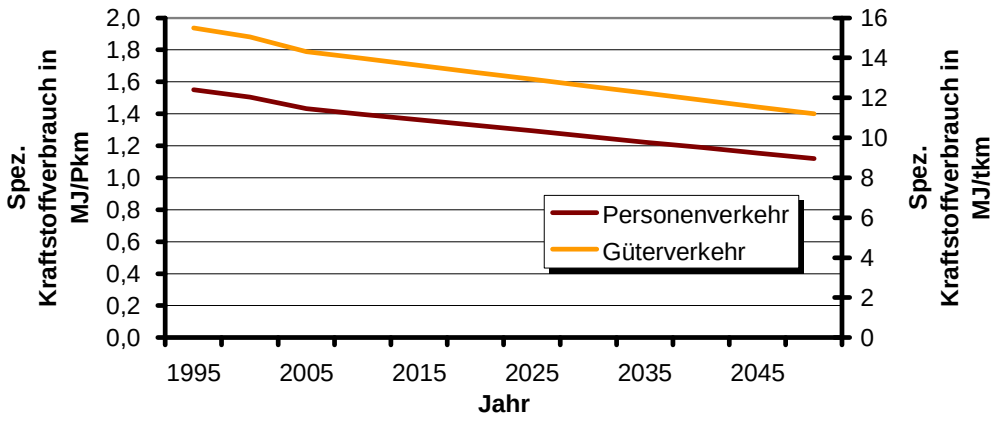

Abbildung 2-88: *Spezifischer Kraftstoffverbrauch im Luftverkehr*

Schienenverkehr

Der spezifische Kraftstoffverbrauch wird in Endenergie je Personenkilometer angegeben. Dieser wird in der vorliegenden Studie aus dem Endenergieeinsatz für den Betrieb der Schienenfahrzeuge (Traktionsenergie, /DBAG 06b/) und der entsprechenden Verkehrsleistung /DBAG 01/, /DBAG 06a/ berechnet. Somit ergeben sich im Personenschienenverkehr (**Abbildung 2-89**) für 2000 ein spezifischer Kraftstoffverbrauch von 1,09 MJ/Pkm (Diesel) bzw. 0,45 MJ/Pkm (Strom) und für 2050 0,87 MJ/Pkm (Diesel) bzw. 0,36 MJ/Pkm (Strom).

Ähnliche Werte weisen /IFEU 05a/ (2004: Dieselkraftstoffverbrauch: Fernverkehr 1,01 MJ/Pkm, Nahverkehr 1,13 MJ/Pkm. Elektrotraktion: Fernverkehr 0,29 MJ/Pkm, Nahverkehr 0,56 MJ/Pkm) und /LIN 06/ (2002: Dieselkraftstoffverbrauch: Fernverkehr 0,79 MJ/Pkm, Nahverkehr 1,18 MJ/Pkm; Elektrotraktion: Fernverkehr 0,29 MJ/Pkm, Nahverkehr 0,54 MJ/Pkm) aus.

In dem Referenzszenario wird von einer jährlichen Nutzungsgradverbesserung von 0,2 % für beide Antriebsarten ausgegangen /IFEU 05a/. Da der spezifische Kraftstoffverbrauch auf die zurückgelegten Personenkilometer bezogen ist, spiegelt sich in dieser Kenngröße neben den technischen Effizienzsteigerungen auch die Zugauslastung wider. Letztere ist verantwortlich für den schwankenden, spezifischen Verbrauch in den ermittelten Jahren von 1995 bis 2005.

Der Einsatz Diesel betriebener Schienenfahrzeuge betrug 2005 17 % (1995: 22 %). In dieser Studie wird ein weiterer Rückgang des Betriebs der Dieselfahrzeuge bis 2050 auf insgesamt 4 % angenommen.

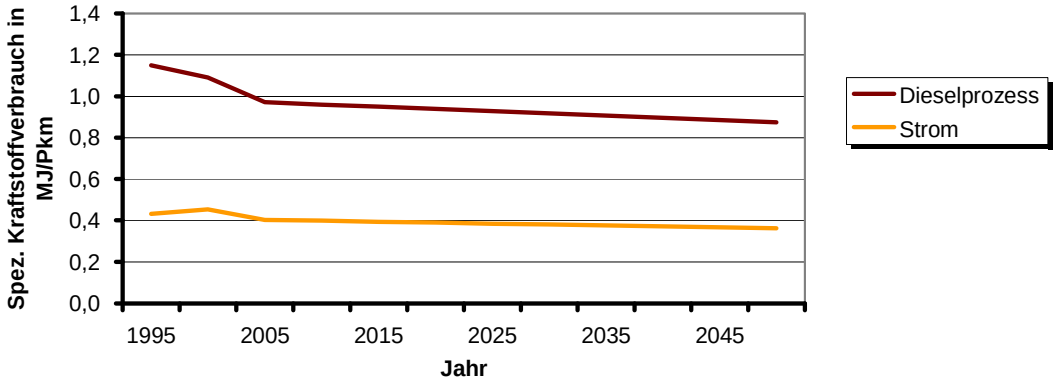

Abbildung 2-89: *Spezifischer Kraftstoffverbrauch im Personenschienenverkehr*

Im Güterverkehr liegt der spezifische Kraftstoffverbrauch von Diesel bei 0,69 MJ/tkm (2000) und 0,59 MJ/tkm (2005), von Strom bei 0,17 MJ/tkm (2000) und 0,12 MJ/tkm (2005). Dabei wird zukünftig eine jährliche Wirkungsgradsteigerung von 0,2 % unterstellt (**Abbildung 2-90**).

/IFEU 05a/ nennt für Diesel niedrigere Verbrauchswerte 0,46 MJ/tkm (2004, inkl. Rangierarbeit) und vergleichbare Werte für die Elektrotraktion (2004: 0,14 MJ/tkm).

/LIN 06/ weist mit 0,16 MJ/tkm deutlich höhere Werte für die Elektrotraktion in 2030 aus als die FfE (0,12 MJ/tkm).

Der Anteil der Dieselfahrzeuge an der Transportleistung betrug im Jahr 2000 9 % (1995: 16 %). Es wird angenommen, dass dieser Wert bis 2050 weiterhin auf 2 % fällt

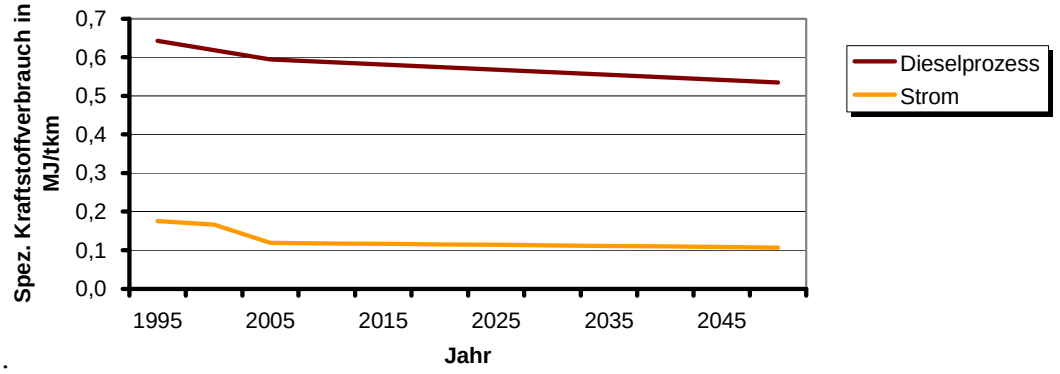

Abbildung 2-90: *Spezifischer Kraftstoffverbrauch im Güterschienenverkehr*

Schiffsverkehr

Der spezifische Kraftstoffverbrauch im Schiffsverkehr ist stark von der Schiffsgröße und dem Schiffstyp abhängig.

/IFEU 05a/ beziffert den spezifischen Verbrauch im Binnenverkehr mit 0,43 MJ/tkm, /LIN 06/ gibt für 2002 ca. 0,45 MJ/tkm und 2030 etwa 0,39 MJ/tkm an.

Im Seeverkehr werden in /IFEU 05b/ Verbrauchsangaben für unterschiedliche Schiffstypen angegeben:

- Tankschiffe (50.000 bis 200.000 t): 0,03-0,11 MJ/tkm
- Massenguttransporter (ca. 40.000 t): 0,09-0,21 MJ/tkm

- Containerschiffe oder Fähren (9.000 bis 23.000 t): 0,16-0,41 MJ/tkm

In der vorliegenden Studie wird der durchschnittliche Verbrauch der Binnen- und Seeschifffahrt auf 0,11 MJ/tkm (2005) abgeschätzt und eine Effizienzsteigerung bis 2050 um 7,5 % unterstellt (**Abbildung 2-91**).

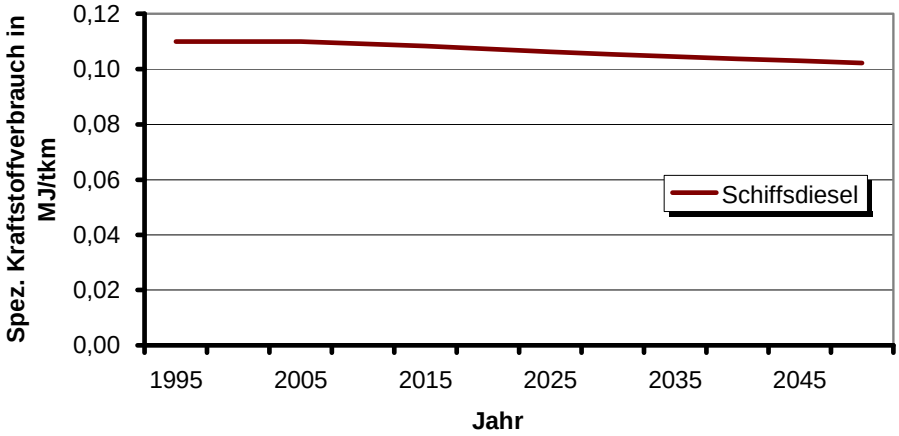

Abbildung 2-91: *Spezifischer Kraftstoffverbrauch im Schiffsverkehr*

2.4.3 Endenergieverbrauch

Straßenverkehr

Der Kraftstoffverbrauch im Personenverkehr (**Abbildung 2-92**) ist von dem Bevölkerungsrückgang und der Effizienzsteigerung der Fahrzeuge geprägt. Während die neueren Kraftstoffe ihren Anteil vergrößern, geht insbesondere der Benzinanteil drastisch zurück. Im Jahr 2010 beträgt der gesamte Endenergieverbrauch im Personenverkehr 1.560 PJ, in 2030 ca. 1.220 PJ und in 2050 etwa 890 PJ.

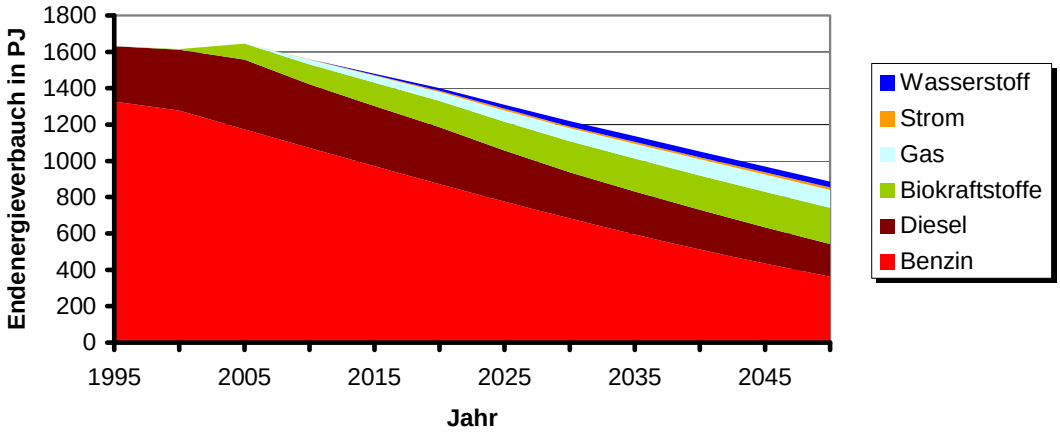

Abbildung 2-92: *Kraftstoffverbrauch im Personenverkehr*

Der Kraftstoffverbrauch im Güterverkehr steigt auf Grund des langfristig optimistischen Wirtschaftswachstums (**Abbildung 2-93**), kann aber ab 2010 durch Effizienzsteigerungen bezüglich der Auslastung und der Antriebstechnik konstant gehalten werden. Die Umstellung auf Fahrzeuge und Techniken mit höheren Wirkungsgraden wie Elektro- und Brennstoffzellenfahrzeuge oder Bremsenergierückgewinnung sorgt ab

2030 für einen rückläufigen Energieverbrauch im Bereich des Güterstraßenverkehrs. Im Jahr 2010 beträgt der gesamte Endenergieverbrauch im Güterstraßenverkehr 970 PJ und in 2050 etwa 900 PJ.

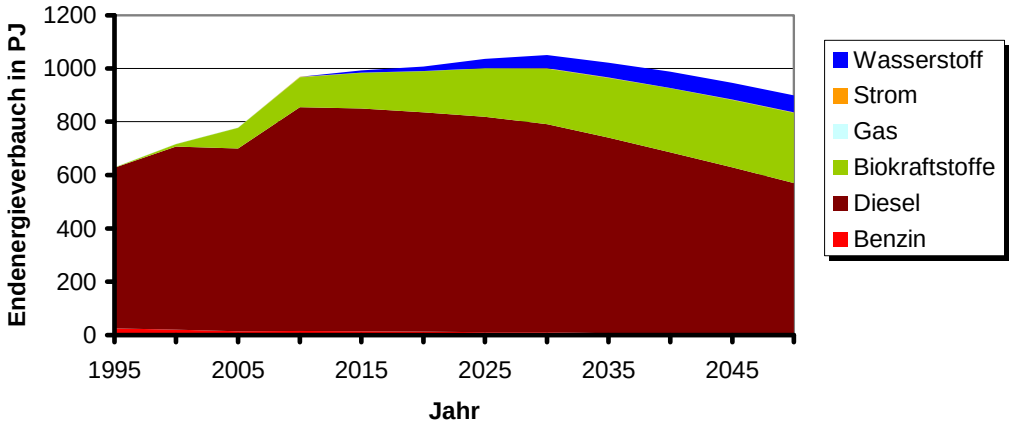

Abbildung 2-93: *Kraftstoffverbrauch im Güterverkehr*

In Summe sinkt der Endenergieverbrauch im Straßenverkehr ab 2010 von ca. 2,5 EJ auf 1,8 EJ in 2050 (**Abbildung 2-94**). Der heute dominierende Anteil des motorisierten Individualverkehrs wird zu Gunsten eines gleichwertigen Verbrauchs im Personen- und Güterverkehr abgelöst. Der öffentliche Personenverkehr ist energetisch von untergeordneter Rolle.

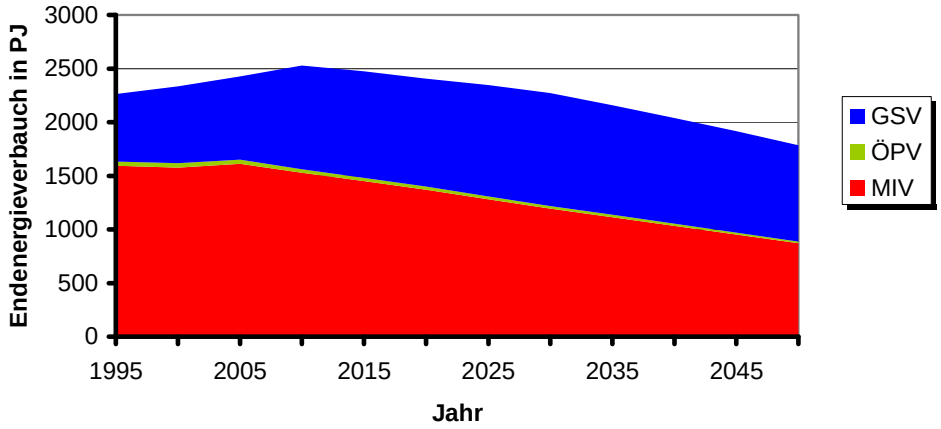

Abbildung 2-94: *Kraftstoffverbrauch im Straßenverkehr*

/IFEU 05a/ gibt einen Rückgang des Endenergieverbrauchs im Straßenverkehr von 2.140 PJ im Jahr 2010 auf 1.800 PJ in 2030 an, dies entspricht einer Reduzierung um 16 %. Das Referenzszenario der FfE geht von einem Rückgang im gleichen Zeitraum um 13 %, im Zeitraum von 2010 bis 2050 um 33 % aus.

/LIN 06/ nennt im Jahr 2010 einen Endenergieverbrauch von ca. 2.260 PJ (Referenzszenario) bzw. 2.200 PJ (Ölpreisszenario), bis zum Jahr 2030 einen Rückgang auf 1.970 PJ bzw. 1.860 PJ. Dies entspricht einem Minus von 13 % bzw. 15 %.

Luftverkehr

Abbildung 2-95 zeigt den Endenergieverbrauch im Flugverkehr, aufgeteilt in Güter- und Personenverkehr. Ein deutlicher Anstieg von 298 PJ in 2000 auf 597 PJ (2030) und 839 PJ (2050) ist das Resultat der dynamischen Entwicklung des Luftverkehraufkommens. /WI 08/ sieht, bedingt durch eine gegenüber dem FfE-Referenzszenario größere Verkehrsleistung, höhere Energieeinsätze voraus: bereits 2030 werden demnach 19,4 Mio. t Flugbenzin (ca. 826 PJ) verbraucht.

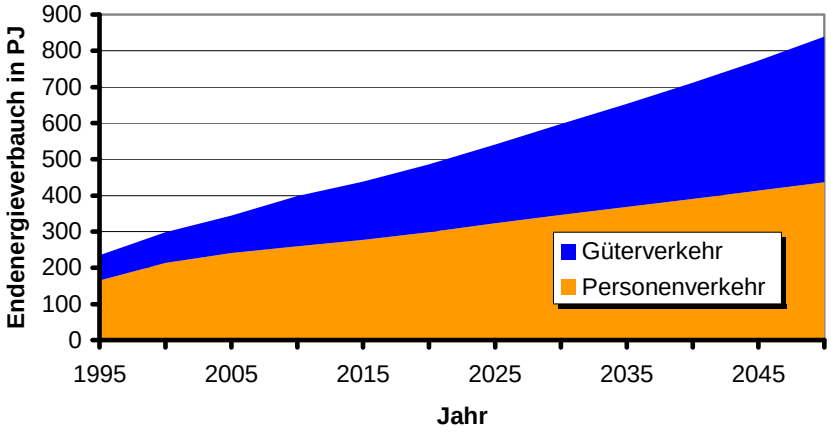

Abbildung 2-95: *Endenergieverbrauch im Luftverkehr*

Schienenverkehr

Der Endenergieverbrauch im Schienenverkehr (vgl. **Abbildung 2-96**) wird aus der Verkehrsleistung und dem spezifischen Kraftstoffverbrauch berechnet. Der anfängliche Rückgang bis 2010 ist durch die reduzierten spezifischen Kraftstoffverbräuche im Personen- und Güterverkehr bedingt. In den folgenden Jahren werden eine moderate Effizienz- und Auslastungssteigerung angenommen, die durch die steigende Verkehrsleistung ausgeglichen bzw. überkompensiert wird.

/LIN 06/ weist insgesamt für den Schienenverkehr einen höheren Endenergieeinsatz auf. Für den Personenverkehr werden dort im Jahr 2030 27,9 PJ Strom im Referenzszenario (Ölpreisvariante 30,7 PJ) und 13,8 PJ Dieselkraftstoff (Ölpreisvariante 15,1 PJ) aufgewendet. Das FfE-Referenzszenario geht im Jahr 2030 von 32,8 PJ (Strom) und 7,0 PJ (Dieselkraftstoff) aus. Im Güterverkehr nennt /LIN 06/ in beiden Szenarien im Jahr 2030 18,0 PJ Strom (FfE: 10,1 PJ) und 9,0 PJ Dieselkraftstoff (FfE: 5,1 PJ). Diese deutliche Abweichung erklärt sich aus den unterschiedlichen Ansätzen im spezifischen Kraftstoffverbrauch der Studien.

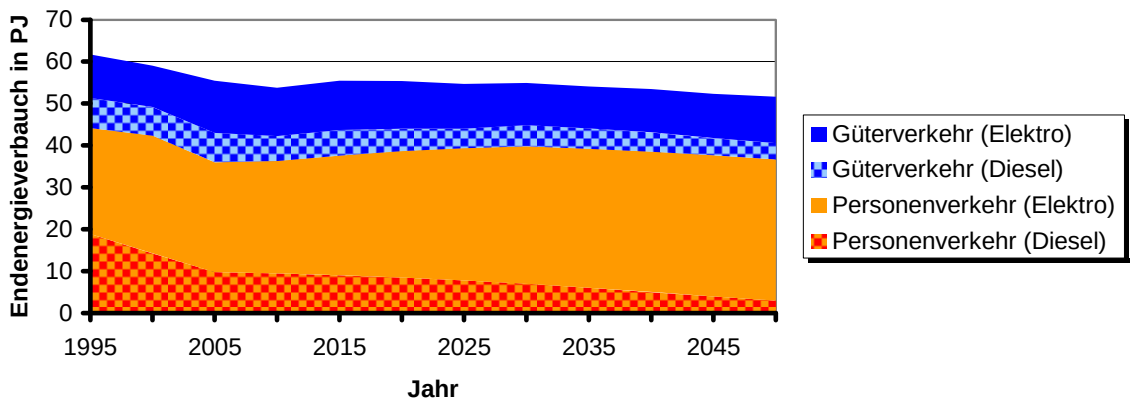

Abbildung 2-96: *Endenergieverbrauch im Schienenverkehr*

Schiffsverkehr

Der Schiffsverkehr setzt weniger als 1 % der Energie des Verkehrssektors ein. Der in dieser Studie bilanzierte Energieverbrauch des Schiffsverkehrs ist der inländische Verbrauch der Binnen- und der Seeschifffahrt. Da die Schiffe große Treibstofftanks besitzen, ist nicht davon auszugehen, dass die internationalen Transporteure große Mengen in Deutschland tanken. Dennoch hat die Vergangenheit gezeigt, dass ein gleichförmiger Zusammenhang zwischen Güterumschlag und Schiffsdieselabsatz in Deutschland besteht. Ein entsprechender Zusammenhang zwischen der Binnentransportleistung und dem Schiffsdieselabsatz konnte nicht beobachtet werden.

In **Abbildung 2-97** ist die Entwicklung des Dieselverbrauchs bis 2050 dargestellt. Zwischen 2010 und 2050 ist eine Effizienzverbesserung von 7,5 % unterstellt und eine jährliche Zunahme der Verkehrsleistung zwischen 1 und 1,5 %.

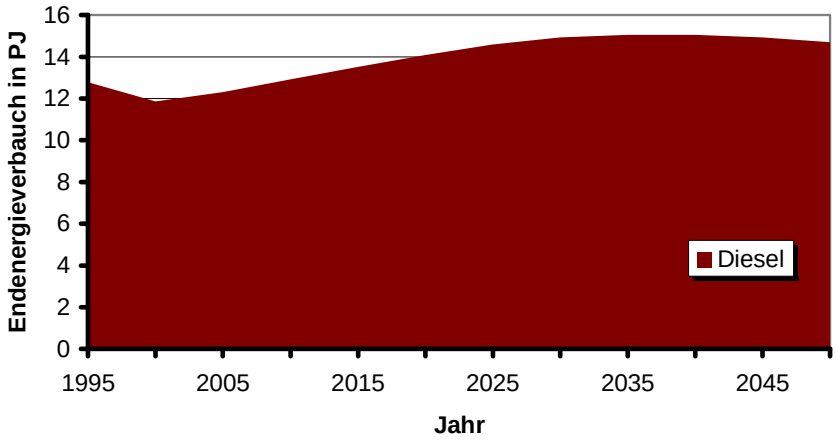

Abbildung 2-97: *Endenergieverbrauch im Schiffsverkehr*

/LIN 06/ gibt einen Endenergieverbrauch für die Binnenschifffahrt in Höhe von 31 EJ (2002) und 35 EJ (2030, Referenzszenario) an. Dieser Wert übersteigt allerdings den inländischen Verbrauch an Schiffsdiesel (2006: 11,2 EJ) um ein Vielfaches und ist vermutlich auf Tanken im Ausland zurückzuführen. Im Referenzszenario der FfE wird der in Deutschland abgesetzte Schiffsdiesel als Bezugsgröße verwendet.

Zusammenfassung des Verkehrssektors

Der Endenergieverbrauch im Verkehrssektor wird heute und in Zukunft maßgeblich vom Straßenverkehr bestimmt (**Abbildung 2-98**). Der Rückgang des gesamten Energieverbrauchs bis zum Jahr 2050 ist im Wesentlichen auf Entwicklungen im Straßenverkehr zurückzuführen. Im Luftverkehr wird der Energieeinsatz stark zunehmen, insbesondere im Bereich des Güterverkehrs. Der Schiffs- und Schienenverkehr bleiben aus energetischer Sicht von untergeordneter Bedeutung. Der gesamte Verbrauch erreicht in 2010 seinen Höhepunkt (3,0 EJ) und kann bis 2030 auf 2,8 EJ und bis 2050 auf 2,6 EJ reduziert werden.

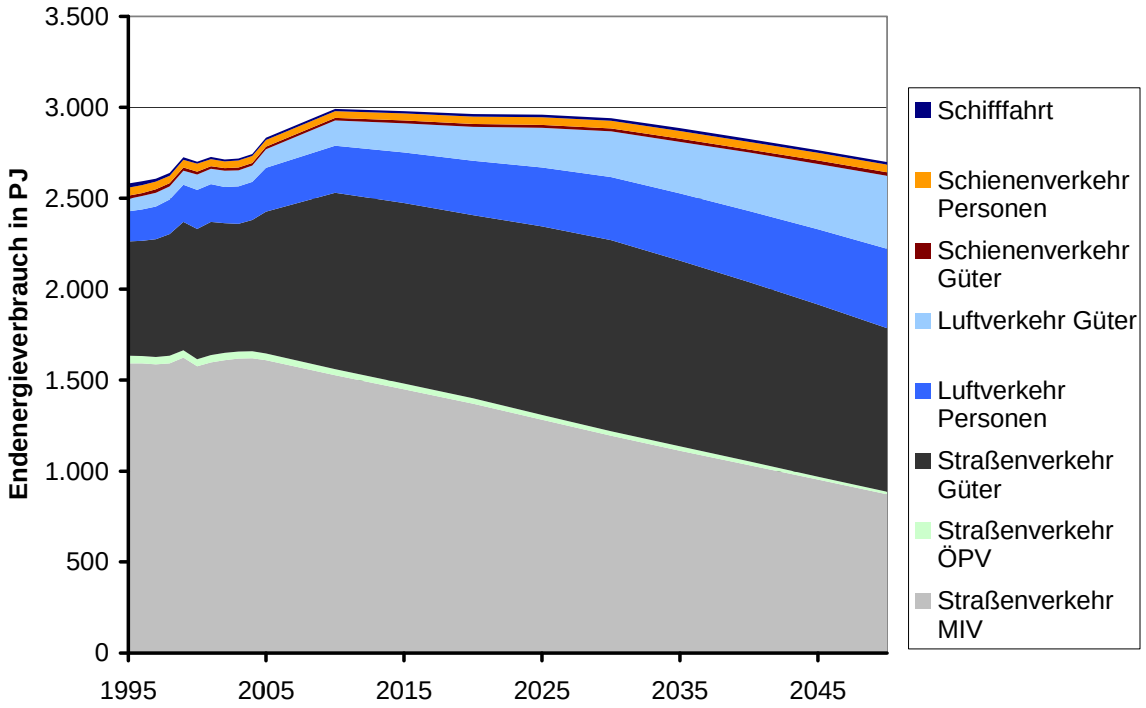

Abbildung 2-98: *Endenergieverbrauch im Verkehrssektor nach Verkehrsträgern*

Die Zusammensetzung der Endenergieträger (**Abbildung 2-99**) verändert sich von Mineralöl dominierten Kraftstoffen zu einem breiteren Kraftstoffmix. In 2010 werden die großen Anteile durch Benzin (36 %), Diesel (41 %) und Flugtreibstoff (13 %) gestellt. In 2050 haben sich die Anteile und die Reihenfolge wie folgt verschoben: Flugtreibstoffe (31 %), Diesel (29 %), Biokraftstoffe (17 %), Benzin (13 %), Erd- und Flüssiggas (4 %), Wasserstoff (4 %) und Strom (2 %).

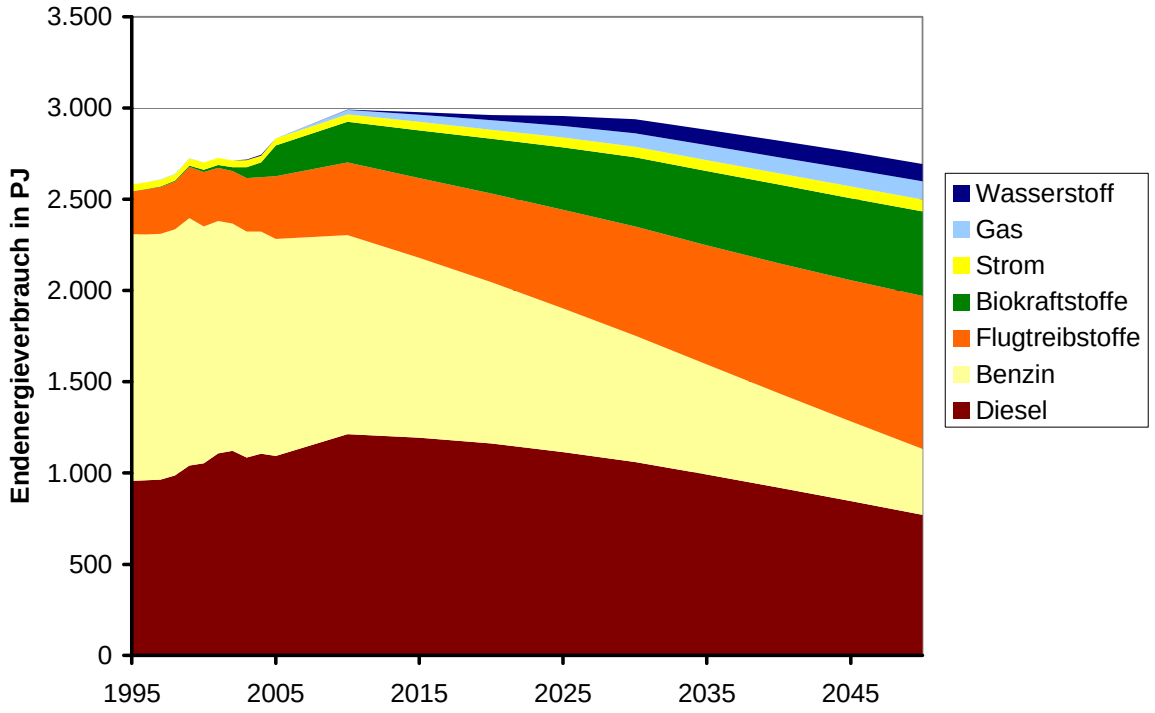

Abbildung 2-99: *Endenergieverbrauch im Verkehrssektor nach Energieträgern*

/IFEU 05a/ gibt für 2010 einen Endenergieverbrauch im Verkehrssektor von 2.580 PJ an und für 2030 einen Wert von 2.540 PJ.

/LIN 06/ beziffert den Endenergieverbrauch im Verkehrssektor auf 2.690 PJ (Referenzszenario) bzw. 2.620 PJ (Ölpreisszenario) in 2010 und auf 2.580 PJ (Referenzszenario) bzw. 2.470 PJ (Ölpreisszenario) in 2030.

Die Differenz des FfE-Referenzszenarios zu den zitierten Studien ist im Wesentlichen auf eine abweichende Einschätzung des zukünftigen Güterstraßenverkehrs zurückzuführen.

2.5 Entwicklung im Umwandlungssektor

Im Umwandlungssektor sind nicht die Bedarfsdeterminanten Grundlage der Fortschreibung, sondern der Endenergieverbrauch, der sich wiederum aus den Szenarien der Anwendungssektoren ergibt. Wie in Teil I des Berichtes zum derzeitigen Zustand beschrieben, stützt sich der Einfluss auf die zukünftige Endenergiebereitstellung schwerpunktmäßig auf die Entwicklungen im Kraftwerkssektor und der Strombereitstellung.

2.5.1 Simulationsmodell zur Kraftwerkseinsatzplanung

Als Leitwert für die Fortschreibung des Energieeinsatzes im Umwandlungssektor dienen die Ergebnisse der Szenarien für den Strom- und Fernwärmeverbrauch sowie die eigenerzeugte KWK-Wärme in den Anwendungssektoren. Der so genannte „must-run"-Anteil der Stromerzeugung wird für die Kraft-Wärme-Kopplung mit einer mittleren Stromkennzahl, die sich als gewichtetes Mittel der Stromkennzahlen der betrachteten Anlagen ergibt, und vorgegebenen Ausbaupfaden für die regenerative Stromerzeugung ermittelt. Mit Hilfe der charakteristischen Lastgänge, die in den nachfolgenden Kapiteln dargestellt werden, kann ein Differenzlastgang gebildet werden. Bei hohen KWK-Anteilen und starkem regenerativen Ausbau kommt es unter Umständen zu einer Überdeckung des Verbraucherlastganges. Daher wird eine Speichermöglichkeit vorgesehen. Der mit einem Speichernutzungsgrad von 70 % gespeicherte Strom wird zur Lastglättung verwendet. Abschließend wird der Restlastgang sortiert und kann als geordnete Jahresdauerlinie an das Optimierungsmodell ifeon übergeben werden.

In **Abbildung 2-100** sind die verschiedenen Schritte zur Ermittlung des Restlastganges dargestellt, dessen Deckung durch ifeon optimiert wird.

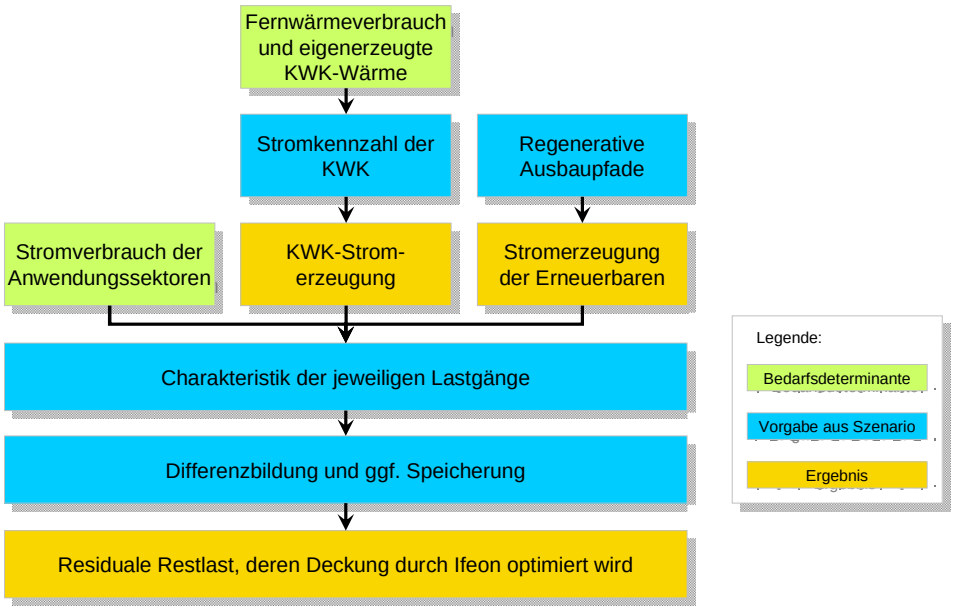

Abbildung 2-100: *Methodische Vorgehensweise zur Berechnung der residualen Last*

Das Energiemodell ifeon wurde im Laufe mehrerer Jahre am Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik der TU München entwickelt und zuletzt im Rahmen

des Verbundprojektes KW21 – Kraftwerke des 21ten Jahrhunderts /IFE-01 08/ angewendet. Aufgabe des Modells ist es, den Zubau neuer thermischer Kraftwerksanlagen innerhalb eines Kraftwerksparks zu optimieren. Das Optimierungskriterium ist hier die Minimierung der diskontierten Ausgaben für die gesamte Strombereitstellung im Betrachtungszeitraum. Im volkswirtschaftlichen Sinn ist ein Optimum erreicht, wenn der benötigte Strom kostenminimal produziert wird. Aus volkswirtschaftlicher Sicht ist ein Ziel des freien Wettbewerbsmarktes, eine möglichst effiziente Strombereitstellung zu gewährleisten.

Das Modell ifeon basiert auf einem evolutionären Algorithmus nach /ROTH-01 08/, der die Investitions- und Betriebskosten der Stromerzeugung innerhalb des gesamten Betrachtungszeitraums optimiert.

Der bestehende Kraftwerkspark wird mit seinen relevanten technischen und ökonomischen Parametern vorgegeben. In jedem einzelnen Jahr der Simulation ist der Zubau von Kraftwerkskapazität aus einer festgelegten Auswahl an Kraftwerkstypen möglich. Die Höhe der mindestens zu bauenden Kraftwerkskapazität richtet sich nach der einzuhaltenden Versorgungssicherheit, welche auf dem heute in Deutschland erreichten Niveau bleibt.

Die technischen und ökonomischen Parameter der einzelnen Kraftwerkstypen, aber auch die möglichen Kraftwerkstechnologien, können in jedem Jahr separat festgelegt werden. Damit ist z. B. gewährleistet, dass später gebaute Kraftwerke einen besseren Nennwirkungsgrad aufweisen als ältere.

Die Ergebnisse der Simulations- und Optimierungsrechnung mit ifeon werden wiederum mit den Ergebnissen der Rechnungen für die „must-run"-Anlagen, die Heizwerke und Raffinerien zusammengeführt und in das Zukunftsmodell Energie (ZEN) übernommen. Auf diese Weise ergibt sich ein konsistentes Modell des Energiebedarfs, seiner Deckung durch Endenergieträger und deren Bereitstellung im Umwandlungssektor bis hin zum Primärenergieeinsatz, wie in Teil I des Projektberichtes beschrieben.

Energieversorgungsnetze
Der Ausbau bzw. die Wartung und Instandhaltung von Energieübertragungsnetzen ist Bedingung für ein funktionierendes System mit dezentralen Verbrauchern und sowohl zentraler, aber auch dezentraler Erzeugungsstruktur. Da Netze zur Aufrechterhaltung der Versorgungssicherheit ohnehin notwendig sind, kann davon ausgegangen werden, dass sie in geeigneter Art und Weise strukturiert werden. Auch historisch war das Vorhandensein von Netzen nie Bedingung für den Bau von Erzeugungsanlagen oder den Anschluss von Verbrauchern, stattdessen wurden die Netze stets dem Bedarf angepasst. Daher wird in diesem Projekt angenommen, dass zukünftig der für die technische Entwicklung notwendige Netzausbau durchgeführt wird. Dieser ist daher keine Vorgabe als Rahmenbedingung, sondern ergibt sich als Notwendigkeit aus den Ergebnissen des Projektes.

2.5.2 Lastgangsynthese: Gesamtlastgang

2.5.2.1 Verfügbare statistische Informationen

Zur Berechnung des Jahreslastganges stehen mehrere statistische Informationen zur Verfügung:

- Vertikale Netzlast der vier Übertragungsnetzbetreiber (/VDN 07c/):
  „(…) die vorzeichenrichtige Summe aller Übergaben aus dem Übertragungsnetz über direkt angeschlossene Transformatoren und Leitungen zu Verteilungsnetzen und Endverbrauchern."
- Leistungsbilanz der allgemeinen Stromversorgung (/VDN 07a/, /UCTE 09/):
  Netzbelastung gemäß der Vereinbarung der UCTE für jeden dritten Mittwoch im Monat als Viertelstundenwert von 11:00 Uhr bis 11:15 Uhr.
- Leistung und Belastung der Kraftwerke (/VIK 07/, /StBu 08a/):
  Netzeinspeisung der Kraftwerke der allgemeinen Versorgung für jeden dritten Mittwoch im Monat in Stundenwerten nach Energieträgern.
- Nettoerzeugung inkl. KWK (/StBu 08a/):
  Jahreserzeugung der einzelnen Kraftwerke (inkl. KWK) in monatlicher Auflösung nach Energieträgern.
- Windenergieeinspeisung (/VDN 07c/):
  Stromerzeugung aus Windkraft ab 2006, aufgeteilt nach den einzelnen Regelzonen.

Abbildung 2-101 zeigt schematisch die verschiedenen Netz- und Verbrauchsebenen und farblich hervorgehoben die verschiedenen veröffentlichten Lasten bzw. Leistungsflüsse zur leichteren Abgrenzung der Begrifflichkeiten.

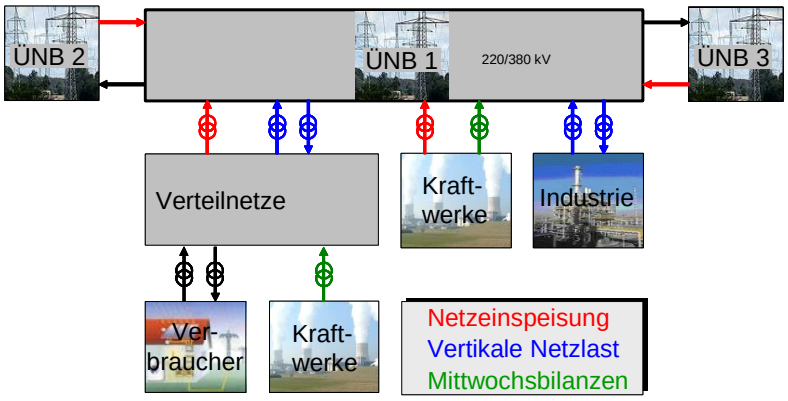

Abbildung 2-101: *Abgrenzung der Begrifflichkeiten*

Die von den 4 ÜNB veröffentlichte Netzeinspeisung beinhaltet alle Zuflüsse in das jeweilige Höchstspannungsnetz. Da auch Durchleitungen durch die Netze – z. B. von ÜNB 1 über ÜNB 2 zu ÜNB 3 – möglich sind, kann die Summe der vier Netzeinspeisungen mehr Erzeugung abbilden, als in der Realität vorhanden ist.

Die vertikale Netzlast ist, wie oben beschrieben, die stundenscharfe Summe der Zu- und Abflüsse aus bzw. in niedrigere Netzebenen und direkt angeschlossene große Industriebetriebe. Die vertikale Netzlast kann negativ werden, wenn mehr aus den unteren Netzebenen ins Übertragungsnetz zurückgespeist wird, als die direkt angeschlossenen Verbraucher benötigen. Der Überschuss wird in einem der anderen Übertragungsnetze verbraucht oder ins Ausland exportiert. Die stundenexakte Summierung der vertikalen Netzlast in den vier Regelzonen bildet ein Maß für die Lastcharakteristik der Verbraucher. Ein Teil der Verbraucherlast wird jedoch direkt durch Erzeugung in den Verteilnetzen gedeckt. Daher bildet die Jahressumme der vertikalen Netzlast nicht den gesamten Stromverbrauch ab.

Die Mittwochsbilanzen werden vom Statistischen Bundesamt /StBu 08a/ und dem Verband der industriellen Kraftwirtschaft /VIK 07/ veröffentlicht. Sie geben die Netzeinspeisung der Kraftwerke der allgemeinen Versorgung für jeden dritten Mittwoch im Monat in Stundenwerten nach Energieträgern an. Damit repräsentieren sie die tatsächliche Lastsituation besser als die vertikale Netzlast, der die Kraftwerke der unteren Netzebenen fehlen. Kraftwerke, die nicht der allgemeinen Versorgung angehören, wie beispielsweise Windkraftanlagen, sind allerdings in den Mittwochsbilanzen nicht enthalten.

2.5.2.2 Erzeugung des Jahreslastgangs

Vorgehensweise

Im Folgenden soll die Vorgehensweise zur Synthese eines Jahreslastganges der Erzeugung der allgemeinen Versorgung und des elektrischen Verbrauchs für 2005 aus den verfügbaren statistischen Daten erläutert werden.

Die Integration der vertikalen Netzlast über das Jahr 2005 ergibt eine Jahreserzeugung von 365,5 TWh. Dieser Wert liegt leicht unter dem der Vorjahre (z. B. 2003: 377 TWh). Insbesondere im Vergleich zum Stromverbrauch zeigt sich, dass dies auf die verstärkte Einspeisung in untere Netzebenen durch den Ausbau der regenerativen Energien zurückzuführen ist. Die vergütete Windstromerzeugung und damit die eingespeiste Windstrommenge betrug 2005 27,2 TWh /VDN 07b/. Die Nettostromerzeugung der allgemeinen Versorgung ergab sich 2005 zu 497,7 TWh /StBu 08a/. Sowohl in der vertikalen Netzlast als auch der Leistungsbilanz der allgemeinen Versorgung an den dritten Mittwochen jedes Monats ist die Windstromerzeugung nur indirekt enthalten. Die Erzeugung der allgemeinen Versorgung ist beispielsweise zu den Zeitpunkten niedriger, an denen ein größerer Teil der Last durch Wind gedeckt wird.

Es muss nun ein Weg gefunden werden, die vertikale Netzlast so in ein Profil umzurechnen, dass die berechneten Werte den tatsächlichen Werten, sowohl der Erzeugungsmenge als auch der Charakteristik inklusive der Jahreshöchstlast, angeglichen werden können. Dabei ist darauf zu achten, dass für die Entwicklung einer Methodik zur Substitution konventioneller Kraftwerksleistung durch KWK sowohl die Lastspitzen als auch die Lasttäler nicht verzerrt sein sollten. Im Hinblick auf die Kenntnis des Lastverlaufs am jeweils dritten Mittwoch eines Monates sollten auch dessen Stundenwerte auf der resultierenden Lastkurve zu finden sein.

In **Abbildung 2-102** ist exemplarisch die Charakteristik der vertikalen Netzlast im Vergleich zur Charakteristik der Mittwochsbilanz im Tagesverlauf des Septemberwertes 2005 aufgezeichnet.

Die vertikale Netzlast zeigt tagsüber lediglich geringe Abweichungen zu den Mittwochsbilanzen. Die Erzeugung zu Tagesbeginn und in den Nachtstunden wird allerdings unterschätzt. Diese ist – wie einleitend beschrieben – vornehmlich durch die Einspeisung von regenerativen Energien und dezentralen Erzeugungsanlagen (z. B. KWK-Anlagen von Stadtwerken) in untere Netzebenen charakterisiert und wird durch die vertikale Netzlast nicht abgebildet.

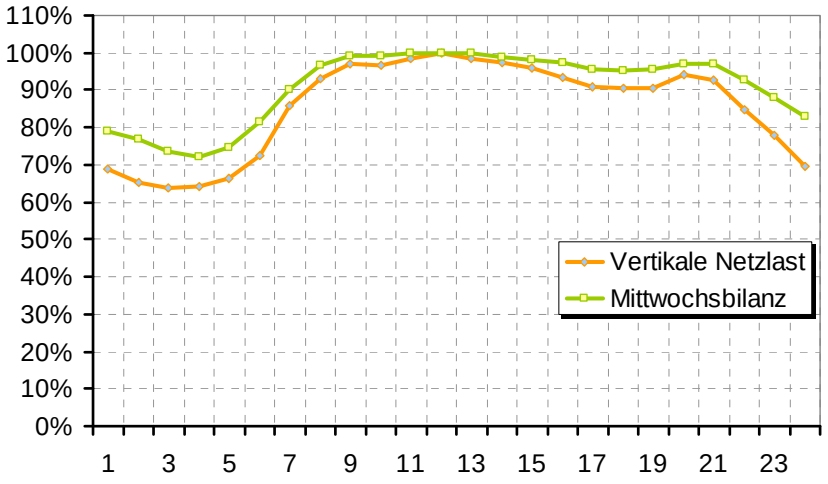

Abbildung 2-102: *Vergleich der Charakteristik von vertikaler Netzlast und Mittwochsbilanz im September 2005*

Die Umrechnung der vertikalen Netzlast auf die durch den bestehenden Kraftwerkspark gedeckte Verbraucherlast kann auf mehrere Arten erreicht werden:

- Skalierung des Lastganges mit einem Faktor
- Addition eines Korrektursockels
- Addition einer Ausgleichsfunktion

Im Folgenden sollen diese Verfahren kurz gegenübergestellt werden.

Skalierung mit einem festen Faktor

Eine einfache Möglichkeit, die gewünschte Erzeugungsmenge nachzubilden, ist die Korrektur der vertikalen Netzlast mit einem Faktor. Dieser wird aus der Jahreserzeugung gebildet, die den Verbrauch repräsentiert, bezogen auf die Erzeugung, die durch die vertikale Netzlast abgebildet wird. Für das betrachtete Jahr 2005 ist dieser Faktor 1,34 (siehe Erzeugungsmengen oben). Die einzelnen Punkte der Lastkurve werden also jeweils um 34 % angehoben. Das führt dazu, dass die Spitzen stärker erhöht werden als die Täler. Es konnte nachgewiesen werden, dass die Jahreserzeugungsmenge mit den Energiebilanzen übereinstimmt, aber die Leistungscharakteristik verzerrt wird.

Addition eines Korrektursockels

Der Fehlbetrag kann auch als Band konstanter Leistung zur Kurve der vertikalen Netzlast addiert werden. Im Jahr 2005 wurden so durchschnittlich pro Stunde 15 GWh (inkl. Wind) mehr erzeugt, als die vertikale Netzlast vorgibt. Die Addition des konstanten Sockelbetrages bewirkt eine Parallelverschiebung der vertikalen Netzlast. Auch bei dieser Methode wird der Lastverlauf der Mittwochsbilanzen nicht erreicht, aber die Erzeugungsmenge stimmt mit der Vorgabe überein.

Addition einer Ausgleichsfunktion

Um die festen Lastpunkte durch die Addition einer Ausgleichsfunktion zu erreichen, darf dieses Lastband nicht konstant sein. Die einzelnen Punkte der vertikalen Netzlast werden dazu um den jeweiligen Fehlbetrag verschoben. Gleichzeitig müssen auch die angrenzenden Punkte verschoben werden, um keine Sprünge im Lastverlauf zu erhalten.

Abbildung 2-103 zeigt die absolute Abweichung der vertikalen Netzlast von der Mittwochsbilanz als fehlende Leistung. Die roten Punkte sind dabei die Stützpunkte der Leistungsbilanz der allgemeinen Stromversorgung /UCTE 09/. Am dritten Januarmittwoch um 11:00 Uhr liegt die vertikale Netzlast beispielsweise um ca. 14 GW unter dem tatsächlichen Wert, während im Juni die Abweichung lediglich knapp -7 GW beträgt. Das ist u. a. darauf zurückzuführen, dass die Verbraucherlast im Sommer niedriger ist als im Winter. Gleichzeitig ist der Deckungsanteil dezentraler Erzeugung sehr hoch.

Ein Verfahren zur harmonischen, stetigen Verbindung von bekannten Stützpunkten ist die Anwendung von Splines. Das sind Polynome n-ten Grades, die so zwischen die Punkte gelegt werden, dass die Ableitung der Funktionen links und rechts der Stützpunkte gleich ist. In Abbildung 2-103 ist dies exemplarisch für die 11-Uhr-Werte gezeigt.

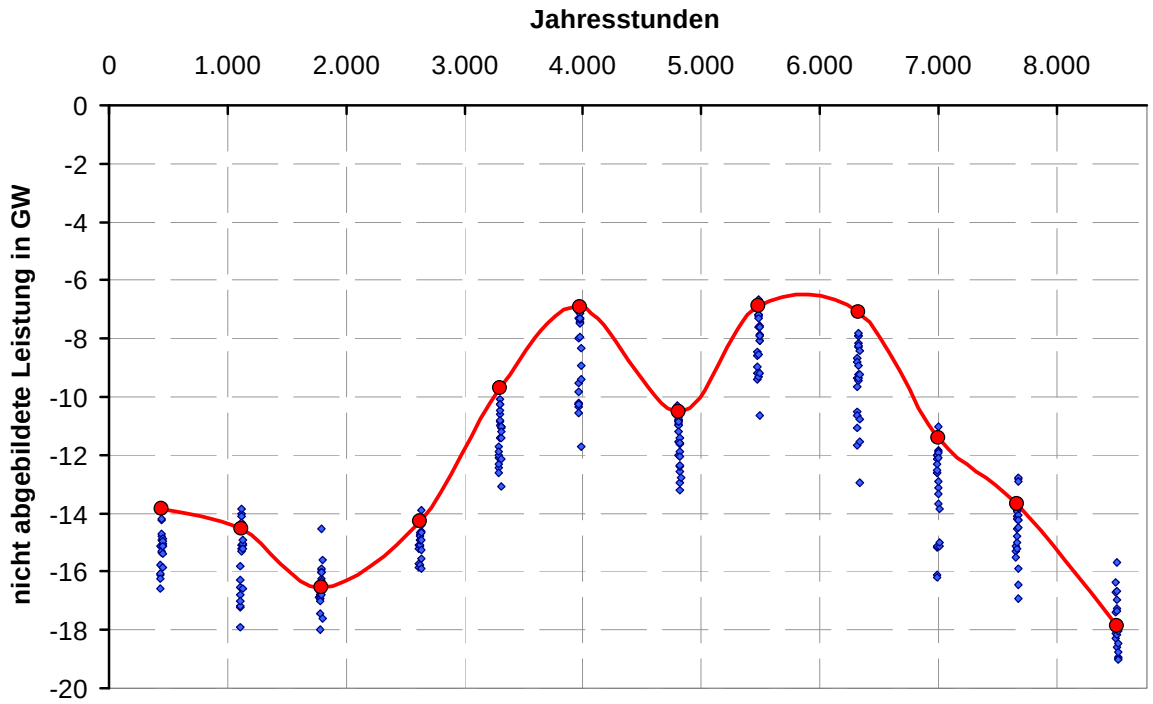

Abbildung 2-103: *Abweichung der vertikalen Netzlast von der tatsächlichen Erzeugung der allgemeinen Versorgung*

Die Streuung der Abweichung an den einzelnen Tagen ist relativ groß, im Oktober sind es bis zu 5 GW. Aus diesem Grund reicht es nicht aus, eine einzelne Korrekturfunktion zu erstellen. Vielmehr sollte eine Korrekturfunktion für jede Stunde berechnet werden. **Abbildung 2-104** zeigt im Rasterdiagramm (engl.: carpet-plot) die Ergebnisse einer derartigen Splines-Berechnung für 2005. Dabei sind die einzelnen Tage auf der Abszisse und die einzelnen Stunden des Tages auf der Ordinate aufgetragen. Der jeweilige Wert ist farblich codiert dargestellt, hohe Abweichungen in blau und niedrige in violett. Diese Form der Darstellung ermöglicht ein schnelles visuelles Erfassen von großen Datenmengen. Als Startwert für die Splines wurde der Dezemberwert für 2004 und als Endwert der Januarwert für 2006 gewählt, so dass insgesamt mit den dritten Mittwochen jedes Monats in 2005 14 Stütztage á 24 h und damit 336 Stützwerte für eine Korrektur zur Verfügung stehen. Auch hier ist analog zu Abbildung 2-103 die stark jahreszeitabhängige Abweichung der vertikalen Netzlast von den Mittwochsbilanzen zu erkennen.

Gleichzeitig sieht man die unterschiedlichen Korrekturfunktionen für die einzelnen Stunden des Jahres.

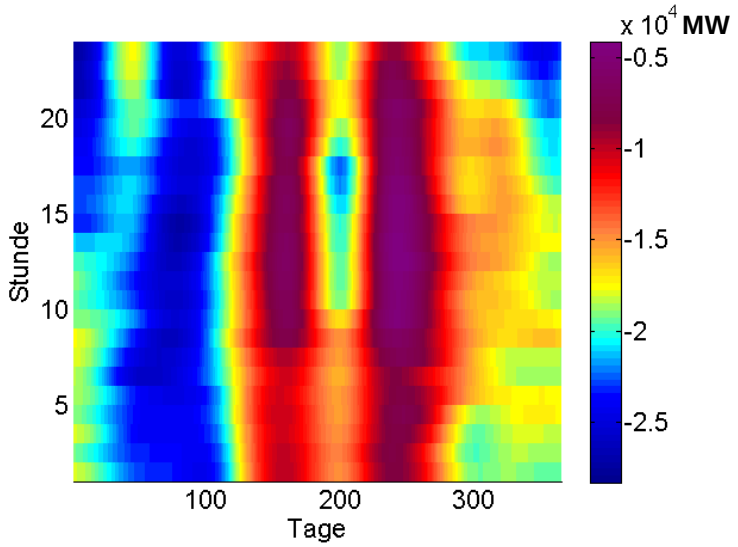

Abbildung 2-104: *Rasterdiagramm der Korrekturtsplines zur Korrektur der vertikalen Netzlast 2005 für 24 Stunden an 14 Stützwerten*

2.5.2.3 Ergebnis der Lastgangsynthese

Abbildung 2-105 zeigt den mit Hilfe von Splines ermittelten Verbraucherlastgang für das Jahr 2005 als Rasterdiagramm. Im Winter treten beispielsweise zwei Verbrauchs-spitzen, mittags und abends, auf, während im Sommer und der Übergangszeit nur eine Mittagsspitze erkennbar ist. Des Weiteren zeigt sich, dass der morgendliche Lastanstieg zu deutlich konstanteren Zeiten auftritt, als der Rückgang der Last am Abend. Die senkrechte Streifenbildung ist auf die einzelnen Wochenlastgänge zurückzuführen.

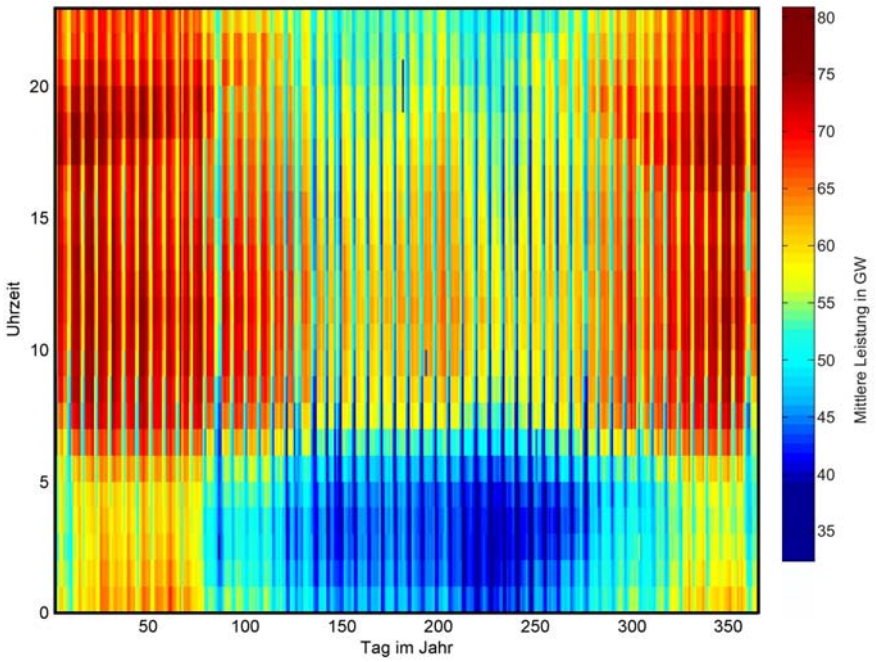

Abbildung 2-105: *Verbraucherlastgang für das Jahr 2005 als Rasterdiagramm*

2.5.3 Lastgangsynthese: Regenerative Energien

In den folgenden Kapiteln wird neben den Lastgängen der regenerativen Stromerzeugung auch auf die Potenziale der Erneuerbaren Energien als die maximal erreichbare Obergrenze des Ausbaus eingegangen.

2.5.3.1 Windstromeinspeisung

Von den vier ÜNB wird erst ab 2006 die Windstromeinspeisung vollständig veröffentlicht. 2005 liegen lediglich von Vattenfall Daten vor. Daher wird zunächst geprüft, ob die Charakteristik der Windstromerzeugung des Netzgebietes von Vattenfall auf die gesamte Windstromeinspeisung übertragen werden kann.

Abbildung 2-106 zeigt für 2006 die Anteile der Windstromerzeugung in den vier Übertragungsnetzgebieten. Insgesamt wurden 2006 etwa 30,5 TWh Windstrom erzeugt. Davon wurden 42,5 % im nordwestdeutschen Raum ins E.ON-Netz eingespeist. Etwa 37,5 % des erzeugten Windstromes fiel im Netzgebiet von Vattenfall an. Die Einspeisung ins RWE-Netz betrug 18,6 %. Wegen der benachteiligten Lage bezüglich Windstromerzeugung im Binnenland wurden im EnBW-Netzgebiet lediglich 1,3 % der Windstrommenge des Jahres 2006 erzeugt.

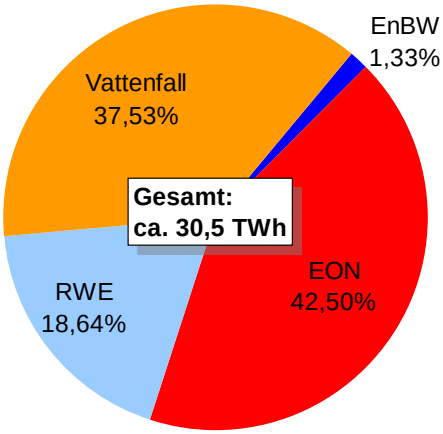

Abbildung 2-106: *Erzeugungsanteile der Windkrafteinspeisung in die vier Übertragungsnetze 2006 /VDN 07c/*

Aufgrund der Erzeugungsanteile dominieren die Einspeisungscharakteristika der Windstromerzeugung im Vattenfall- und im E.ON-Netzgebiet den Leistungsgang der gesamten Stromerzeugung aus Wind.

In **Abbildung 2-107** sind drei 5-Tagesblöcke der Windstromerzeugung in den vier Netzgebieten der Gesamterzeugung gegenübergestellt. Die einzelnen Leistungsgänge wurden dazu mit ihrer jeweiligen mittleren Leistung normiert, um über die relative Darstellung die Charakteristik vergleichen zu können.

Die Dominanz der Erzeugung im E.ON- und Vattenfall-Netz bestätigt sich. Während die Erzeugung im Binnenland zum Teil nicht mit dem Gesamtleistungsgang korreliert oder stark zeitverzögert stattfindet, verschiebt sich die Windstromeinspeisung in den beiden Gebieten mit einem hohen Küstenanteil lediglich um einige Stunden. Die Charakteristik der Windeinspeisung ins Vattenfall-Netz stimmt jedoch meist sehr gut mit der Gesamterzeugung überein.

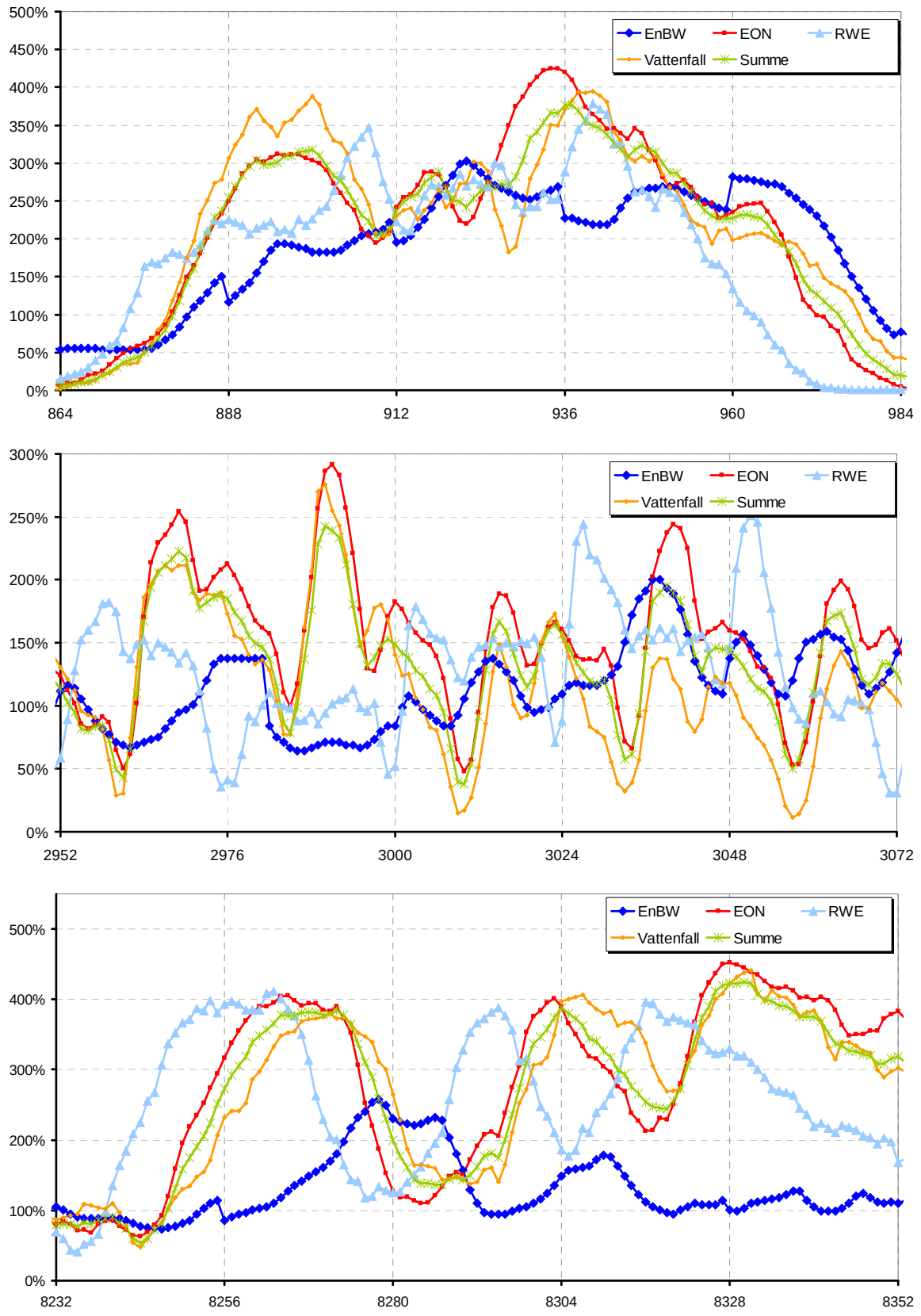

Abbildung 2-107: *Vergleich der Charakteristik der Windeinspeisung in die verschiedenen Übertragungsnetze an drei 5-Tagesblöcken im Jahr 2006 /VDN 07c/*

Für die weitere Berechnung wird die Windstromeinspeisung ins Netzgebiet von Vattenfall als charakteristisch für die gesamte Erzeugung angesehen. Das Integral des von Vattenfall veröffentlichten Leistungsganges aus dem Jahr 2005 wurde daher zunächst normiert und mit 27,2 TWh skaliert. Das Ergebnis gibt den Leistungsgang der gesamten Windstromeinspeisung für das Jahr 2005 wieder (**Abbildung 2-108**).

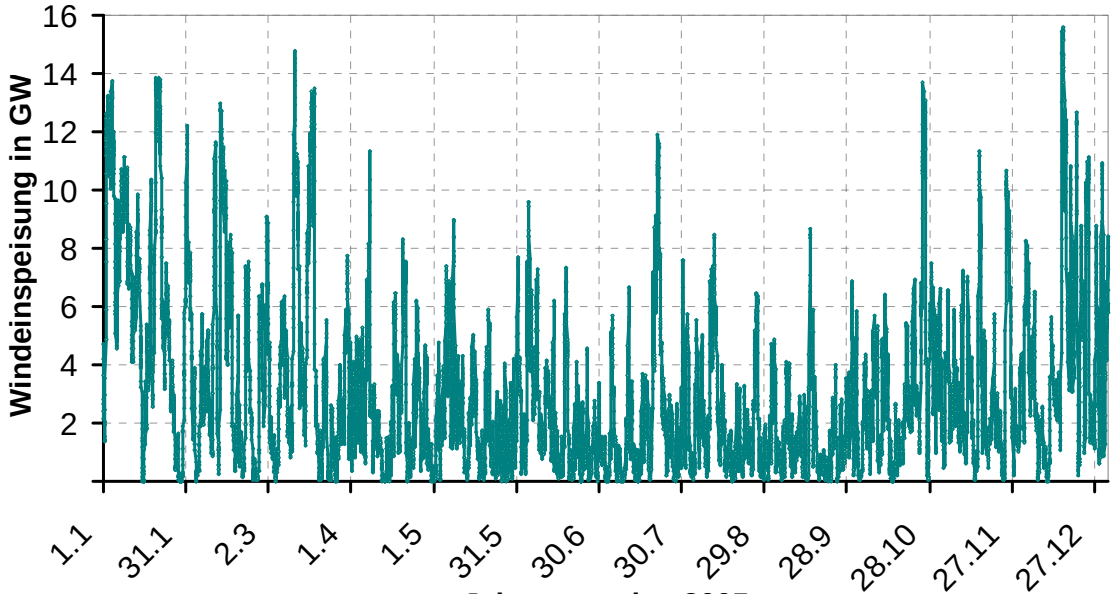

Abbildung 2-108: *Synthetisierter Leistungsgang der Windstromeinspeisung des Jahres 2005*

Die maximal mögliche Zubauleistung wird aus der Dena-Netzstudie /DENA 05/ entnommen. Dabei wurde das Jahr 2003 mit einer installierten Leistung von 14.565 MW als Ausgangsjahr herangezogen. 2006 waren bereits 20.633 MW installiert. Ausgehend von diesem Wert wird das Zubaupotenzial ermittelt, das in **Tabelle 2-10** dargestellt ist.

Der potenzielle Jahresenergieertrag bezieht sich nach /DEWI 06/ auf ein 100 %-Windjahr. Die auf dieser Basis errechneten Volllaststunden wurden der Berechnung des potenziellen Jahresenergieertrags bei maximalem Ausbau zugrunde gelegt.

Tabelle 2-10: *Installierte und theoretische Windenergieleistung in Deutschland nach /DENA 05/ und /DEWI 06/*

	Istzustand 2006	Maximaler Ausbau nach DENA	Potenzieller Jahres-energieertrag 2006	Volllaststunden	Potenzieller Jahres-energieertrag bei maximalem Ausbau
Region	in MW	in MW	in GWh	in h	in GWh
Brandenburg	3.128	5.421	5.369	1.716	9.304
Baden-Württemberg	325	581	363	1.116	649
Bayern	339	542	475	1.400	759
Bremen	64	64	118	1.838	118
Hessen	450	860	708	1.573	1.353
Hamburg	34	64	59	1.752	112
Mecklenburg-Vorpommern	1.233	1.724	2.257	1.830	3.155
Niedersachsen	5.283	5.462	9.992	1.892	10.331
Nordrhein-Westfalen	2.393	5.522	4.214	1.761	9.726
Rheinland-Pfalz	992	992	1.631	1.644	1.631
Schleswig-Holstein	2.391	2.391	4.939	2.066	4.940
Saarland	57	113	100	1.742	197
Sachsen	769	883	1.337	1.739	1.535
Sachsen-Anhalt	2.533	3.920	5.097	2.012	7.888
Thüringen	632	687	1.154	1.826	1.255
Offshore	0	28.974	0	4.000	115.896
Summe	20.633	58.210	37.813	1.759	131.036

2.5.3.2 Lastgangsynthese Photovoltaik

Zur Ermittlung des Lastganges der photovoltaischen Stromerzeugung wird eine Simulation durchgeführt, die auf dem Dachflächenpotenzial in Deutschland beruht, das für Photovoltaik unter Berücksichtigung technischer Restriktionen nutzbar ist.

Zunächst soll bestimmt werden, welcher Anteil der Dachflächen für die Installation von Photovoltaik zur Verfügung steht. Explizite Statistiken über Dachflächen in Deutschland existieren nicht. Aus diesem Grund muss auf anderem Weg versucht werden, die Dachfläche abzuschätzen. Es wurden zunächst folgende Ansätze verfolgt, die jedoch zu keinem Ergebnis führten:

- Über die versiegelte Fläche:
  Von der versiegelten Fläche könnte über empirische Faktoren auf die Grundflächen der Gebäude geschlossen werden, so dass auf diesem Weg die Dachflächen abgeschätzt werden können. Es sind allerdings keine Statistiken über die versiegelte Fläche verfügbar, zudem existieren unterschiedliche Definitionen für diese.
- Über das Bauland:
  Bauland bezeichnet das gesamte Grundstück, auf dem ein Gebäude errichtet werden darf. Ein Verhältnis von Grund- zu Baufläche kann nicht eindeutig und allgemeingültig festgelegt werden.

- Über die Siedlungs- und Freiflächen:
  Es existiert kein Verteilschlüssel dieser statistischen Flächenangabe auf die einzelnen Bestandteile Siedlungs- und Freiflächen.

Da diese Ansätze nicht zu den gewünschten Ergebnissen führen, wird die für Photovoltaik nutzbare Dachfläche nach /PHO 02/ herangezogen. Dabei handelt es sich um 838 km² Dachflächen der Gebäude mit einer reinen Südausrichtung.

Bei Dachflächen mit einer Ausrichtung von -45° bis +45°, bezogen auf Süden, können ebenfalls 100 % der Einstrahlung genutzt werden. Generell kann jedoch davon ausgegangen werden, dass alle Dachflächen für die Installation geeignet sind, auf die mindestens 85 % der Einstrahlung auftrifft. Die durchschnittliche Dachneigung und damit auch die Neigung der Solarmodule werden auf 40 ° festgelegt. Unter dieser Voraussetzung eignen sich alle Dächer mit einer Ausrichtung von -81,5 ° bis 76,5 °, bezogen auf Süden, für Photovoltaik. Da von einer Gleichverteilung der Dachflächen ausgegangen werden kann, ergibt sich die für Photovoltaik nutzbare Gesamtfläche zu ca. 1.471 km². Dies entspricht ca. 44 % der gesamten Dachfläche. Bei dieser Fläche sind bereits folgende Restriktionen nach /KAL 93/ enthalten:

- Ein Teil der Fläche steht für die Installation von Photovoltaik nicht zur Verfügung, da sie bereits für Kamine, Dacherker, Lüftungsschächte, Dachfenster, Antennenanlagen, Ausstiegsluken u. ä. verwendet wird.
- Bei industriell genutzten Gebäuden verringert sich die nutzbare Dachfläche zusätzlich, da diese für Dachbebauungen, zusätzliche Oberlichter, überproportional ansteigenden Lüftungsschachtbedarf oder andere technische Einbauten genutzt werden.
- Durch Abschattungseffekte und Denkmalschutz wird das Flächenpotenzial weiter reduziert.
- Bei Flachdächern gibt es keine Einschränkung der Nutzung durch die Ausrichtung des Daches, doch muss hier berücksichtigt werden, dass ein Mindestabstand der Module eingehalten werden muss, um Abschattungsverluste durch die Module selbst zu vermeiden.

Die für die Installation von Photovoltaik geeignete Dachfläche in Deutschland beträgt somit 1.471 km². Hierbei ist jedoch noch nicht berücksichtigt, dass bereits ein Teil dieser Dachflächen für Photovoltaik genutzt wird und somit für einen weiteren Ausbau nicht mehr zur Verfügung steht. Auch auf Dachflächen, auf denen schon solarthermische Anlagen installiert sind, kann keine Photovoltaik angebracht werden.

Laut /BMWi 07/ waren im Jahr 2005 ungefähr 7,2 km² Dachfläche mit solarthermischen Anlagen belegt. Für die Photovoltaik liegen keine Statistiken über die bebauten Flächen vor. Deshalb wird die verwendete Fläche aus der installierten Leistung nach /PHO 06/ abgeleitet. Die installierte Leistung liegt für jedes Bundesland vor. Insgesamt war 2005 eine Leistung von 1,9 GW installiert. Vergleicht man die flächenspezifischen Leistungen von Solarmodulen verschiedener Hersteller, so ergibt sich im Mittel ein Wert von 118 W/m². Ausgehend von dieser flächenspezifischen Leistung sind im Jahr 2005 bereits Dachflächen von ca. 16 km² für Photovoltaik genutzt. Unter der Annahme, dass keine weiteren sonstigen Einschränkungen vorliegen, ergibt sich ein Dachflächenpotenzial für Photovoltaik von 1.448 km².

Um zu bestimmen, welche Strommenge mit Photovoltaik erzeugt werden kann, wird die Globalstrahlung zugrunde gelegt. **Abbildung 2-109** zeigt die Globalstrahlung des Jahres 2005 für Deutschland. Die Jahressummen sind farblich gekennzeichnet, wobei die Globalstrahlung von grün eingefärbten Gebieten bis zu dunkelrot eingefärbten Gebieten zunimmt. Dabei schwanken die Werte zwischen jährlich 960 kWh/m² im Westerwald (dunkelgrün eingefärbt) und 1.220 kWh/m² in München (dunkelrot eingefärbt).

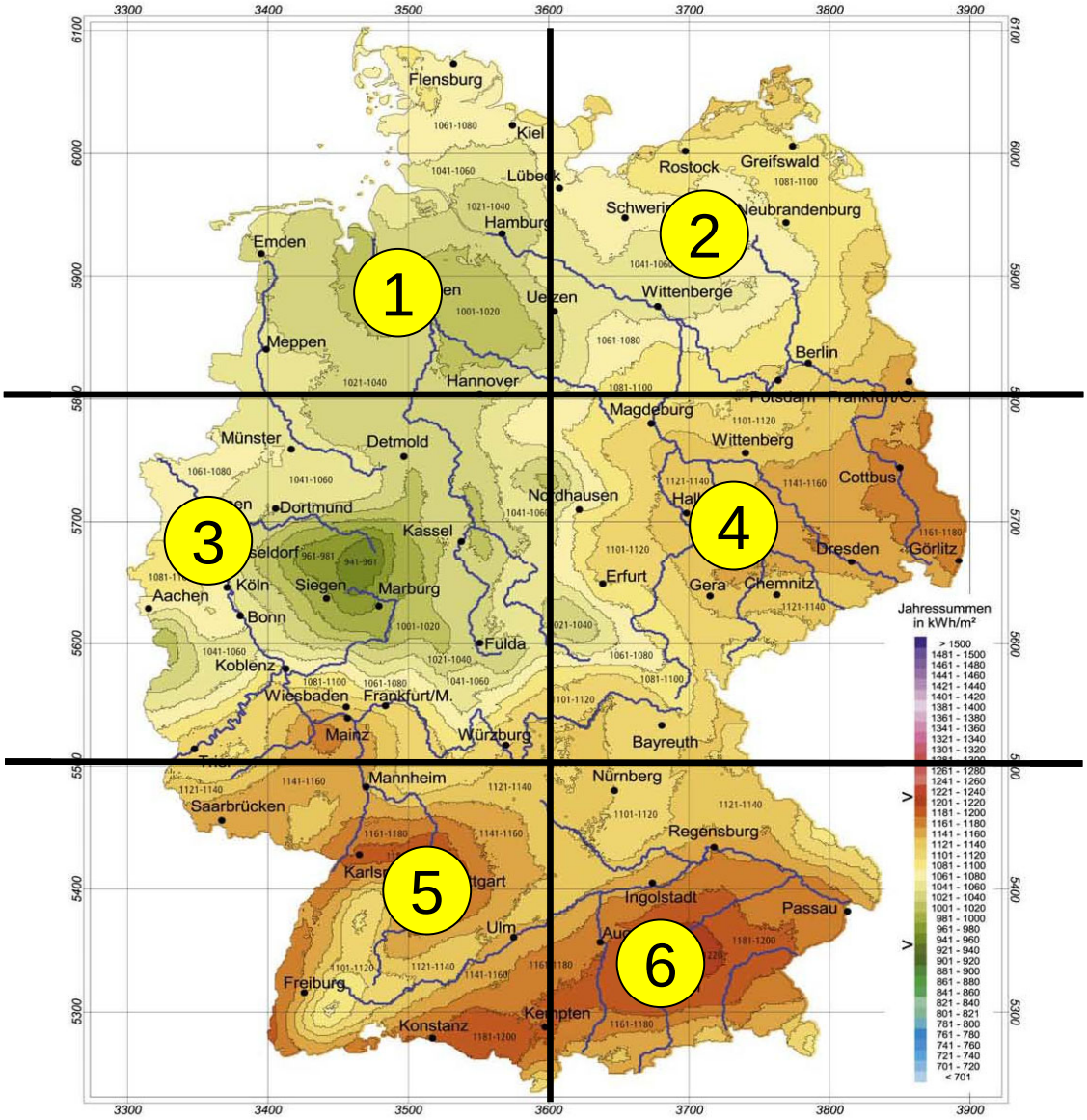

Abbildung 2-109: *Jahressumme der Globalstrahlung /DWD 06/, /eigene Ergänzungen/*

Zusätzlich sind in der Karte die sechs Referenzgebiete aus **Tabelle 2-11** eingezeichnet. Diese geben die räumliche Lage an, die für die spätere Berechnung eines Lastganges notwendig ist. Die Auswahl orientiert sich weniger an den Flächenschwerpunkten, als an den Besiedelungsschwerpunkten, die ein Indikator für die Dachflächen sind.

Tabelle 2-11: *Festgelegte Referenzgebiete*

Referenzstandort	Gebiet	Längengrad in ° östl. Länge	Breitengrad in ° nördl. Breite
Bremen	1	8,81	53,08
Waren (Landkreis Müritz)	2	12,68	53,52
Düsseldorf	3	6,78	51,23
Leipzig	4	12,38	51,33
Stuttgart	5	9,18	48,78
München	6	11,57	48,14

Aufgrund der großen Bandbreite der Globalstrahlung werden die Dachflächen auf Landkreise bzw. kreisfreie Städte aufgeteilt, welchen wiederum Einstrahlungswerte zugeordnet werden können. Das Vorgehen für die Aufteilung der Dachflächen ist in **Abbildung 2-110** graphisch dargestellt.

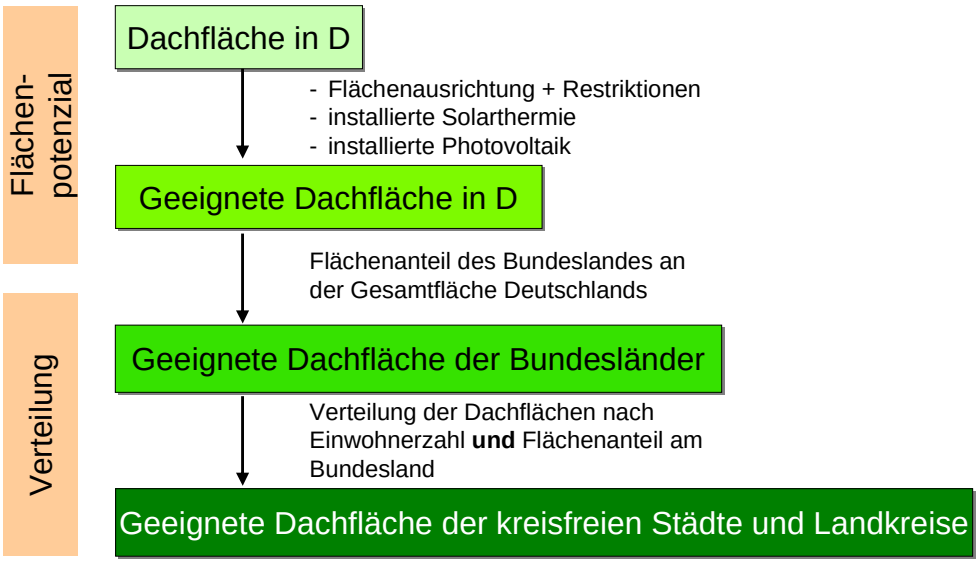

Abbildung 2-110: *Methodisches Vorgehen zur Potenzialermittlung*

Zunächst wird die Dachfläche auf die 16 Bundesländer verteilt. Basis dieser Verteilung ist der Flächenanteil am Bundesgebiet. So liegen beispielsweise in Bayern entsprechend der Bodenfläche 16 % der Dachflächen. Von den Dachflächen der Bundesländer ausgehend, werden diese dann auf die 313 Landkreise und 118 kreisfreien Städte in Deutschland verteilt.

Dazu wurden drei Ansätze miteinander verglichen:

- Verteilung gemäß der Einwohnerzahl,
- Verteilung gemäß der Fläche der Landkreise und Städte,
- oder Verteilung gemäß der Einwohnerzahl und der Fläche.

In **Abbildung 2-111** sind die drei möglichen Varianten exemplarisch für das Bundesland Schleswig-Holstein dargestellt.

Bei Verteilung nach der Einwohnerzahl wird den Städten überproportional viel Dachfläche zugeordnet, da der Großteil der Bevölkerung in der Stadt und nicht auf dem Land lebt. Hierbei wird jedoch nicht berücksichtigt, dass auf dem Land die meisten Häuser

ein- bis zweigeschossig sind, während die Geschosszahl der Häuser in der Stadt deutlich darüber liegt. Deshalb gibt es pro Stadtbewohner weniger Dachfläche als pro Landbewohner.

Wird die Fläche der Städte bzw. Landkreise als Verteilschlüssel gewählt, führt dies zu einer Übervorteilung der Landkreise. Beispielsweise hat die Stadt Kiel deutlich mehr Einwohner als der Landkreis Nordfriesland. Wird hier allerdings die Dachfläche nach der Fläche verteilt, so wird dem Landkreis eine 16-mal so große Dachfläche zugeteilt wie Kiel.

Daher werden beide Größen bei der Verteilung der Dachflächen berücksichtigt. Dazu wird der Mittelwert aus dem Anteil der Dachfläche, der Verteilung nach Einwohnern und der Verteilung nach der Fläche gebildet, welcher als weitere Berechnungsgrundlage dient.

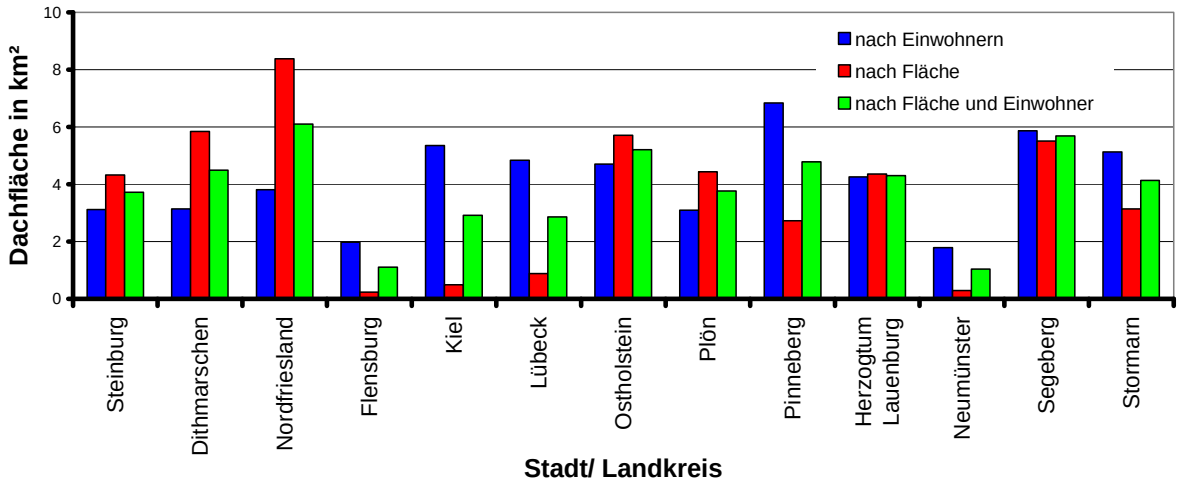

Abbildung 2-111: *Aufteilung der Dachfläche auf Landkreise und kreisfreie Städte für Schleswig-Holstein*

Um einen Lastgang zu ermitteln, wird jedem Landkreis und jeder kreisfreien Stadt in einem nächsten Schritt ein Referenzgebiet nach Tabelle 2-11, eine TRY-Region sowie ein Wert für die Globalstrahlung nach /DWD 06/ zugeordnet. Testreferenzjahre (TRY) des deutschen Wetterdienstes sind Datensätze ausgewählter meteorologischer Elemente für jede Stunde eines Normaljahres. Der Bezugszeitraum entspricht der international vereinbarten Referenzperiode (1961 bis 1990) der World Meteorological Organisation (WMO). Sie liefern die klimatologischen Randbedingungen für Simulationsrechnungen auf stündlicher Basis. Mit ihrer Hilfe kann die jährliche Globalstrahlung in einen stündlichen direkten und diffusen Anteil aufgeteilt werden. Damit stehen die notwendigen Informationen zur Verfügung, um die Landkreise und kreisfreien Städte hinsichtlich der Globalstrahlung, der geographischen Lage sowie der Testreferenzjahre zu 117 verschiedenen Typregionen zu aggregieren. Mit diesen kann die stündliche Einstrahlung auf die Dachfläche nach DIN 5034 simuliert werden. Dabei fließt auch die Gebäudeausrichtung in Gradschritten mit ein, so dass jeder Lastgang der Einstrahlung aus 159 Einzellastgängen besteht.

Das technische Ausbaupotenzial für Photovoltaik ergibt sich aus dem elektrischen Summenlastgang aller Typregionen. Dieser wird aus dem zuvor berechneten Verlauf der

diffusen und direkten Einstrahlung und den technischen Parametern der Anlagen abgeleitet.

Für die angesetzten Zellwirkungsgrade wurde eine Datenbank mit 1.548 käuflich erwerbbaren Anlagen verschiedener Hersteller /SMA 07/ ausgewertet. Die Häufigkeitsverteilung der Wirkungsgrade in **Abbildung 2-112** zeigt, dass der Modalwert der Verteilung bei 12,5 % liegt.

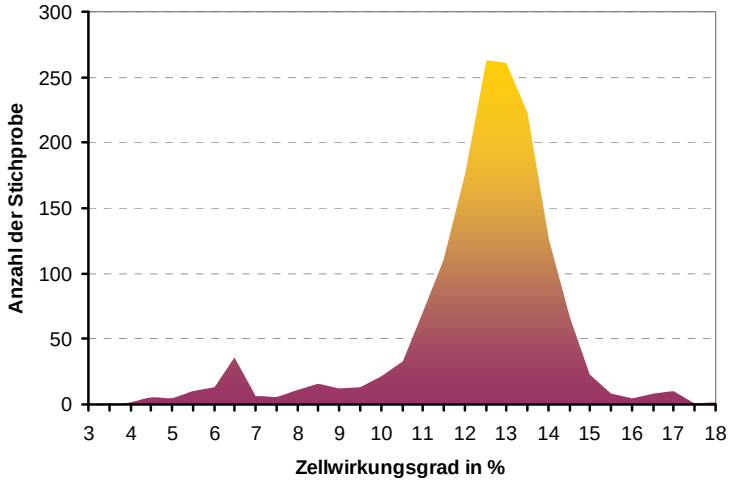

Abbildung 2-112: *Häufigkeitsverteilung der Zellwirkungsgrade /SMA 07/*

Zur Simulation wurde daher eine Anlage mit einer Peakleistung von 125 W/m² herangezogen. Die Peakleistung entspricht der Nennleistung eines Moduls unter Standardbedingungen, d. h. einer Bestrahlungsstärke von 1.000 W/m² bei senkrechtem Lichteinfall sowie einer Temperatur der Zellen von 25 °C. Die tatsächlich auftretende Leistung kann auch über der Nennleistung der Module liegen. Zusätzliche Verluste von etwa 15 % entstehen durch den Wechselrichter und Leitungsverluste.

Abbildung 2-113 zeigt den simulierten Summenlastgang der Photovoltaik sowie den Lastgang der allgemeinen Versorgung. Insgesamt lässt sich auf der verfügbaren Dachfläche eine Leistung von etwa 152 GW_{peak} installieren. Wie erwartet, ist die Erzeugungsleistung im Sommer bei ca. 154 GW am höchsten. Insgesamt ließen sich mit dieser Leistung etwa 176 TWh an Strom erzeugen. Allerdings kommt es bei derart starkem Ausbau zu einer deutlichen Überdeckung des Verbraucherlastganges von bis zu 300 %. Nur der Anteil des PV-Erzeugungsganges unterhalb des Lastganges kann genutzt werden. Das Integral über die Zeit ergibt eine bei Maximalausbau nutzbare Erzeugung von etwa 141 TWh, entsprechend einem solaren Deckungsbeitrag von 27,9 %.

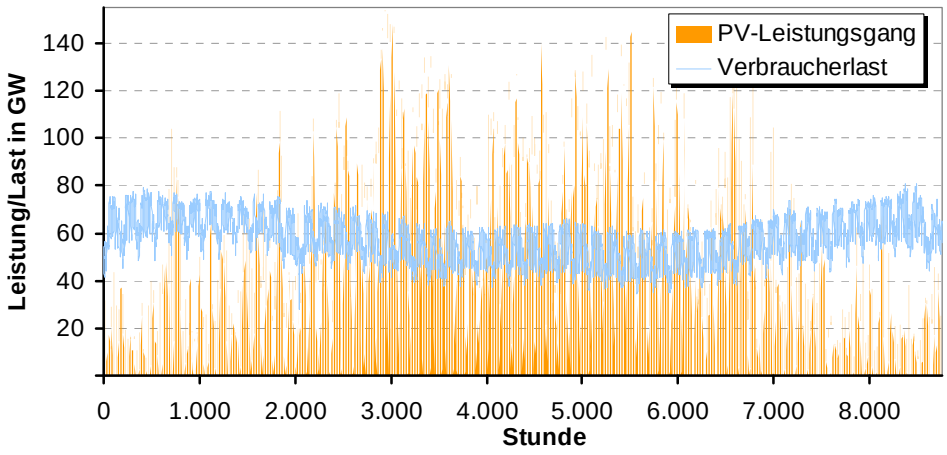

Abbildung 2-113: *Photovoltaik-Lastgang und Verbraucherlastgang*

Der ermittelte Lastgang für die Photovoltaikstromerzeugung kann je nach angesetztem Szenario mit dem angenommenen PV-Anteil skaliert werden. Der maximal mögliche Ausbau ergibt sich aus einer Potenzialbetrachtung.

Da ein Ausbau nicht in allen Regionen Deutschlands unter den gesetzten Rahmenbedingungen wirtschaftlich darstellbar ist, wird der Gewinn der wirtschaftlichsten Region als Führungsgröße zur Ermittlung des wirtschaftlichen PV-Ausbaus verwendet. Deren Annuität wird durch Parametervariation maximiert, d. h. es wird das wirtschaftliche Optimum zwischen installierter Leistung und möglicher Erzeugung ermittelt. Mit dieser Zielgröße ergibt sich ein Ausbaufaktor von ca. 37 %, das bedeutet, dass deutschlandweit in jeder Region auf 37 % der technisch verfügbaren Dachflächen Photovoltaik installiert wird. Dabei ist eine Überdeckung des Lastganges zulässig. Bei Überproduktion werden die Anlagen dem Bedarf angepasst zurückgefahren.

Als Vergleichslastgang für den Ausbau wird dabei nicht der Verbraucherlastgang verwendet. Dieser wird zum Teil durch nicht verdrängbare „must-run"-Anlagen bereitgestellt. Daher wird ein Restlastgang gebildet, der um die Erzeugung aus Wasser- und Windkraft reduziert ist. Insgesamt kann in dieser Variante eine Leistung von 56,2 GW_{peak} installiert werden. Dadurch könnten 65,2 TWh erzeugt werden, wovon allerdings nur 65 TWh genutzt werden können. Bei einer Stromerzeugung von etwa 506 TWh in 2005 entspricht dies einem solaren Deckungsbeitrag von 12,8 %. Das Ergebnis dieser Berechnung zeigt **Abbildung 2-114**.

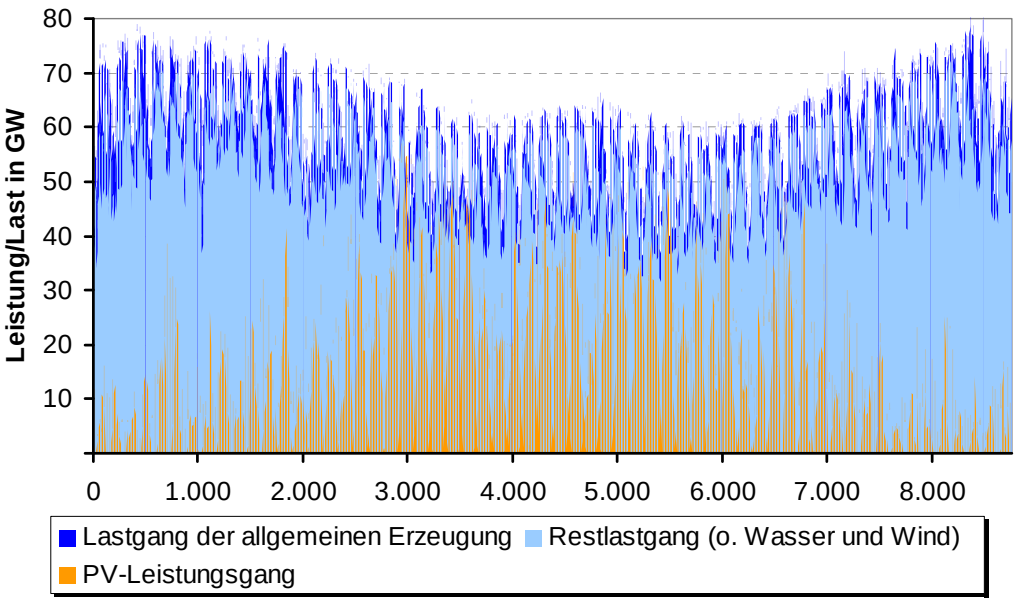

Abbildung 2-114: *Resultierender PV-Lastgang bei wirtschaftlich optimiertem Ausbau*

2.5.3.3 Lastgangsynthese Wasserkraft

Das Wasserdargebot ist im Verlauf des Jahres verschiedenen Schwankungen unterworfen, die auf wechselnde Niederschlagsmengen, Schneeschmelze in den Gebirgsregionen und weitere Effekte zurückzuführen sind. Das Wasser besitzt potenzielle Energie, die aus dem Höhenunterschied zum Meeresspiegel resultiert. Diese wird durch Strömung in kinetische Energie und durch Reibung in Wärmeenergie umgewandelt. Die maßgebliche Größe für die Kraftwerksleistung eines Wasserkraftwerks errechnet sich aus dem Produkt von Fallhöhe und Durchfluss. Die Fallhöhe H ist hierbei allerdings nicht identisch mit der Höhe, die den Höhenunterschied zwischen Anfang und Ende der Ausbaustrecke charakterisiert und als Ausbaufallhöhe H_A bezeichnet wird. Nur etwa die Hälfte der Ausbaufallhöhe kann im Kraftwerk zur Stromerzeugung genutzt werden.

Ein großer Vorteil von Pumpspeicherkraftwerken ist ihre schnelle Einsatzbereitschaft. Mit Hilfe dieser Spitzenlastkraftwerke können schnell extreme Laständerungen in einem elektrischen Versorgungsnetz ausgeglichen werden.

Im Gegensatz zu den regenerativen Energien Photovoltaik oder Windkraft, bei denen stets weitere Kraftwerke vorgehalten werden müssen, um bei Nacht oder Windstille die Stromversorgung zu gewährleisten, ist das Wasserkraftaufkommen bei Laufwasserkraftwerken relativ gleichmäßig und bei Speicherkraftwerken gut bedarfsabhängig regelbar.

In **Tabelle 2-12** ist das technisch nutzbare und im Jahr 2004 genutzte Potenzial aus Laufwasserkraftwerken in Deutschland aufgeführt. Danach liegt das technische Potenzial der Wasserkraftnutzung in der Bundesrepublik bei ca. 25,5 TWh/a. Bayern und Baden-Württemberg sind aufgrund der Topographie und den vergleichsweise hohen mittleren Niederschlägen durch das größte wassertechnische Arbeitsvermögen gekennzeichnet (über 80 % bezogen auf das Gesamtpotenzial der BRD). Ca. 70 % der Energie aus Wasserkraft wird an den großen Flussläufen Inn, Rhein, Donau, Lech, Isar, Main,

Neckar und Saar gewonnen. Im Norden Deutschlands sind deutlich weniger Möglichkeiten für den Betrieb einer Wasserkraftanlage gegeben.

Tabelle 2-12: *Technisch nutzbares und 2004 genutztes Wasserkraftpotenzial (Laufwasser) in Deutschland /HEI 05/*

	technisch nutzbar	genutztes Potenzial			
		> 1 MW		gesamt	
Einheit	GWh/a	GWh/a	%	GWh/a	%
Baden-Württemberg	6.294	3.914	62,2	4.227	67,2
Bayern	14.400	11.403	79,2	12.315	85,5
Berlin/Brandenburg	101	4	4,0	4	4,0
Hessen	815	206	25,3	222	27,2
Mecklenburg-Vorpommern	45	2	4,4	2	4,4
Niedersachsen	350	249	7,11	269	76,9
Nordrhein-Westfalen	700	349	49,9	377	53,9
Rheinland-Pfalz	1.500	902	60,1	975	65,0
Saarland	169	154	91,1	166	98,2
Sachsen	320	75	23,4	81	25,3
Sachsen-Anhalt	362	24	6,6	26	7,2
Schleswig-Holstein	10	5	50,0	5	50,0
Thüringen	414	35	8,5	37	8,9
Summe	25.480	17.322	68,0	18.707	73,4

Zur Steigerung des derzeit genutzten Wasserkraftpotenzials ist grundsätzlich eine Revitalisierung stillgelegter Anlagen, ein Ausbau bzw. eine Modernisierung bestehender Anlagen und ein Neubau möglich. Die Mehrzahl der Wasserkraftanlagen mit einer installierten Leistung von mehr als 1 MW wurde vor 1960 gebaut; hier können Modernisierungen der maschinellen Ausstattung und der hydraulischen Auslegung zu einer Leistungssteigerung von bis zu 30 % führen. Da bei dem Ausbau und der Modernisierung auf die bereits vorhandene Bausubstanz zurückgegriffen werden kann und bei geringen Änderungen die noch gültigen Wasserrechte weiterhin gültig bleiben, sind die Hemmnisse deutlich geringer als bei Neubauten. Dabei bedingt beispielsweise eine Vergrößerung der Ausbauwassermenge eine Leistungssteigerung, die bei Großwasserkraftanlagen bei 15 % und mehr liegen kann. Durch künstliche Retentionsmaßnahmen im Rahmen des Hochwasserschutzes könnte beispielsweise die Wasserführung eines Flusslaufes besser reguliert und damit auch die Wasserkraftnutzung erhöht werden. Darüber hinaus weisen ältere Wasserkraftmaschinen Wirkungsgrade auf, die unterhalb des heute Machbaren liegen; nach dem aktuellen Stand der Technik wäre hierdurch eine Steigerung von 5 % der Jahresenergieerzeugung möglich.

In /BMU 05/ wird das technische Potenzial beim Neubau an bereits genutzten Standorten auf 0,3 TWh pro Jahr, bei Neubauten an Rhein und Donau auf 1,6 TWh/a und beim Ausbau kleiner Wasserkraftanlagen auf knapp 1 TWh/a geschätzt.

Die Laufzeit eines Wasserkraftwerks ist nicht nur von der Lebensdauer der baulichen Maßnahmen und der installierten Technik abhängig, sondern auch von der wasserrechtlichen Genehmigung. Die wasserrechtliche Genehmigung entspricht einer Betriebserlaubnis und wird auf 30 bis 99 Jahre erteilt. Eine erneute Genehmigung ist

oft an bauliche Maßnahmen zum Umwelt- oder Hochwasserschutz gekoppelt, wodurch dem Betreiber Kosten entstehen. Daher ist eine Ertüchtigung der vorhandenen Technik nur in Verbindung mit einer weiteren wasserrechtlichen Genehmigung sinnvoll. Die Betrachtung des Ablaufs wasserrechtlicher Genehmigungen in /BEE 07/ zeigt, dass in den nächsten 25 Jahren ca. ein Drittel und bis 2050 ca. 75 % der Genehmigungen ablaufen. Ob die Kraftwerke dann stillgelegt bzw. rückgebaut werden oder eine Ertüchtigung bzw. ein Neubau erfolgt, ist neben den wirtschaftlichen Faktoren auch stark von den Bedingungen einer weiteren Genehmigung abhängig. Sind die Forderungen zu hoch, so kann der weitere Betrieb des Wasserkraftwerks unrentabel sein. Derzeit werden für Neubauten sowie für den Ausbau bestehender Wasserkraftwerke nur Genehmigungen erteilt, wenn gewährleistet wird, dass dadurch ein „guter ökologischer Zustand“ nicht beeinträchtigt bzw. hergestellt wird. Die zu erfüllenden Qualitätskomponenten sind hierbei durch folgende Handlungsbereiche beeinflussbar: biologische Durchgängigkeit, Mindestwasserabfluss, Feststoffbewirtschaftung und Stauraumbewirtschaftung /BMU 05/.

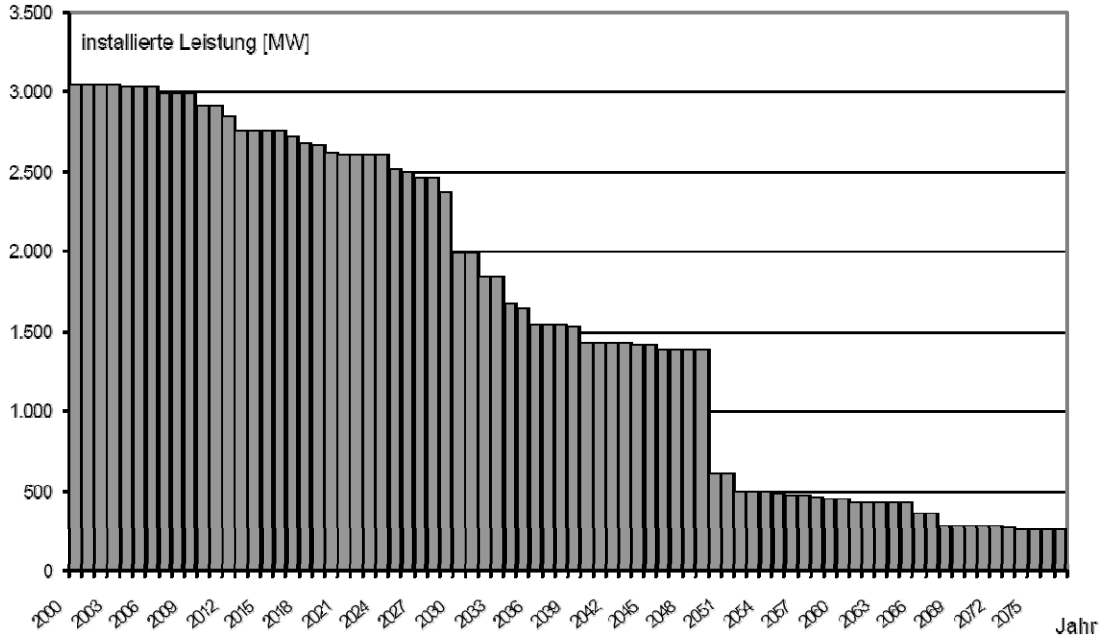

Abbildung 2-115: *Kumulierte Leistung der heute installierten Wasserkraft infolge Ablauf der wasserrechtlichen Genehmigung der Laufwasser- und Speicherkraftwerke der allgemeinen Versorgung und der Bahn AG /VDEW 01/*

In **Abbildung 2-116** ist der Lastgang der Stromerzeugung aus Wasserkraft für das Jahr 2005 dargestellt. Deutlich erkennbar nimmt die Erzeugung mit der Schneeschmelze und den Niederschlägen im Sommer zu, während die Leistung in den Wintermonaten zurückgeht. In der relativen Darstellung des Volumenstromes einzelner Standorte im Jahr 1995 zeigen sich auch tageszeitliche Schwankungen, die sich allerdings über ganz Deutschland vergleichmäßigen.

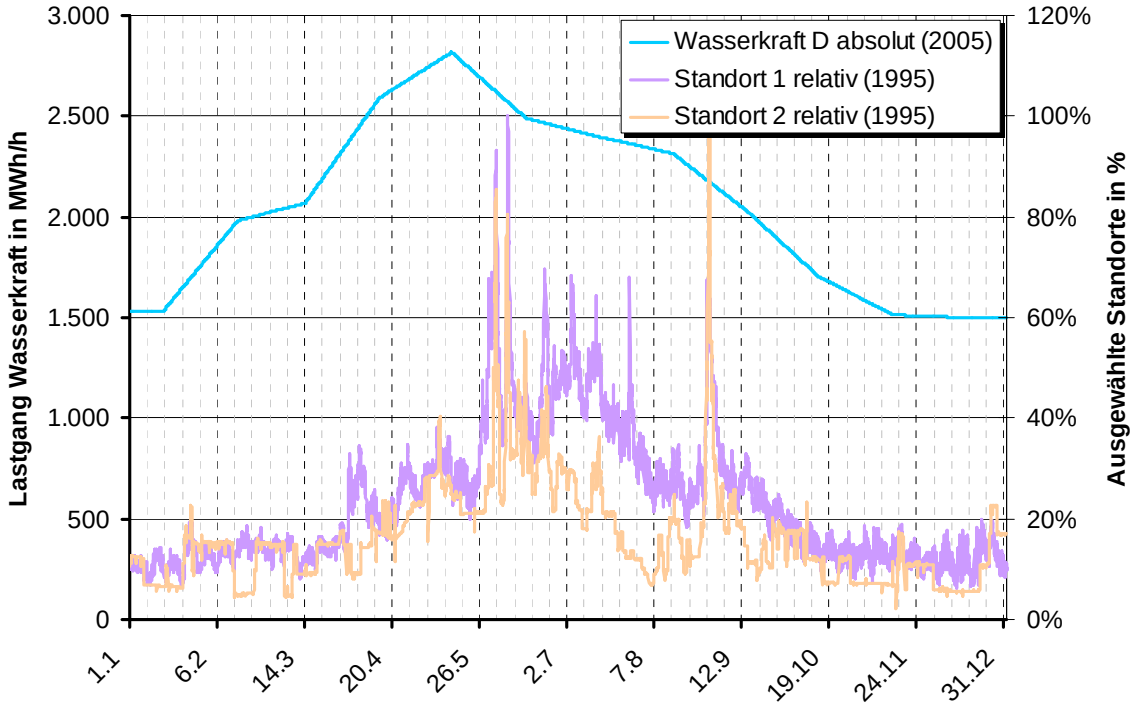

Abbildung 2-116: *Lastgang der Stromerzeugung aus Wasserkraft*

2.5.4 Lastgangsynthese: Kraft-Wärme-Kopplung

Zur Ermittlung des KWK-Lastganges wird eine bereits mehrfach verwendete Methodik angesetzt. Zuletzt wurde diese im Rahmen einer Kurzstudie für den VDEW nochmals überarbeitet und verbessert /ROO 06/ und fand im Projekt „EduaR&D – Ganzheitliche dynamische Bewertung der KWK mit Brennstoffzellen“ /BEE 07/ Eingang. Das Vorgehen soll im Folgenden kurz dargestellt werden.

Die gesamte ins Stromnetz eingespeiste KWK-Stromerzeugung betrug 2005 58,8 TWh /VDN 07b/. Die KWK-Stromerzeugung der allgemeinen Versorgung betrug hingegen 52,3 TWh /StBu 08a/. Die Monats-Charakteristik der allgemeinen KWK-Erzeugung ist in **Abbildung 2-117** dargestellt. Wie erwartet, ist sowohl der Anteil der KWK-Wärme- als auch der KWK-Stromerzeugung im Sommer geringer als im Winter. Die Stromkennzahl nimmt 2003 in den Sommermonaten zu. Daher nimmt auch der Gesamtnutzungsgrad der Anlagen von maximal 80 % im Dezember auf knapp 67 % im Juni ab. Verglichen mit anderen Jahren ist dieses Verhalten im Jahr 2003 aufgrund des „Jahrhundert“-Sommers besonders ausgeprägt.

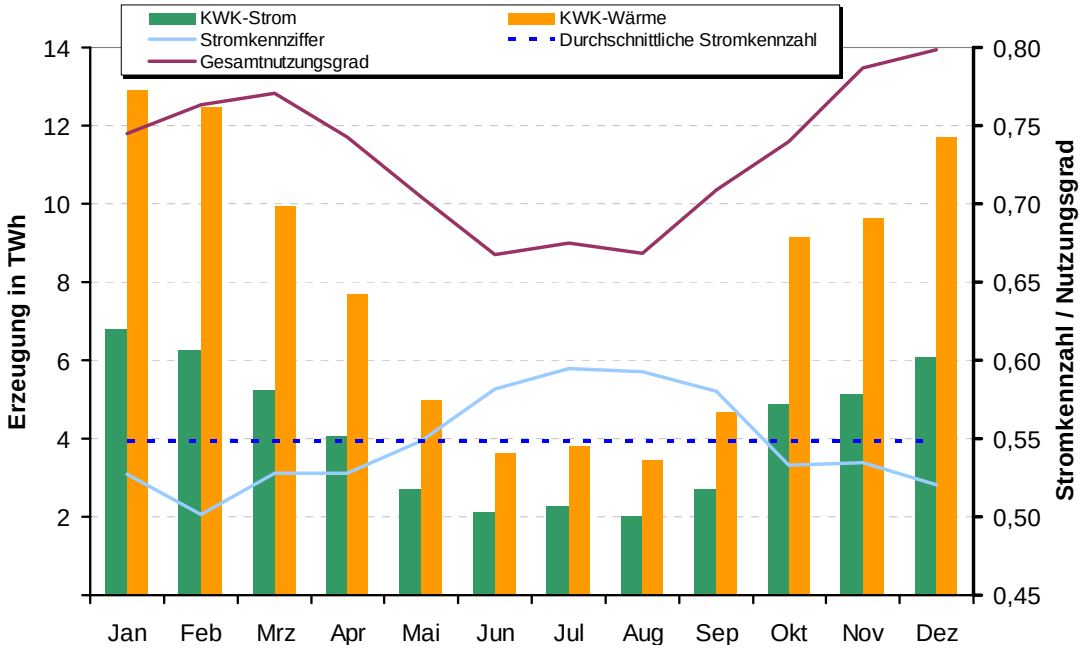

Abbildung 2-117: *Monatsgang der KWK-Strom- und –Wärmeerzeugung 2003 /StBu 08a/*

Auf der Basis von Fernwärmelastgängen von vier großen Stadtwerken konnte eine Funktion ermittelt werden, mit der sich ein auf die mittlere Leistung normierter, stundenscharfer Fernwärmelastgang für Deutschland mit folgenden Eingangsdaten berechnen lässt:

- Angabe des Wochentages bzw. bundesweiter Feiertage
- stundenscharfe Zeitreihe mit der mittleren Temperatur im Gebiet von Würzburg

Die Datumsangabe wird benötigt, da gezeigt werden konnte, dass der Fernwärmebedarf bei gleicher Außentemperatur stark von der Uhrzeit und dem Wochentag bestimmt wird. Eine Unterscheidung in die zwei Gruppen Montag bis Freitag einerseits, sowie Samstag, Sonntag und Feiertag andererseits, erwies sich als ausreichend.

Die mittlere Temperatur wird als gleitendes gewichtetes 72-Stundenmittel gebildet. Hierbei gingen die Temperaturen der 24 unmittelbar davor liegenden Stunden mit 50 %, die nächsten zurückliegenden Stunden mit 30 % und die 24 am längsten zurückliegenden Stunden mit 20 % in die Berechnung des Mittelwertes ein. Die Temperaturdaten wurden von der Internetseite der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft bezogen /LfL 07/. Es wurden die Messwerte von drei Wetterstationen bei Würzburg verwendet.

Der Fernwärmelastgang wurde im nächsten Schritt durch Multiplikation mit der Stromkennzahl in einen normierten KWK-Stromlastgang umgerechnet. Da die Stromkennzahl nicht konstant ist (vgl. auch Abbildung 2-117), wurden auf Basis der Monatsbilanzen des Statistischen Bundesamtes die mittleren Stromkennzahlen für jeden Monat im Jahr 2005 ermittelt (vgl. /StBu 08a/).

Der normierte Lastgang wurde im folgenden Schritt mit der von der AGFW veröffentlichten mittleren KWK-Stromerzeugung für 2005 skaliert. Diese wird im Arbeitsbericht der AGFW mit 35.604 GWh angegeben /AGFW 06/, was einer mittleren Leistung von

4,06 GW entspricht. Mit dem so erzeugten KWK-Lastgang konnten Monatsbilanzen aufgestellt und mit den Monatsbilanzen des Statistischen Bundesamtes in /StBu 08a/ verglichen werden. Hierbei zeigte sich, dass die Fehlleistung zur gesamten KWK-Leistung in jedem Monat etwa gleich hoch ist. Da somit nur eine geringfügige Temperaturabhängigkeit des Fehlbetrags besteht, wurde die Differenz zwischen der von der AGFW ausgewiesenen KWK-Stromerzeugung von 35.604 GWh und der vom Statistischen Bundesamt veröffentlichten KWK-Stromerzeugung der allgemeinen Versorgung von 52.310 GWh durch Addition einer konstanten Leistung zum KWK-Lastgang ausgeglichen. Der modellierte stundenscharfe KWK-Lastgang für 2005 ist in **Abbildung 2-118** dargestellt.

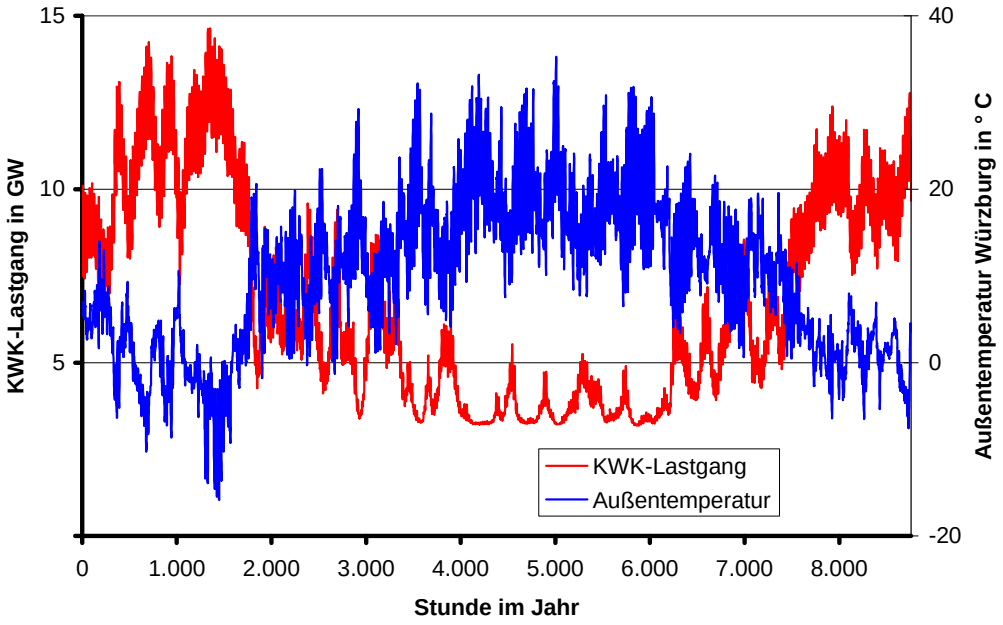

Abbildung 2-118: *Modellierter KWK-Lastgang für 2005*

Für das Vorgehen bei der Szenarienrechnung wird der jeweilige jährliche Fernwärmeverbrauch und die Wärme aus KWK-Eigenerzeugung in den Anwendungssektoren mit der Stromkennzahl auf die Stromerzeugung umgerechnet.

Diese Bewertung der KWK-Anlagen entspricht einer energetischen Allokation unter Berücksichtigung der Stromkennzahl. Dazu werden Strom und Wärme jeweils mit dem Gesamtnutzungsgrad bewertet. So ist durch einfache Addition der jeweils eingesetzten End- bzw. Primärenergie der Gesamtenergieverbrauch der KWK-Anlagen berechenbar (**Abbildung 2-119**).

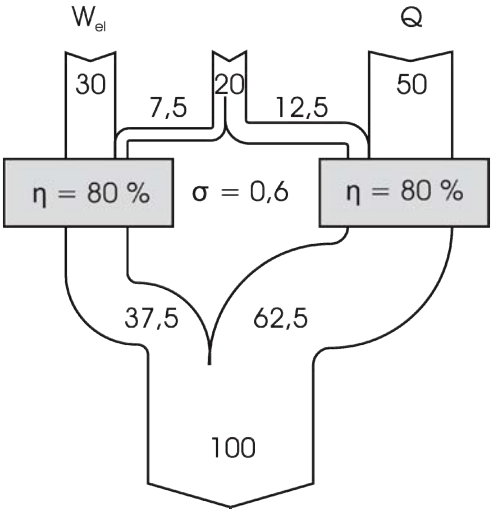

Abbildung 2-119: *Vorgehen zur Bewertung der KWK in energiebilanzbasierten Szenarien*

Bei dieser Methode ist darauf zu achten, dass die beiden Produkte Strom und Wärme immer gekoppelt erzeugt werden und die Bilanzgrenze daher immer um beide Energieformen gezogen werden muss. Das ist gewährleistet, wenn die Stromkennzahl bekannt ist. Mit der verwendeten Vorgehensweise sind die Ergebnisse transparent darstellbar.

2.5.5 Notwendige Leistung

Eine notwendige Angabe zur Optimierung des Kraftwerksparks durch ifeon ist die jährliche Gesamtleistung, die im Kraftwerkspark installiert sein muss. Da das Modell den zukünftigen Verbrauch und die zugehörigen Leistungen kennt, würde der Kraftwerkspark ansonsten lediglich die zur Lastdeckung notwendige Kraftwerkskapazität planen. Der Anteil der notwendigen Reserveleistung im konventionellen Kraftwerkspark steigt mit dem Ausbau der Erzeugung durch KWK und Regenerative.

Abbildung 2-120 zeigt den Verlauf der inländischen Leistungsbilanz der Jahre 2001 bis 2007 nach /VDN 07a/ bzw. /UCTE 09/. Trotz nahezu konstanter Last nimmt die gesamte installierte Leistung im Kraftwerkspark zu. Ein Teil der installierten Kapazität ist als nicht einsetzbar aufgeführt. Das ist insbesondere auf die regenerativen Energien zurückzuführen, die auf ein nicht planbares, fluktuierendes Primärenergieangebot angewiesen sind, z. B. bei Wind und Photovoltaik. Auch wärmegeführte KWK-Anlagen zählen zur nicht einsetzbaren Leistung, wenn aufgrund zu geringer Wärmenachfrage nicht die volle mögliche elektrische Leistung am Netz anliegt.

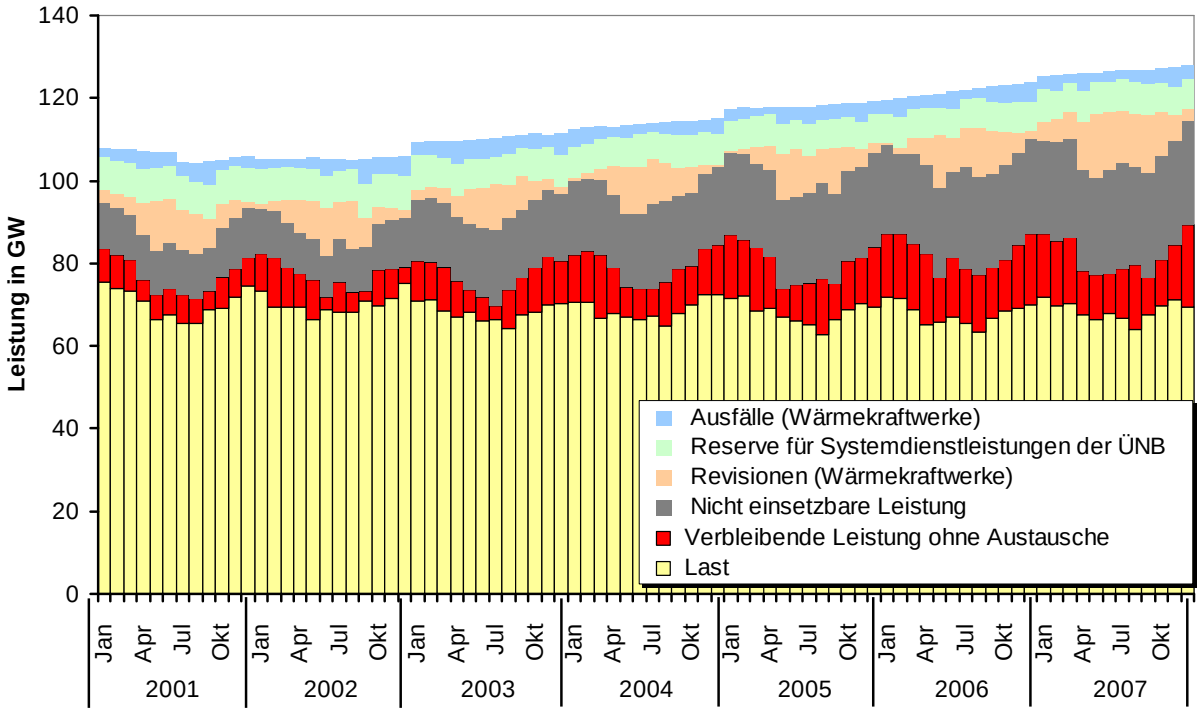

Abbildung 2-120: *Leistungsbilanz der Stromerzeugung in Deutschland 2001 bis 2007 /VDN 07a/, /UCTE 09/*

Des Weiteren kann Kraftwerksleistung aufgrund von ungeplanten Ausfällen und geplanten Revisionen nicht zur Lastdeckung zur Verfügung stehen.

Als Systemdienstleistungen werden diejenigen für die Funktionstüchtigkeit des Systems zum Teil unvermeidlichen Dienstleistungen bezeichnet, die Übertragungsnetzbetreiber für die Kunden erbringen und damit die Qualität der Stromerzeugung bestimmen /VDN 00/:

- Frequenzhaltung,
- Spannungshaltung,
- Versorgungswiederaufnahme und
- Betriebsführung.

Die notwendige Reserve für Systemdienstleistungen der Übertragungsnetzbetreiber beträgt ca. 7 GW. Lediglich die Kraftwerksleistung abzüglich der nicht einsetzbaren Leistung, Ausfälle, Revisionen und Reserveleistung steht gesichert zur Lastdeckung bereit. Jedoch wird nicht die vollständige gesicherte Leistung zur Lastdeckung benötigt. Das Verhältnis von verbleibender Leistung zur Last stellt einen guten Indikator für die zu installierende Leistung im Kraftwerkspark dar. Die Entwicklung in der Vergangenheit zeigt **Abbildung 2-121**. Für die Simulationsrechnung wird ein Quotient von 25 % im Jahr 2050 angesetzt, der dem steigenden Anteil regenerativer Stromerzeugung sowie der KWK Rechnung trägt.

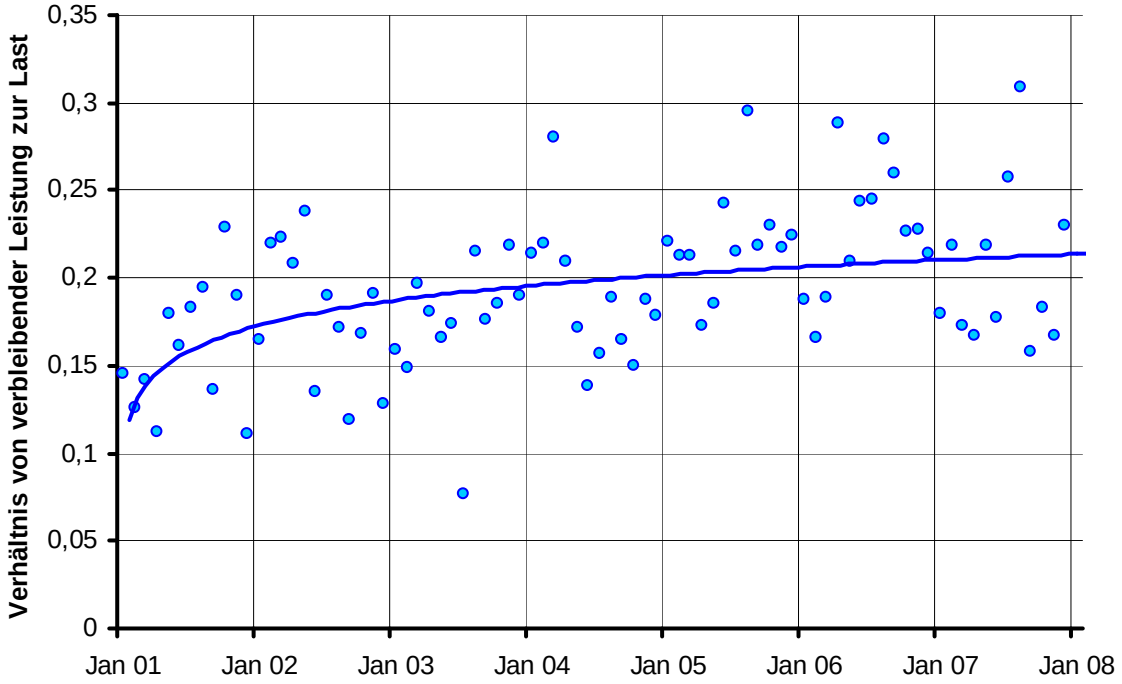

Abbildung 2-121: *Verhältnis von verbleibender Leistung zur Last als Indikator für die zu installierende Leistung im Kraftwerkspark*

2.5.6 Technikstruktur und Parameter

Für die Simulationsrechnung im Umwandlungssektor werden verschiedene Rahmenbedingungen vorgegeben. Die dem Umwandlungssektor zugrundeliegenden Bedarfsdeterminanten sind im Wesentlichen durch die Entwicklung des Endenergieeinsatzes in den Anwendungssektoren beschrieben. Insbesondere die Nachfrage nach Fernwärme sowie die in KWK-Anlagen der Anwendungssektoren erzeugte Wärme sind ein entscheidender Schwerpunkt bei der Ermittlung des „must-run"-Anteils der Stromerzeugung.

Der Fernwärmeabsatz geht aufgrund des Bevölkerungsrückganges sowie eines sinkenden Wärmebedarfs – bedingt durch verbesserten Wärmeschutz an Gebäuden – zurück. Die spezifischen Wärmekosten werden in Zukunft durch diese Entwicklung steigen. Gleichzeitig werden mehr Gebäude durch Nahwärmenetze versorgt. Fern- und insbesondere Nahwärmenetze werden nur zum Teil durch in KWK-Anlagen produzierte Wärme versorgt – allerdings nimmt dieser Anteil bis 2050 zu. Der in **Abbildung 2-122** gezeigte Verlauf der zukünftigen Wärmebereitstellung im Umwandlungssektor, bestehend aus BHKW und Spitzenlastkesseln sowie industrieller Groß-KWK, zeigt zusätzlich die Wärmeerzeugung in Mikro-KWK-Systemen.

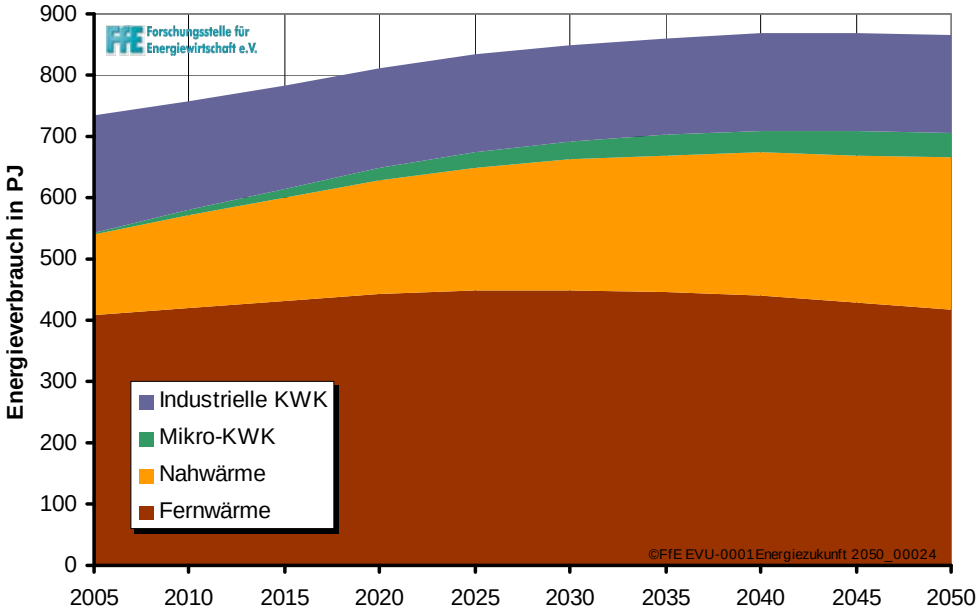

Abbildung 2-122: *Entwicklung der Wärmebereitstellung im Umwandlungssektor*

Abbildung 2-123 zeigt die auf Basis der KWK-Wärme ermittelte KWK-Stromerzeugung in Szenario 1. Ebenfalls dargestellt ist der Anteil der KWK-Stromerzeugung am gesamten Stromverbrauch bzw. der Nettostromerzeugung. Bis zum Ende des Betrachtungszeitraums nimmt die absolute Stromerzeugung aus KWK stärker zu als die Wärmebereitstellung, da die Stromkennzahlen der KWK-Anlagen zunehmen werden. Der KWK-Anteil stagniert ab 2030 jedoch, weil der Strombedarf stärker steigt, als es höhere Stromkennzahlen kompensieren können, wie **Abbildung 2-124** zeigt.

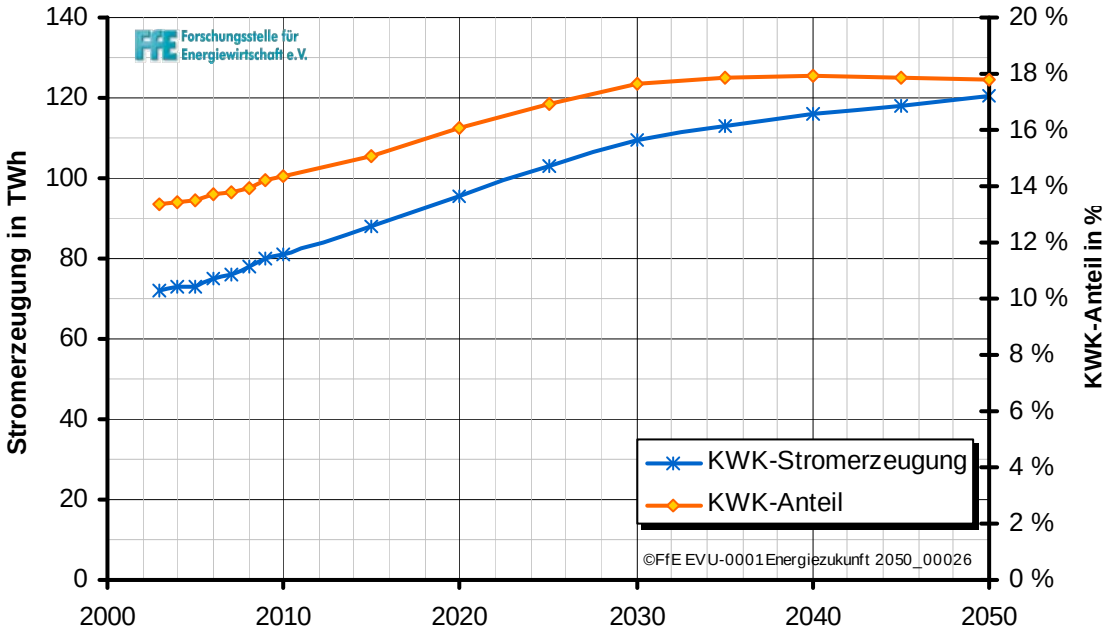

Abbildung 2-123: *Entwicklung der KWK-Stromerzeugung und des KWK-Anteils in Szenario 1*

Der in Abbildung 2-124 abgebildete Stromverbrauch in den Anwendungssektoren wird mit den Netzverlusten und dem Eigenverbrauch aller Energiewandler im Umwandlungssektor zur Bruttostromerzeugung zusammengefasst. Dieser beinhaltet auch den für die Wasserelektrolyse benötigten Strom. Im Diagramm ist erkennbar, dass der Trend eines ansteigenden Stromverbrauchs aus der Vergangenheit fortgesetzt wird.

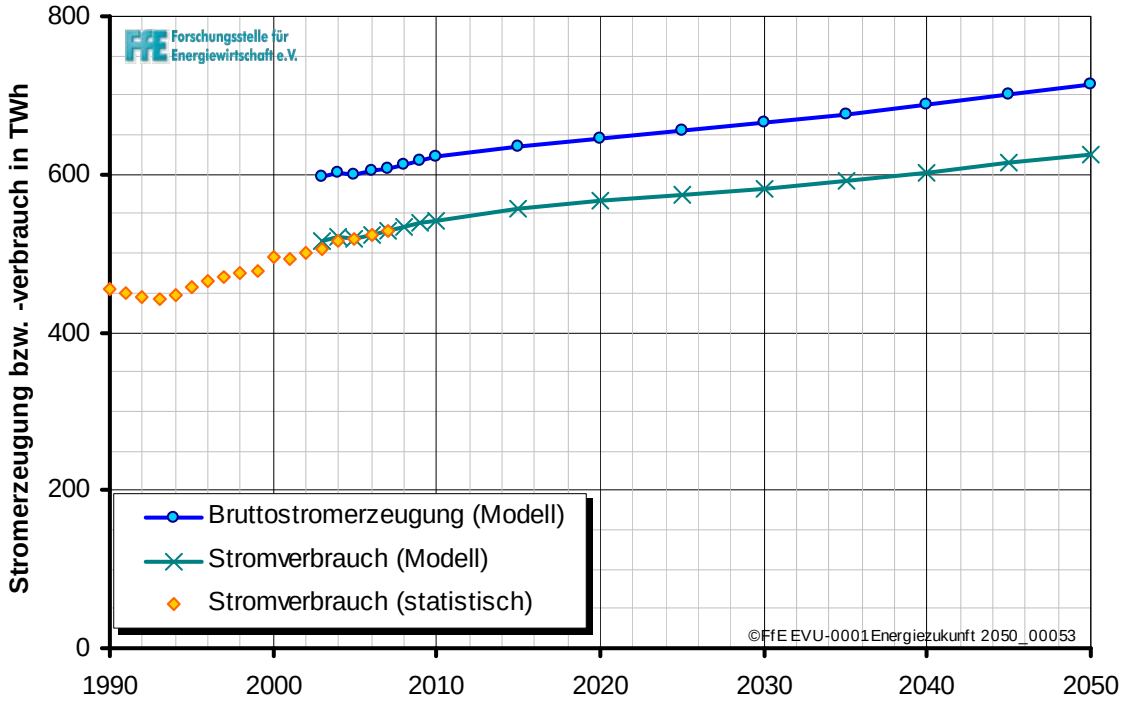

Abbildung 2-124: *Entwicklung des Stromverbrauchs und der Bruttostromerzeugung in Szenario 1 /AGEB 08/, /eigene Berechnungen/*

Der Endenergieverbrauch im Verkehr wird durch die Einführung von wasserstoffbetriebenen Brennstoffzellenfahrzeugen verändert. Der notwendige Wasserstoff muss durch unterschiedliche Primärenergieträger bereitgestellt werden. Die angenommene Entwicklung, dargestellt in **Abbildung 2-125**, orientiert sich an den Bereitstellungspfaden nach HyWays /BÜN 07/ und EduaR&D /BEE 07/. Bereits heute könnte ein Teil des Wasserstoffs für den Verkehr aus Nebenprodukten der Düngemittelherstellung entnommen werden. Bis 2050 nimmt dieser Anteil allerdings relativ zu den anderen Möglichkeiten von etwa 19 % auf ca. 4 % ab. Auch die Erdgas-Dampfreformierung, 2010 noch bei 56 %, verliert etwa die Hälfte ihres Anteils. Stark zunehmen wird hingegen die Bedeutung der Elektrolyse – von ca. 25 % in 2010 auf etwa 68 % im Jahr 2050. Dadurch bietet sich die Möglichkeit, regenerative Energien, aber auch andere nicht-flüssige Primärenergieträger im Verkehr einzusetzen.

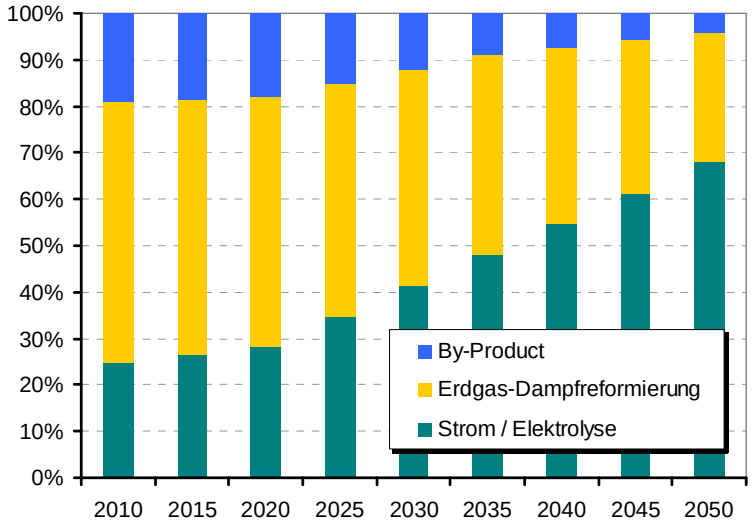

Abbildung 2-125: *Anteile der verschiedenen Wasserstoffbereitstellungspfade /BEE 07/, /BÜN 07/*

Die Entwicklung der regenerativen Stromerzeugung orientiert sich an der Leitstudie 2008 /DLR-01 08/ und wurde um eigene Berechnungen und Potenzialstudien ergänzt (vgl. auch Kapitel 2.5.3). Zusammen mit der Stromerzeugung aus KWK bildet sie den „must-run"-Anteil, die gesetzte Erzeugung, die unabhängig vom Strombedarf produziert.

Insgesamt steigt die gesetzte Erzeugung bis 2050 in Szenario 1 um das 2,8-fache an. Das größte absolute Wachstum ist dabei auf die Windenergie zurückzuführen, die zukünftig Offshore ausgebaut werden soll. Obwohl die Stromerzeugung aus Geothermie als Grundlastsystem propagiert wird und sich gegenüber heute um den Faktor 100 steigern lässt, nimmt sie absolut auch weiterhin einen verschwindend geringen Anteil ein. Der Wasserkraftanteil bleibt nahezu konstant. Die Stromerzeugung aus Biomasse wird auf das Doppelte, Photovoltaik auf das Dreifache steigen. Die Entwicklung der gesetzten Stromerzeugung für Szenario 1 zeigt **Abbildung 2-126**. Um das Jahr 2030 wird sich demgemäß der Ausbau verlangsamen, da sich die Potenziale – vor allem von geeigneten Windkraftstandorten – erschöpfen.

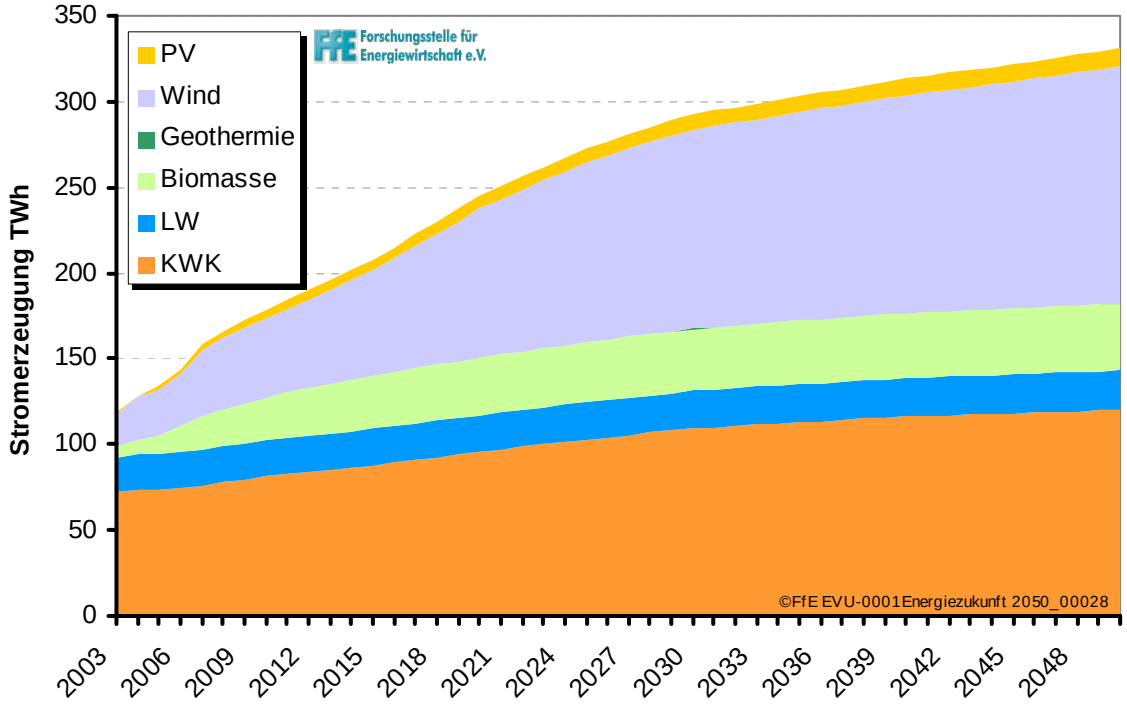

Abbildung 2-126: *Entwicklung der Stromerzeugung aus „must-run"-Anlagen in Szenario 1*

Wie in Kapitel 2.5.1 beschrieben, wird aus dem Szenario zum Ausbau der Erneuerbaren Energien und der KWK für jedes Jahr im Betrachtungszeitraum ein Restlastgang generiert.

Abbildung 2-127 zeigt die Ergebnisse der Lastgangsynthese für Szenario 1 als geordnete Jahresdauerlinie. Die obere, blaue Linie zeigt die Ausgangssituation im Jahr 2003. Mit zunehmendem Anteil der „must-run"-Anlagen wird der Restlastgang sowohl in seiner Höhe als auch in seinem Verlauf verändert. Spätestens ab 2020 ist eine Speicherung unabdingbar, wenn nicht in einigen Stunden die regenerativen Anlagen abgeschaltet werden sollen. Die dunkelgrüne Linie zeigt diesen Fall für das Jahr 2050, wenn etwa 3 TWh an gesetzter Erzeugung eine negative Restlast bewirken.

Im Modell wurde daher die Möglichkeit einer Speicherung des „überschüssigen" Stroms vorgesehen. Der Strom kann in Form potenzieller Energie durch Pumpspeicherkraftwerke und (adiabate) Druckluftspeicherkraftwerke mit einem Nutzungsgrad von ca. 70 % gepuffert werden. Die Energie wird im Modell genutzt, um Leistungsspitzen zu glätten. Von den 10 GW an Speicherleistung stehen allerdings nur etwa drei Viertel zur Zeit der Höchstlast zur Verfügung, da nicht von einem idealen Speichermanagement ausgegangen werden kann.

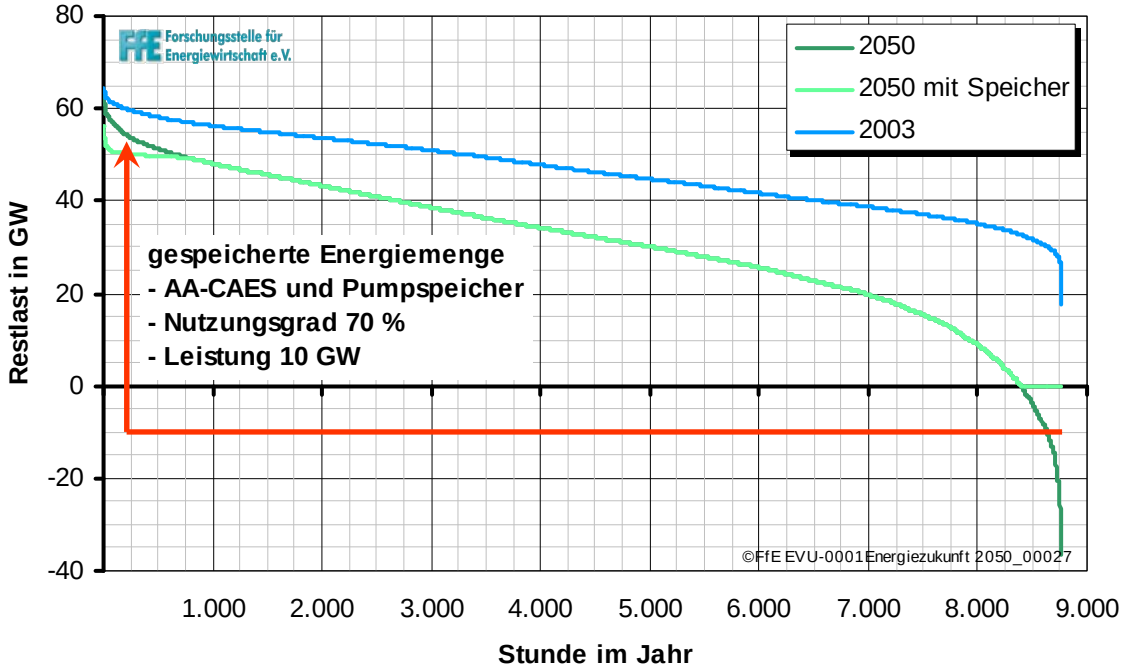

Abbildung 2-127: *Geordnete Jahresdauerlinie der zu deckenden Restlast in Szenario 1*

Die geordnete Jahresdauerlinie der residualen Last wird als Rahmenbedingung vom Optimierungsmodell ifeon verwendet, um den Kraftwerkseinsatz zu simulieren und den Kraftwerkszubau zu berechnen. Als weitere Parameter müssen die technische Verfügbarkeit zukünftiger Kraftwerkstechnologien sowie Preisentwicklungen vorgegeben werden. Die Verfügbarkeit gibt dabei an, wann das Modell ifeon die jeweilige Technologie in Betrieb nehmen kann – allerdings nicht, ob diese Technologie zu diesem Zeitpunkt unter den übrigen Prämissen (Zertifikatspreise, notwendige Leistung, etc.) tatsächlich zum Zug kommt.

In Szenario 1 wird als Rahmenbedingung für die Modellrechnung der Kernenergieausstieg gemäß dem Gesetz zur geordneten Beendigung der Kernenergienutzung zur gewerblichen Erzeugung von Elektrizität /BMJ-01 02/ vorgegeben. Das letzte bestehende Kernkraftwerk wird demnach im Jahr 2023 außer Betrieb gehen. Des Weiteren wird angenommen, dass die 700 °C-Technologie für Kohleverstromung ab 2025 sowie CO_2-Abtrennung und Speicherung ab dem Jahr 2030 großtechnisch verfügbar und einsetzbar sind.

Die Preise der Energieträger werden nach den in Kapitel 1.2.4 dargestellten Entwicklungen abgebildet. Für die Preise der CO_2-Zertifikate wird ein Anstieg von 20 €/t in 2003 auf 60 €/t (real) im Jahr 2050 unterstellt. Die Vorgabe eines Zertifikatepreises scheint zur Abbildung des Handelssystems besser geeignet als die Vorgabe einer degressiven Deckelung, da mit einer Ausweitung des Zertifikatehandels Emissionsrechte aus dem Ausland zugekauft werden können. Der Preis wird somit durch die Grenzkosten globaler CO_2-Minderungsmaßnahmen bestimmt und liegt damit unter den Preisen, die sich in einem Binnenmarkt mit ohnehin hoher Effizienz einstellen würden.

Die Entwicklungen in der Kraftwerkstechnik waren auch in der Vergangenheit durch Technologiesprünge und Fortschritte bei der Werkstofftechnik geprägt. **Abbildung 2-128** zeigt die Steigerungen der Nettowirkungsgrade bei den mit Braun-

und Steinkohlen befeuerten Dampfkraftwerken. Heutige Dampfkraftwerke erreichen demnach im Mittel Wirkungsgrade von etwa 44 %. Mit der Einführung von höheren Dampfparametern sind Werte von 50 % und höher erreichbar. Zum Vergleich sind im Diagramm die – durch die Temperaturen vorgegebenen – theoretisch erreichbaren Carnot-Wirkungsgrade sowie die technikbedingten Grenzen eingezeichnet.

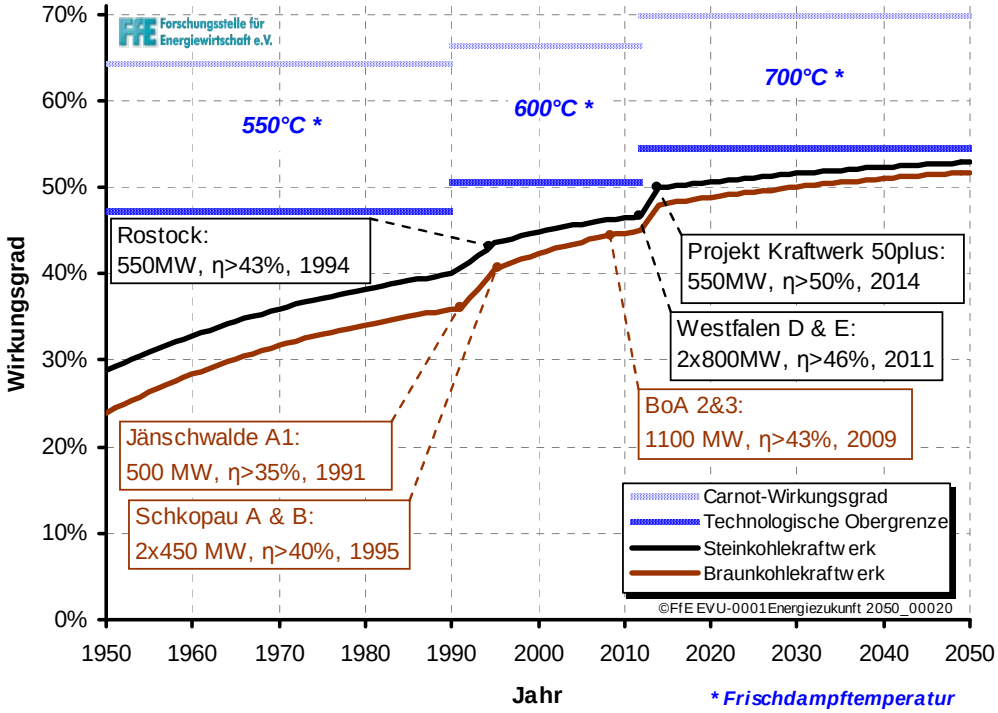

Abbildung 2-128: *Entwicklung der Nettowirkungsgrade von Stein- und Braunkohlenkraftwerken /FFE 08b/*

Abbildung 2-129 zeigt die Wirkungsgradentwicklung sowie die technologischen Obergrenzen bei GuD-Kraftwerken. Durch die Kombination von modernen Gasturbinen mit keramisch beschichteten Einkristallschaufeln und 700 °C-Technologie bei den Dampfturbinen sind hier ab 2025 Wirkungsgrade von über 60 % erreichbar.

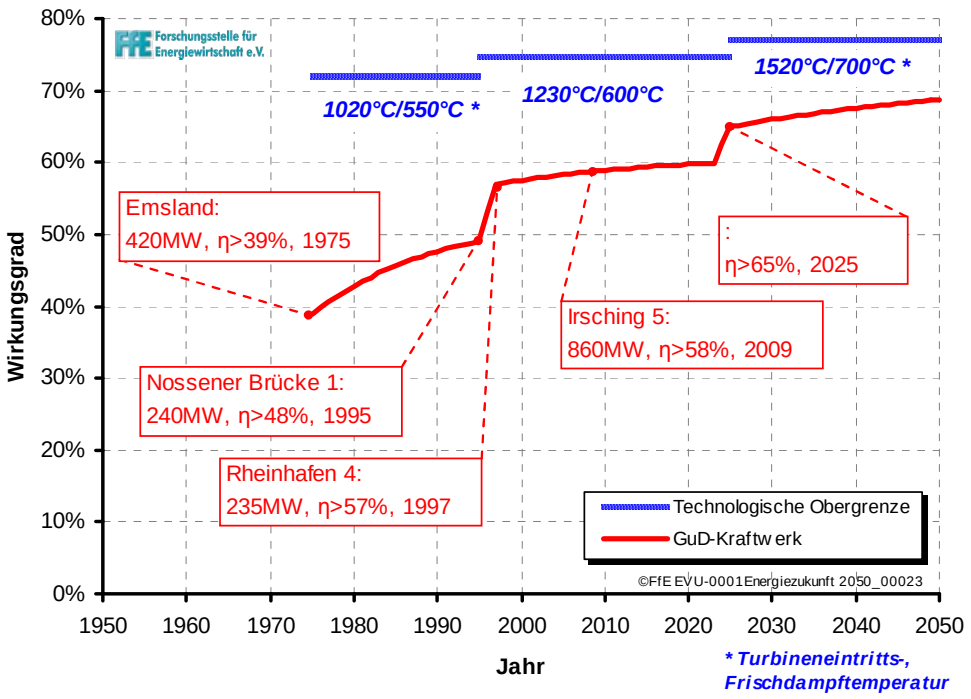

Abbildung 2-129: *Entwicklung der Wirkungsgrade von Gas- und Dampf-Kombikraftwerken /FFE 08b/*

Die Wirkungsgrade von Gasturbinen (siehe **Abbildung 2-130**) werden neben den Temperaturen bei der Verbrennung durch das Druckverhältnis Π bestimmt. Gegenüber den ersten stationären Anlagen mit etwas über 30 % Wirkungsgrad konnte in den vergangenen Jahren eine Steigerung auf über 40 % erreicht werden. Zukünftig sind Wirkungsgrade von maximal 48 % erreichbar.

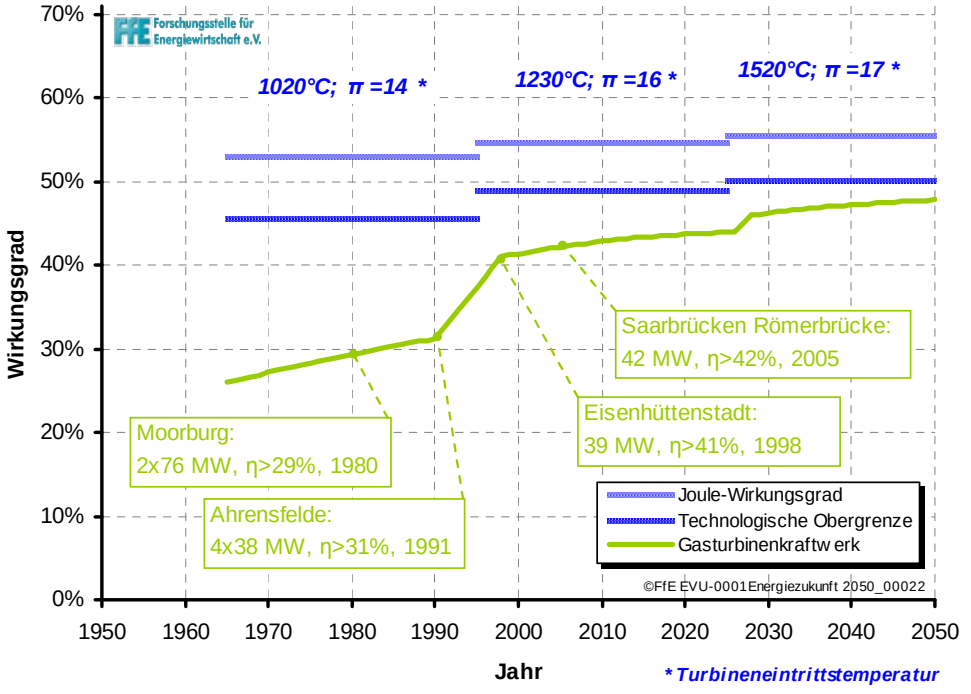

Abbildung 2-130: *Entwicklung der Wirkungsgrade von Gasturbinenkraftwerken /FFE 08b/*

Mit diesen Rahmenbedingungen und Berechnungen konnte in ifeon die Deckung der residualen Last durch reine Kraftwerke, die ausschließlich zur Stromerzeugung genutzt werden, optimiert werden. Das Ergebnis der Simulation ist in **Abbildung 2-131** graphisch dargelegt. Während im Startjahr noch etwa 37 % des Stroms in Kernkraftwerken erzeugt wurde, geht der Kernenergieanteil durch den Ausstiegsbeschluss im Jahr 2024 auf Null zurück. Die fehlende Kapazität und Erzeugung wird zunächst durch den Neubau von Steinkohlekraftwerken – ab 2025 mit 700 °C-Technologie – aufgefangen. Auch Braunkohlekraftwerke werden in 700 °C-Technologie ausgeführt. Ab 2030 wird durch die Verfügbarkeit von CCS-Technologie in Kombination mit hohen CO_2-Preisen der Einsatz von Braunkohlekraftwerken mit CO_2-Abscheidung und Sequestrierung rentabel. Da eine Speicherung von Strom bereits bei der Lastgangsynthese vorgesehen ist, wird der Anteil der gasbefeuerten Kraftwerke – nicht zuletzt aufgrund des ungünstigen Verhältnisses von Gas- zu Kohlepreisen – zurückgehen.

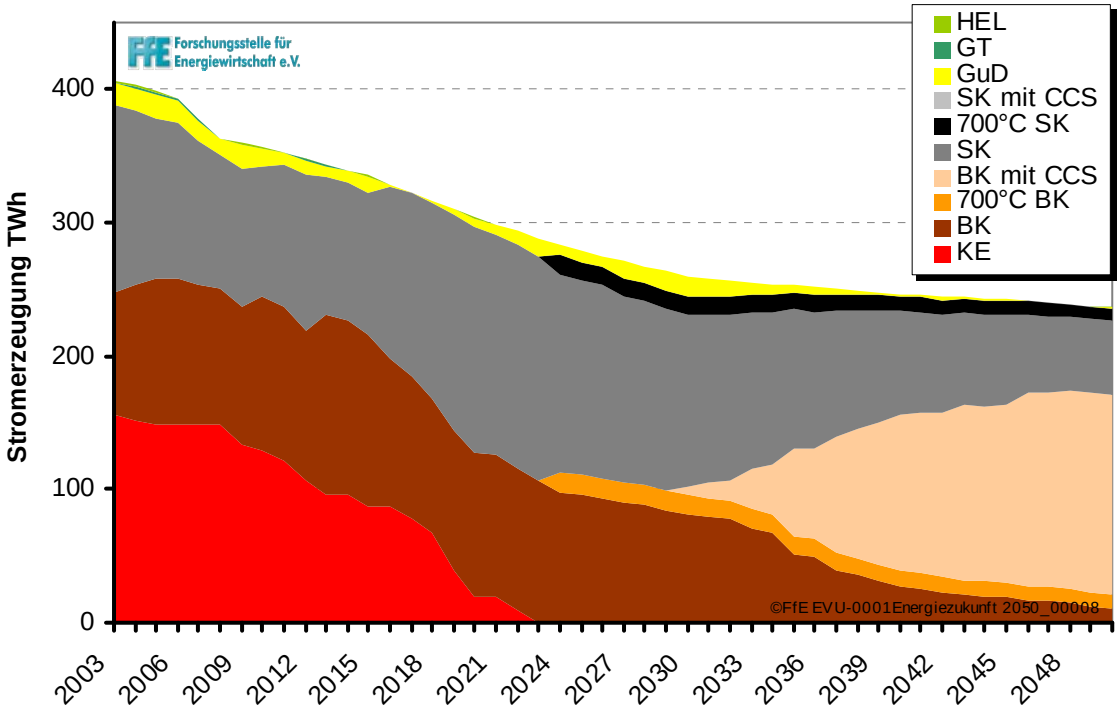

Abbildung 2-131: *Ergebnis der Simulation mit ifeon für die Stromerzeugung in den konventionellen Kraftwerken (Szenario 1)*

2.5.7 Primärenergieverbrauch

Die Ergebnisse der vorangegangenen Berechnungsschritte sowie die Daten aus den Anwendungssektoren wurden im ZEN, wie in Teil I des Berichtes beschrieben, zusammengefasst. Das Ergebnis der Szenarienrechnung für die Entwicklung des Primärenergieverbrauchs ist in **Abbildung 2-132** dargestellt. Im Posten „Regenerative“ sind Solarstrahlung, Windenergie, Biomasse und Wasserkraft sowie Geothermie subsumiert. Ein Teil des im Verkehr für die Traktion verwendeten Wasserstoffs entstammt stofflichen Umwandlungsprozessen aus der Industrie, wie in Kapitel 2.5.6 beschrieben. Dieser vergleichsweise geringe Anteil ist mit Erdgas und den sonstigen Gasen zusammengefasst.

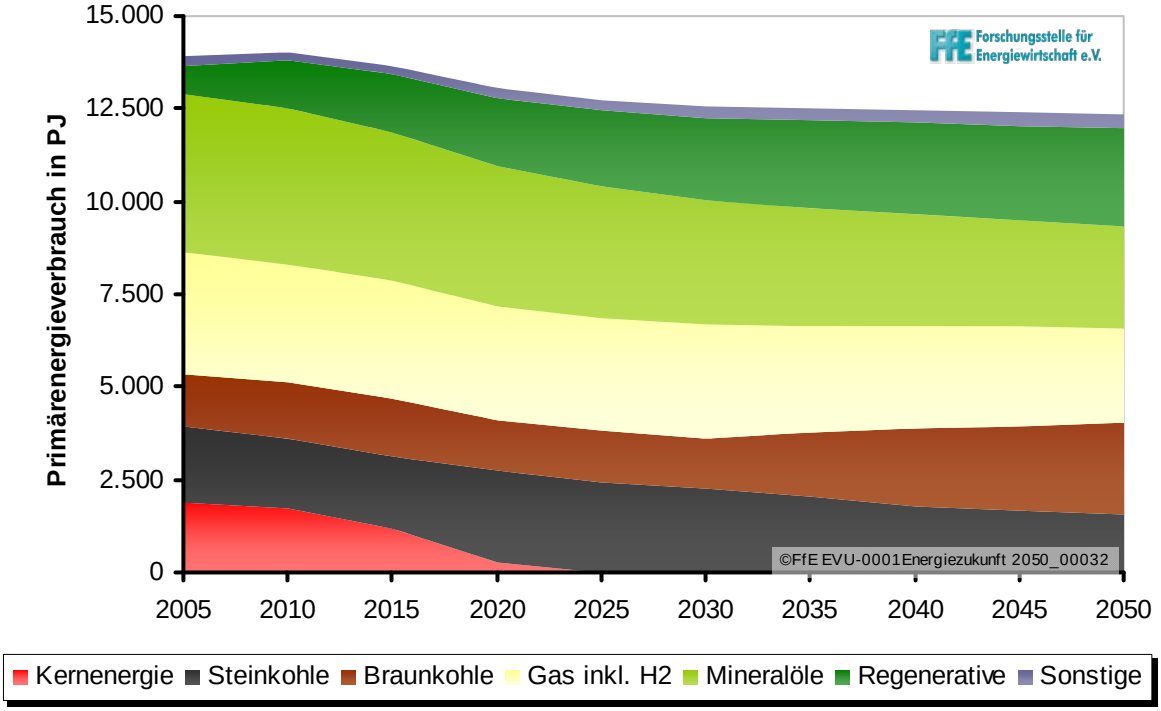

Abbildung 2-132: *Entwicklung des Primärenergieverbrauchs in Szenario 1*

Im gesamten Betrachtungszeitraum sinkt der Primärenergieverbrauch leicht – bis 2020 stärker als im Zeitraum bis 2050. Der Anteil der fossilen Energieträger sinkt stetig – bis auf Braunkohle, die ab 2030 in CCS-Kraftwerken eingesetzt wird und eine Renaissance erlebt. Der absolute Anteil der Regenerativen steigt bis 2050 um das 3,5-fache an.

2.5.8 CO_2-Emissionen

Aus dem Primärenergieeinsatz lassen sich die energiebedingten CO_2-Emissionen für Szenario 1 errechnen. Die dafür verwendeten spezifischen Emissionsfaktoren sind in **Tabelle 2-13** aufgeführt.

Tabelle 2-13: *Zusammenfassung der verwendeten spezifischen CO_2-Emissionsfaktoren von Energieträgern bei vollständiger Verbrennung*

	CO_2-Emissionen bei vollständiger Verbrennung	
	in t/TJ	in g/kWh
Steinkohle	94	337
Braunkohle	112	403
Heizöl leicht	74	266
Heizöl schwer	78	281
Sonst. Mineralöle	80	288
Erdgas	56	202
Sonstige Gase	52	187
Müll, sonst.	45	162
Benzin	65	234
Diesel	74	266

Zu beachten ist, dass die CO_2-Emissionen aus Braunkohle in Szenario 1 sinken, obwohl deren Einsatz zunimmt, da ab 2030 CO_2-Abtrennung und Speicherung genutzt wird.

Auch wenn bei einem Abscheidegrad von 85 % nicht alle Emissionen sequestriert werden können, so kann doch der größte Anteil des durch Braunkohleeinsatz bedingten CO_2-Ausstoßes reduziert werden. Insgesamt sinken die Emissionen von etwa 900 Mio. t im Jahr 2005 bis auf etwa 600 Mio. t in 2050 ab, wie in **Abbildung 2-133** dargestellt. Der Trend der Vergangenheit setzt sich dabei bis 2020 abgeschwächt fort. Danach können sich die steigenden Anteile regenerativer Energien sowie CCS bei Braunkohlekraftwerken durchsetzen. Die politischen Ziele für die Einsparung von Treibhausgasemissionen wurden in dieser Darstellung auf die Betrachtung von CO_2 als Haupttreiber der Klimaerwärmung eingeschränkt. Beispielsweise kann das für 2012 anvisierte Kyoto-Ziel von 21 % CO_2-Einsparung bis 2012 in diesem Szenario demnach erst im Jahr 2035 erreicht werden.

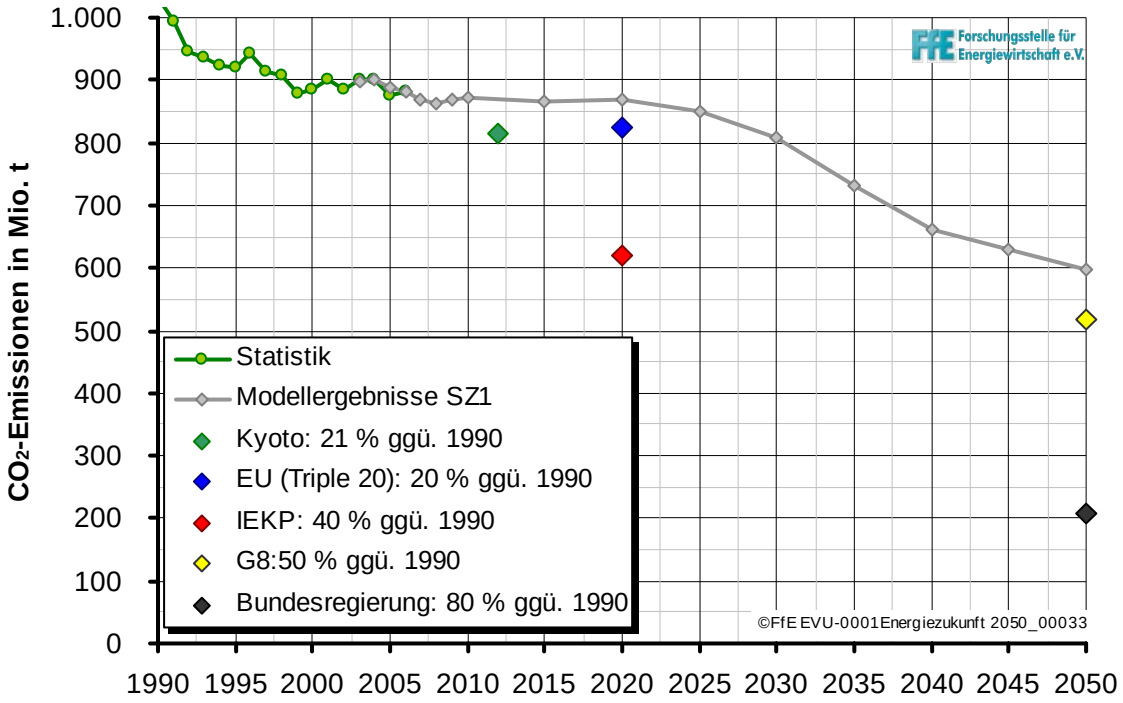

Abbildung 2-133: *Entwicklung der CO_2-Emissionen von 1990 bis 2050 in Szenario 1 /BMWi 09/, /eigene Berechnung/*

2.6 Zusammenfassung der Ergebnisse aus Szenario 1

Im Folgenden sind die Rahmenbedingungen und Ergebnisse der Szenarienrechnung für die Referenzentwicklung zusammengefasst. Zunächst werden die Einflussfaktoren und Annahmen für die Anwendungssektoren stichpunktartig dargestellt.

Haushalte

- Entwicklung entsprechend der sozioökonomischen Rahmendaten und der Historie
- Dies führt zu:
  - zunehmenden Komfortansprüchen
  - steigenden Ausstattungsgraden
  - Energiesparmaßnahmen werden weiterhin nur schleppend umgesetzt
  - umweltbewusstes Handeln setzt sich in der Bevölkerung nur langsam durch

Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD)

- Entwicklungstendenzen relevanter technischer Systeme entsprechend der Historie
- Fortschreibung des Bedarfs auf Basis der sozioökonomischen Rahmendaten
- keine Ereignisse, die einen Strukturbruch hervorrufen würden

Industrie

- weiterhin moderates und stabiles Wachstum
- die Energieeffizienz erhöht sich in den Unternehmen entsprechend der Historie
- die politischen Bestimmungen der EU zur Energieeffizienz werden knapp verfehlt

Verkehr

- Zunahme des Luftverkehrs durch Globalisierung
- stetiges Wachstum des Güterverkehrs
- Beimischung regenerativer Kraftstoffe gemäß den gesetzlichen Vorgaben
- zunehmende Urbanisierung führt zu
  - kürzeren Wegen
  - mehr ÖPNV
  - weniger Individualverkehr

Die Ergebnisse der Endenergieverbrauchsentwicklung in Szenario 1 zeigt **Abbildung 2-134**. Strom- und Fernwärmeverbrauch steigen im gesamten Betrachtungszeitraum leicht an. Der Kraftstoffeinsatz steigt bis 2010 an, um dann abzunehmen. In der Summe der Energieträger ergibt sich daher bis 2010 ein leichter Anstieg des Endenergieverbrauchs um 1,4 %. Im Zeitraum von 2010 bis 2050 sinkt der Endenergieeinsatz durch den Rückgang der Bevölkerung sowie eine höhere Endenergieeffizienz, u. a. durch steigenden Stromeinsatz, um 4,5 %.

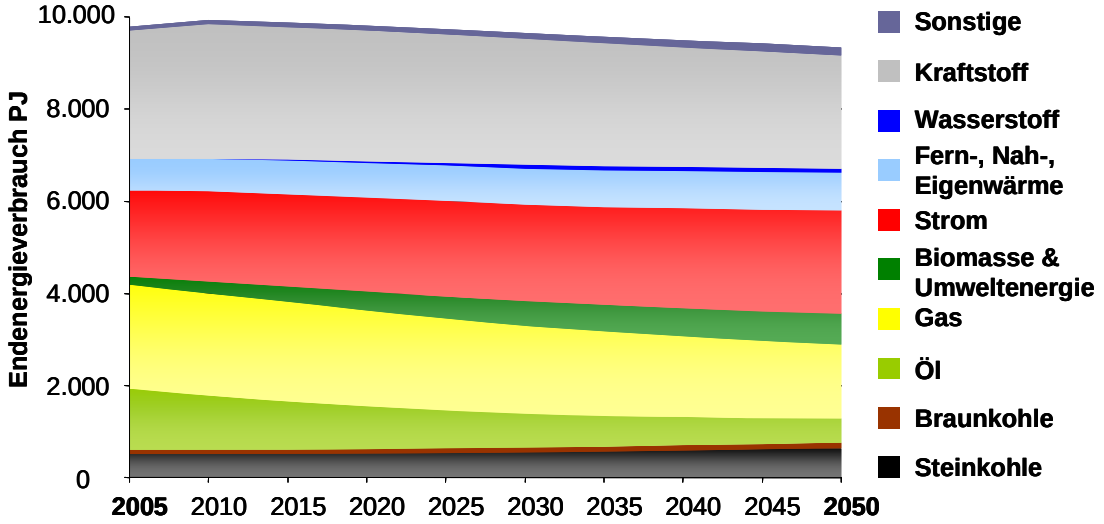

Abbildung 2-134: *Endenergieverbrauch nach Energieträgern in Szenario 1*

In den Ringdiagrammen in **Abbildung 2-135** ist die Änderung der Endenergieverwendung von 2005 (links) nach 2050 (rechts) dargestellt. Im inneren Ring ist jeweils die Verteilung des Verwendungszwecks nach Sektoren gezeigt. Es ist erkennbar, dass sich gegenläufige Trends in einzelnen Sektoren teilweise aufheben. Während beispielsweise der Bedarf an Endenergie zur Bereitstellung mechanischer Energie in Haushalten und GHD zurückgeht, wird dieser Trend durch den steigenden Bedarf in der Industrie kompensiert. Die Industrie legt auch in allen anderen Anwendungsbereichen zu. Da sie im Bereich der Raumwärmebereitstellung unterrepräsentiert ist, nimmt dieser Anteil insgesamt ab.

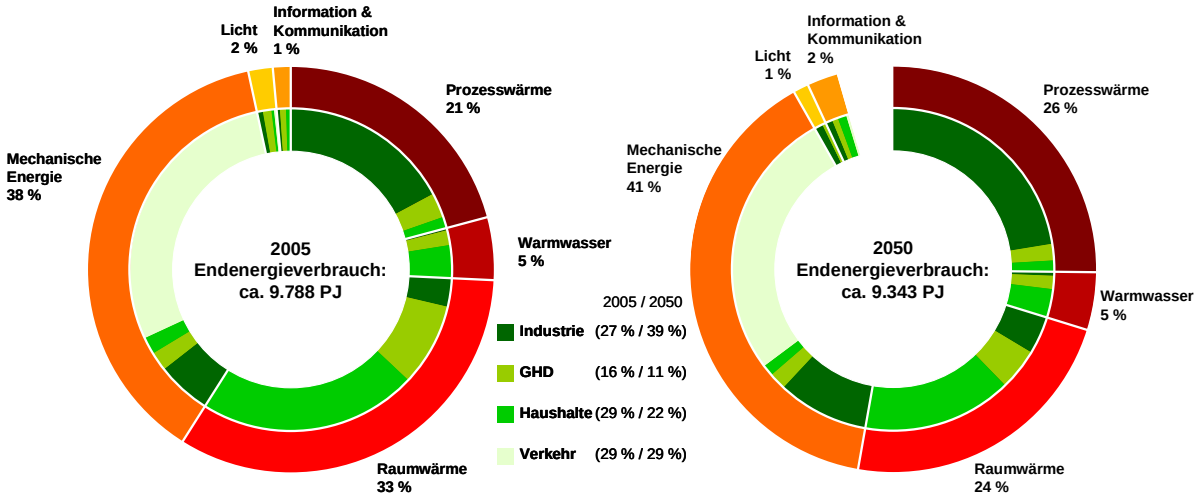

Abbildung 2-135: *Endenergie aufgeteilt auf Anwendungsart und Verwendungszweck in Szenario 1*

Im Umwandlungssektor werden für Szenario 1 folgende Rahmenbedingungen angenommen:

- Der CO_2-Zertifikatepreis steigt von 20 € auf 60 € (real).
- Der regenerative Anteil sowie KWK steigen weiter an.
- Der Beschluss zum Kernenergieausstieg wird weiter umgesetzt.

- Ab 2025 ist die 700 °C-Technologie bei Kohlekraftwerken verfügbar.
- Ab 2030 sind Kohlekraftwerke mit CCS einsetzbar.

Abbildung 2-136 zeigt die zusammengefassten Ergebnisse für den Primärenergieeinsatz in Szenario 1. Trotz weiteren Ausbaus können die regenerativen Energieträger die Fossilen nur teilweise ersetzen. Im Betrachtungszeitraum sinken die aus der errechneten Energieträgerstruktur resultierenden CO_2-Emissionen um ca. ein Drittel.

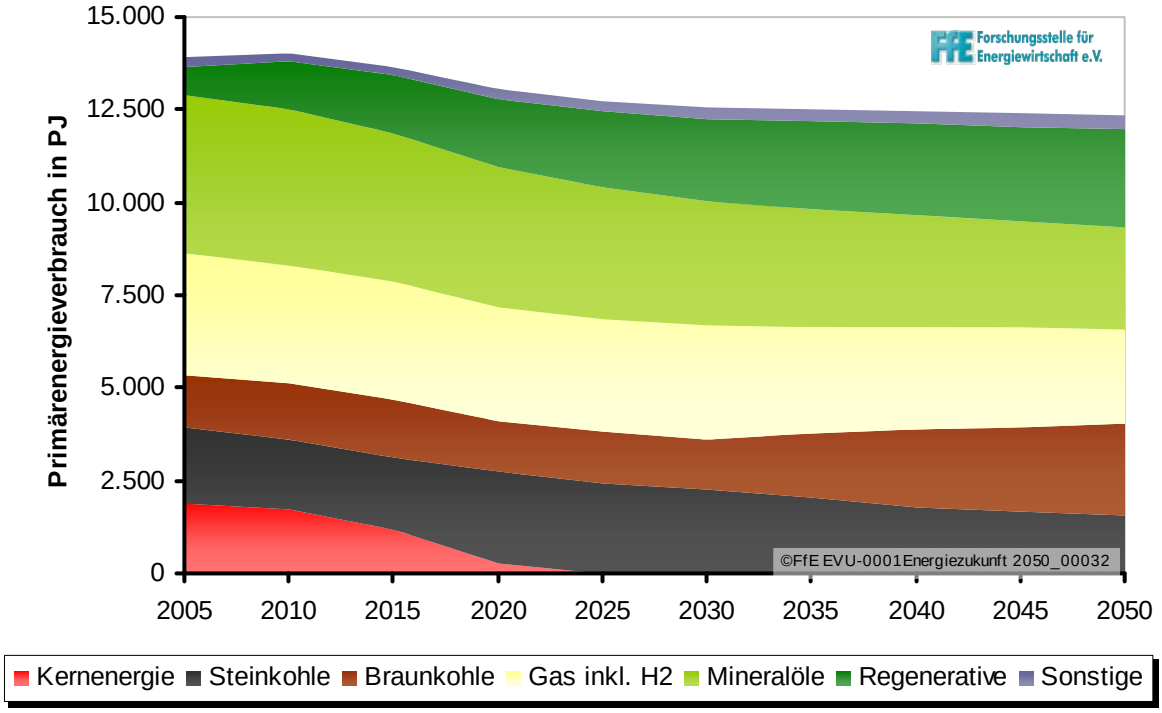

Abbildung 2-136: *Entwicklung des Primärenergieverbrauchs in Szenario 1*

3 Szenario 2 – Erhöhte Technikeffizienz

3.1 Entwicklung im Sektor Haushalte

Bis zum Jahr 2050 wird bei sämtlichen Energieanwendungen jeweils die energieeffizienteste Technologie eingesetzt. Dabei bleibt die Energiedienstleistung im Vergleich zum Szenario 1 konstant. Energiesparmaßnahmen resultieren in diesem Szenario aus dem Umstieg auf die jeweils effizienteste Technologie bei der Umwandlung von Endenergie in Nutzenergie.

Die in diesem Szenario eingesetzte Technik steigert allein die Effizienz. Das Nutzerverhalten ändert sich im Vergleich zu Szenario 1 nicht.

Die Effizienz der Energieverbraucher bzw. der Energieumwandlungssysteme im Sektor Haushalte unterliegt einer dynamischen Entwicklung. Durch Verbesserungen und weitere Fortschritte lassen sich ausgehend von der aktuell besten erhältlichen Technik Steigerungen der Effizienz bis 2050 erwarten, die in diese Betrachtungen mit einbezogen werden. Die zu erwartenden höheren Investitionskosten werden in diesem Szenario akzeptiert.

Durch den Wechsel hin zur effektivsten Technologie ergibt sich eine erhebliche Reduktion des Energiebedarfs, die jedoch durch den allgemeinen Wunsch nach steigendem Komfort etwas gemindert wird. In diesem Zusammenhang wirken wie bei Szenario 1 der steigende Ausstattungsgrad sowie der Zuwachs an beheizten Flächen der Reduktion des Energiebedarfs entgegen.

3.1.1 Maßgebliche Bedarfsdeterminanten

3.1.1.1 Raumwärme

Der Raumwärmebedarf hängt von den folgenden Determinanten ab:

- Thermische Qualität des Gebäudebestandes
- Zu beheizende Gesamtfläche
- Nutzungsgrad der verwendeten Heizungssysteme bzw. Speicher- und Verteilverluste

Thermische Qualität des Gebäudebestandes
Der Gebäudebestand entspricht bis zum Betrachtungsjahr 2003 dem Gebäudebestand aus Szenario 1. Ab 2003 ist die thermische Gebäudequalität der neu gebauten bzw. der sanierten Gebäude besser, was sich im niedrigeren spezifischen Raumwärmebedarf niederschlägt.

Der Raumwärmebedarf der Ensemblegebäudeklassen 1 bis 8 wurde /ISO 00/ entnommen. Die Werte für die Ensemblegebäudeklassen 9 bis 18 beruhen auf Berechnungen der FfE. In **Tabelle 3-1** ist die Fortschreibung des spezifischen Raumwärmebedarfs für die Ensemblegebäudeklassen angegeben.

Tabelle 3-1: *Spezifischer Raumwärmebedarf der unterschiedlichen Ensemblegebäudeklassen /STO 07/, /eigene Berechnungen/*

Spezifischer Raumwärmebedarf (Nutzenergie)	EZH		MFH	
	Ensemblegebäude-klasse	kWh/m²*a	Ensemblegebäude-klasse	kWh/m²*a
bis 1968	EB 1	128,5	EB 2	154,0
1969-1982	EB 3	136,2	EB 4	163,9
1984-1995	EB 5	141,4	EB 6	128,7
1996-2001	EB 7	120,6	EB 8	120,8
2002-2009	EB 9	115,2	EB 10	106,4
2010-2020	EB 11	76,1	EB 12	49,7
2021-2030	EB 13	68,5	EB 14	44,7
2031-2040	EB 15	61,6	EB 16	40,3
2041-2050	EB 17	55,5	EB 18	36,2

Die Ermittlung des spezifischen Heizenergiebedarfs ab Ensemblegebäudeklasse 9 erfolgt nach folgender Vorgehensweise:

- Ensemblegebäude 9 und 10:
  Aus der jeweiligen durchschnittlichen Wohnfläche der EZHs und MFHs und den typischen A/V-Verhältnissen werden die Gebäudedaten für die Berechnung des Heizwärmebedarfs nach DIN 4108-6 generiert.
- Die Nutzfläche A_N nach EnEV wird auf die Wohnfläche umgerechnet.
- Ensemblegebäude 11 und 12:
  Für die Ensemblegebäude EB 11 und EB 12 wird eine weitere Verbesserung des Wärmedämmstandards ab dem Jahr 2010 angenommen. Die spezifischen Heizenergiebedarfswerte von EB 11 und EB 12 werden deshalb um 10 % reduziert. Die Berechnung erfolgt analog. Die Annahme, dass sich der Heizenergiebedarf vom Jahr 2010 bis 2020 weiter um ca. 10 % reduzieren wird, basiert darauf, dass die Anzahl der bauphysikalisch hochwertigen Gebäude steigt. Insbesondere der Anteil an KfW-60-, KfW-40- und Passivhäusern nimmt zu.
- Eine Verbesserung in gleicher Größenordnung wird auch für die folgenden Jahrzehnte und somit für die folgenden Baualtersklassen angenommen.

Zu beheizende Gesamtfläche
Die Fortschreibung der Wohnfläche erfolgt analog Szenario 1.

Nutzungsgrad der verwendeten Heizungssysteme
Die Ausgangswerte (Bezugsjahr 2003) für die Nutzungsgrade sind die gleichen wie in Szenario 1 (vgl. Tabelle 2-2).

In der **Abbildung 3-1** ist die Fortschreibung der drei am weitesten verbreiteten Heizsysteme dargestellt.

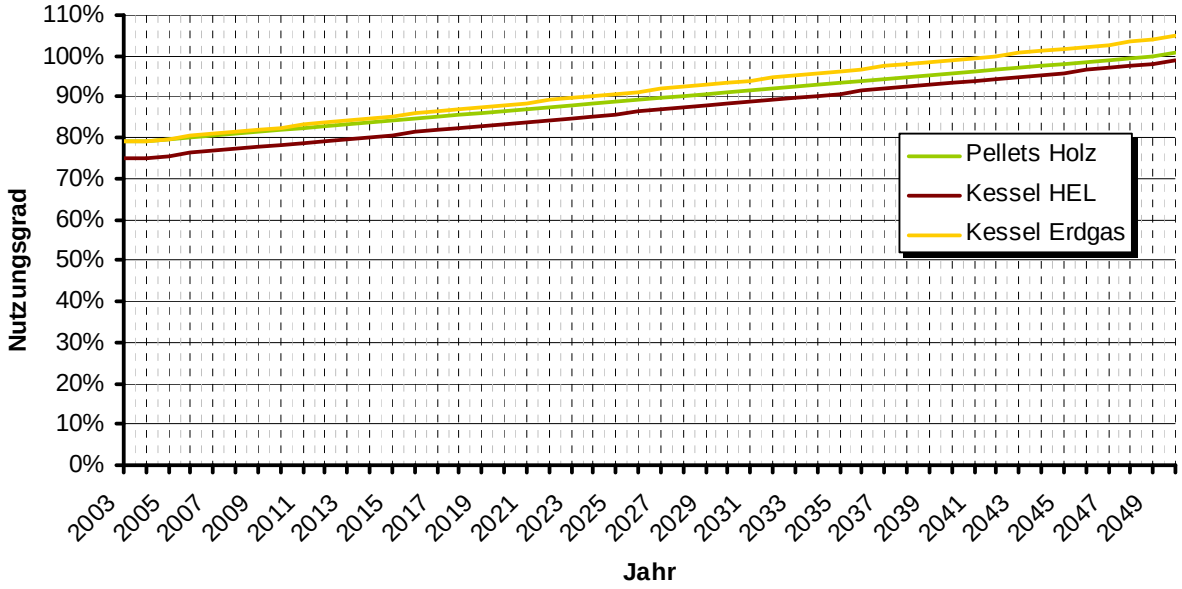

Abbildung 3-1: *Fortschreibung der Nutzungsgrade*

Der Nutzungsgrad der Holzpellet-, Braunkohle- und Erdgaskessel wird in diesem Szenario bis 2050 auf 105 % steigen. Bei Heizöl wird eine Steigerung auf 98 % angenommen, da kein hoher Innovationsdruck mehr besteht.

Der Solarthermie wird, wie in Szenario 1, ein rechnerischer Nutzungsgrad von 100 % zugewiesen, da die Energie für die Umwälzpumpen im Bereich mechanische Energie bilanziert wird.

Die Wärmepumpe fließt mit einem Nutzungsgrad (Arbeitszahl) von 350 % in das Modell ein, welcher bis 2050 im Szenario 2 auf 500 % ansteigt. Dies erscheint aus heutiger Sicht, aufgrund des niedrigeren Raumwärmebedarfs der Gebäude in diesem Szenario, möglich. Dies ermöglicht niedrigere Vorlauftemperaturen, wodurch sich die Arbeitszahl der Wärmepumpen erhöht. Bedingt durch den hohen Innovationsdruck kann auch von der Entwicklung weiter verbesserter Kältemittel ausgegangen werden.

Für die Strom-Direktheizung wird, wie in Szenario 1, von einem Nutzungsgrad von 99 % ausgegangen. Für die Wärmetauscher der Kompaktstationen wird von einem gleich bleibenden Nutzungsgrad von 98 % bis 2050 ausgegangen.

3.1.1.2 Warmwasser

Die Faktoren für den Energieverbrauch unterscheiden sich von Szenario 1 in folgenden Punkten:

- Die Kesselwirkungsgrade sind höher und es werden verstärkt effizientere Heizsysteme, die parallel der Warmwasserbereitung dienen, eingesetzt.
- Bei den Waschmaschinen und Geschirrspülern wird eine Effizienzsteigerung um 40 % bis 2050 unterstellt. Dies ist im Hinblick auf die beste verfügbare Technologie möglich, da sich beispielsweise durch den Einbau einer Regelung, die den Verschmutzungsgrad erkennt, beträchtliche Effizienzsteigerungen ergeben können.

3.1.1.3 Prozesswärme

Die Bedarfsdeterminanten sind die gleichen wie in Szenario 1 mit dem Unterschied, dass bis zum Jahr 2050 eine Effizienzsteigerung von 30 % unterstellt wird.

3.1.1.4 Beleuchtung

Für die Berechnung des Endenergiebedarfs mit dem Berechnungsmodell gelten dieselben Annahmen für die Bevölkerungsentwicklung und die Entwicklung der spezifischen Wohnfläche wie in Szenario 1. Die Energiedienstleistung, also der benötigte Lichtstrom, bleibt ebenfalls gleich, da sich nicht abzeichnet, dass die Menschen in Zukunft mit weniger künstlichem Licht auskommen wollen.

3.1.1.5 Mechanische Energie

Pumpen
Die den Energieverbrauch der Pumpen bestimmenden Faktoren, wie z. B deren Bestandszahl bleiben die gleichen wie in Szenario 1. Die Effizienzentwicklung unterscheidet sich allerdings. Im Szenario 1 wurde eine Effizienzsteigerung von 70 % erreicht, da bereits heute 80 % möglich wären. In diesem Szenario wird eine Effizienzsteigerung von 85 % unterstellt.

Aufzüge
Der Energieverbrauch der Aufzüge hängt ab von:

- Der Anzahl der Aufzüge, welche mit der Gebäudebestandsentwicklung verknüpft ist. Der Gebäudebestand basiert auf der Fortschreibung von /IFO 06/ und ändert sich somit gegenüber Szenario 1 nicht.
- Es wird angenommen, dass die Effizienz bis 2050 um 45 % steigt. Möglich wird dies durch eine Verringerung der Standby-Verluste, den vermehrten Einsatz von Seilaufzügen anstelle von hydraulisch betriebenen Aufzügen sowie den Einsatz von Rekuperatoren.

Hilfsenergie
Hilfsenergie wird für den Eigenbedarf der Kessel und die Umwälzung bei den thermischen Solaranlagen benötigt.

Der Energieverbrauch an Hilfsenergie für die Heizkessel hängt von folgenden Faktoren ab:

- Anzahl der Heizsysteme (vgl. Abbildung 2-3, Gebäudebestand).
- Durch die Verringerung von Standby-Verlusten, effizientere Gebläse und bessere Regelung ergibt sich gegenüber 2003 eine Energieeinsparung von 40 % bis zum Jahr 2050.

Die Determinanten für den Energiebedarf der Solaranlagen sind die nachfolgend aufgezählten:

- Die Anzahl der Solaranlagen steigt in Szenario 2 von etwa 550.000 im Jahr 2003 auf ca. 18,5 Mio. im Jahr 2050 an, was im Heizkesselmodell berücksichtigt wird.
- Die Effizienz der Solarpumpen steigt bis 2050 um 40 %.

Haushaltsgeräte
In diesem Szenario wird dieselbe Art von Haushaltsgeräten untersucht, wie in Szenario 1. Im Unterschied zum Bereich IuK unterliegt der Haushaltsgerätebestand nicht so schnellen Veränderungen wie etwa die Unterhaltungselektronik. Bei der Geräteeffizienz wird unterstellt, dass sie bis 2050 um 40 % steigt.

3.1.1.6 Information und Kommunikation

Die bestimmenden Faktoren für den Energieverbrauch sind folgende:

- Effizienz der Geräte
- Anzahl der Geräte
- Betriebsdauer

Im Folgenden wird kurz auf die Determinanten eingegangen:

Effizienz der Geräte
Die Bedarfsdeterminanten sind die gleichen wie in Szenario 1 mit dem Unterschied, dass eine Effizienzsteigerung von 45 % unterstellt wird. Bei bestimmten Gerätegruppen wurde aufgrund der sich jetzt schon abzeichnenden technischen Entwicklung darüber hinaus angenommen, dass sich der Energiebedarf sogar noch weiter reduziert. Es gibt bereits Player, die anstatt Festplattenspeicher Festspeicher verwenden. Ein weiterer Unterschied im Vergleich zu Szenario 1 ist, dass in diesem Szenario die Schein-Aus und Standby Verluste nicht nur reduziert, sondern gänzlich eliminiert werden.

Anzahl der Geräte
Die Anzahl der Geräte und deren Fortschreibung ist analog Szenario 1. Es stehen detaillierte Daten aus der Bottom-Up Analyse in /FFE 08a/, sowie der Studie /SCH 04/ zur Verfügung.

Betriebsdauer
In diesem Szenario erhöht sich die Betriebsdauer der Geräte um 20 % bis 2050. Aufgrund der Abhängigkeit des Energieverbrauchs von der Bevölkerungsanzahl wird diesem noch die Bevölkerungsentwicklung überlagert. Für die Abhängigkeiten der einzelnen Gerätetypen von den jeweiligen Bedarfsdeterminanten ergeben sich keine Änderungen zu Szenario 1 (vgl. Tabelle 2-3).

3.1.2 Technikstruktur

3.1.2.1 Raumwärme

Die Technikstruktur ist prinzipiell die gleiche wie in Szenario 1. Unterschiede bestehen allerdings in folgenden Punkten:

- Geringerer spezifischer Heizwärmebedarf bei den zukünftigen Gebäuden
- Höhere Nutzungsgrade der Heizsysteme
- Unterschiedliche Austausch- bzw. Wechselwahrscheinlichkeit in der Entscheidungsmatrix, hin zu effizienteren Systemen

Das Berechnungsmodell entspricht dem aus Szenario 1, mit den zuvor genannten unterschiedlichen Eingangsparametern.

3.1.2.2 Warmwasser

Warmwasser wird in Deutschland, bis auf einen kleinen Anteil an Elektroboilern, von den Heizkesseln zur Verfügung gestellt. Gasboiler wurden nicht weiter betrachtet, da sie nur noch vereinzelt vorkommen. Die Berechnung der Endenergie für Warmwasser erfolgt im diesem Szenario ebenfalls parallel zur Berechnung des Heizenergiebedarfs im Berechnungsmodell (vgl. 2.1.2).

Die Technikstruktur bei den Waschmaschinen und Geschirrspülern bleibt, bis auf die höheren Nutzungsgrade, gleich und basiert auf detaillierten Bottom-Up Bestandszahlen aus /FFE 08a/.

3.1.2.3 Prozesswärme

Die betrachtete Technikstruktur unterscheidet sich in der höheren Effizienz von Szenario 1. Die Effizienzsteigerungen bei den Haushaltsgeräten liegen bei 40 %, bedingt vor allem durch verbesserte Regelung. Bei den Elektroherden liegen sie bei 25 %, da die Umwandlung von Strom in Wärme beim Herd prinzipiell sehr effizient geschieht. Verbesserungspotenzial bleibt lediglich in der Art des Kochgeschirrs (Schnellkochtopf), bzw. beim Übergang der Wärme (Kochplatte/Topf). Bei Induktionsherden sind Energieeinsparungen in der Größenordnung von 50 % während der ersten Kochphase (Ankochen) möglich, beim Fortkochen ist der Energieverbrauch ca. 10 % bis 15 % geringer als beim herkömmlichen Elektroherd, so dass Einsparungen von durchschnittlich 25 % möglich erscheinen. Einspareffekte ergeben sich auch durch Geräteshift, d. h, indem das Wasser z. B. im Wasserkocher erhitzt wird, anstatt auf dem Herd.

3.1.2.4 Beleuchtung

Ausgangsbasis für Szenario 2 bildet wiederum der Leuchtmittelbestand des Jahres 2003. Es werden die gleichen Arten von Leuchtmitteln verwendet wie in Szenario 1, da sich derzeit keine realistische Alternative zu den bekannten Leuchtmitteln abzeichnet. Die Einführung einer „Wundertechnologie“ wäre höchst spekulativ. Die Effizienzsteigerung bis 2050 wurde aus demselben Grund gleich wie in Szenario 1 festgelegt. Der Unterschied zu Szenario 1 besteht darin, dass die optimale Technologie (LED) im Leuchtmittelmix verstärkt zum Einsatz kommt, was einer erhöhten Technikeffizienz des Gesamtsystems Leuchtmittelbestand gleich kommt. In Tabelle 3-2 sind die Anteile am emittierten Lichtstrom der einzelnen Leuchtmittel dargestellt.

Tabelle 3-2: *Prozentualer Anteil der zu Grunde gelegten Leuchtmittel für das Betrachtungsjahr 2003 und prognostiziert für das Jahr 2050 /eigene Berechnung/*

Lampentyp	Anteil am Lichtstrom in %	
Jahr	**2003**	**2050**
Glühlampe	33	0
Halogenlampe	25	0
Energiesparlampe	23	20
Leuchtstofflampe	19	15
LED	0	60

In der **Abbildung 3-2** ist die Fortschreibung bzw. der Leuchtmittelshift, ausgedrückt in Anteilen am gesamten Lichtstrom, dargestellt. Berücksichtigt ist, wie in Szenario 1 das EU-weite Verbot der Glühlampe und der angenommene Anteil von nahezu null bis 2015.

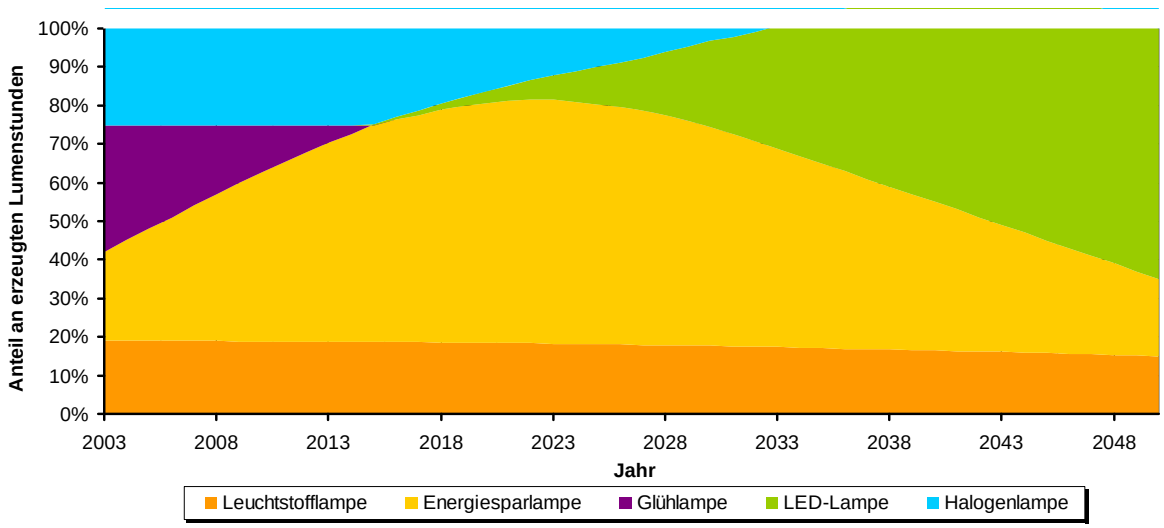

Abbildung 3-2: *Prognose des Anteils der Leuchtmittel am Lichtstrom (Leuchtmittelmix) von 2003 bis 2050*

Die Halogenlampe wird in diesem Szenario bis 2050 ganz von der LED verdrängt, da angenommen wird, dass die LED in den unterschiedlichsten Bauformen erhältlich sein wird. Aus dem gleichen Grund wird die LED die Energiesparlampe und ebenso die effiziente und preisgünstige Leuchtstoffröhre verdrängen.

3.1.2.5 Mechanische Energie

Die folgenden Gerätearten fallen in den betrachteten Bereich der mechanischen Energie:

- Pumpen
- Aufzüge
- Hilfsenergie Kessel und Solarthermie
- Haushaltsgeräte (inkl. Kleingeräte)

Pumpen
Detaillierte Bestandszahlen stehen aus /FFE 08a/ zur Verfügung. Bei den Heizkreispumpen, die im Jahr 2003 einen Energieverbrauch von knapp 36 PJ hatten, wird angenommen, dass bis 2050 ein Drittel des Bestandes durch dezentrale Pumpen ersetzt wird, die eine besonders hohe Effizienzsteigerung von bis zu 90 % ermöglichen. Zwei Drittel des Heizkreispumpenbestandes werden, wie die Zirkulationspumpen, durch effiziente, angepasste und optimal geregelte Pumpen ersetzt, die eine Effizienzsteigerung von 80 % ermöglichen.

Aufzüge
Da ab vier Stockwerken ein Aufzug gesetzlich vorgeschrieben ist, kann die Anzahl der Aufzüge gegenüber Szenario 1 nicht verringert werden. Neben den zuvor genannten Faktoren und in Anbetracht des geringen Gesamtverbrauchs von knapp 4 PJ, werden keine weiteren Änderungen in der Technikstruktur betrachtet.

Hilfsenergie
Die Technikstruktur entspricht, abgesehen von Geräten mit höherer Effizienz beim Eigenbedarf für die Kessel, der von Szenario 2. Die Anzahl der Solarkreispumpen entspricht, wie in Szenario 1, der Anzahl der installierten Solaranlagen. Trotz des starken Anstiegs der Anzahl der Solarthermieanlagen hält sich die Energieverbrauchszunahme der Umwälzpumpen aufgrund ihres niedrigen Eigenbedarfs (lediglich 0,07 PJ im Jahr 2003) in Grenzen und wird sich bis 2050 auf knapp 1,6 PJ erhöhen.

Haushaltsgeräte
Die Technikstruktur entspricht, mit Ausnahme der besseren Effizienz, jener von Szenario 1. Die betrachteten Geräte bleiben gleich (vgl. Tabelle 2-8). Es wird angenommen, dass bereits die Marktsättigung erreicht ist, und deshalb werden die Ausstattungsgrade bis 2050 nicht mehr erhöht. Die Anzahl der Gefriergeräte und Kühlschränke ändert sich somit nur aufgrund der steigenden Anzahl an Haushalten insgesamt.

3.1.2.6 Information und Kommunikation

Die Technikstruktur ist die gleiche wie in Szenario 1 mit dem Unterschied, dass bei Gerätegruppen, bei denen sich schon heute ein Technologiesprung abzeichnet, eine Effizienzsteigerung angenommen wird, die die allgemein angenommenen 45 % übersteigt. Im Folgenden werden diese Geräte kurz beschrieben.

Player
Die dem Szenario 2 unterstellten DVD-Player werden zukünftig einen Festspeicher haben, der den Energieverbrauch der Player in Szenario 2 auf 10 % sinken lässt.

EDV inklusive Internetanschlüssen
In Szenario 2 wird angenommen, dass durch die technologische Entwicklung die Leistungsaufnahme der Internet-Connection-Box von 12 W auf 1 W sinkt. Diese Geräte sind, wie in Szenario 1, während des ganzen Tages in Betrieb.

3.1.3 Endenergieverbrauch

3.1.3.1 Raumwärme

In der **Abbildung 3-3** ist die Prognose des Endenergieverbrauchs im Bereich der Raumwärme dargestellt.

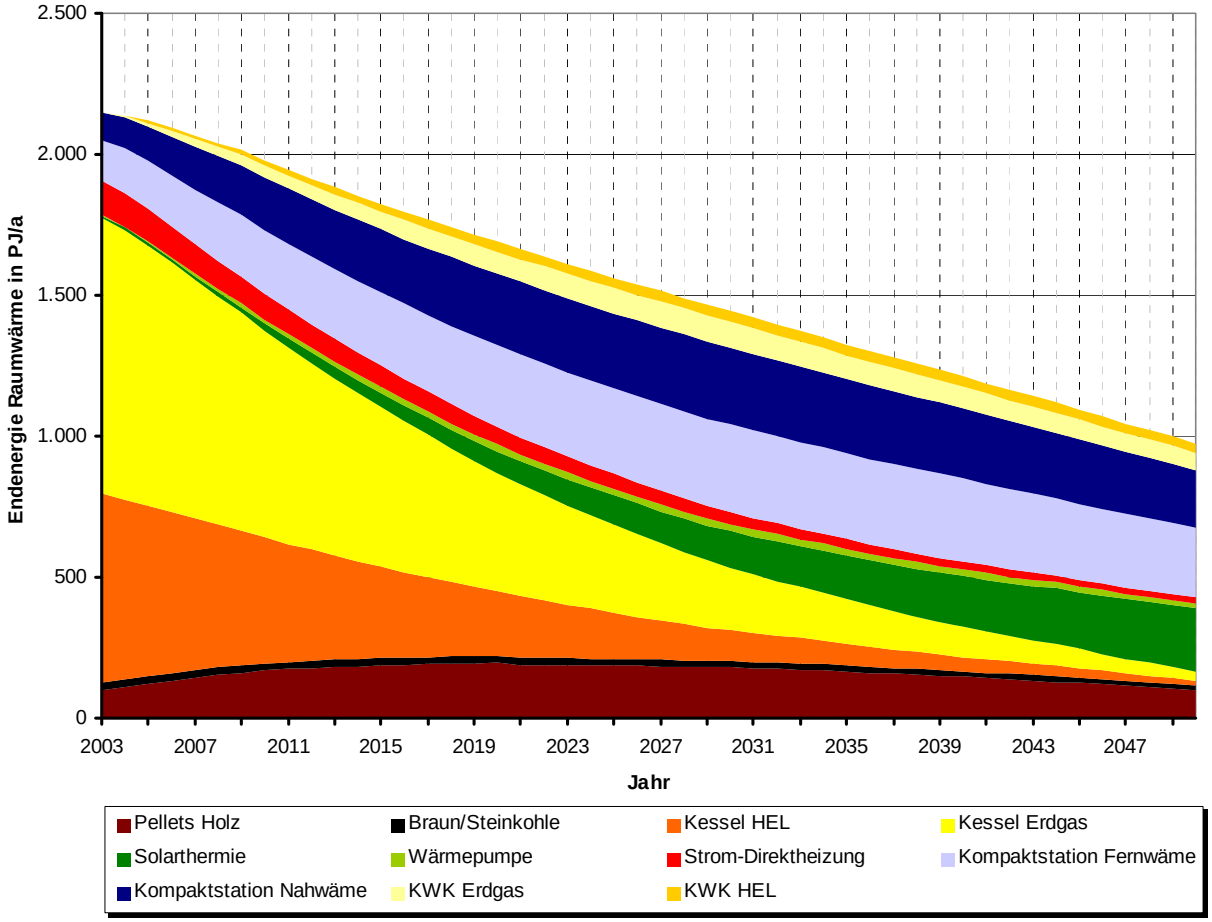

Abbildung 3-3: *Endenergiebedarf im Bereich der Raumwärme*

Der Endenergieverbrauch an Raumwärme nimmt nach dieser Prognose von 2.148 PJ im Jahr 2003 auf etwa 973 PJ im Jahr 2050 ab. Es ergibt sich ein deutlicher Unterschied zu Szenario 1 (1.474 PJ). Zurückzuführen ist dies nicht nur auf die verbesserte Gebäudequalität, sondern auch auf die besseren Nutzungsgrade der Heizsysteme und den Trend hin zu effizienteren Systemen wie Nah- und Fernwärme sowie zu Systemen, die ihre Energie aus der Umwelt beziehen (Solarthermie und Wärmepumpe).

3.1.3.2 Warmwasser

In der **Abbildung 3-4** ist die Prognose des Endenergieverbrauchs im Bereich Warmwasser (Brauchwasser) dargestellt.

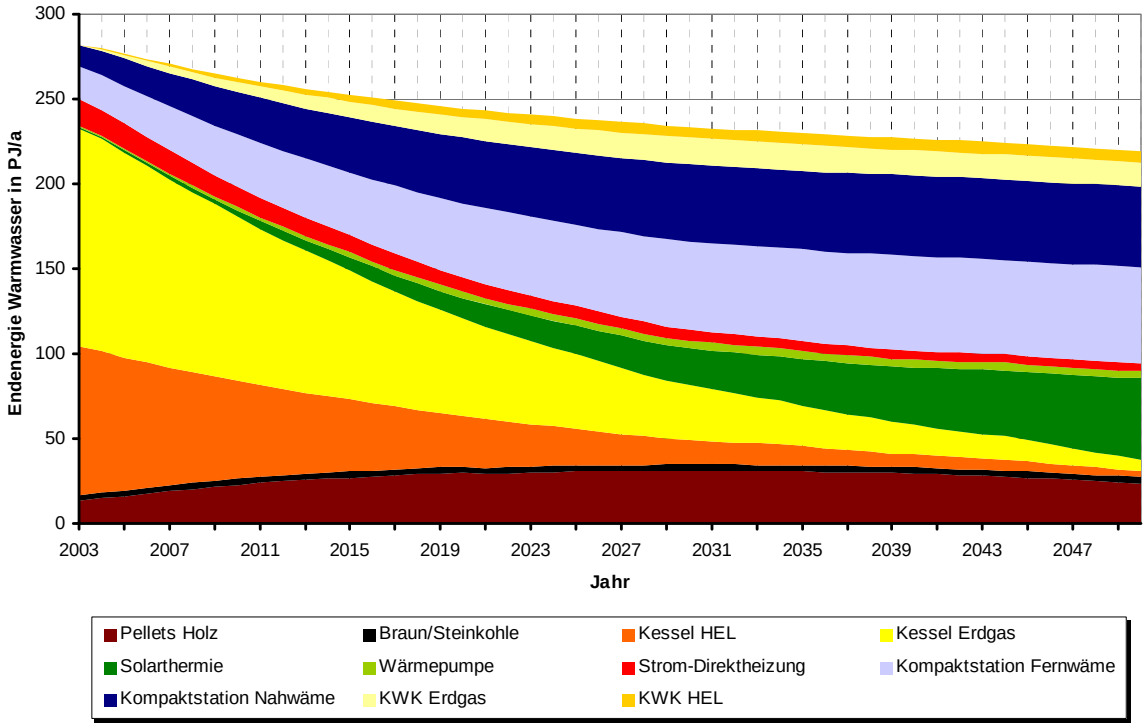

Abbildung 3-4: *Endenergiebedarf für Warmwasser (Brauchwasser)*

Der Endenergieverbrauch für die Warmwasserbereitung nimmt von etwa 283 PJ auf ca. 219 PJ im Jahr 2050 ab. Er unterscheidet sich damit kaum vom Endenergiebedarf von 220 PJ in Szenario 1. Dies liegt einerseits daran, dass der Pro-Kopf-Warmwasserbedarf in beiden Szenarien gleich ist (Anstieg um 15 % bis zum Jahr 2050). Andererseits zeigt die Erhöhung der Nutzungsgrade auf bis zu 105 % in diesem Szenario auf den Energiebedarf für Warmwasser nur geringe Auswirkungen gegenüber Szenario 1, da über die Jahre ein stark zunehmender Anteil von Nahwärme, Fernwärme sowie Solarthermie bereitgestellt wird.

Der Endenergieverbrauch für Warmwasser bei Waschmaschinen und Geschirrspülern ist in der **Abbildung 3-5** dargestellt. Der Bedarf nimmt im Szenario 2 von 33,4 PJ im Jahr 2003, aufgrund der steigenden Anzahl an Haushalten, noch bis zum Jahr 2008 auf etwa 33,5 PJ zu.

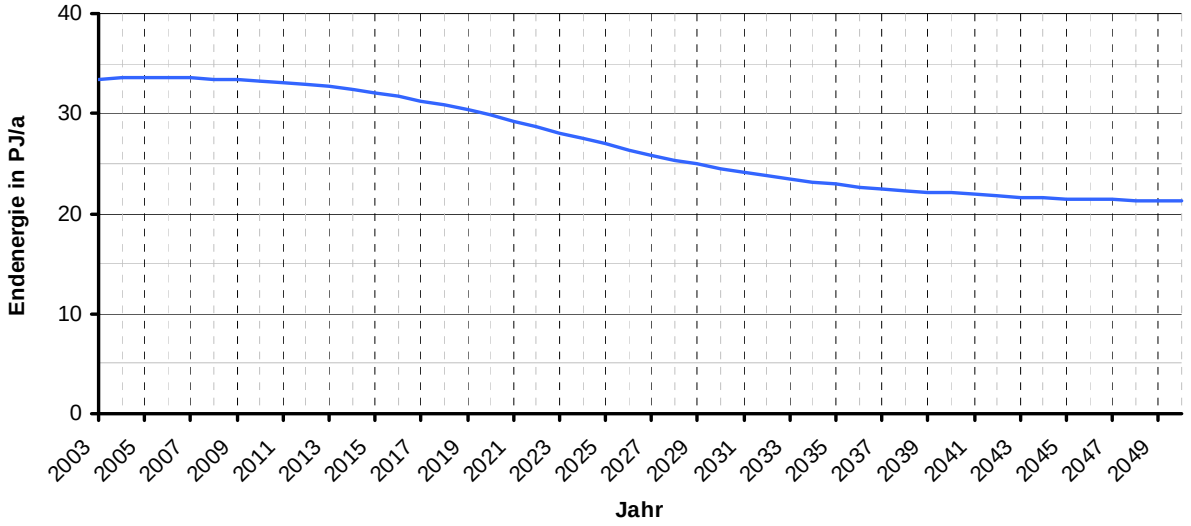

Abbildung 3-5: *Endenergiebedarf für Warmwasser für Waschmaschinen und Geschirrspüler*

Bis 2050 nimmt die Endenergie aufgrund der steigenden Geräteeffizienz auf etwa 21 PJ im Jahr 2050 ab.

3.1.3.3 Prozesswärme

In der folgenden **Abbildung 3-6** ist der Endenergieverbrauch von Strom, Biomasse und Gas dargestellt

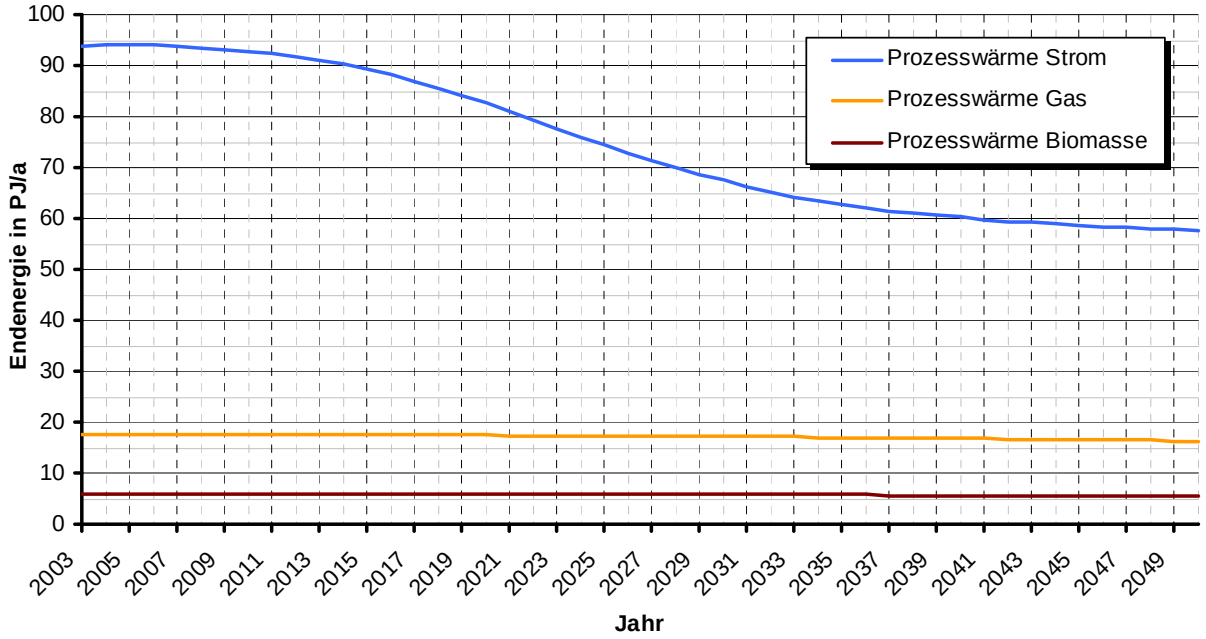

Abbildung 3-6: *Fortschreibung des Endenergieverbrauchs bei der Prozesswärme*

Bei der Prozesswärme Strom nimmt der Energieverbrauch im Szenario 2 von knapp 93,8 PJ im Jahr 2003, aufgrund der höheren Geräteeffizienz und der Bevölkerungsabnahme, bis 2050 stetig auf ca. 57,6 PJ ab. Bei Gas ergibt sich ein Rückgang von 17,6 PJ auf 16,3 PJ. Bei Biomasse geht die Endenergie von ca. 5,9 PJ im Jahr 2003 auf

5,5 PJ in 2050 zurück. Bei Gas und Biomasse ergibt sich kein Unterschied zu Szenario 2.

3.1.3.4 Beleuchtung

In der **Abbildung 3-7** ist das Ergebnis der Berechnung dargestellt.

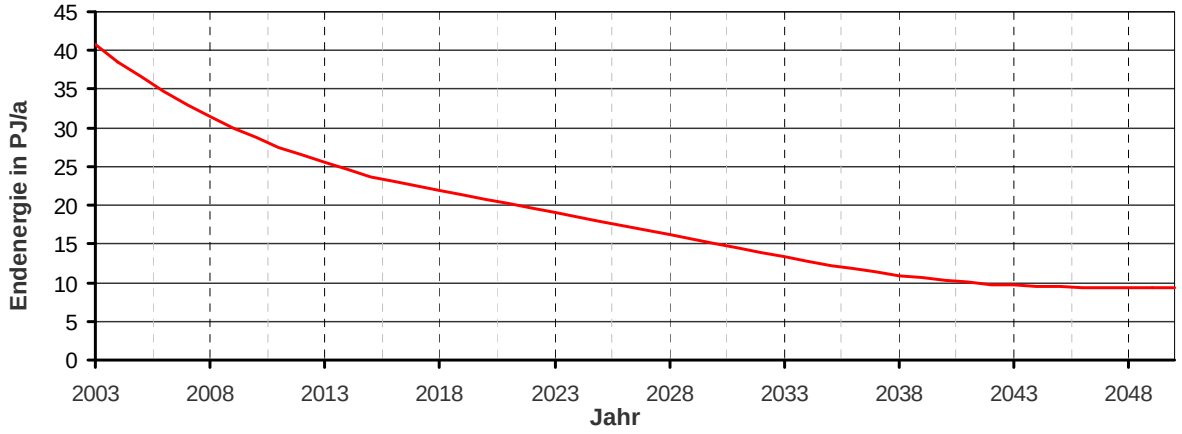

Abbildung 3-7: *Prognostizierte Entwicklung des Endenergieverbrauches 2003 für Beleuchtung bis 2050*

In diesem Szenario geht der Endenergiebedarf von 40,8 PJ auf knapp 9,3 PJ zurück. Wenn LED Leuchtmittel in Zukunft die angenommene Effizienz von 150 Lumen pro Watt erreichen, in den unterschiedlichsten Lampenformen angeboten werden und daneben noch preisgünstig sind, erscheint dieses Szenario durchaus möglich.

3.1.3.5 Mechanische Energie

Pumpen

Im Szenario 2 reduziert sich der Endenergieverbrauch von 53,6 PJ auf 12,4 PJ. Die Prognose des Endenergieverbrauchs ist in **Abbildung 3-8** dargestellt.

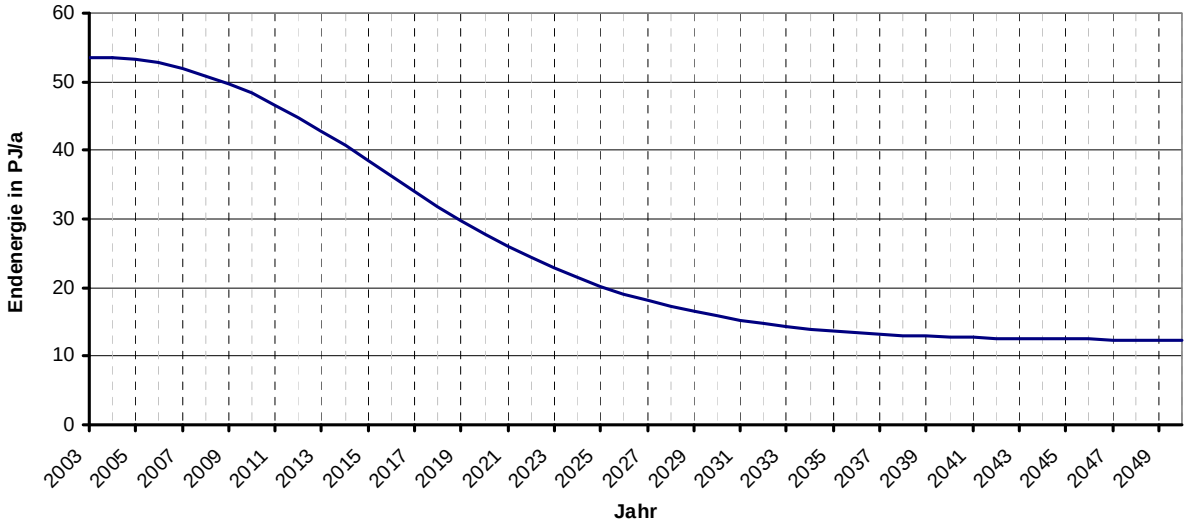

Abbildung 3-8: *Endenergieverbrauch der Heizkreis- und Zirkulationspumpen*

Aufzüge

Die Fortschreibung des Energieverbrauchs im Bereich der mechanischen Energie bei den Aufzügen ist in **Abbildung 3-9** dargestellt.

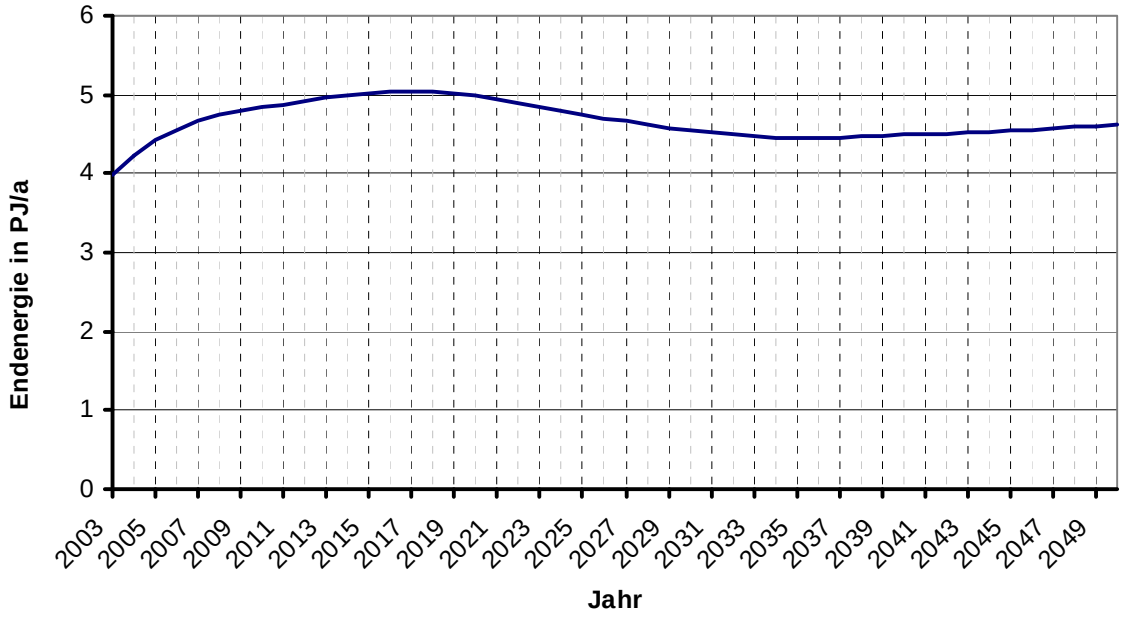

Abbildung 3-9: *Fortschreibung des Energieverbrauchs an mechanischer Energie der Aufzüge*

Der Energieverbrauch steigt durch die mit dem Gebäudeneubau stetig wachsende Anzahl an Fahrstühlen zunächst an. Durch die sich nach und nach verbessernde Effizienz sinkt der Energieverbrauch ab. Gegen Ende des Betrachtungszeitraums steigt der Bedarf, bedingt durch die weiterhin zunehmende Anzahl an Aufzügen und die dann nur noch relativ kleinen Effizienzsteigerungen, wieder leicht an.

Im Jahr 2050 beträgt der Endenergiebedarf ca. 4,6 PJ, was eine Steigerung von 15 % bedeutet. Im Vergleich zum Szenario 1, das eine Steigerung von etwa 47 % aufwies, fällt der Anstieg des Verbrauchs in diesem Szenario deutlich geringer aus. Verglichen mit dem gesamten Endenergieverbrauch im Sektor Haushalte bleibt der Bereich der mechanischen Energie für Aufzüge eine vernachlässigbare Größe.

Hilfsenergie der Heizkessel und Solarthermieanlagen

In der **Abbildung 3-10** ist die Prognose des Hilfsenergieverbrauchs für die Heizkessel (Brenner) und die Solarthermieanlagen dargestellt.

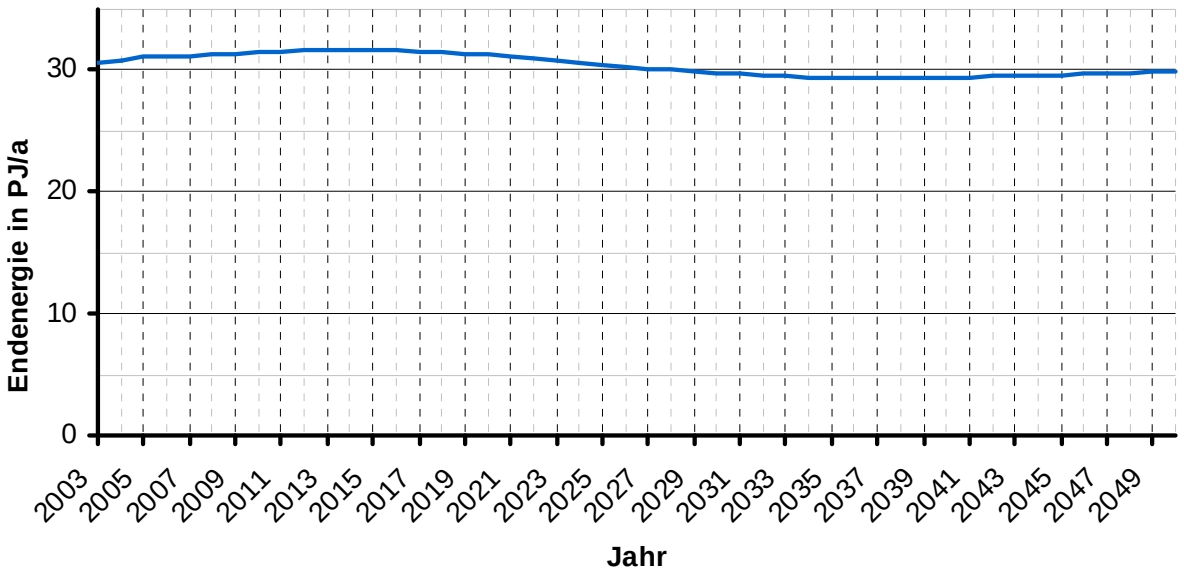

Abbildung 3-10: *Endenergieverbrauch bei der Hilfsenergie*

Ausgehend von 30,6 PJ im Jahr 2003 erhöht sich der Energieverbrauch noch bis etwa 2015 auf 31,6 PJ und nimmt danach aufgrund der höheren Geräteeffizienz leicht ab. Am Ende des Betrachtungszeitraums steigt der Energiebedarf aufgrund der immer noch steigenden Anzahl an Heizsystemen und Solaranlagen leicht an. Er liegt somit im Jahr 2050 bei 29,9 PJ, welcher sich im Bereich des Wertes von 2003 befindet.

Haushaltsgeräte

Mit den zuvor beschriebenen Bedarfsdeterminanten lässt sich der Gesamtenergieverbrauch fortschreiben. Das Ergebnis der Berechnung ist in **Abbildung 3-11** dargestellt.

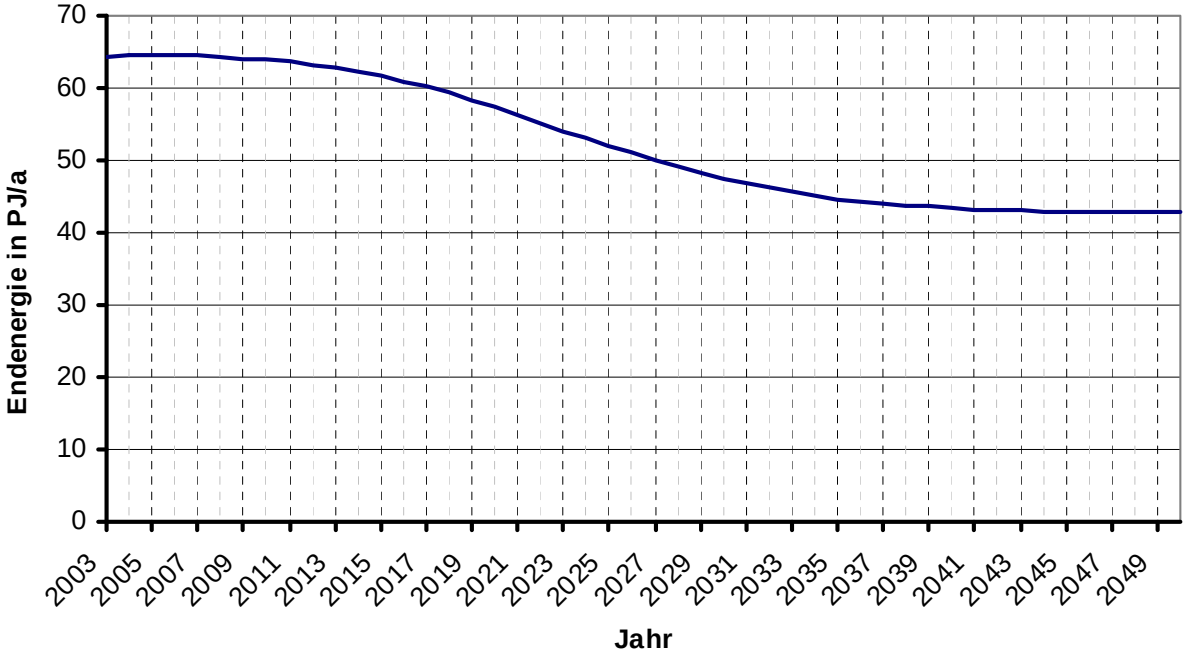

Abbildung 3-11: *Fortschreibung des Endenergieverbrauchs an mechanischer Energie der Haushalts- und Kleingeräte*

Der Endenergieverbrauch in diesem Szenario steigt von ca. 64,2 PJ bis etwa zum Jahr 2006 leicht an und nimmt danach, bedingt durch die höhere Geräteeffizienz und die Abnahme der Bevölkerung, bis zum Jahr 2050 auf etwa 42,8 PJ ab.

3.1.3.6 Information und Kommunikation

In der **Abbildung 3-12** ist der prognostizierte Endenergiebedarf für den Bereich IuK dargestellt.

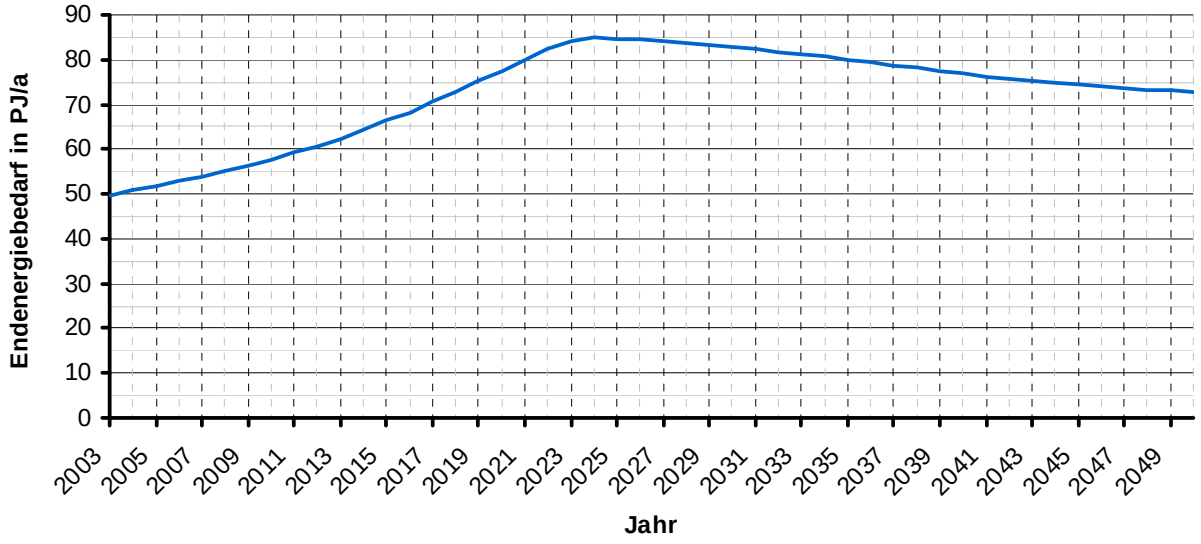

Abbildung 3-12: *Entwicklung des Energiebedarfs im Bereich IuK*

Der Endenergiebedarf steigt im Szenario 2, ausgehend von 49,8 PJ im Jahr 2003, bis etwa zum Jahr 2025 auf 84,8 PJ an. Dies ist durch die steigenden Gerätezahlen bedingt. Auf der anderen Seite wird unterstellt, dass sich die Effizienz anfangs, zufolge des s-förmigen Übergangs zu neuen Technologien (vgl. Abbildung 2-1), nur moderat verbessert und später, etwa ab 2030, dem Energiebedarfsanstieg wirksam entgegenwirkt. Der Endenergiebedarf wird im Szenario 2 bis auf ca. 72,9 PJ im Jahr 2050 ansteigen.

3.2 Entwicklung im Sektor GHD

3.2.1 Maßgebliche Bedarfsdeterminanten

Das Szenario 2 beschäftigt sich mit dem Einfluss der Technik auf die Entwicklung des Energieverbrauchs. Änderungen in der Technikstruktur wirken ausschließlich auf die Effizienz und die Zusammensetzung des Energieträgereinsatzes. Um eine Aussage hinsichtlich der energetischen Auswirkungen treffen zu können, ist es daher notwendig, den zugrunde liegenden Bedarf nicht zu verändern. Lediglich an den Stellen, an denen sich die eingesetzte Technik bedarfsbestimmend auswirkt, sind implizite Veränderungen zulässig. Ein Beispiel hierfür ist die energetische Optimierung des Gebäudebestandes. Hieraus resultiert einerseits ein verminderter Raumwärmebedarf, andererseits führt der vermehrte Einsatz von Geräten zur kontrollierten Raumlüftung zu einer vermehrten Nachfrage nach mechanischer Energie bei raumlufttechnischen Anlagen. Die grundlegenden Bedarfsdeterminanten der Modelle bleiben hiervon jedoch unberührt, da die Änderungen implizite Folgen der Technikstruktur sind und ursächlich nicht aus einem veränderten Nutzerverhalten resultieren.

3.2.2 Technikstruktur

3.2.2.0 Fortschreibung des sektoralen Modellgebäudebestandes bis 2050

Die Entwicklung des Gebäudebestandes erfolgt analog zu Szenario 1, jedoch wird bei der Gebäudesanierung stets auf die Luftdichtheit der Gebäudehüllen geachtet und zur bedarfsgerechten und kontrollierten Lüftung der Gebäude auf Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung zurückgegriffen. So können die Luftqualität gesichert bzw. verbessert und der Lüftungswärmeverlust verringert werden. Zusätzlich wird die Qualität der Dämmung gegenüber Szenario 1, falls erforderlich, weiter verbessert, so dass der Heizwärmebedarf eines sanierten Gebäudes 30 kWh/m²a nicht überschreitet.

3.2.2.1 Entwicklung der Beheizungsstruktur

Die Fortschreibung der sektoralen Beheizungsstruktur erfolgt analog zu Szenario 1 auf Basis des Gebäudemodells. Aufgrund des veränderten Wärmeschutzes ergeben sich Veränderungen hinsichtlich der zu deckenden Heizlasten. Die veränderte Entwicklung der Heizlasten im Gebäudebestand ist in **Abbildung 3-13** graphisch dargestellt.

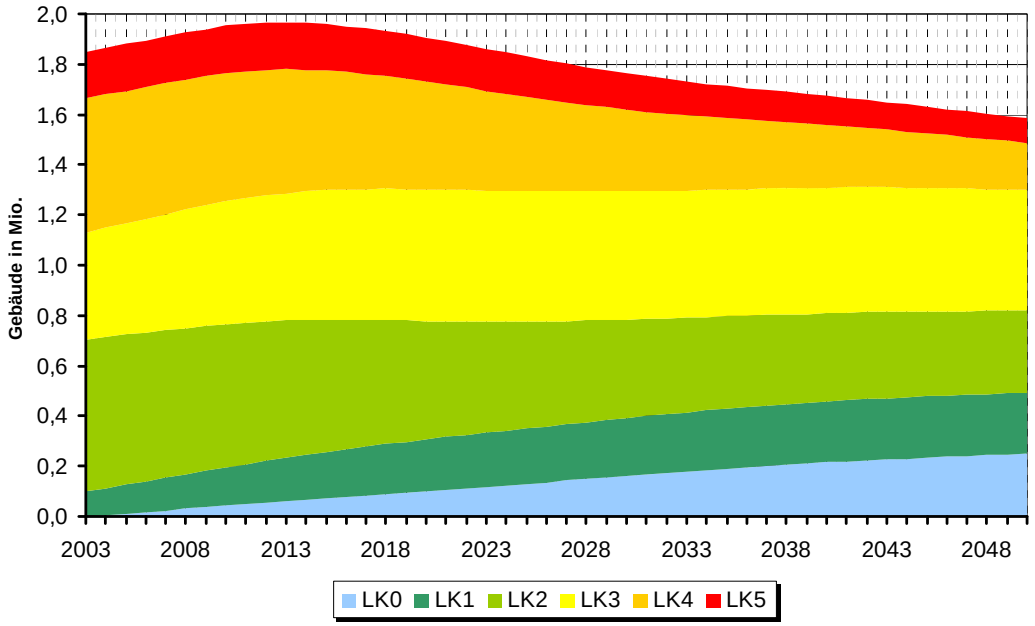

Abbildung 3-13: *Zeitliche Entwicklung der Heizlasten im Gebäudebestand*

Der technische Ausfall der Heizsysteme, der Kesseltausch im Rahmen energetischer Gebäudesanierungen sowie die technologische Weiterentwicklung der Heizsystemtechnik erfolgen analog zu Szenario 1.

Hinsichtlich der Marktanteile im Bereich der Heizsystemtechnik wirkt sich die verstärkte Nutzung des vorhandenen Biomassepotenzials reduzierend auf den Zubau der übrigen Heizsysteme aus. In Kombination mit der rückläufigen Entwicklung des Raumwärmebedarfs nimmt der Anteil der Biomassekessel an den Systeminstallationen somit bis 2050 auf über 50 % zu. Da Biomasse vorrangig eingesetzt wird, beziehen sich die weiteren Angaben – analog zu Szenario 1 – jeweils auf den verbleibenden, um den Anteil der Biomasse reduzierten Markt.

Für Fernwärme wird angenommen, dass sich der Anteil der Systeminstallationen gegenüber Szenario 1 auch nach 2020 weiter leicht erhöht und ab 2025 einen Marktanteil von 35 % erreicht.

Der Anteil der elektrisch betriebenen Heizsysteme verhält sich analog zu Szenario 1. Da jedoch durch energetische Optimierung vermehrt Gebäude in der Leistungsklasse LK 0 vorliegen, in der aus ökonomischen Gründen in etwa der Hälfte der Fälle ein elektrisches Heizregister zur Deckung des verbliebenen Raumwärmebedarfs eingesetzt wird, kommt es in diesem Bereich zwar zu einem vermehrten Einsatz elektrischer Heizsysteme, die jedoch jeweils nur einen geringen Bedarf zu decken haben.

Bei Öl und (vor allem) Gas ist analog zu Szenario 1 über alle Leistungsklassen hinweg ein Trend zu Brennwertgeräten erkennbar, der jedoch stärker ausgeprägt ist. Bei Gas wird sich die Brennwerttechnik unabhängig von der Leistungsklasse ab 2020 vollständig gegen konventionelle Geräte durchgesetzt haben. Auch bei ölbefeuerten Kesseln ist trotz der wesentlich komplexeren Technik (saures Kondensat, Korrosion etc.) mit einer vollständigen Marktdurchdringung durch Brennwertgeräte bis 2040 zu rechnen. Das Verhältnis von öl- zu gasbefeuerten Systemen variiert dabei je nach Leistungs-

klasse zwischen 1:4 und 1:1, wobei sich der Anteil der ölbefeuerten Kessel in allen Leistungsklassen gegenüber Szenario 1 bis 2040 jeweils halbiert.

Unter Berücksichtigung der Installationszahlen und der Heizlastentwicklung im Bestand ergibt sich die in **Abbildung 3-14** dargestellte Entwicklung der Deckungsbeiträge der Energieträger am sektoralen Bedarf.

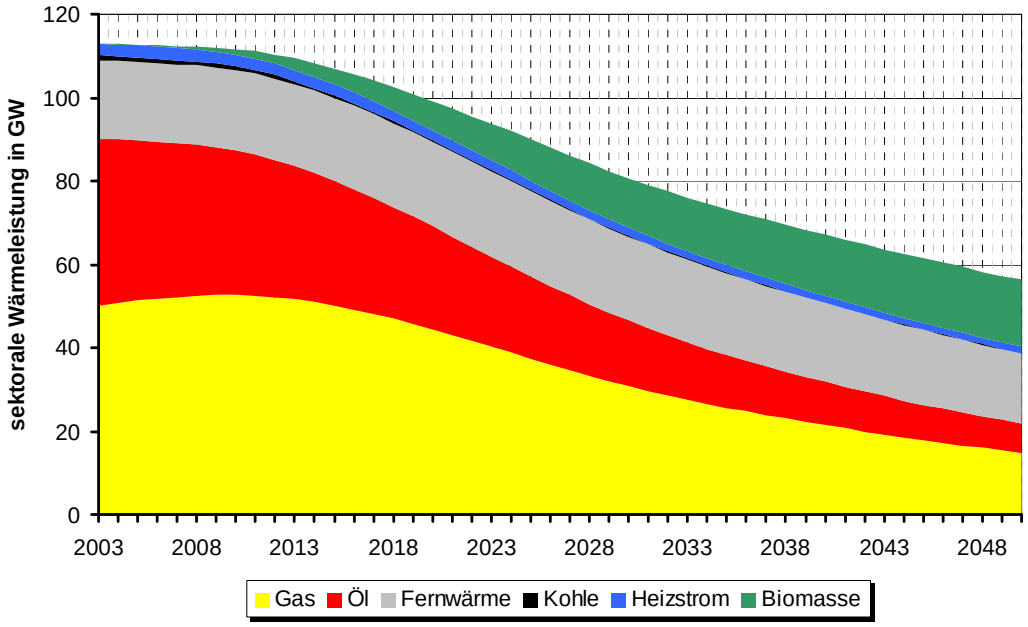

Abbildung 3-14: *Beiträge der Energieträger an der Deckung der sektoralen Heizlast*

Bis 2050 erhöht sich der Gesamtnutzungsgrad im Bestand auf durchschnittlich 95,1 % und erreicht damit in etwa den gleichen Wert wie in Szenario 1. Jedoch wird dieser durch die forcierten Effizienzbestrebungen früher erreicht und fällt gegen Ende des Betrachtungszeitraumes sogar leicht ab (vgl. **Abbildung 3-15**). Obwohl bei Gas und insbesondere bei Öl gestiegene mittlere Energieträgernutzungsgrade gegenüber Szenario 1 vorliegen und auch deren zeitliche Entwicklung eine stetige Zunahme aufweist, kommt es insgesamt zu einem Rückgang um 0,1 % in den letzten Jahren der Betrachtung. Dieser resultiert aus der verstärkten Nutzung der Biomasse, die die Effizienzgewinne der einzelnen Technologien gegenüber Szenario 1 im Bestandsmittel in etwa kompensiert.

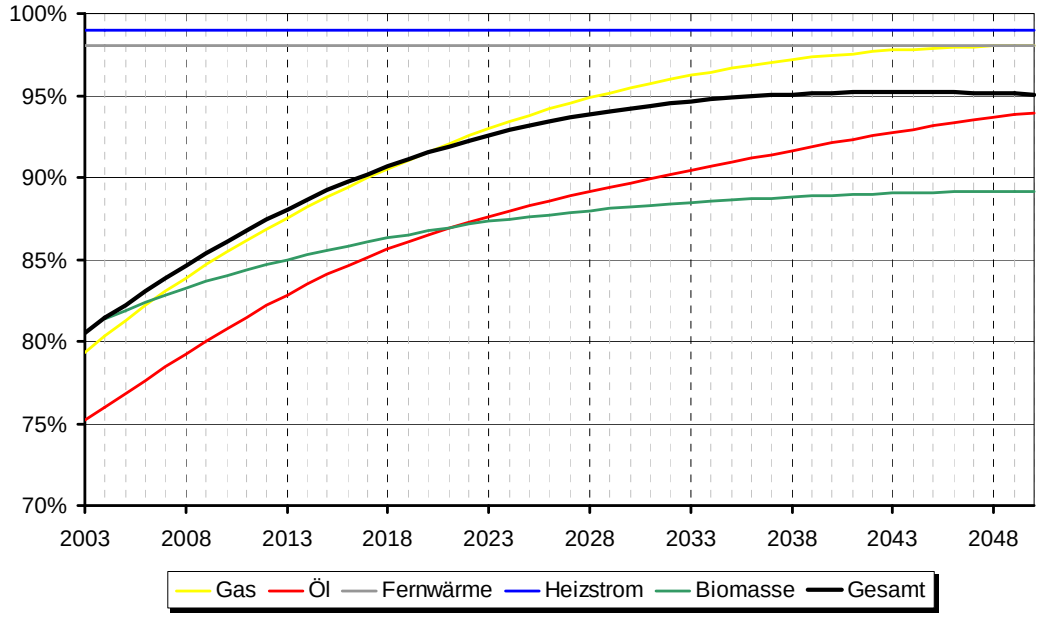

Abbildung 3-15: *Entwicklung der mittleren Energieträgernutzungsgrade im Bestand über den Betrachtungszeitraum*

3.2.2.2 Entwicklung der Beleuchtungstechnik und ihrer strukturellen Anteile

Die eingesetzte Beleuchtungstechnik in Szenario 2 unterscheidet sich von jener aus Szenario 1 grundlegend durch LED-Systeme in der Grund- oder Flächenbeleuchtung, der Anwendung, die bisher den leuchtstofflampenbasierten Systemen vorbehalten war. In 2050 wird 1/3 der Grundbeleuchtung bereits durch diese geleistet (vgl. **Abbildung 3-16**). Die LED-Systeme zur Spotbeleuchtung erlangen früher Marktreife und setzen sich rascher gegen die etablierten und energieintensiven Halogensysteme durch. Ab 2030 befinden sich praktisch keine Halogensysteme mehr im Einsatz.

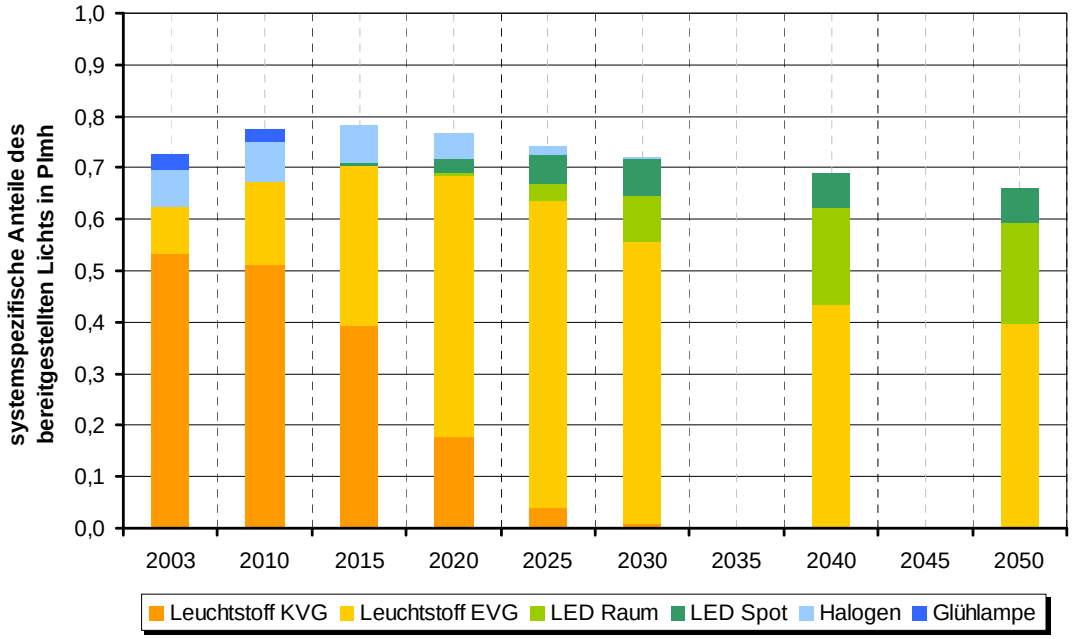

Abbildung 3-16: *Entwicklung der systemspezifischen Anteile des bereitgestellten Lichts*

Der Bestandsrückgang bei den KVG-betriebenen Leuchtstofflampen bleibt unverändert, da der technische Ausfall der Systeme durch etwaige Effizienzsteigerungen der anderen Systeme unberührt bleibt. Auch liegt bereits eine maximale Substitution vor, da KVG nicht mehr vertrieben werden dürfen und im Rahmen einer Ersatzinstallation somit nicht zur Verfügung stehen.

Des Weiteren weisen in Szenario 2 sowohl Lampen als auch Leuchten – im Rahmen ihrer technologischen Potenziale – stärkere Effizienzsteigerungen auf als in Szenario 1.

3.2.2.3 Entwicklung von Informations- und Kommunikationstechnologien (IuK)

Durch eine Erhöhung der Effizienz wird für gewöhnlich die Gerätezahl des Gesamtbestandes nicht tangiert. Lediglich Verschiebungen zwischen den Gerätegruppen – zu effizienteren Geräten hin – sind zu erwarten, sofern eine Wahlmöglichkeit gegeben ist, wie z. B. bei den Arbeitsplatzrechnern. Hier findet im Rahmen der forcierten Effizienzbestrebungen eine vollständige Substitution der PCs bis zum Ende des Betrachtungszeitraumes statt (vgl. **Abbildung 3-17**). Im stationären Einsatz werden diese durch Thin Clients (TC) ersetzt. Hinzu kommt ein verstärkter Trend zu Notebooks, die prinzipbedingt auch über eine möglichst hohe Effizienz verfügen müssen und zudem auch noch den Vorteil der mobilen Nutzbarkeit mit sich bringen.

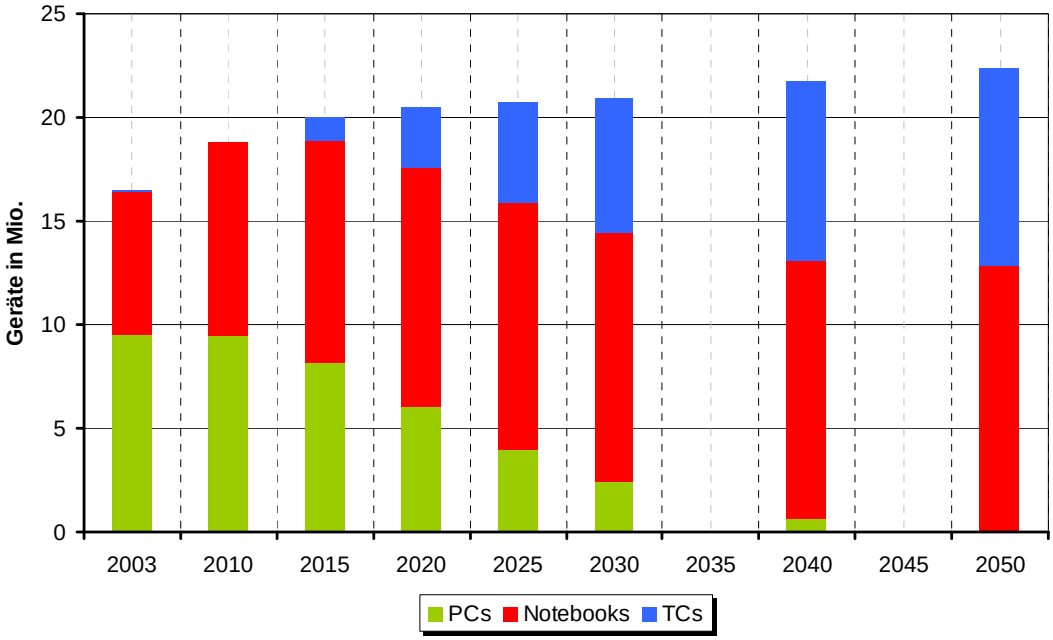

Abbildung 3-17: *Bestandsentwicklung von Individualrechnern*

Bei Servern hingegen wirken sich die Effizienzbemühungen auch direkt auf den Bestand aus, da hier durch verstärkte Konsolidierung die Anzahl der Systeme gegenüber Szenario 1 (8 Mio. Server in 2050) deutlich reduziert wird (vgl. **Abbildung 3-18**).

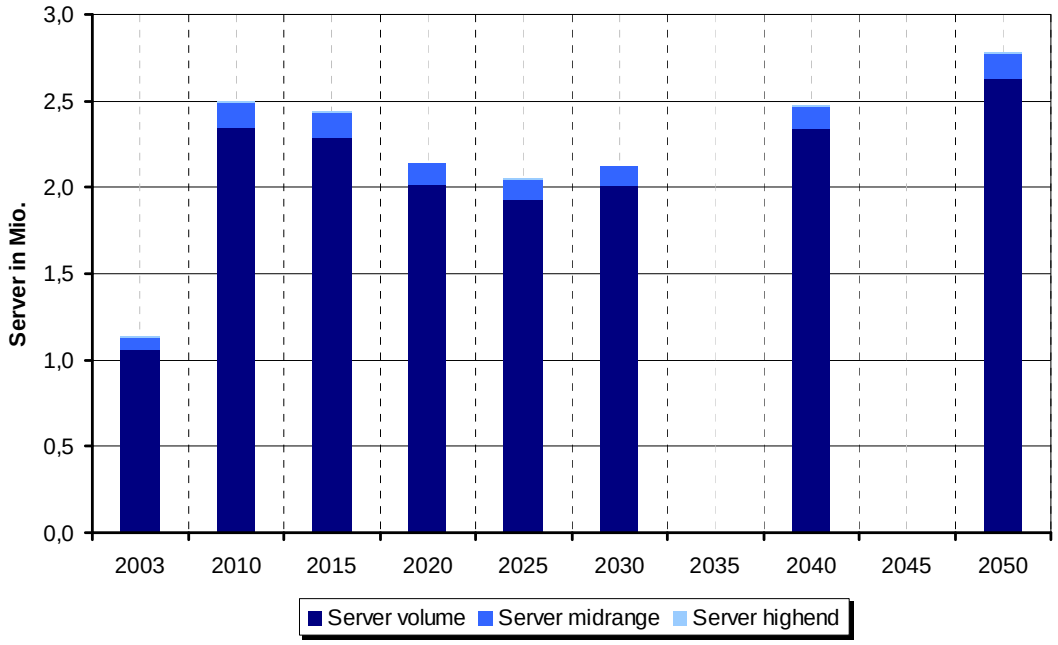

Abbildung 3-18: *Bestandsentwicklung der Serversysteme*

Hinzu kommt bei Servern und Arbeitsplatzrechnern auch noch eine gerätespezifische Effizienzsteigerung entsprechend der Entwicklungen der einzelnen Bauteile. Dazu zählen neben der Optimierung von Lüftern und Kühlkonzepten im Serverbereich auch Weiterentwicklungen bei den Netzteilen bzw. die flächendeckende Etablierung bester heute verfügbarer Technik, wie der „80plus-Netzteile“, die ab 2020 als Standard im Modell hinterlegt sind. Hier wird von einer raschen Weiterentwicklung zu „90plus-Netzteilen“ bis 2025 ausgegangen. Bei den Laufwerken ist schon heute ein Trend von 3,5“ zu 2,5“ Festplatten bei Servern zu verzeichnen. Im Rahmen einer weiteren Effizienzsteigerung ist im Modell für dieses Szenario die sukzessive Substitution von 2,5“ Festplatten durch Flashspeicher in allen Bereichen abgebildet.

Nicht nur bei den Rechnern kommt es zu signifikanten Effizienzsteigerungen. Auch bei Bildschirmen ist durch verbesserte Beleuchtungs- und Displaytechnik mit einem Rückgang des spezifischen Betriebsverbrauchs auf die Hälfte bis zum Ende der Betrachtungen zu rechnen. Bei Druckern und Kopierern ist ein grundlegender Technologiewechsel (thermische Fixierung des Toners) nicht abzusehen, weshalb die Verbrauchsminderung im Betrieb für diesen Bereich auf maximal 30 % abgeschätzt wird.

Im Gegensatz zu den unterschiedlichen gerätespezifischen Betriebsverbräuchen unterliegen die Verbräuche für Standby und Schein-Aus von elektrischen Geräten nahezu denselben technischen Voraussetzungen. Durch Verwendung hocheffizienter elektronischer Baugruppen können diese Verbräuche leicht minimiert oder vermieden werden. Daher kann angenommen werden, dass ab 2025 kein Schein-Aus-Betrieb mehr existiert und die Standby-Verluste aller Endgeräte bis auf 1 W reduziert werden.

3.2.2.4 Entwicklung der Technik im Bereich der mechanischen Energie

Bei der Kühlung von Nahrung wird von einer Verdoppelung der jährlichen Effizienzsteigerung (auf 1,0 %/a) gegenüber Szenario 1 ausgegangen. Da in diesem Bereich der ständig wiederkehrende Zugriff während der Geschäftszeiten nach wie vor den Erfolg

von Effizienzsteigerungen (etwa durch besseren Kälteschutz der Geräte) relativiert, kann eine weitergehende Ausschöpfung des Potenzials der Berechnung nicht zugrunde gelegt werden.

In Rechenzentren können die vorhandenen Potenziale hingegen leichter erschlossen werden, da die Räume für gewöhnlich geschlossen gehalten werden und äußere Störeinflüsse daher eher selten auftreten. Das vorhandene Optimierungspotenzial ist relativ groß und kann gut umgesetzt werden. Die deshalb in Szenario 1 bereits mit 1,0 % – im Vergleich zu anderen mechanischen Anwendungen – schon recht hoch angesetzte jährliche Effizienzsteigerung kann, trotz konservativer Betrachtung, dennoch um die Hälfte erhöht werden. Für den Bereich der Serverkühlung in Szenario 2 wird deshalb eine Steigerungsrate von 1,5 % zugrunde gelegt.

Auch für die Berechnungen zur sonstigen Kälteerzeugung (z. B. Eisbahnen, Labore etc.) wird wegen der gesteigerten Effizienzbemühungen die 1,5fache Steigerungsrate des Referenzszenarios angenommen. Dies geschieht jedoch nur auf der Hälfe des Niveaus der Serverkühlung, woraus sich eine jährliche Effizienzsteigerung von 0,75 % ergibt.

Ein großes Potenzial kann auch in den Heizkreisen der Gebäude erschlossen werden. Im Rahmen dieses Szenarios wird von einem verstärkten Einsatz gleitdruckgeregelter Pumpen und der konsequenten Durchführung hydraulischer Abgleiche der Heizkreise bei Neubau und Sanierung ausgegangen. Der Modellberechnung liegt für die Effizienz im Bestand daher eine jährliche Erhöhung um 1,5 % zugrunde.

Beim Warmwasser wird ein paralleler Ansatz auf Basis effizienterer Pumpen und geeigneter Regelungen und Steuerungen für Zirkulationsleitungen gewählt. Auch hier werden der Berechnung des Szenarios 2 jährliche Effizienzsteigerungsraten im Bestand von 1,5 % zugrunde gelegt.

Bei großen Pumpen, wie sie beispielsweise in Schwimmbädern und im Rahmen der Ver- und Entsorgung eingesetzt werden, liegt ein wesentlich geringeres Optimierungspotenzial vor, da diese heute schon relativ effizient sind. Daher wird unter Berücksichtigung der Effizienzentwicklung aus Szenario 1 der Berechnung zugrunde gelegt, dass große Pumpensysteme im Rahmen einer genaueren Dimensionierung auf die Anforderung sowie durch verbesserte Regelung eine jährliche Effizienzsteigerung von 0,5 % im Bestand erreichen.

Für die raumlufttechnischen Anwendungen und den Hilfsenergiebedarf der Kessel als verbleibende Anwendungen im Gebäudebereich wird, wie auch für die sonstigen mechanischen Anwendungen, im Modell die 1,5fache Effizienzsteigerung des Referenzszenarios angesetzt. Somit ergibt sich für diese Anwendungen eine jährliche Effizienzzunahme von 0,75 %.

3.2.2.5 Entwicklung der Technik zur Prozesswärme-/Warmwasserbereitstellung

Bei der Erzeugung von Warmwasser entwickeln sich die Nutzungsgrade analog zu Szenario 1 implizit aus dem Kesselmodell. Die Ergebnisse des Modells sind in Kapitel 3.2.2.1 näher erläutert. Entsprechend den Ausführungen in Kapitel 2.2.2.5 leisten elektrische Systeme bei der dezentralen Wassererwärmung weiterhin ihren Beitrag.

Der Brennstoffsplitt entwickelt sich analog zu Szenario 1 implizit aus dem Kesselmodell. Hinsichtlich des maximalen solarthermischen Deckungsbeitrages ist einschränkend zu beachten, dass die solarthermische Warmwasserbereitung nur in Bereichen mit kontinuierlichem Warmwasserbedarf ökonomisch sinnvoll betrieben werden kann. Hierfür kommen in GHD primär zunächst nur die Branchen Bäder sowie Beherbergung, Gaststätten, Heime in Frage. Jedoch kann die Solarthermie auch hier nur einen Teil der Wärme bereitstellen. Da auch an anderer Stelle – wenn auch nicht branchentypisch, so doch zumindest im Einzelfall – Solarthermie sinnvoll eingesetzt werden kann, wird von einem gesamtsektoralen Deckungsbeitrag ausgegangen, der 75 % der beiden oben genannten Branchen entspricht. Da diese Bereiche lt. /SLM 04/ etwa 36 % des Warmwasserbedarfs verursachen, ergibt sich folglich ein sektorales Substitutionspotenzial von 27 % des Bedarfs unter den relevanten Systemen, das bis 2050 auch ausgeschöpft wird. Hierzu zählen alle zentralen Systeme mit Ausnahme der Fernwärme. Unter den dezentralen Systemen finden sich auch elektrisch beheizte Geräte, wie Wasch- und Spülmaschinen. Diese sind gerade im Bereich Beherbergung, Gaststätten, Heime oft mit einem Warmwasseranschluss ausgestattet. Im Rahmen der Szenario 2 zugrunde liegenden Effizienzbestrebungen wird davon ausgegangen, dass vermehrt solche Geräte eingesetzt werden, wobei die resultierenden Auswirkungen nur schlecht quantifiziert werden können. Um diesen Trend dennoch zu berücksichtigen, wird bei den elektrischen Systemen bis zum Ende des Betrachtungszeitraumes ein Substitutionsanteil für die solarthermische Deckung von 5 % angesetzt.

Aufgrund der stetigen Verbesserung der Qualität der Speichersysteme und Leitungsnetze im Bestand (durch Sanierung und Neubau), wird für Szenario 2 eine Verbesserung des Speicher- und Verteilnutzungsgrades auf 85 % bis 2050 angenommen. Somit reduzieren sich die Verluste in Speichern und Verteilung über den Betrachtungszeitraum um 40 % anstelle der in Szenario 1 angenommenen 20 %. Dieser Wert scheint durch bedarfsorientierte Regelung (Zirkulation) und konsequente Dämmung der Leitungssysteme und Speicher realistisch erreichbar.

Für die Prozesswärmebereitstellung wird von einer Verdoppelung der pauschalen jährlichen Effizienzsteigerungsrate auf 0,5 % ausgegangen.

3.2.3 Endenergieverbrauch

Der sektorale Endenergieverbrauch in GHD halbiert sich im Betrachtungszeitraum nahezu. Von 1.540 PJ im Jahr 2003 sinkt er bis 2050 auf knapp unter 825 PJ (vgl. **Abbildung 3-19**). Die größten relativen Einsparungen stellen sich auch in Szenario 2 bei der Beleuchtung und der Raumwärmebereitstellung ein. Diese gehen auf gut 21 % bzw. knapp unter 40 % ihres ursprünglichen Wertes zurück.

Der Rückgang des Energieeinsatzes wirkt sich analog zu Szenario 1 am stärksten auf die fossilen Energieträger Öl und Gas aus. Der Energieträgereinsatz beim Öl erreicht nur noch gut 1/5 des Verbrauchs aus 2003. Der Gasverbrauch geht auf etwa 1/3 des Basiswertes zurück. Der Einsatz elektrischer Energie geht sektoral hingegen nur um etwa 36 % auf 311 PJ in 2050 zurück (vgl. **Abbildung 3-20**).

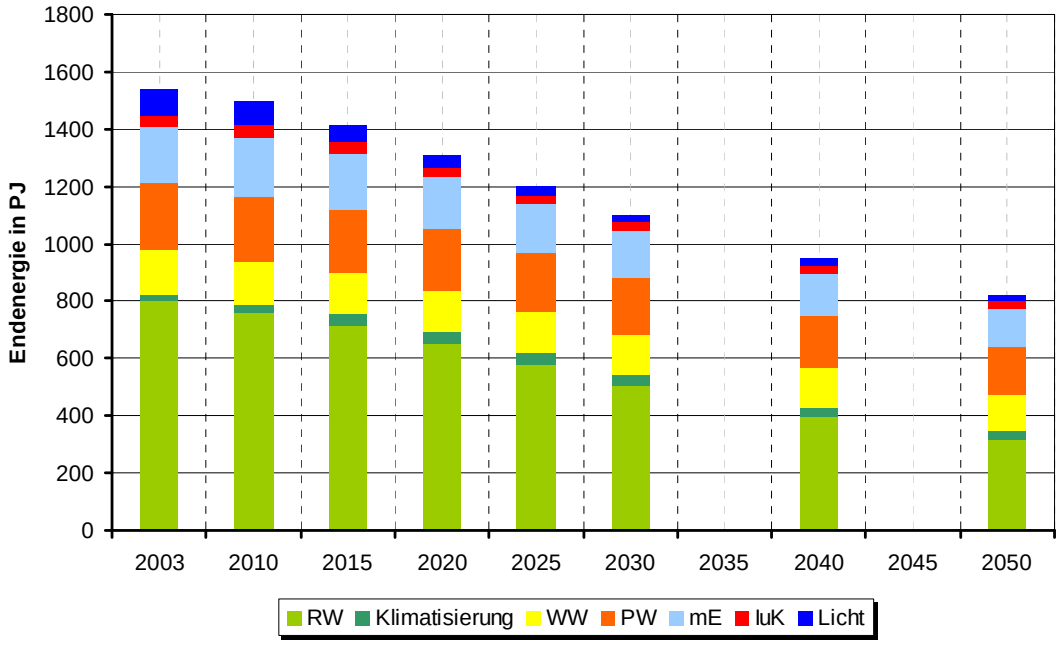

Abbildung 3-19: *Entwicklung des sektoralen Endenergieverbrauchs (nach Anwendungen)*

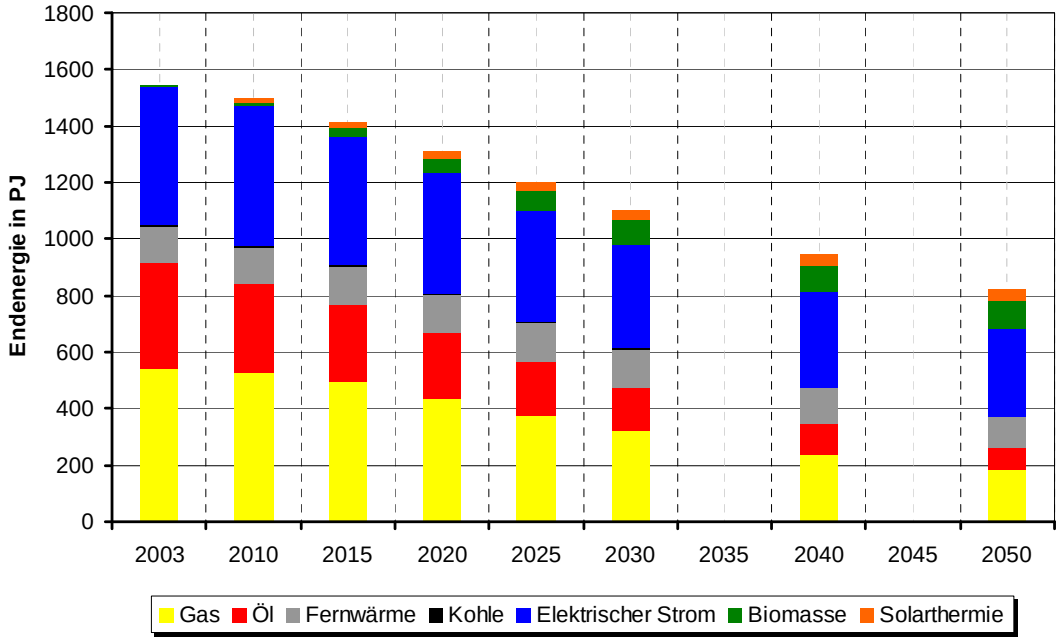

Abbildung 3-20: *Entwicklung des sektoralen Endenergieverbrauchs (nach Energieträgern)*

Ein Vergleich der beiden Szenarien zeigt, dass sich der sektorale Endenergieverbrauch in Szenario 2 um weitere 167 PJ gegenüber Szenario 1 verringert (vgl. **Abbildung 3-21**). Die Differenz ist ausschließlich auf die verstärkten Effizienzbemühungen, die diesem Szenario zugrunde liegen, zurückzuführen. Gegenüber der Entwicklung des Referenzszenarios stellt dies einen weiteren Rückgang um etwa 17 % dar. Hinsichtlich der CO_2-Emissionen resultiert aus den Verschiebungen beim Energieträgereinsatz zu CO_2-armen oder -neutralen Energieträgern ein darüber hinaus

gehender Rückgang. Eine exakte Aussage kann an dieser Stelle jedoch nicht getroffen werden, da die spezifischen Emissionen von elektrischem Strom und Fernwärme erst nach Abschluss der Berechnungen im Umwandlungssektor auf Basis der Ergebnisse dieses Kapitels und weiterer Ergebnisse aus den anderen Sektoren vorliegen.

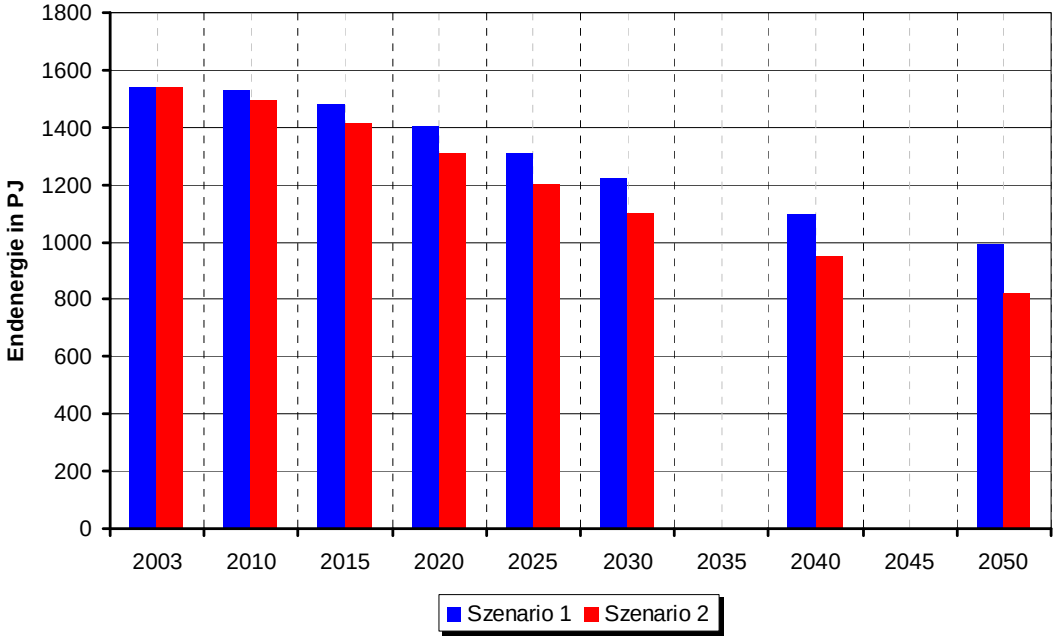

Abbildung 3-21: *Gegenüberstellung der sektoralen Energieverbrauchsentwicklungen der Szenarien 1 und 2*

3.2.3.1 Anwendungsbereich Raumwärme

Der Energieverbrauch für die Raumwärmebereitstellung liegt in 2050 mit nur noch 315 PJ etwa 485 PJ unter dem des Jahres 2003, wie **Abbildung 3-23** zu entnehmen ist. Somit erreicht der Energieverbrauch in 2050 gerade noch 39,4 % des Ausgangswertes aus 2003 und liegt 50 PJ unter dem des Referenzszenarios. Bezogen auf dieses entspricht das einer Reduktion um 13,7 % aufgrund der weitergehenden technischen Verbesserungen.

Den größten Rückgang unter den eingesetzten Energieträgern verzeichnen mit Abstand Öl und Gas auf nur mehr 13 % bzw. 21 % des Ausgangswertes, wohingegen die Biomasse in 2050 mit ca. 83 PJ zur Raumwärmebereitstellung beiträgt (vgl. **Abbildung 3-22**), was einem Anteil von über 26 % entspricht.

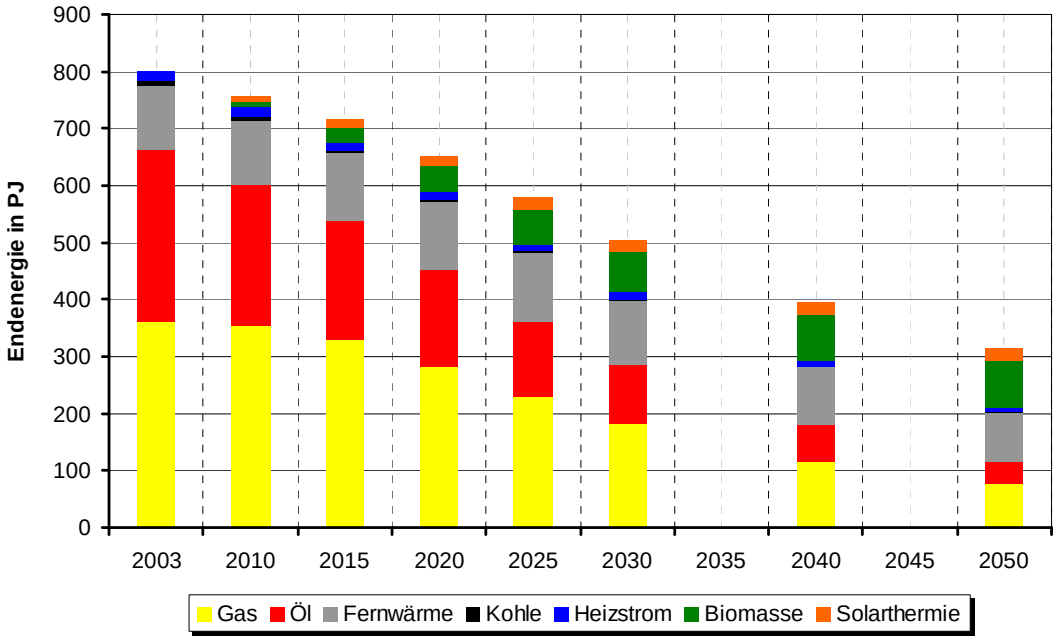

Abbildung 3-22: *Entwicklung des Endenergieverbrauchs für Raumwärme (nach Energieträgern)*

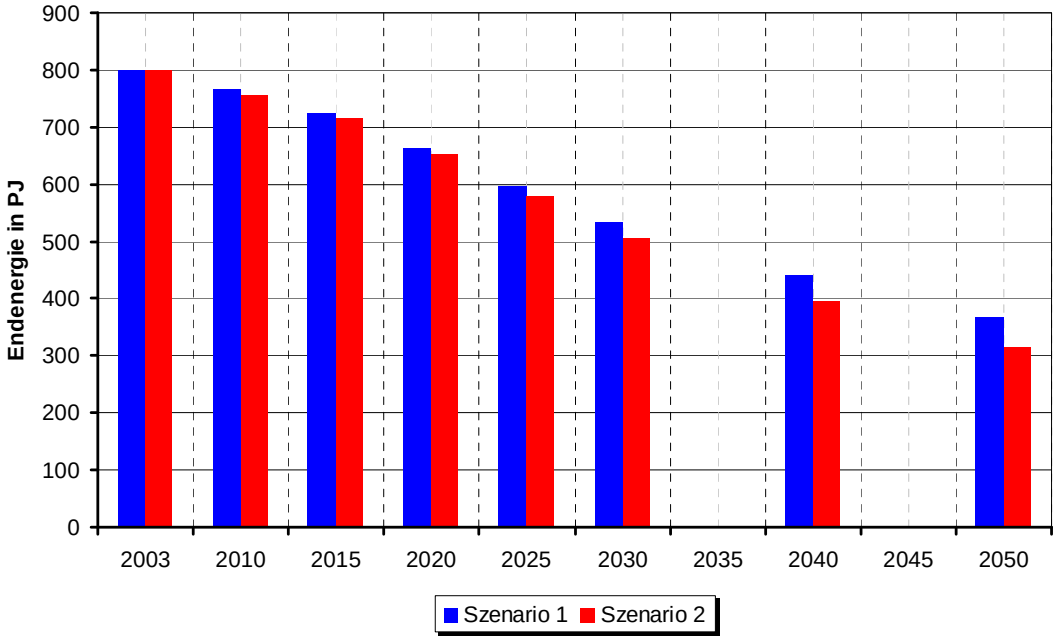

Abbildung 3-23: *Gegenüberstellung der Energieverbrauchsentwicklungen für die Raumwärmebereitstellung der Szenarien 1 und 2*

3.2.3.2 Anwendungsbereich Beleuchtung

Der Einsatz elektrischer Energie geht im Beleuchtungsbereich auf knapp unter 20 PJ zurück (vgl. **Abbildung 3-24**), was einem Rückgang auf etwa 21 % des Ausgangswertes entspricht. Im Beleuchtungsbereich zeichnet sich somit – wie schon in Szenario 1 – ein besonders starker Rückgang des Energieverbrauchs ab. Der Wert des Effizienzszenarios liegt am Ende des Betrachtungszeitraumes 4,8 PJ unter dem des Referenzszenarios (vgl.

Abbildung 3-25). Angesichts des großen absoluten Verbrauchsrückgangs scheint dies vergleichsweise gering. Betrachtet man die beiden Szenarien relativ zueinander, so zeigt sich, dass durch die verstärkten Effizienzbestrebungen der Energieverbrauch um weitere 20 % gesenkt werden kann.

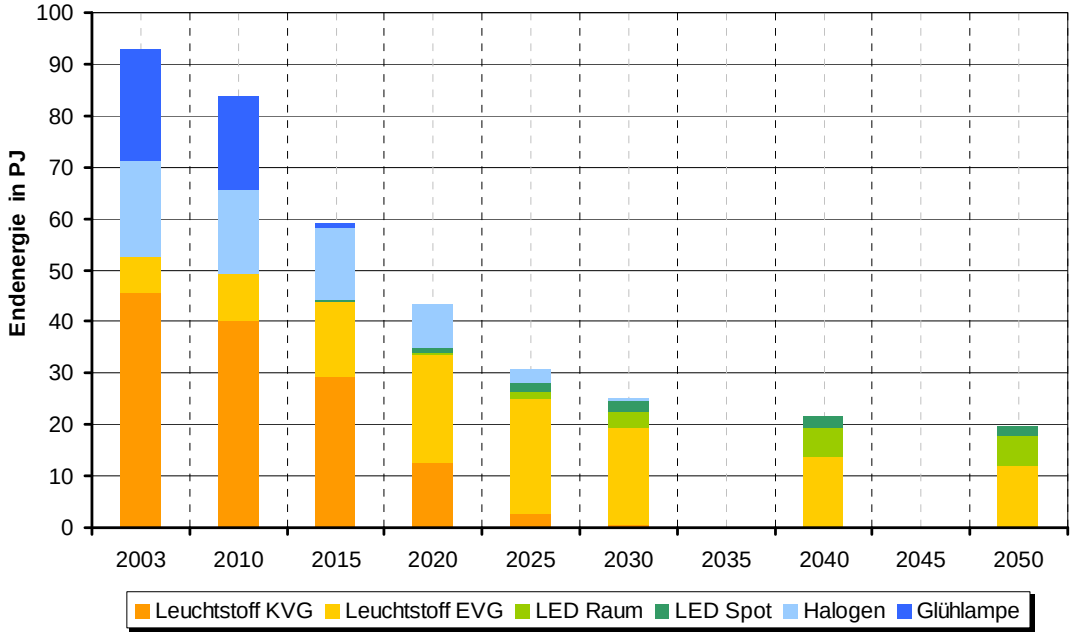

Abbildung 3-24: *Entwicklung des Endenergieverbrauchs für Beleuchtung*

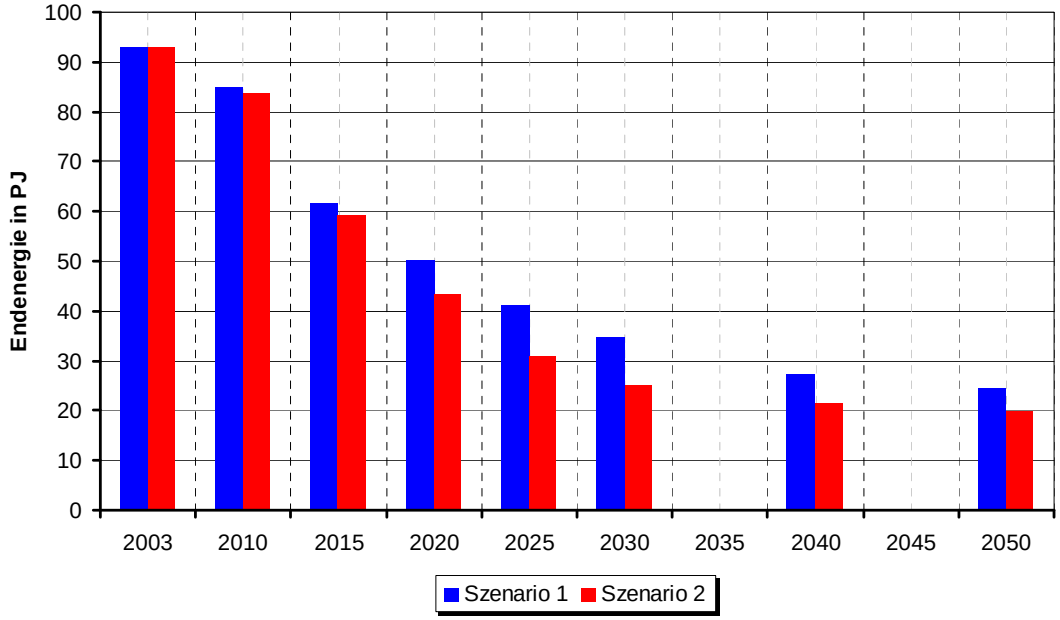

Abbildung 3-25: *Gegenüberstellung der Energieverbrauchsentwicklungen für Beleuchtung der Szenarien 1 und 2*

3.2.3.3 Anwendungsbereich IuK

Die Entwicklung des Endenergieverbrauchs im Anwendungsbereich IuK ist in **Abbildung 3-26**, nach Verbrauchergruppen differenziert, dargestellt. Es ist deutlich zu

erkennen, dass der Energiebedarf in den ersten Jahren im Wesentlichen vom Einsatz der Serversysteme bestimmt sein wird. Auffällig hierbei ist, dass der deutliche Verbrauchsanstieg im ersten Teil des Betrachtungszeitraums, wie er sich im Referenzszenario zeigte (vgl. **Abbildung 3-27**), schon ab etwa 2015 durch die forcierte Konsolidierung des Serverparks abgefangen werden kann.

In Kombination mit der Effizienzsteigerung bei den Endgeräten fällt der Energieverbrauch für IuK bereits 2020 unter den heutigen Wert und bleibt ab 2025 bis zum Ende des Betrachtungszeitraumes nahezu konstant auf einem Niveau knapp unter 30 PJ. Der Verbrauchsrückgang bis zur Mitte des Betrachtungszeitraumes resultiert aus den Effizienzgewinnen im Endgerätebereich und spiegelt die Minimierung der Schein-Aus- und Standby-Verbräuche wider.

Insgesamt liegt der Verbrauch zum Ende der Betrachtung mit knapp 30 PJ gut 55 % niedriger als in Szenario 1. Auch kann im Gegensatz zu Szenario 1 nur ein moderat steigender Trend des Verbrauches in 2050 durch die Server verzeichnet werden.

Die im Rahmen der Effizienzbemühungen vermehrt eingesetzten Regelungs- und Steuerungssysteme, die auch dem Bereich der IuK zugeordnet werden, lassen diesen Bereich – im Kontext des konsolidierten Serverbestandes – zunehmend zum Verbrauchsschwerpunkt heranwachsen.

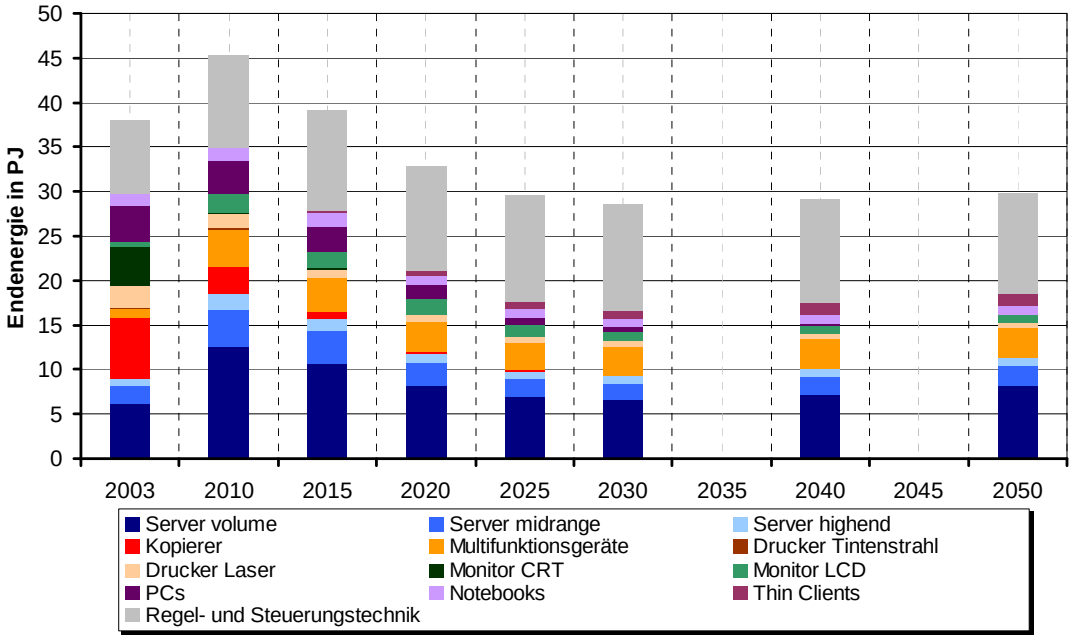

Abbildung 3-26: *Entwicklung des Endenergieverbrauchs für IuK*

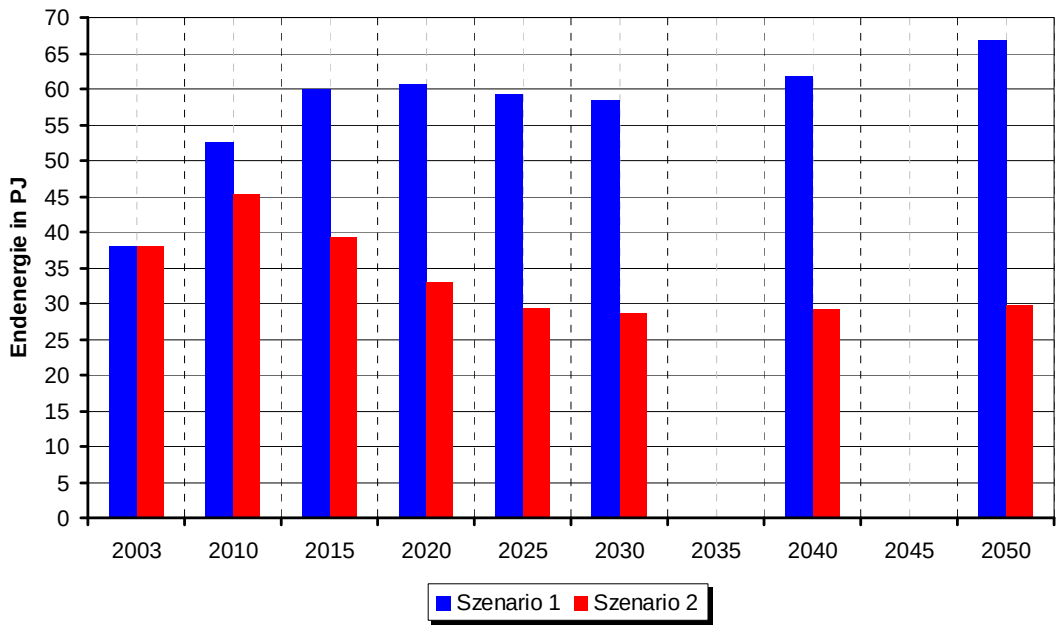

Abbildung 3-27: *Gegenüberstellung der Energieverbrauchsentwicklungen für IuK der Szenarien 1 und 2*

3.2.3.4 Anwendungsbereich mechanische Energie

Der Endenergieverbrauch für mechanische Anwendungen wird in den ersten Jahren, wie schon in Szenario 1, durch die Entwicklung im Serverbereich und die erforderliche Kühlung stark beeinflusst. Folglich zeigt sich bereits ab 2015 ein Verbrauchsrückgang gegenüber 2003 (vgl. **Abbildung 3-28**). Der Verbrauch erreicht 2050 einen Wert von knapp unter 134 PJ und liegt am Ende der Betrachtungen somit 36 PJ unter der Entwicklung des Referenzszenarios. Aus der gestiegenen Effizienz resultiert gegenüber Szenario 1 somit ein Verbrauchsrückgang um mehr als 20 % bis 2050, wie in **Abbildung 3-29** zu sehen ist.

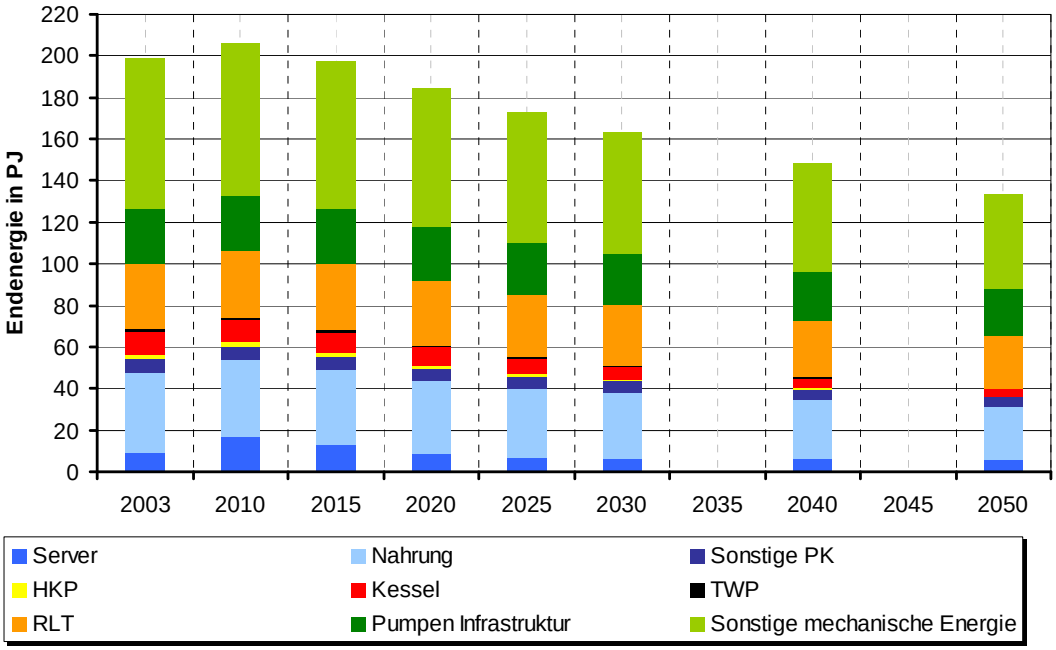

Abbildung 3-28: *Entwicklung des Endenergieverbrauchs für mechanische Energie*

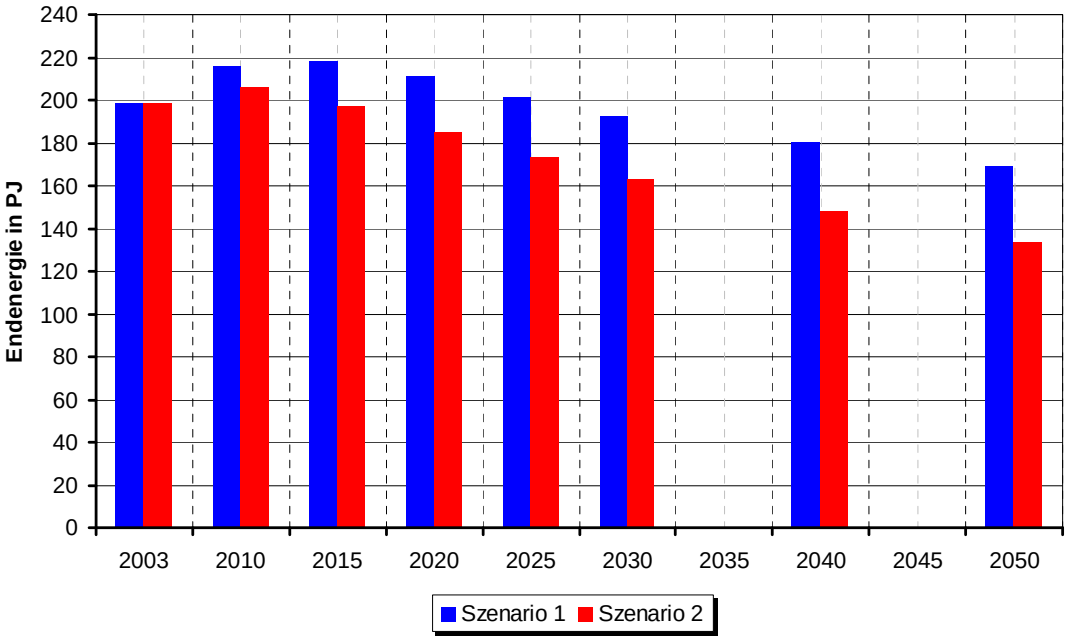

Abbildung 3-29: *Gegenüberstellung der Energieverbrauchsentwicklungen für mechanische Energie der Szenarien 1 und 2*

3.2.3.5 Anwendungsbereich Prozesswärme/Warmwasser

Der Energiebedarf für die Bereitstellung von Warmwasser erreicht 2050 in Szenario 2 einen Wert von knapp 129 PJ, was einem Verbrauchsrückgang über den Betrachtungszeitraum von 23 PJ entspricht. Damit reduziert sich der Verbrauch gegenüber dem Referenzszenario um weitere 7,3 PJ (vgl. **Abbildung 3-31**), was einer Minderung um 5,4 % gleichkommt. Ergänzend ist jedoch zu beachten, dass die Solarthermie mit 17 PJ

zur Deckung des Warmwasserbedarfs in 2050 beiträgt (vgl. **Abbildung 3-30**). Im Referenzszenario waren es lediglich 3 PJ.

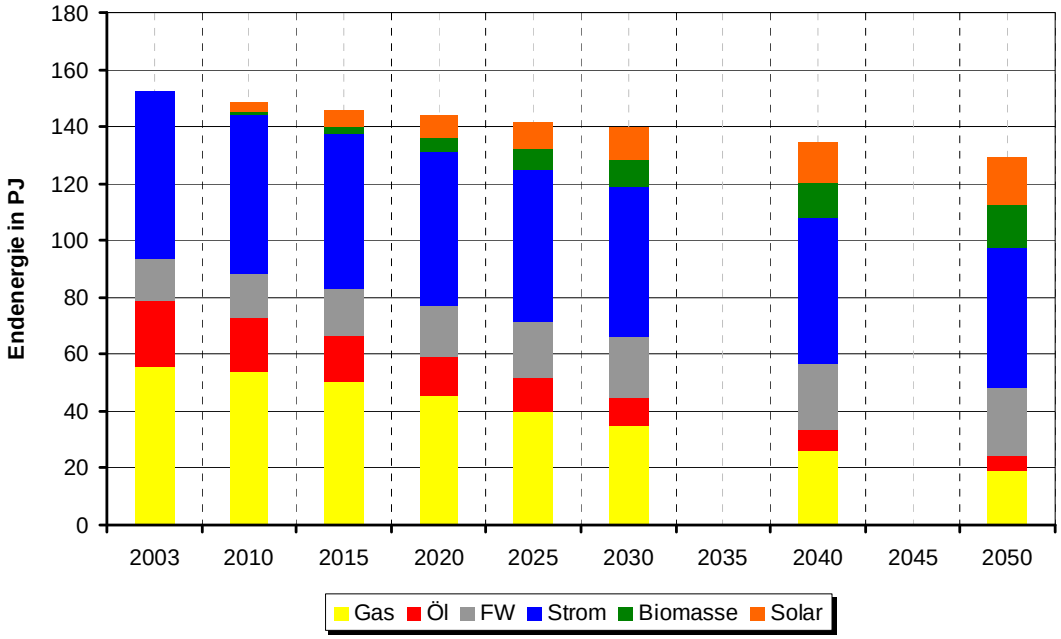

Abbildung 3-30: *Entwicklung des Endenergieverbrauchs für Warmwasser (nach Energieträgern)*

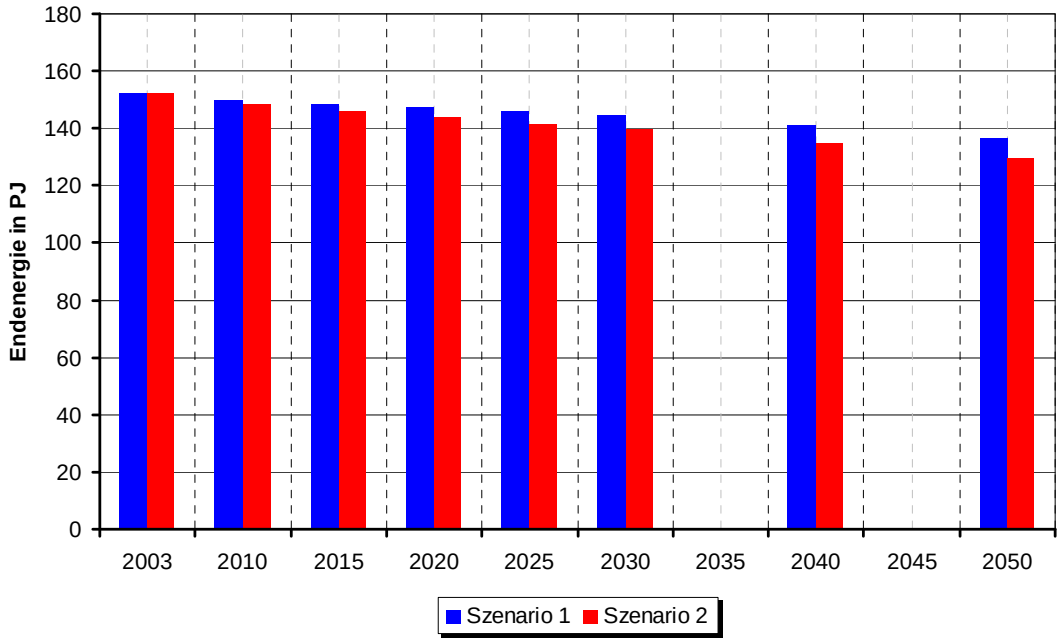

Abbildung 3-31: *Gegenüberstellung der Energieverbrauchsentwicklungen für die Warmwasserbereitstellung der Szenarien 1 und 2*

Der Energiebedarf zur Prozesswärmebereitstellung erreicht in 2050 einen Wert von etwa 166 PJ, was einen Verbrauchsrückgang von ca. 48 PJ über den Betrachtungszeitraum bedeutet. Damit reduziert sich der Verbrauch gegenüber dem Referenzszenario um weitere 20,7 PJ (vgl. **Abbildung 3-33**). Dies entspricht einer Minderung von 11 %

aufgrund der gestiegenen Effizienz. Entsprechend der Ausführungen in Kapitel 2.2.3.5 kann die Solarthermie keinen Deckungsbeitrag zur Prozesswärme in GHD liefern und der Verbrauchsrückgang verteilt sich analog zu Szenario 1 auf die eingesetzten Energieträger (vgl. **Abbildung 3-32**).

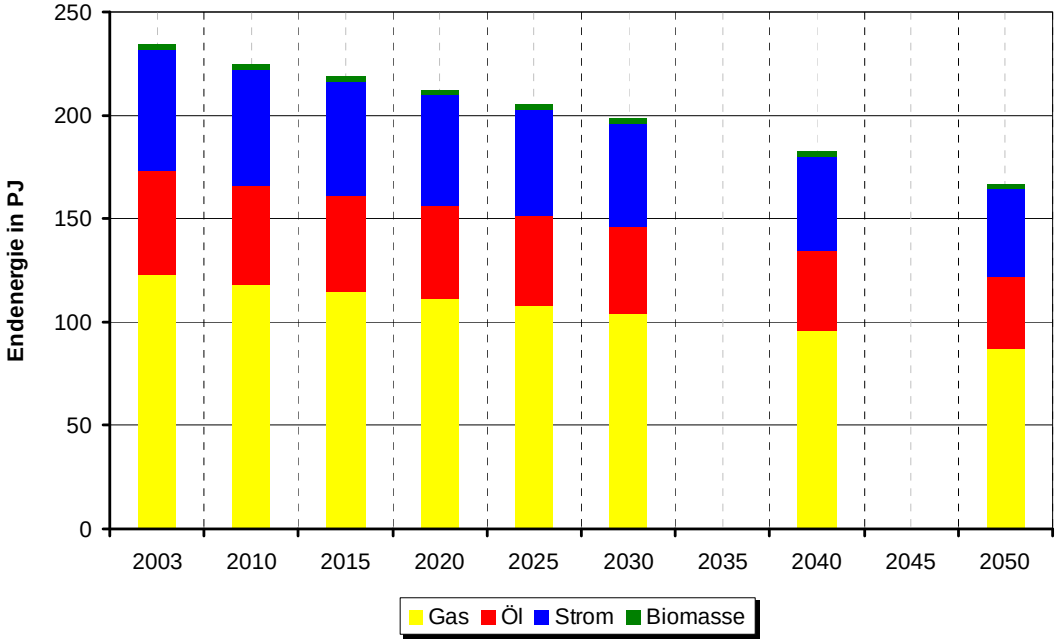

Abbildung 3-32: *Entwicklung des Endenergieverbrauchs für (sonstige) Prozesswärme (nach Energieträgern)*

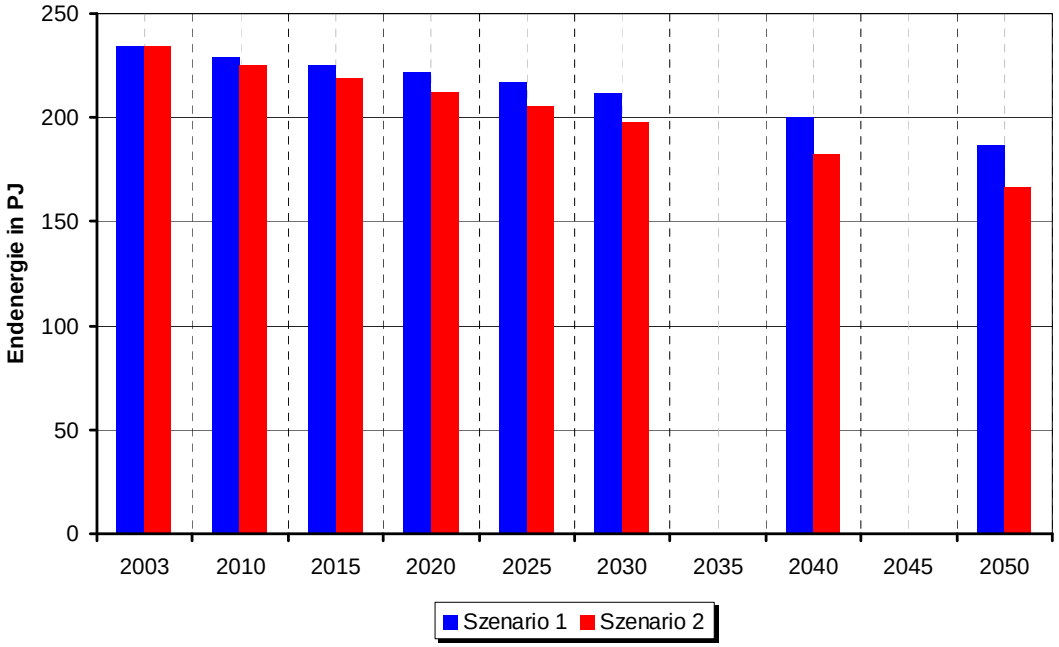

Abbildung 3-33: *Gegenüberstellung der Energieverbrauchsentwicklungen für die Prozesswärmebereitstellung der Szenarien 1 und 2*

3.3 Entwicklung im Sektor Industrie

3.3.1 Maßgebliche Bedarfsdeterminanten

Durch den Einsatz der besten verfügbaren Technologie ist vor allem im Bereich des Strom- und Brennstoffverbrauches eine weitere Reduktion zu erwarten. Produktionsschritte benötigen beispielsweise durch die Verwendung effizienter Maschinen weniger elektrische Antriebsenergie. Durch eine neue Prozessführung kann Prozesswärme gezielter zur Produktherstellung eingesetzt werden, wobei geringere Wärmeverluste entstehen. Diese beiden Beispiele spiegeln nur einen kleinen Teil der Möglichkeiten wider, die den Endenergieverbrauch in der Industrie senken können. Eingriffe in den Produktionsablauf beeinflussen den Effizienzparameter e (einmalige Effizienzänderung) in der Formel aus 2.3.1.1. Auf diese Vorgänge wird in den folgenden Punkten der einzelnen Industriesektoren näher eingegangen.

Im Vergleich zu Szenario 1 bleibt der Produktionsindex unverändert, da nur eine Änderung im Nutzerverhalten auch eine Auswirkung auf die produzierte Menge an Gütern hat. Weiter wird angenommen, dass der Wert der Güter nicht verändert wird.

3.3.2 Technikstruktur

3.3.2.1 KWK in der Industrie

Die Erzeugung von Strom und Wärme in KWK-Anlagen zeichnet sich durch eine deutlich höhere Ausnutzung des eingesetzten Brennstoffes gegenüber der konventionellen (getrennten) Erzeugung aus. Der Einsatz von KWK-Systemen kann derzeit als beste verfügbare Technik im Bereich der konventionellen Energiebereitstellung angesehen werden. Allerdings stoßen die KWK-Anlagen im Bereich der Industrie schnell an ihre technischen Grenzen. Kleine Anlagen (einige 100 kW thermische Leistung) können Prozesstemperaturen nur im unteren Bereich (bis 100 °C) zur Verfügung stellen. Prozessdampf kann durch diese Anlagen nur schwer erzeugt werden. Die Installation eines größeren Systems, welches Energie auf einem höheren Temperaturniveau zur Verfügung stellen kann, ist hingegen mit höheren Investitionen verbunden und erreicht in aller Regel nicht die für einen wirtschaftlichen Betrieb notwendigen Volllaststunden. Ein weiter Nachteil dieser KWK-Anlagen ist das fehlende dynamische Betriebsverhalten. Leistungsschwankungen können bei großen Systemen auf Grund ihrer Trägheit kaum ausgeregelt werden, was die Einsatzmöglichkeiten zur Prozessenergiebereitstellung weiter vermindert. Dennoch wird davon ausgegangen, dass ein gewisser Anteil des Brennstoffverbrauches im Szenario „Erhöhte Technikeffizienz“ durch den Einsatz hocheffizienter Mikro-KWK Anlagen vermieden werden kann (Grundlast der Energiebereitstellung zur Raumheizung und -kühlung).

3.3.2.2 Erneuerbare Energien in der Industrie

Der Einsatz erneuerbarer Energien wird sich auch in Zukunft in der Industrie hauptsächlich auf die Raumklimatisierung beschränken. Auf Grund der Konkurrenz zu den KWK-Anlagen und den hohen Investitionskosten wird ein nennenswerter Ausbau der regenerativen Energieerzeugung in den meisten Industriesektoren jedoch nicht stattfinden.

Eine Ausnahme bilden hier Industriezweige, in denen biogene Energieträger als Abfallprodukte anfallen, wie es beispielsweise in der Papier- und Ernährungsindustrie der Fall ist. Hier wird bereits heute ein Großteil der anfallenden Reststoffe zur Energiebereitstellung genutzt, was aber das zukünftige Ausbaupotenzial erheblich einschränkt.

3.3.3 Endenergieverbrauch

Für die Ermittlung des Endenergieverbrauches in Szenario 2 wird die Methode angewendet, wie sie in Szenario 1 beschrieben ist. Die einzelnen Parameter werden so gewählt, dass sie den Einsatz der verbesserten Technik in den verschiedenen Industrieprozessen widerspiegeln.

3.3.3.1 Metallindustrie

In der Metallindustrie dominieren vor allem die Hochtemperaturprozesse, die auf einem Temperaturniveau von mehr als 900 °C stattfinden. Einsparungen können hier über einen Eingriff in die Prozessführung oder eine gezielte Nutzung der Abwärme aus den verschiedenen Prozessen realisiert werden. Eine weitere Möglichkeit zur Energieeinsparung findet sich im Einsatz effizienter Feuerungstechniken zur Prozesswärmeerzeugung.

Fortschreibung gesamt

Im Vergleich zu Szenario 1 kann durch den Einsatz der besten verfügbaren Technik der Endenergieverbrauch um ca. 200 PJ – das entspricht ca. 12 % – gesenkt werden. Einsparmöglichkeiten liegen hierbei in den verschiedensten Prozessen der Eisen- und Stahlerzeugung sowie der Verarbeitung von Metallen. So können beispielsweise beim Sinterprozess, der zur Verhüttung von Metallen eingesetzt wird, durch die gezielte Wärmerückgewinnung aus dem Kühler der Sinteranlage Einsparungen von 18-30 % des eingesetzten Brennstoffes erzielt werden /UBA 01b/. Die Abwärme kann zur Dampferzeugung, zur Vorheizung der für den Prozess nötigen Verbrennungsluft oder zur Vorwärmung der Sintermischung genutzt werden. Durch die Optimierung der Prozessführung bei der Herstellung von Elektrostahl im Elektrolichtbogenofen kann ein erheblicher Beitrag zur Einsparung elektrischer Energie geleistet werden. Hierbei wird durch eine Schrottvorwärmung der Einsatz an Strom bei Einschaft-Öfen um bis zu 70 kWh/t und bei Fingerschaft-Öfen um bis zu 100 kWh/t reduziert. Dies entspricht einer 25 %igen Reduktion des gesamten Stromeinsatzes /UBA 01b/. Weitere Beispiele zur Energieeinsparung in der Metallindustrie sind in **Tabelle 3-3** aufgeführt.

Tabelle 3-3: *Weitere Einsparpotenziale in der Metallindustrie /UBA 01b/, /UBA 01c/*

Technik	Einsparung im Prozess
Direkteinblasung von Reduktionsmitteln	4%
Energierückgewinnung mittels Gichtgasturbine	2%
Betrieb und Instandhaltung der Wärme- und Wärmebehandlungsöfen	10%
Ofenautomatisierung/Ofenregulierung	bis 15%
Regenerativbrennersystem	40%

In **Abbildung 3-34** ist der Energieverbrauch im Metallsektor für das Szenario 2 dargestellt. Durch die oben beschriebenen Einsparmaßnahmen kann der Stromverbrauch bis in das Jahr 2050 im Vergleich zu Szenario 1 um ca. 12 % auf 855 PJ gesenkt werden. Der Brennstoffeinsatz kann um ca. 20 % auf einen Wert von 670 PJ reduziert werden.

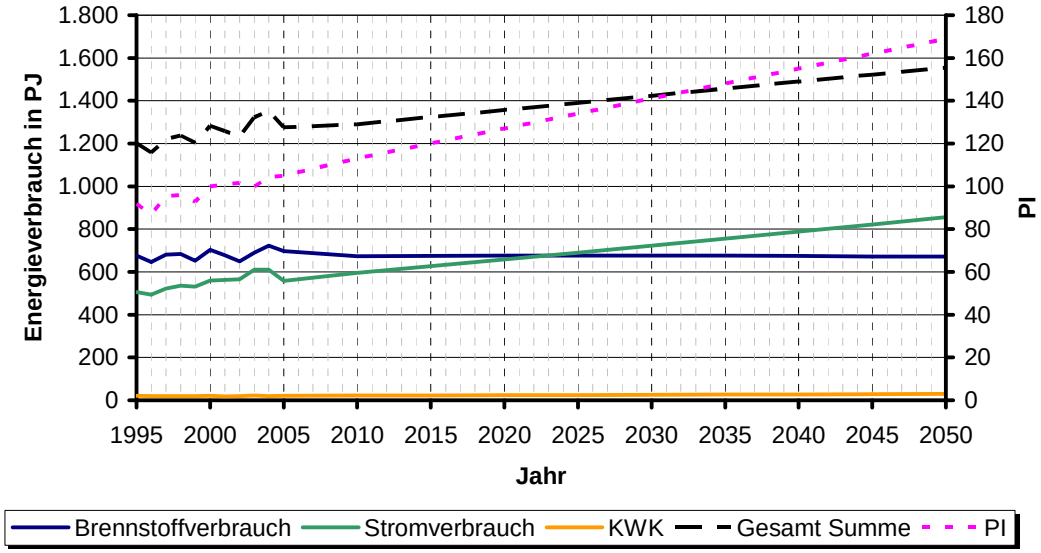

Abbildung 3-34: *Gesamtfortschreibung der Metallindustrie in Szenario 2*

Fortschreibung Brennstoffe

Die Aufteilung der prognostizierten Reduktion des Energieeinsatzes zur Wärmebereitstellung durch Brennstoffe erfolgt prozentual auf die einzelnen Energieträger. In der Metallindustrie bedeutet dies einen Rückgang der Stein- und Braunkohlen, des Heizöls, des Erdgases und der regenerativen und sonstigen Energieträger um ca. 20 %. Dargestellt ist der Brennstoffbedarf in **Abbildung 3-35**. Insgesamt kann der Energieverbrauch durch den Einsatz der effizientesten Technik gegenüber Szenario 1 um ca. 165 PJ reduziert werden.

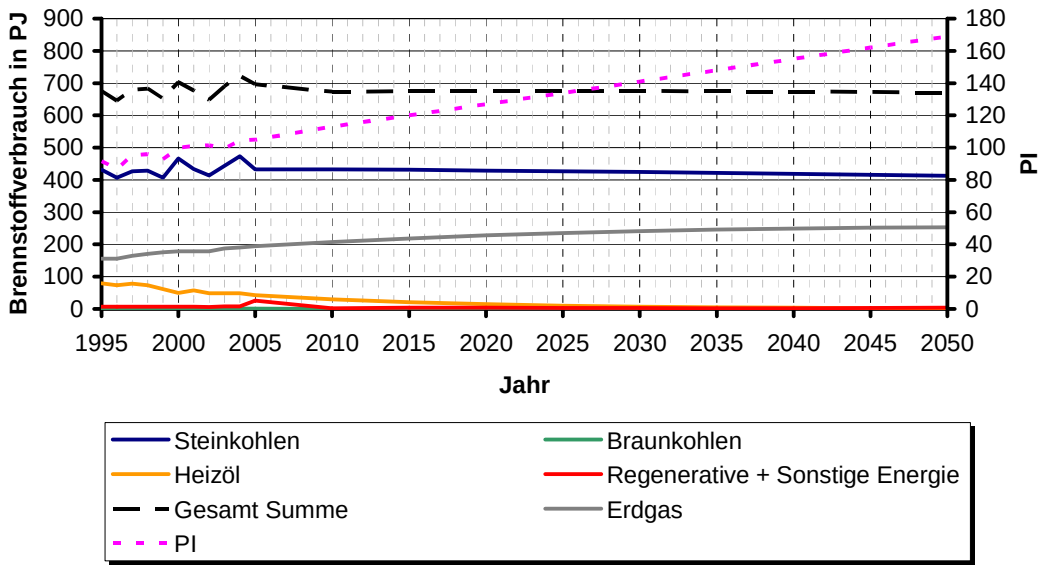

Abbildung 3-35: *Brennstoffverbrauch der Metallindustrie in Szenario 2*

3.3.3.2 Chemieindustrie

Die Chemieindustrie zeichnet sich durch ein hohes Potenzial im Bereich der KWK-Anlagen aus. Bereits im Jahr 1994 wurden ca. 170 PJ Wärme aus Fernwärme- und KWK-Systemen bereitgestellt. Auf die KWK entfiel dabei ein Betrag von ca. 150 PJ. Bis zum Jahr 2004 reduzierte sich die aus den beiden Technologien bezogene Wärmemenge auf ca. 100 PJ. Diese Reduktion ist auf einen Rückbau und die Stilllegung der KWK-Anlagen aus überwiegend wirtschaftlichen Gründen zurückzuführen.

Fortschreibung gesamt

Wie in **Abbildung 3-36** zu erkennen ist, wird der Brennstoffverbrauch zur Wärmeerzeugung in zunehmendem Maße durch die aus KWK-Anlagen bereitgestellte Wärme substituiert. Bis zum Jahr 2035 kann durch den Einsatz von KWK-Systemen der ehemalige Stand von 1995 (170 PJ) erreicht werden. Durch die steigende Produktion entsteht weiteres nutzbares Potenzial, was zu einem Ausbau der KWK bis zu einer erzeugten Wärmemenge von 210 PJ führt. Berücksichtigt werden muss allerdings, dass durch die Erweiterung der KWK-Anlagen auch der Brennstoffbedarf (Primärenergie) in diesem Bereich deutlich ansteigen wird. Dieser Mehrverbrauch muss auf zwei Sektoren aufgeteilt werden. Der für die Erzeugung von Wärme aus KWK benötigte Brennstoff wird im Industriesektor, der aus der zusätzlichen Strombereitstellung resultierende Anteil im Umwandlungssektor bilanziert.

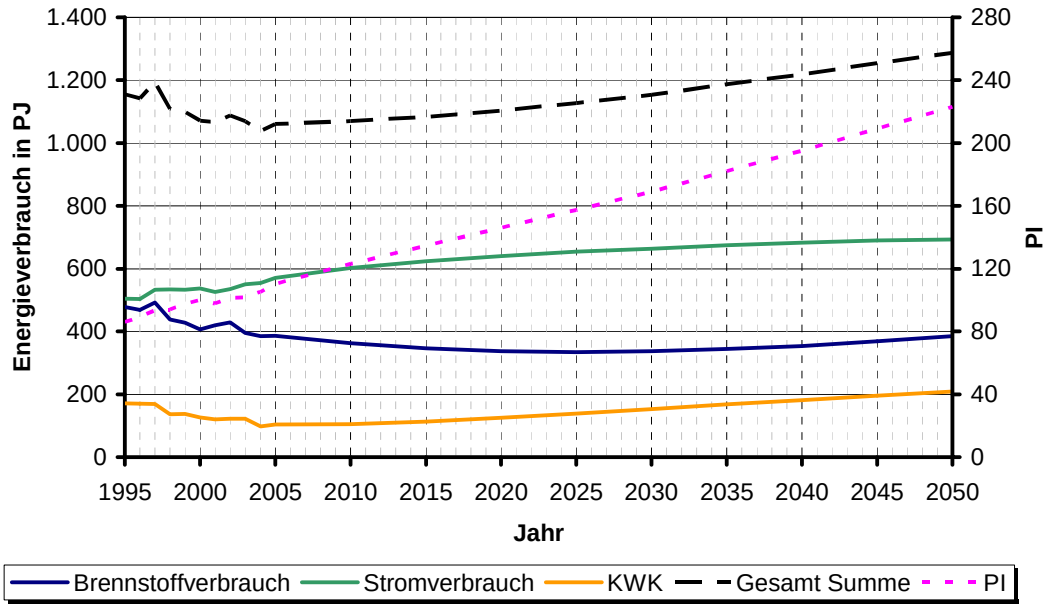

Abbildung 3-36: *Gesamtfortschreibung der Chemieindustrie in Szenario 2*

Im Bereich des Stromverbrauches lassen sich vor allem durch die Umrüstung von Amalgamtechnik auf Membrantechnik in der Chloralkaliindustrie deutliche Einsparpotenziale realisieren. Durch den Einsatz dieser Technologie können bei der Chlorherstellung bis zu 15 % an elektrischer Energie eingespart werden /UBA 01a/. Weitere Energieeinsparungen können durch die Anwendung enzymatischer Verfahren anstelle chemischer Verfahren bei der Herstellung organischer Feinchemikalien erreicht werden /EU 05/. Insgesamt wird davon ausgegangen, dass sich der Gesamtverbrauch in der chemischen Industrie nur geringfügig durch den Einsatz effizienter Technologien reduzieren lässt. Auf Grund des deutlich steigenden PI's wird der Energieverbrauch auch in Zukunft weiter ansteigen. Im Vergleich zu Szenario 1 sinkt der Energiebedarf im Chemiesektor um ca. 60 PJ (4,5 %). Nicht berücksichtigt ist hier die Stromgutschrift, die sich aus dem gesteigerten Einsatz von KWK-Anlagen ergibt.

Fortschreibung Brennstoffe

Die Aufteilung auf die einzelnen Brennstoffe ist in **Abbildung 3-37** dargestellt. Es ergibt sich eine Reduktion von ca. 170 PJ gegenüber Szenario 1, was in etwa 30 % entspricht. Anzumerken ist, dass sich die zusätzlich in KWK-Anlagen benötigten Brennstoffe nicht in dieser Betrachtung widerspiegeln. Dies resultiert aus der Tatsache, dass nur die genutzte Energie aus einer bestimmten Quelle (Strom, Brennstoffe, KWK) betrachtet wird und nicht der dazu nötige Primärenergieträger-Einsatz.

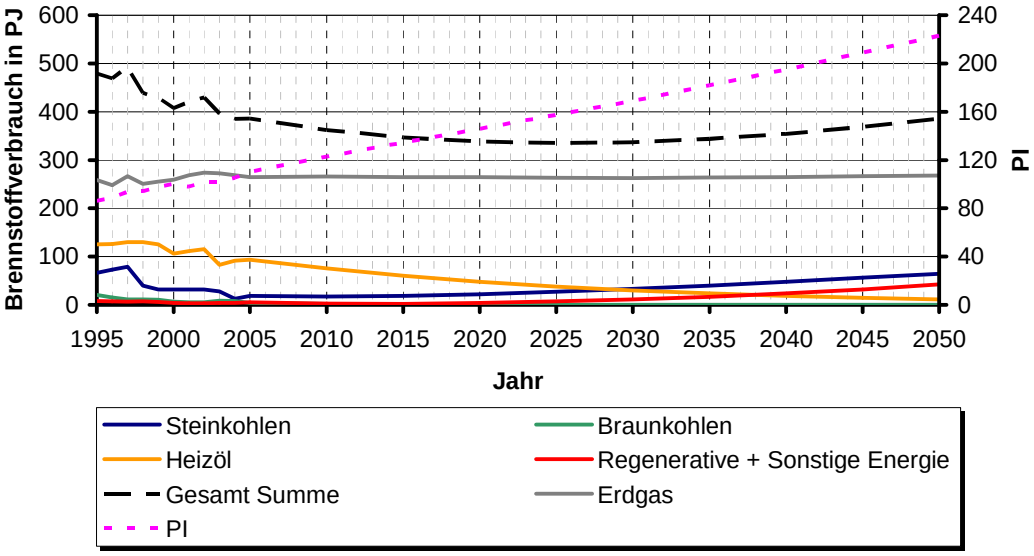

Abbildung 3-37: *Brennstoffverbrauch der Chemieindustrie in Szenario 2*

3.3.3.3 Glasgewerbe, Verarbeitung von Steinen und Erden

Wie in der Metallindustrie zeichnen sich die Prozesse in der Glasindustrie durch die sehr hohen Prozesstemperaturen aus. Auch hier ist es kaum möglich, die hohen Abgastemperaturen in KWK-Anwendungen sinnvoll zu nutzen, da keine Niedertemperatur-Prozesswärme benötigt wird. Die Abwärme kann jedoch dazu genutzt werden, die Ausgangsstoffe des Produktes bereits vorzuwärmen, um den Energieeinsatz hierfür zu verringern. Ebenfalls kann durch die Verwendung der effizientesten Verbrennungstechniken ein erheblicher Anteil an Energie eingespart werden.

Fortschreibung gesamt

In **Abbildung 3-38** sind die Verläufe des Strom-, Brennstoff- und Gesamtenergieverbrauches für das Szenario 2 dargestellt. Die aus KWK-Anlagen erzeugte Wärmemenge wird nicht näher untersucht.

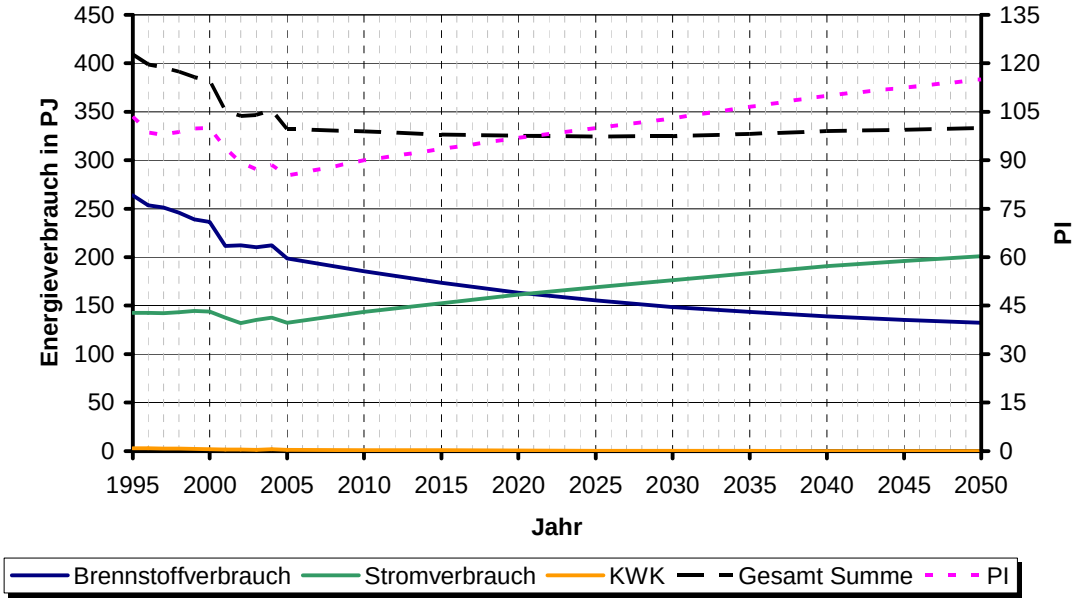

Abbildung 3-38: *Gesamtfortschreibung der Glasindustrie in Szenario 2*

Im Vergleich zu Szenario 1 kann hauptsächlich der Brennstoffeinsatz zur Prozesswärmeerzeugung durch den Einsatz effizienter Technik reduziert werden. So führt zum Beispiel eine Gemenge- und Scherben-Vorwärmung durch die Nutzung der Restwärme im Abgas zu einer Energieeinsparung zwischen 10 % und 20 % /UBA 01d/. Eine weitere Möglichkeit, sowohl den Verbrauch elektrischer Energie als auch den Brennstoffbedarf zu senken, besteht in der Erhöhung des Scherbenanteils bei der Glasherstellung. Durch eine Zugabe von 10 % Scherben kann der Energieeinsatz um 2,5 bis 3 % gesenkt werden /UBA 01d/. Zusätzliche Energieeinsparungen können durch den Einsatz der Sauerstoff-Brennstoff-Schmelztechnik realisiert werden. Hier sind je nach Wannentyp bis zu 50 % Brennstoffeinsparung möglich /UBA 01d/. Der gesamte Energieverbrauch im Jahr 2050 reduziert sich somit von ca. 390 PJ im Szenario 1 auf 330 PJ im Szenario 2, wobei 15 PJ auf die Einsparung an elektrischer Energie und 45 PJ auf die Brennstoffreduktion entfallen.

Fortschreibung Brennstoffe

In **Abbildung 3-39** ist die Entwicklung des Brennstoffverbrauches der Glasindustrie bis in das Jahr 2050 dargestellt. Ein Rückgang ist beim Einsatz von Steinkohlen und Erdgas zu verzeichnen, wohingegen die Braunkohlen in etwa auf dem Niveau von 1995 verharren. Ein Grund für diesen Kurvenverlauf liegt im niedrigeren Preisniveau der Braunkohlen.

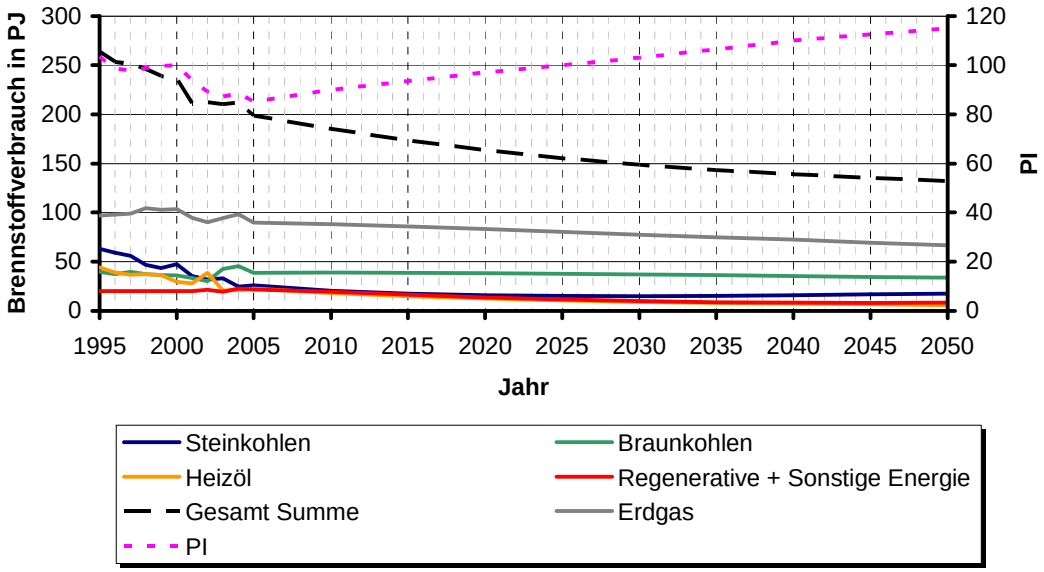

Abbildung 3-39: *Brennstoffverbrauch der Glasindustrie in Szenario 2*

3.3.3.4 Papier-, Verlags- und Druckgewerbe

Eine Möglichkeit, einen Teil der Prozess- und Raumwärme im Papiersektor in Zukunft bereitzustellen, ist die Nutzung von KWK-Anlagen. Bereits heute liegt der prozentuale Anteil der kombinierten Strom- und Wärmeerzeugung im Vergleich zu anderen Industriesektoren weit über dem durchschnittlichen Wert. Begünstigt wird dies zum einen durch die für die KWK günstigen Prozesstemperaturen zwischen 100 °C und 200 °C, der zweite maßgebliche Faktor ist die energetische Nutzung der anfallenden Reststoffe wie Rinde oder Faserreststoffe. Die größten Einsparpotenziale bei der Papierherstellung lassen sich durch eine effizientere Prozessführung realisieren. Hier reichen die Möglichkeiten von einer Modernisierung der bestehenden Anlagen bis hin zum Einsatz neuer effizienter Technologien.

Fortschreibung gesamt

In **Abbildung 3-40** sind die Verläufe des Energiebedarfs bis zum Jahr 2050 für das Szenario 2 dargestellt. Durch die Verwendung der besten verfügbaren Technologie in der Prozessführung, wie z. B. durch den Einsatz der effizientesten praxisüblichen Mahltechnik oder eine Optimierung der Vakuumsysteme, können Energieeinsparungen von bis zu 20 % in einzelnen Produktionsschritten realisiert werden.

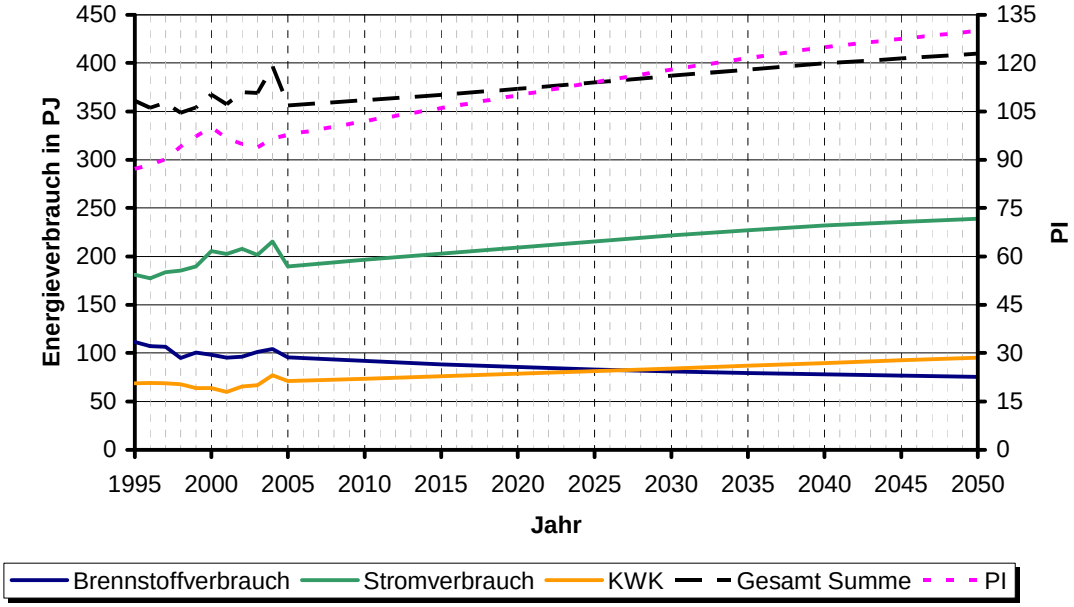

Abbildung 3-40: *Fortschreibung der Papierindustrie in Szenario 2*

Durch die Umsetzung weiterer Maßnahmen kann insgesamt eine Reduktion des gesamten Strom- und Brennstoffbedarfs um ca. 6 % (25 PJ) gegenüber Szenario 1 erreicht werden. Eine weitere Möglichkeit bietet, wie auch in den übrigen Industriesektoren, die Nutzung der Abwärme. Vor allem im Prozess der Papiertrocknung können bis zu 50 % der eingesetzten Energie über Wärmetauschersysteme zurück gewonnen werden /UBA 03/. Die erreichbaren Temperaturniveaus reichen aus, um Prozesswasser vorzuwärmen oder die Maschinenhalle zu beheizen. Die Nutzung der Wärme aus KWK-Anlagen liegt in der Papierindustrie bereits auf einem sehr hohen Niveau. Bis zum Jahr 2050 kann auf Grund des vorhandenen Potenzials im Niedertemperaturbereich noch mit einem leichten Anstieg gerechnet werden. Die Substitution von Prozessenergie aus fossilen Brennstoffen durch KWK-Wärme kann zum einen über eine Ausdehnung der Reststoffnutzung oder über den Einsatz fossiler und regenerativer Energieträger in KWK-Systemen erfolgen.

Fortschreibung Brennstoffe

In der Papierindustrie ist ein Rückgang im Einsatz von Stein- und Braunkohlen und von regenerativen und sonstigen Energieträgern zu erkennen. Die Energiegewinnung aus Erdgas nimmt hingegen zu. Die Abnahme der Kohlen ist durch die Substitution durch Erdgas, welches in den einzelnen Prozessen effizienter eingesetzt werden kann, zu erklären. Wegen der Effizienzsteigerung in den einzelnen Prozessketten verringert sich auch die Menge an anfallenden biogenen Reststoffen in der Zelluloseherstellung. Dies führt zu einer Verringerung der aus regenerativen und sonstigen Energieträgern erzeugten Energie (vgl. **Abbildung 3-41**).

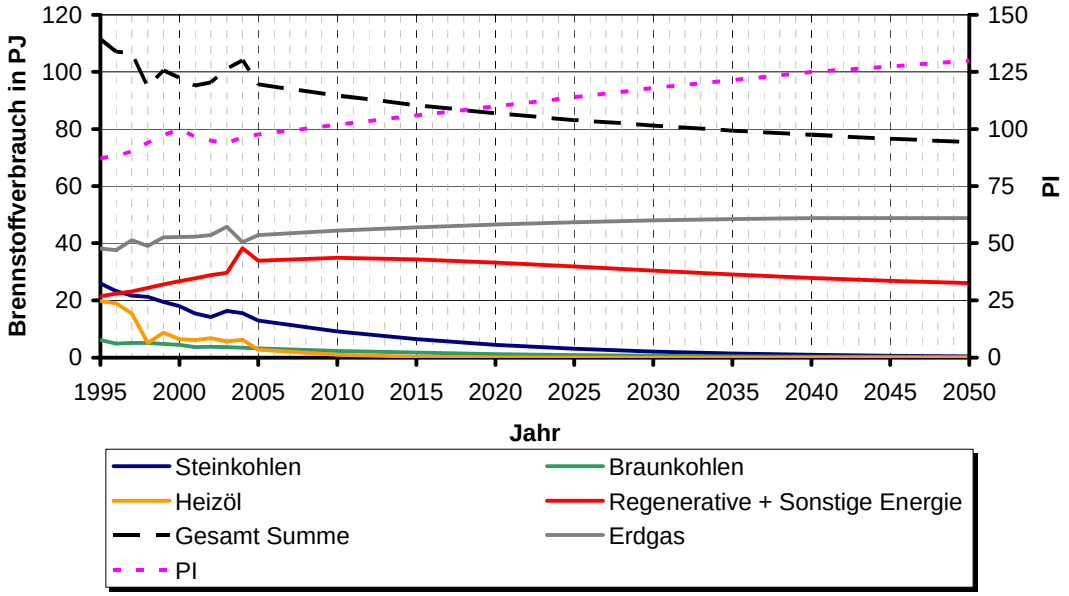

Abbildung 3-41: *Brennstoffverbrauch in der Papierindustrie in Szenario 2*

3.3.3.5 Ernährungsgewerbe

Das Hauptpotenzial zur Energieeinsparung in der Ernährungsindustrie liegt, durch die oft gleichzeitig anfallenden Heiz- und Kühlanforderungen, im Bereich der sinnvollen Abwärmenutzung. Um diese Reduktionsmöglichkeiten vollständig zu identifizieren und auszunutzen, muss eine detaillierte Analyse der im Betrieb vorhandenen Energieströme erfolgen. Eine weitere Option zur Reduzierung des Energieverbrauches bietet die Umstellung auf effizientere Produktionsprozesse in der Nahrungsmittelherstellung. Auf Grund des niedrigen Prozesstemperaturniveaus können in begrenztem Umfang auch KWK-Anlagen zur Wärmebereitstellung eingesetzt werden.

Fortschreibung gesamt

Einsparungen beim Stromverbrauch (siehe **Abbildung 3-42**) lassen sich zum Beispiel bei der Herstellung von Milchprodukten erzielen. So kann beispielsweise der Verbrauch an elektrischer Energie durch eine Teilhomogenisierung der Marktmilch um bis zu 65 % gesenkt werden. Eine Sanierungsmaßnahme, die sich auf den Strom- und Brennstoffbedarf auswirkt, ist die konsequente Isolierung der Wärme- und Kälteleitungen in einem Betrieb. Dadurch kann der Wärme-/ Kälteverlust in Extremfällen um bis zu 86 % gesenkt werden /UBA 05/.

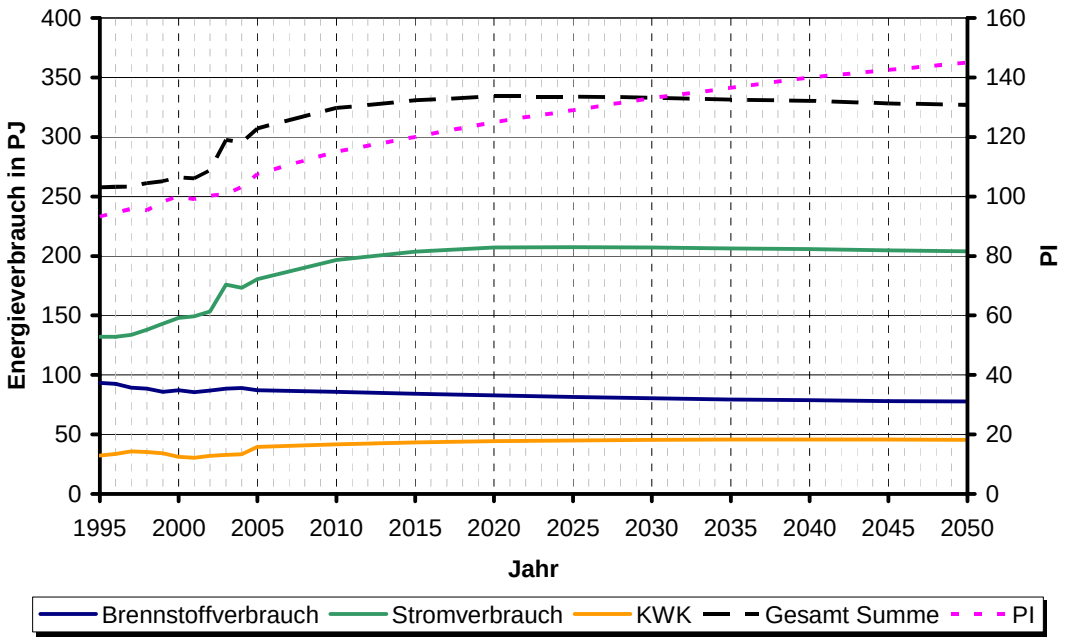

Abbildung 3-42: *Fortschreibung der Ernährungsindustrie in Szenario 2*

Durch den Einsatz effizienter KWK-Anlagen kann ebenfalls Strom für den Eigenbedarf erzeugt und somit eine Verringerung des CO_2-Ausstoßes erreicht werden. Jedoch liegt das vorhandene Potenzial für die Wärmeerzeugung aus KWK in der Ernährungsindustrie mit etwa 45 PJ nur ca. 10 PJ über dem Wert von 1995. Zu erkennen ist auch, dass die Wärmebereitstellung aus KWK-Anlagen bereits im Jahr 2020 den maximalen Ausbaugrad erreicht und bis 2050 stagniert. Der Gesamtenergieverbrauch kann durch den Einsatz der besten verfügbaren Technik im Vergleich zu Szenario 1 um ca. 50 PJ auf einen Betrag von 325 PJ reduziert werden.

Fortschreibung Brennstoffe

Schon im Bereich der Basis-Daten ist ein deutlicher Rückgang des Heizölverbrauches zu erkennen. Auslöser für diesen Wandel in der Versorgungsstruktur sind die effizientere Prozessführung durch den Erdgaseinsatz, der geringere CO_2-Ausstoß und die niedrigeren Brennstoffkosten. Alle weiteren Energieträger spielen, mit Ausnahme der Regenerativen und Sonstigen, keine nennenswerte Rolle. Vor allem im Bereich der Prozesswärme und -kälte wird auf Grund der vorherrschenden Temperaturniveaus von einem verstärkten Einsatz solarthermischer Energiegewinnung ausgegangen (vgl. **Abbildung 3-43**).

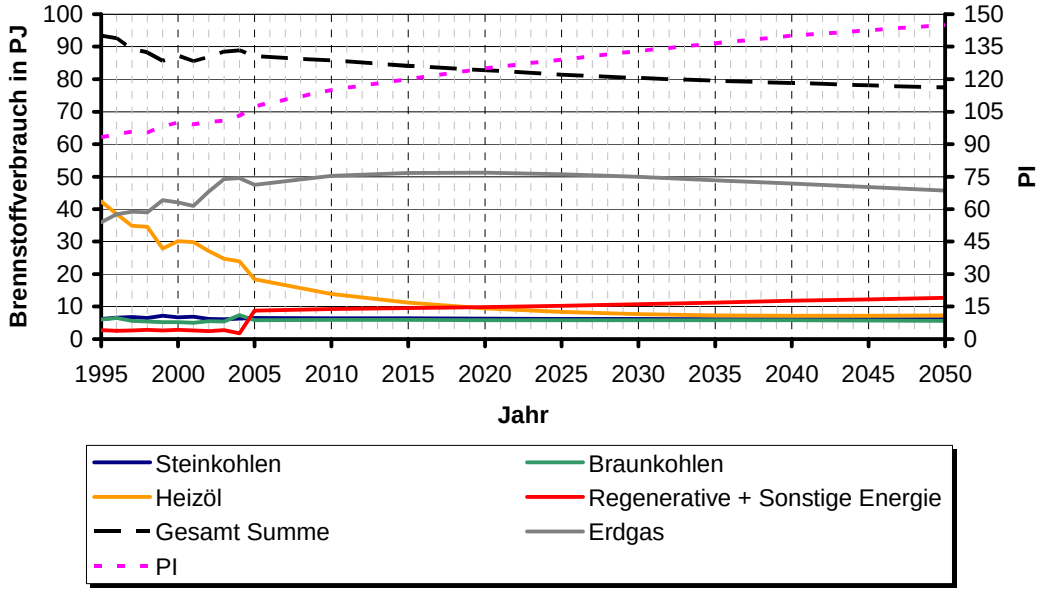

Abbildung 3-43: *Brennstoffverbrauch in der Ernährungsindustrie in Szenario 2*

3.3.3.6 Automobilindustrie

In der Automobilindustrie ist durch den Einsatz der besten verfügbaren Technik kaum Einsparpotenzial realisierbar. Durch ständige Anpassungen an neue Produktionsprozesse und die Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit findet bereits heute eine ständige Verbesserung des Produktionsablaufes statt. Eine Energieeinsparung könnte durch die Umstellung der Produktion auf energiesparende Autos erfolgen. Durch die Leichtbauweise und einen Verzicht auf Zusatzausstattung kann der Energieverbrauch je erzeugtem Kraftfahrzeug reduziert werden.

Fortschreibung gesamt

Der Brennstoffverbrauch und die Wärmeerzeugung aus KWK-Anlagen kann auf Grund des bereits sehr niedrigen Bedarfes kaum durch den Einsatz der effizientesten Technik reduziert werden. Brennstoffe werden in der Automobilindustrie hauptsächlich zur Gebäudebeheizung eingesetzt. Einziger Ansatzpunkt für die Reduktion des Energieverbrauches sind effizientere Heizungsanlagen und ein verbesserter Dämmstandard. Durch diese Maßnahmen können bis zu 2 PJ an bereitgestellter Wärme aus Brennstoffen eingespart werden (vgl. **Abbildung 3-44**).

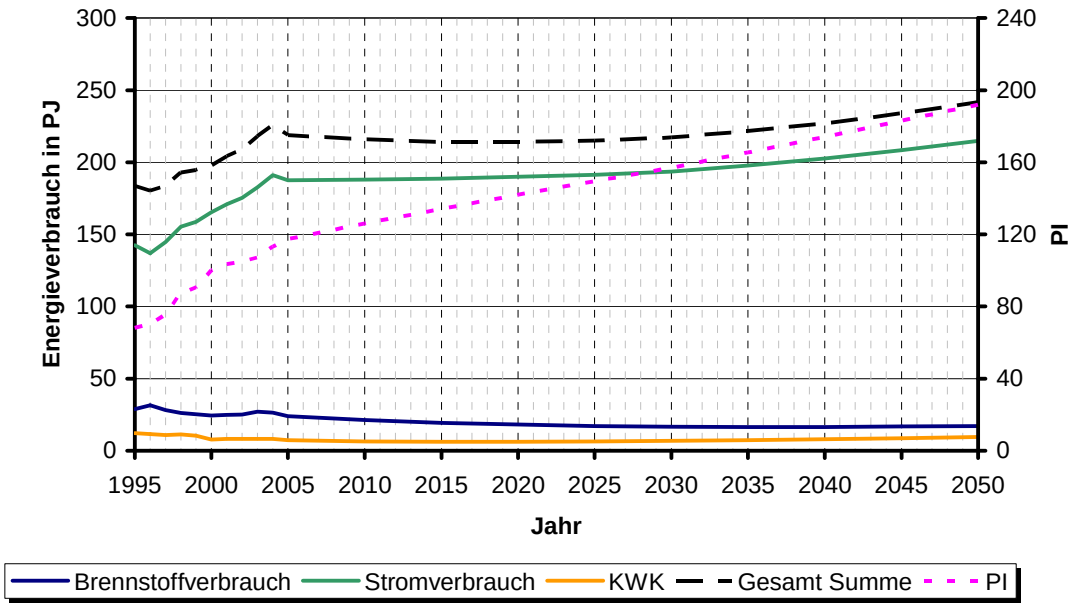

Abbildung 3-44: *Fortschreibung der Automobilindustrie in Szenario 2*

Bei der Betrachtung des Stromverbrauches wird ein leichter Rückgang gegenüber Szenario 1 prognostiziert. Dieser beruht auf der Tatsache, dass auch in der Zukunft weitere Effizienz-verbessernde Maßnahmen ergriffen werden, um die immer strenger werdenden Umweltauflagen bezüglich des Energieverbrauches zu erfüllen. Große Einsparpotenziale sind nach dem heutigen Stand der Technik nicht mehr realisierbar. Somit wird von einem ca. 5 %igen Anstieg des Stromverbrauches bei gleich bleibendem Brennstoff- und KWK-Wärmebedarf ausgegangen. Ein Umstieg von Verbrennungskraft- auf Elektrofahrzeuge wirkt sich auf den Energieverbrauch zur Herstellung nicht aus. Es wird davon ausgegangen, dass es trotz der Veränderung der Produktionsabläufe durch neue Modelle keinen Einfluss auf den Gesamtenergieverbrauch geben wird.

Fortschreibung Brennstoffe

Durch stetige Effizienzverbesserung kann der Erdgasverbrauch reduziert werden. Hierbei ist das Hauptaugenmerk auf die Reduktion des Energieverbrauches zur Gebäudeklimatisierung zu richten. Ab 2012 greifen die verschärften Auflagen aus der Energieeinsparverordnung für Nichtwohngebäude, was zu einem Anstieg der regenerativen Energieversorgung im Bereich der Büro- und Fertigungsgebäude führt (Solare Heizung und Kühlung). Dieser Trend wird sich bis in das Jahr 2050 fortsetzen. Dargestellt sind diese Ergebnisse in **Abbildung 3-45**.

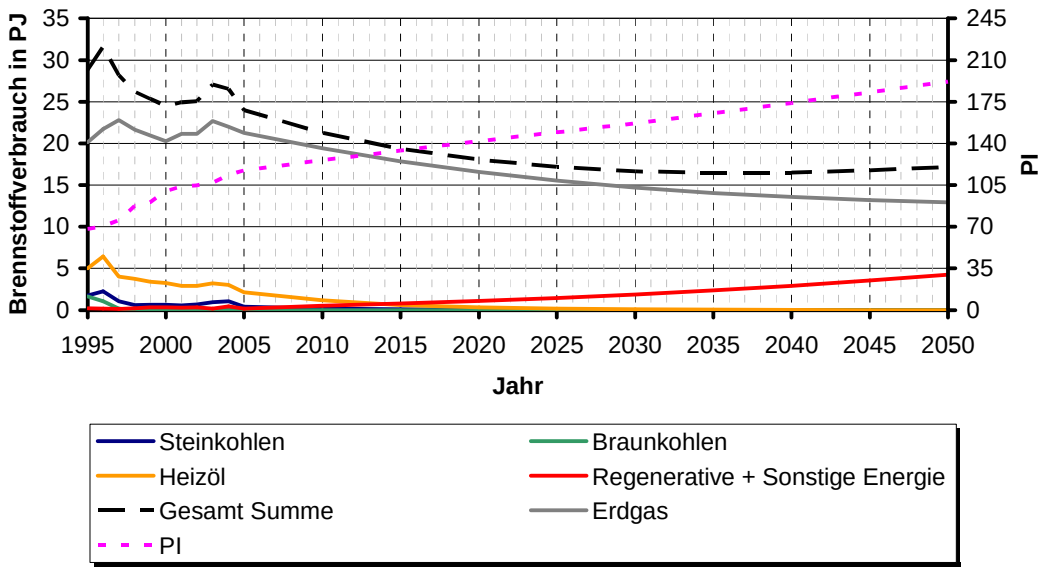

Abbildung 3-45: *Brennstoffverbrauch in der Automobilindustrie in Szenario 2*

3.3.3.7 Maschinenbau

Fortschreibung gesamt

In der Maschinenbauindustrie verhält es sich ähnlich wie in der Automobilindustrie. Die Optimierung in den bestehenden Produktionsprozessen ist bereits weit fortgeschritten. Demnach sind nur sehr wenige Energieeinsparpotenziale noch nicht ausgeschöpft worden (vgl. **Abbildung 3-46**). Da die Erzeugung von Wärme aus KWK-Anlagen auch im Szenario 2 nur etwa 2 % ausmacht, wird auf eine weitere Betrachtung verzichtet.

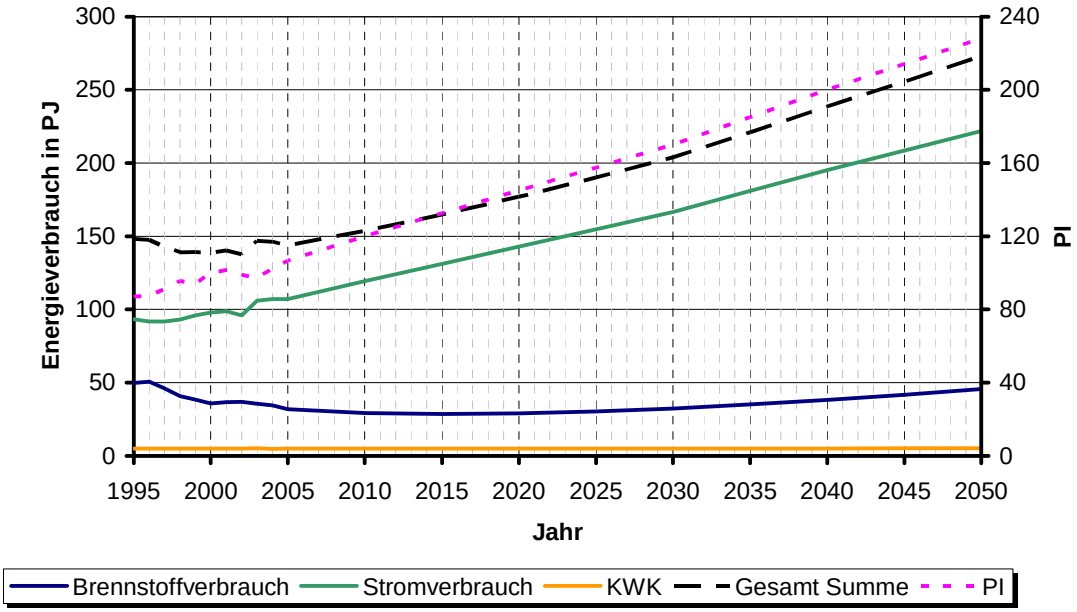

Abbildung 3-46: *Fortschreibung der Maschinenbauindustrie in Szenario 2*

Der Strombedarf in der Maschinenbauindustrie wird in Szenario 2 nicht signifikant reduziert. Über weitere Verbesserungen im Produktionsablauf, wie etwa dem Einsatz

effizienterer Antriebe, können Einsparungen an elektrischer Energie erreicht werden. Diesem Trend wirkt jedoch der stetig zunehmende Herstellungsaufwand der einzelnen Produkte entgegen. Auch eine Verschärfung der Umweltauflagen kann einen erhöhten Energiebedarf mit sich bringen. Insgesamt wird davon ausgegangen, dass sich eine Reduktion des Stromverbrauches um ca. 5 % gegenüber Szenario 1 erzielen lässt. Im Bereich des Brennstoffbedarfes kann der Heizenergieverbrauch durch verbesserte Gebäudeklimatisierung und einen erhöhten Dämmstandard der Produktions- und Bürogebäude reduziert werden. Hier kann mit Einsparungen von ca. 5 PJ gerechnet werden.

Fortschreibung Brennstoffe

Nach einem anfänglichen Rückgang des Erdgasverbrauches (siehe **Abbildung 3-47**) bis zum Jahr 2020 steigt dieser bis 2050 nahezu auf das Niveau von 1995 wieder an. Begründet ist dies durch die deutlich steigende Produktion. Im Gegensatz zur Automobilindustrie überwiegt im Maschinenbau der prozessgebundene Energieverbrauch, der nur bedingt durch Effizienzmaßnahmen reduziert werden kann. Der Anstieg der regenerativen Energieträger ist auch hier mit dem Inkrafttreten der Energieeinsparverordnung 2012 zu erklären. Der Verbrauch an Heizöl steigt im letzten Drittel des Betrachtungszeitraumes, bedingt durch die höhere Produktion, wieder an.

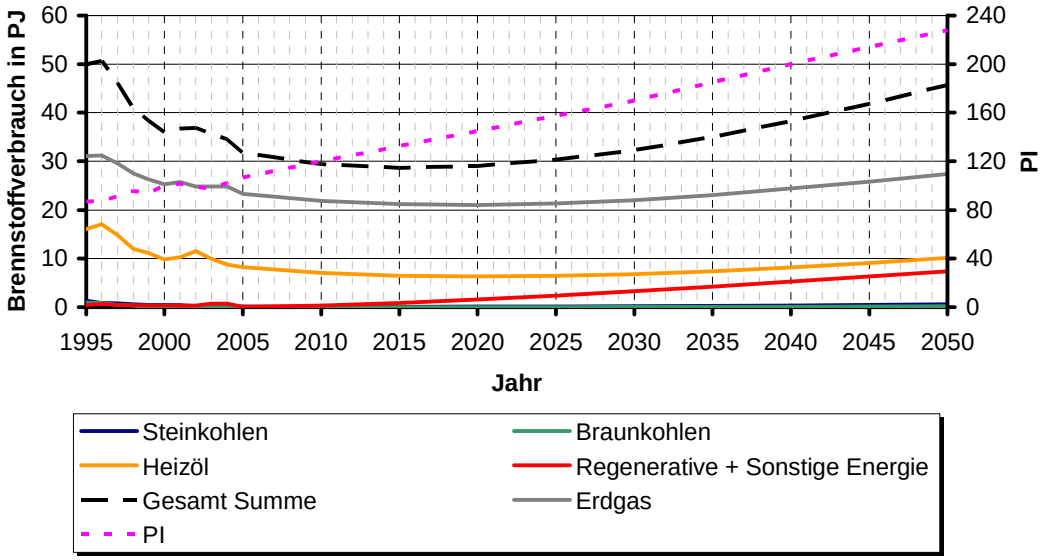

Abbildung 3-47: *Brennstoffverbrauch in der Maschinenbauindustrie in Szenario 2*

3.3.3.8 Restliche Sektoren

Die zusammengefassten übrigen Industriesektoren bieten wiederum ein breiteres Einsparpotenzial. Durch die Vielfältigkeit der Produktionsprozesse kann an vielen Stellen durch den Einsatz der besten verfügbaren Technik Energie eingespart werden. Aber auch hier wird es nicht zu einem ausgeprägten Rückgang des Energieverbrauches kommen, da in Deutschland bereits ein sehr hoher Effizienzstandard erreicht ist. Der Reduktion wirken darüber hinaus, wie in den übrigen Sektoren, die gesteigerten Qualitätsanforderungen an die Produkte entgegen. Der dadurch aufwändigere Produktionsprozess benötigt in der Regel mehr Energie.

Fortschreibung gesamt

Da es sich bei den restlichen Sektoren um die Zusammenfassung aller übrigen Industriezweige handelt, wird für den zukünftigen Energieverbrauch von einem Durchschnittswert bei der Einsparung ausgegangen. Durch den Einsatz der besten Technik können im Vergleich zu Szenario 1 ca. 14 % des Gesamtenergieverbrauches bis zum Jahr 2050 eingespart werden. Beim Stromverbrauch beträgt dieser Wert ca. 15 %, der Brennstoffverbrauch reduziert sich um etwa 11 %. Diese Werte errechnen sich aus den durchschnittlichen Energieeinsparungen der einzeln betrachteten Industriesektoren In **Abbildung 3-48** ist der prognostizierte Energieverbrauch für das Szenario 2 dargestellt.

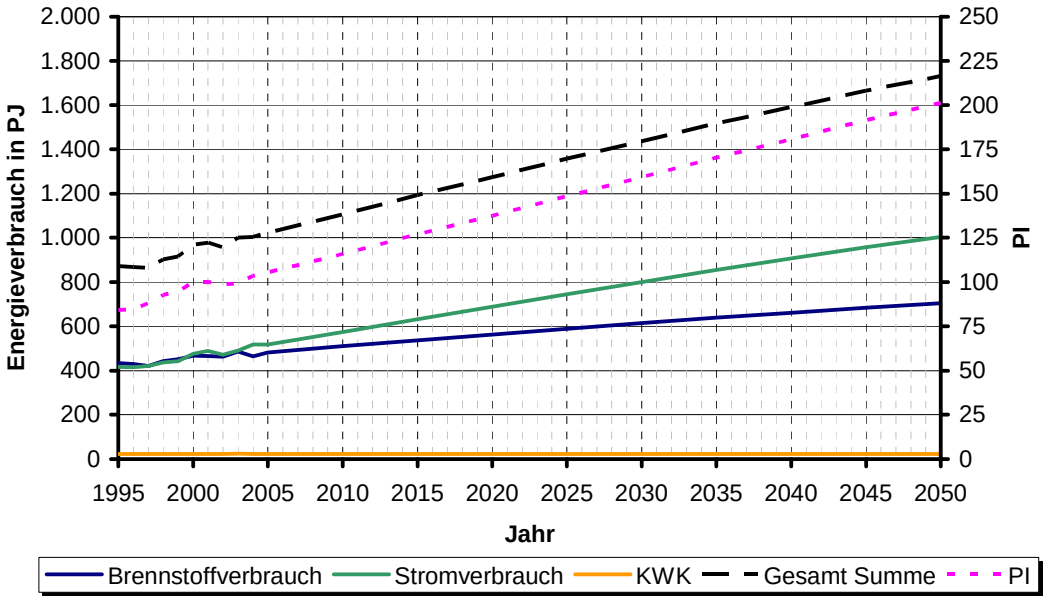

Abbildung 3-48: *Fortschreibung der restlichen Industrie in Szenario 2*

Fortschreibung Brennstoffe

In der restlichen Industrie ist ein deutlicher Anstieg in der Nutzung regenerativer (vgl. **Abbildung 3-49**) und sonstiger Energieträger zu verzeichnen. Vor allem der Bereich der Gebäudeklimatisierung durch erneuerbare Energien wird in Zukunft stark ausgebaut werden. Ebenso liegen die benötigten Prozesstemperaturen, anders als bei den einzeln betrachteten Industriezweigen, überwiegend im Bereich bis 200 °C. Auch in diesem Segment ist von einem breiten Einsatz regenerativer Energiequellen auszugehen. Der Verbrauch an Erdgas wird durch die deutliche Erhöhung der produzierten Menge an Gütern bis zum Jahr 2050 stetig zunehmen. Die Kohlen werden weiterhin nur in Nischenanwendungen zum Einsatz kommen, während beim Einsatz von Heizöl ein Rückgang zu verzeichnen ist.

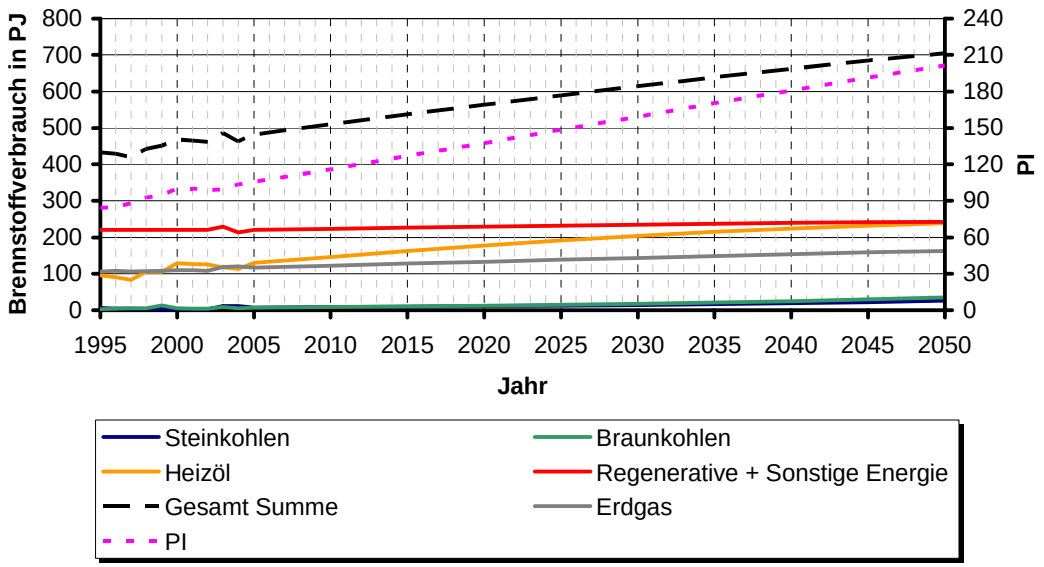

Abbildung 3-49: *Brennstoffverbrauch in der restlichen Industrie in Szenario 2*

3.3.3.9 Zusammenfassung Industrie – Szenario 2

Der Anstieg des Energieverbrauchs im Industriesektor wird sich durch den Einsatz der besten verfügbaren Technik um etwa 10 % reduzieren. Die Effekte aus Verbesserungen in der energetischen Effizienz der Produktionsabläufe werden zum Teil durch restriktivere Vorschriften beim Umweltschutz wieder kompensiert. Insgesamt bleibt festzuhalten, dass die Einsparpotenziale besonders in den energieintensiven Industriezweigen, wie Metallindustrie oder Chemieindustrie, höher liegen. In **Abbildung 3-50** ist der Gesamtenergieverbrauch, wie er nach den Vorgaben aus Szenario 2 zu erwarten ist, dargestellt. Deutlich erkennbar ist, dass auch durch den Einsatz der effizientesten Technik mit einem weiteren Anstieg – Erhöhung auf ca. 3.700 PJ im Jahr 2050 – des Bedarfes zu rechnen ist, obwohl der Mehrverbrauch nicht mehr so deutlich ausgeprägt ist, wie noch in Szenario 1 (ca. 4.200 PJ).

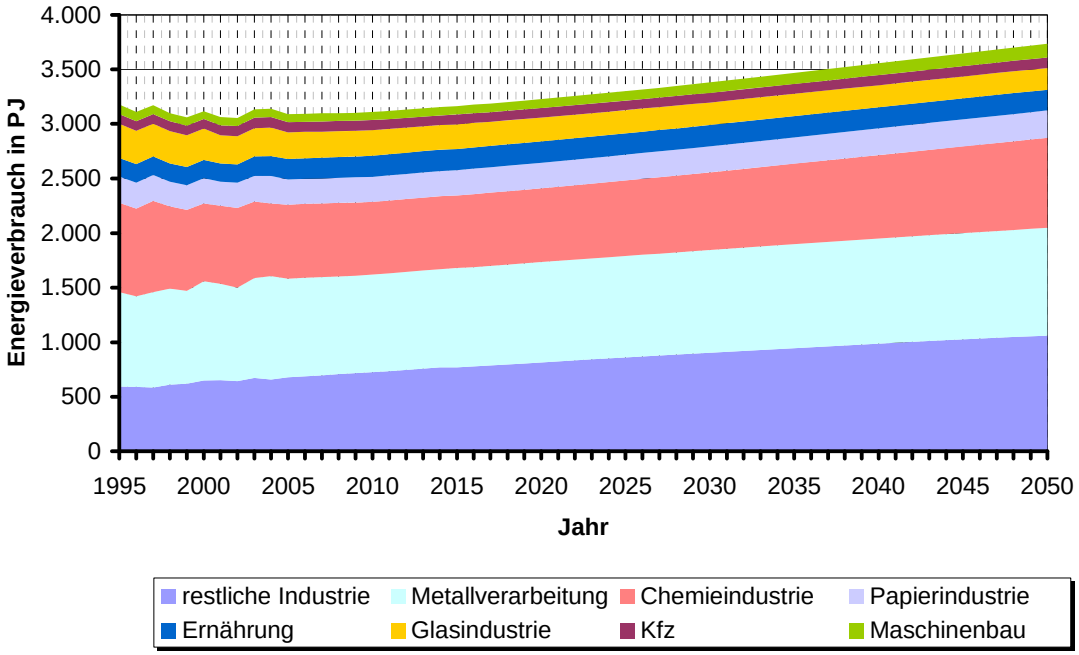

Abbildung 3-50: *Fortschreibung der Gesamtverbräuche in den Industriesektoren (Szenario 2)*

In **Abbildung 3-51** ist der Stromverbrauch aus Szenario 2 abgebildet. Es zeigt sich, dass der Bedarf an elektrischer Energie im Betrachtungszeitraum nicht, wie in Szenario 1, um 100 %, sondern nur mehr um ca. 75 % auf einen Wert von etwa 1.200 PJ ansteigt. Auf die beiden großen Industriezweige, die Metallverarbeitung und den Chemiesektor, entfallen ca. 42 % des gesamten Stromverbrauchs.

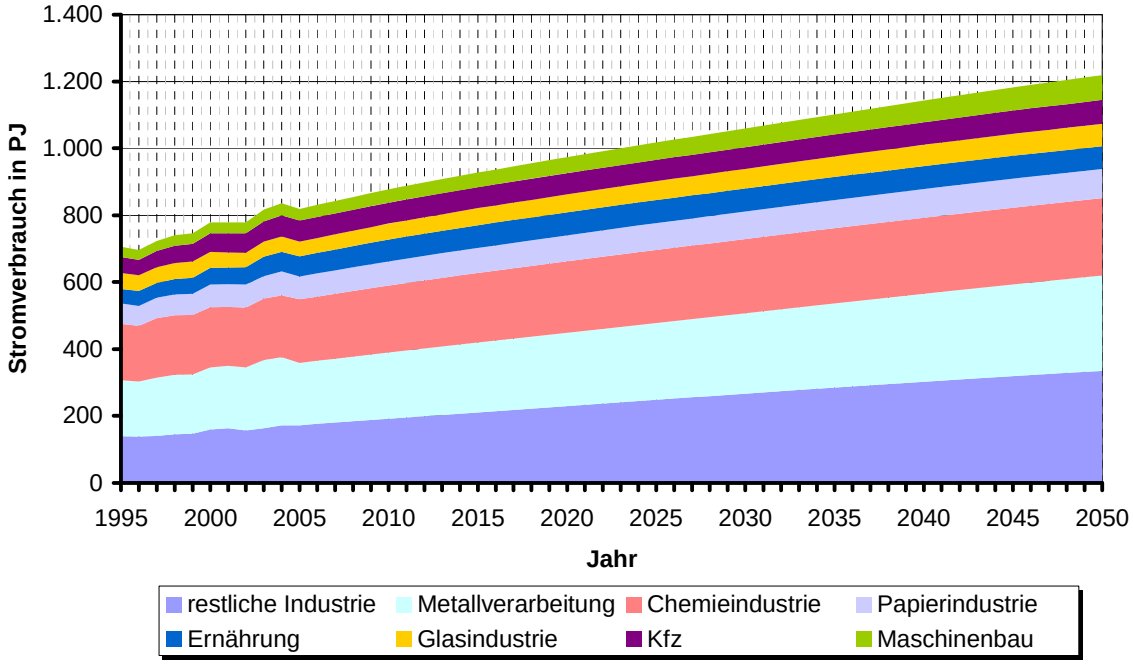

Abbildung 3-51: *Fortschreibung des Stromverbrauches in den Industriesektoren (Szenario 2)*

Abbildung 3-52 zeigt den Brennstoffverbrauch, aufgeteilt auf die verschiedenen Industriezweige. Durch die Einspareffekte aus dem Einsatz der besten verfügbaren Technik und der Substitution durch elektrische Energie wird der Verbrauch im Jahr 2050 in etwa auf dem Niveau des Jahres 1995 liegen. Bis 2020 ist sogar ein leichter Rückgang zu erwarten. Durch den steigenden PI nimmt der Verbrauch jedoch bis zum Ende des Betrachtungszeitraumes wieder zu. Von den 2.100 PJ aus Brennstoffen bereitgestellter Wärmeenergie entfallen etwa 32 % auf die Metallindustrie und 18 % auf den Chemiesektor. Somit nehmen diese beiden Industriezweige bereits die Hälfte des Brennstoffbedarfes ein.

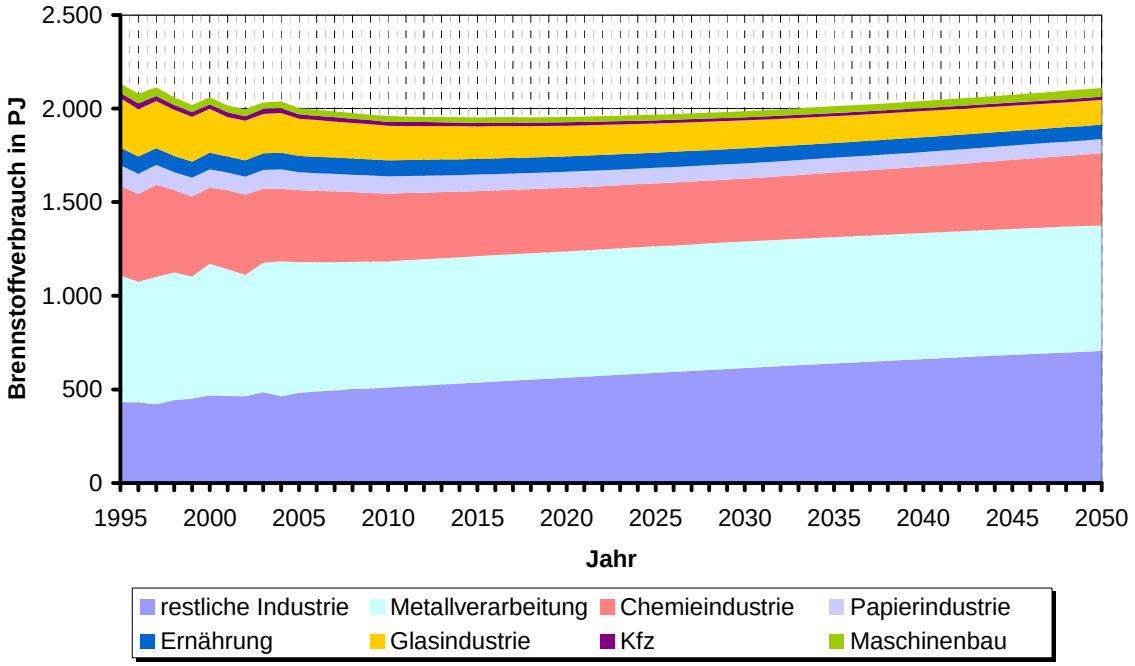

Abbildung 3-52: *Fortschreibung des Brennstoffverbrauches in den Industriesektoren (Szenario 2)*

3.4 Entwicklung im Sektor Verkehr

3.4.1 Maßgebliche Bedarfsdeterminanten

In diesem Szenario „Erhöhte Technikeffizienz“ werden im Wesentlichen die Wirkungsgrade der Antriebe und damit der spezifische Kraftstoffverbrauch variiert. Die Verkehrsleistung im Personen- und Güterverkehr sowie die anteilige Nutzung der verschiedenen Verkehrsarten sind in diesem Szenario unverändert gegenüber dem Referenzszenario. Eine Verlagerung beispielsweise von der Straße auf die Schiene wird nicht angenommen.

3.4.2 Technikstruktur

Straßenverkehr

Die erhöhte Technikeffizienz zeigt sich im Verkehrssektor zum einen in der schnelleren Umsetzung höherer Nutzungsgrade innerhalb der jeweiligen Antriebstechnik, zum anderen in der vermehrten Nutzung der energieeffizienteren Antriebsalternativen.

Abbildung 3-53 zeigt, dass die Nutzung von Benzin betriebenen Fahrzeugen im motorisierten Individualverkehr von ca. 82 % in 1995 auf 15 % reduziert wird. Die Angabe ist bezogen auf die Verkehrsleistung im motorisierten Individualverkehr und ist somit als der Anteil der Personenkilometer, die mit dieser Antriebstechnologie zurückgelegt werden, an der gesamten, im motorisierten Individualverkehr geleisteten Strecke zu verstehen. Der konventionelle Dieseltreibstoff erfährt einen ähnlich starken Rückgang von 18 % (1995) auf 10 % (2050). Dem gegenüber werden vermehrt Personenkilometer in alternativ betriebenen Fahrzeugen zurückgelegt. Biokraftstoffe steigern bis 2050 ihren Anteil gemäß dieses Szenarios auf 25 %. Die Verwendung von Elektrostraßen- und Wasserstoff betriebenen Fahrzeugen (Brennstoffzellenfahrzeuge) erhöht sich auf jeweils 20 %. Fahrzeuge mit Gasantrieb nehmen weniger deutlich auf 10 % zu. Gegenüber dem Referenzszenario bedeutet dies eine Verschiebung von Benzin und Diesel zugunsten von Biokraftstoffen, Strom und Wasserstoff.

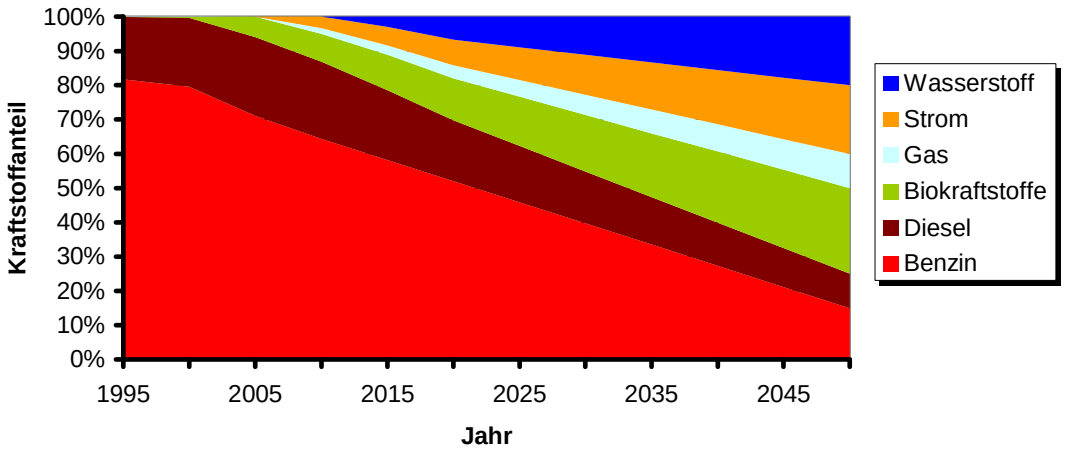

Abbildung 3-53: *Kraftstoffanteil bezüglich der Verkehrsleistung im motorisierten Individualverkehr (MIV)*

Im öffentlichen Personenverkehr (**Abbildung 3-54**) erfolgt ebenfalls eine Verlagerung von den klassischen Antriebskonzepten zu effizienteren Alternativen. Die aktuelle Dominanz der Dieselantriebe (2000: 99 %, 2050: 15 %) wird durch den Einsatz von Strom (2050: 35 %), Biokraftstoffen (2050: 25 %) und Wasserstoff (2050: 20 %) gebrochen. Durch die im öffentlichen Personenverkehr oft kürzeren Fahrstrecken und die gleichzeitig höhere Auslastung bieten sich diese Antriebsalternativen an.

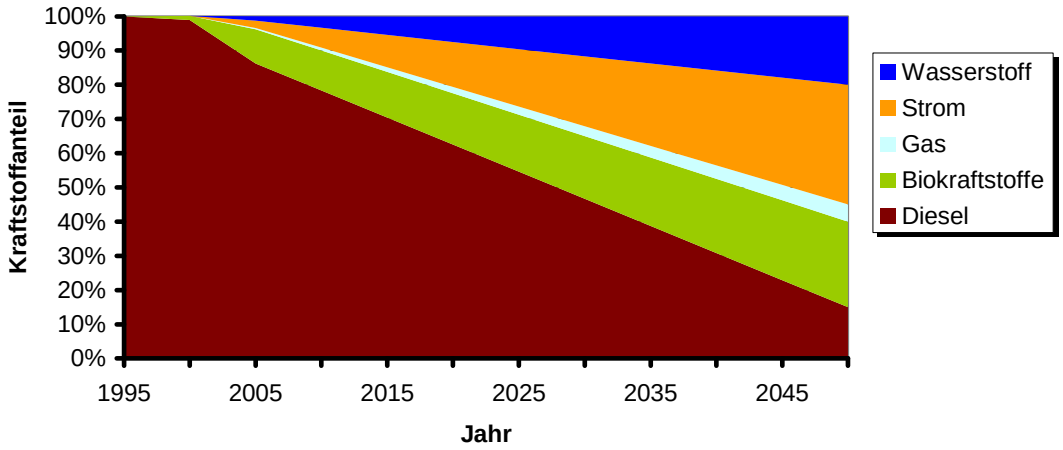

Abbildung 3-54: *Kraftstoffanteil bezüglich der Verkehrsleistung im öffentlichen Personenverkehr (ÖPV)*

Im Güterverkehr wird der Einsatz von Diesel (1995: 96 %, 2050: 30 %) vorrangig durch Wasserstoff (Brennstoffzellen, 2050: 30 %) und Biodiesel (2050: 25 %) abgelöst (**Abbildung 3-55**). Elektrostraßenfahrzeuge spielen im Güterstraßenverkehr eine untergeordnete Rolle (2050: 15 %) und bieten sich nur im Nahverkehr und bei geringer Transportlast an.

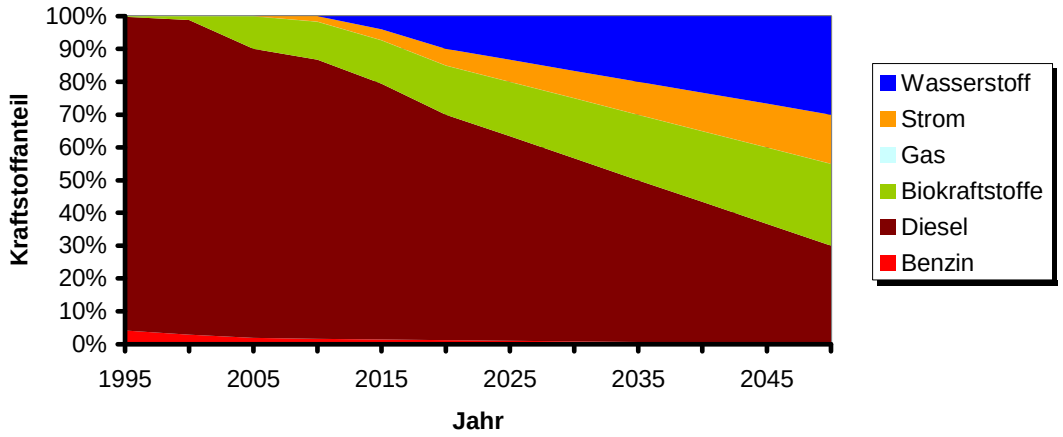

Abbildung 3-55: *Kraftstoffanteil bezüglich der Verkehrsleistung im Güterstraßenverkehr*

Die zweite Säule der Effizienzsteigerung ist eine Nutzungsgraderhöhung der einzelnen Antriebstechniken. Die Gegenüberstellung der kraftstoffbezogenen Verbrauchswerte für die Beförderungsleistung erlaubt die Ausweisung vergleichbarer Kennwerte für alle Fahrzeuge des Personenverkehrs. In **Abbildung 3-56** sind die Verbrauchswerte der verschiedenen Antriebstechniken im motorisierten Individualverkehr dargestellt. Für

Diesel- und Ottoprozesse wird im Zeitraum von 2005 bis 2050 ein Rückgang um 40 % angesetzt, für die vergleichsweise neue Etablierung der Elektrostraßenfahrzeuge sogar 56 %. Der Verbrauch von Brennstoffzellenfahrzeugen konnte in den letzten Jahren schon deutlich gesenkt werden, bis 2050 wird ein spezifischer Verbrauch unter 0,40 MJ/Pkm erwartet.

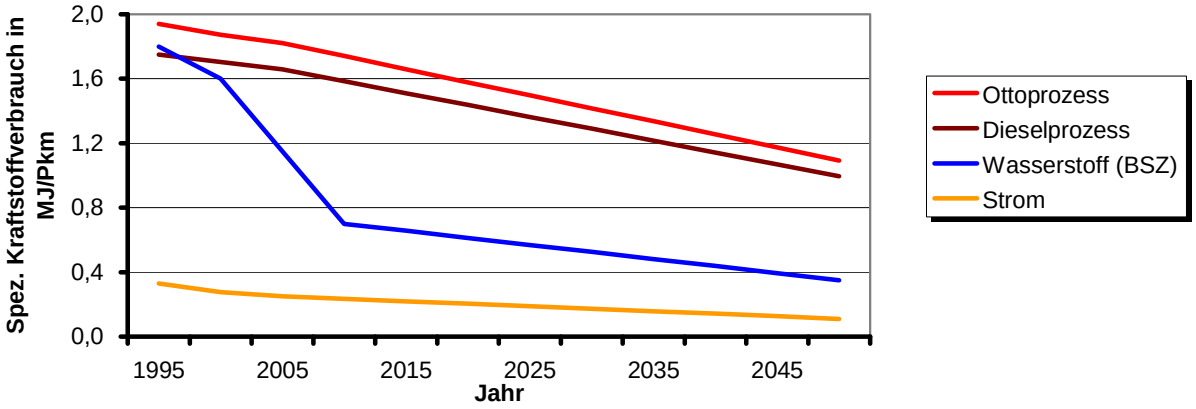

Abbildung 3-56: *Spezifischer Kraftstoffverbrauch im motorisierten Individualverkehr*

Die Verbrauchswerte im öffentlichen Personenverkehr unterscheiden sich gegenüber denen im motorisierten Individualverkehr vor allem durch den höheren Besetzungsgrad, so dass insgesamt günstigere Werte auftreten. Im Dieselprozess werden bis 2050 Werte von 0,51 MJ/Pkm, mit Brennstoffzellenfahrzeugen Werte von 0,18 MJ/Pkm und mit Elektrobussen Werte von 0,06 MJ/Pkm erreicht (vgl. **Abbildung 3-57**). Die Reduzierung des Verbrauchs erfolgt im gleichen Maß wie im motorisierten Individualverkehr.

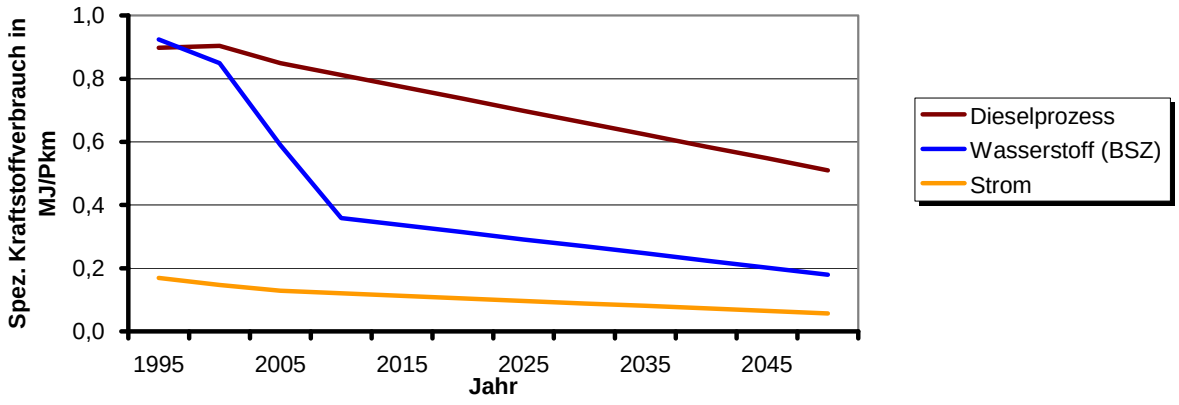

Abbildung 3-57: *Spezifischer Kraftstoffverbrauch im öffentlichen Personenverkehr*

Im Güterverkehr (vgl. **Abbildung 3-58**) wird der spezifische Kraftstoffverbrauch auf die Transportleistung (Tonnenkilometer tkm) bezogen. Im Dieselprozess werden bis 2050 Werte von 1,01 MJ/tkm, mit Brennstoffzellenfahrzeugen Werte von 0,36 MJ/tkm und mit Elektrobussen Werte von 0,11 MJ/tkm erreicht (vgl. Abbildung 3-57). Die Reduzierung des Verbrauchs erfolgt im gleichen Maß wie im motorisierten Individualverkehr.

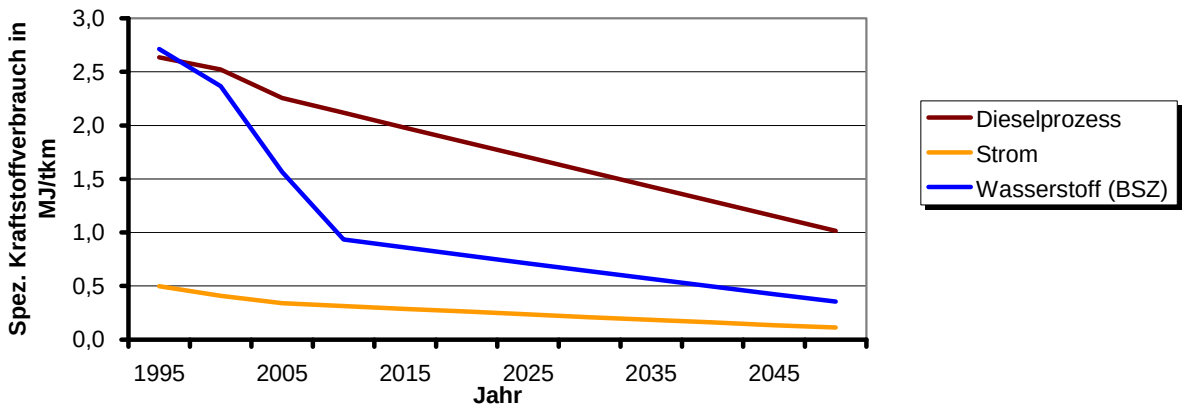

Abbildung 3-58: *Spezifischer Kraftstoffverbrauch im Güterstraßenverkehr*

Luftverkehr

Im Luftverkehr ist bis 2050 mit keiner alternativen Antriebstechnologie zu rechnen, der Gasturbinenantrieb wird weiterhin dominieren. Allerdings können die technischen Nutzungsgrade der Antriebe verbessert werden. Dies geschieht durch aerodynamische und antriebstechnische Maßnahmen sowie durch eine verbesserte Auslastung der Flugzeuge. In **Abbildung 3-59** ist die Entwicklung der Kraftstoffverbräuche im Personen- und Güterverkehr bis 2050 dargestellt. Zwischen 2005 und 2050 ist ein Verbrauchsrückgang um 45 % unterstellt.

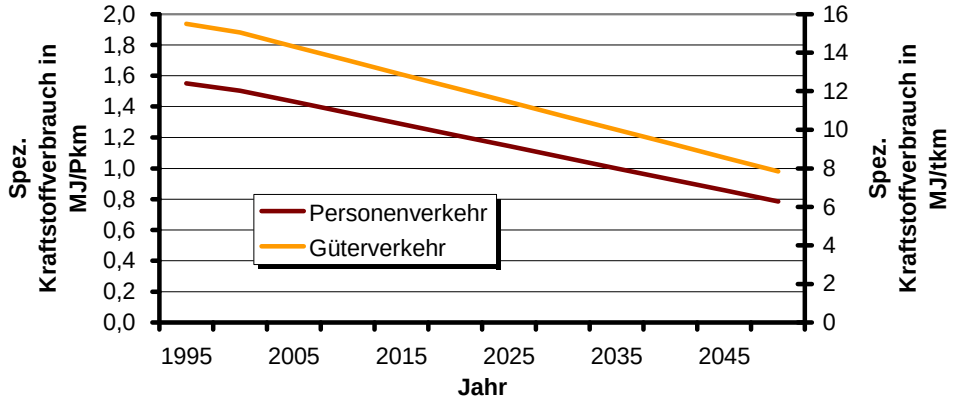

Abbildung 3-59: *Spezifischer Kraftstoffverbrauch im Luftverkehr*

Schienenverkehr

Der Schienenverkehr wird nach wie vor überwiegend durch elektrische Antriebe dominiert, der Anteil der Dieselantriebe wird wie im Referenzszenario eine marginale Rolle spielen. Der Rückgang der Kraftstoffverbräuche im Personen- (**Abbildung 3-60**) und Güterverkehr (**Abbildung 3-61**) wird durch eine erhöhte Zugauslastung sowie durch verbesserte Zugtechnik realisiert. Im Zeitraum von 2005 bis 2050 wird in diesem Szenario eine Reduzierung um 30 % angenommen.

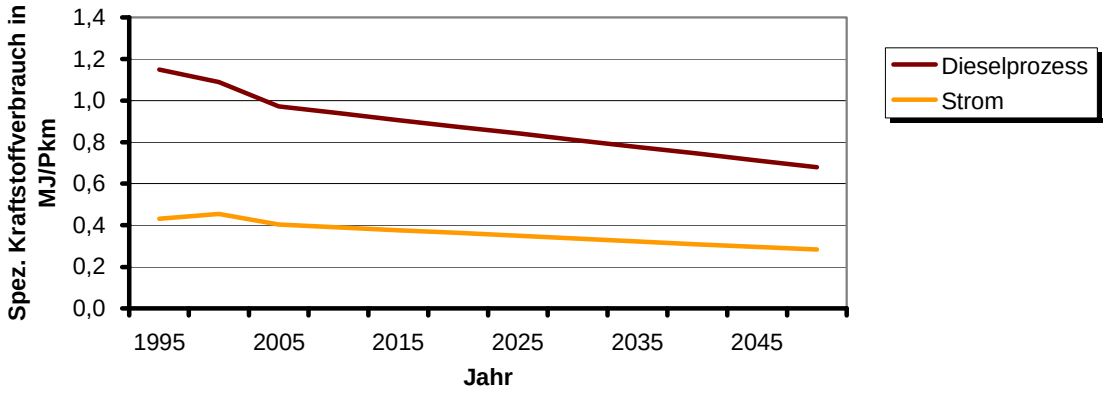

Abbildung 3-60: *Spezifischer Kraftstoffverbrauch im Personenschienenverkehr*

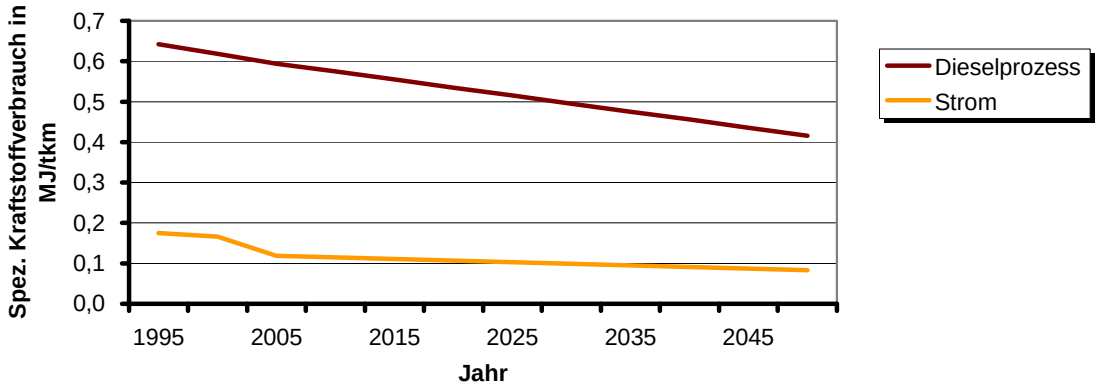

Abbildung 3-61: *Spezifischer Kraftstoffverbrauch im Güterschienenverkehr*

Schiffsverkehr

In der Schifffahrt ist eine Öl betriebene Gasturbine als Alternative zum klassischen Schiffsdiesel denkbar. Aufgrund der hohen Auslastung sind die heutigen Antriebe schon sehr ausgereift. Eine Reduzierung des Verbrauchs bis 2050 um 18 % gegenüber 2005 wird in diesem Szenario angesetzt (vgl. **Abbildung 3-62**).

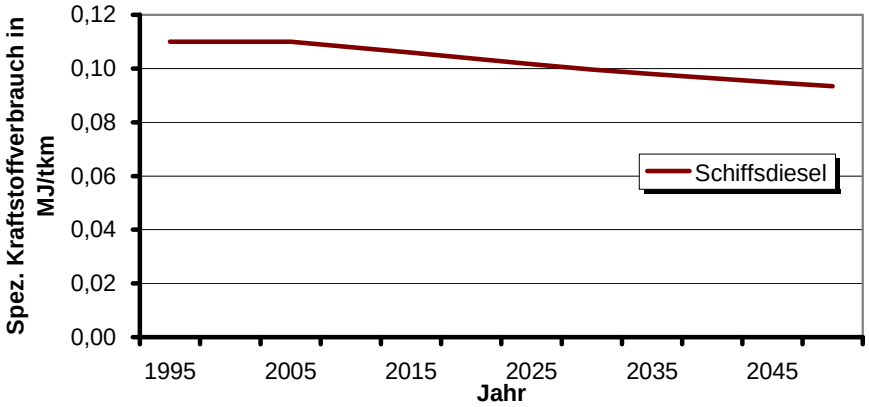

Abbildung 3-62: *Spezifischer Kraftstoffverbrauch im Schiffsverkehr*

3.4.3 Endenergieverbrauch

Der Endenergieverbrauch im Verkehrssektor ergibt sich aus der Verkehrsleistung und dem spezifischen Verbrauch der jeweiligen Verkehrsträger. Die Verkehrsleistungen im Personen- und Güterverkehr sind in diesem Szenario identisch mit denen des Referenzszenarios, die Technikstruktur ist gegenüber dem Referenzszenario wie in Kapitel 3.4.2 beschrieben verbessert.

Straßenverkehr

Der Endenergieverbrauch im Personenstraßenverkehr weist einen starken Rückgang auf (**Abbildung 3-63**). Folgende Faktoren sind in diesem Szenario für den sinkenden Verbrauch von 1.650 PJ(2005) auf 540 PJ(2050) verantwortlich:

- Rückgang der Beförderungsleistung aufgrund der Bevölkerungsentwicklung (unveränderte Annahme des Refernszenarios)
- Geringerer spezifischer Verbrauch durch Effizienzsteigerung und höhere Auslastungen
- Vermehrte Nutzung effizienterer Antriebstechnologien, Verdrängung von Diesel- und Ottomotoren durch Elektro- und Brennstoffzellenfahrzeuge

Durch die hohe Energieffizienz der Elektro- und Brennstoffzellenfahrzeuge treten deren Endenergieverbrauch in Abbildung 3-63 kaum in Erscheinung, obwohl durch beide Technologien jeweils rund 20 % der Beförderungsleistung erbracht werden. In 2050 setzt sich der gesamte Kraftstoffverbrauch des Personenstraßenverkehrs aus Biokraftstoffen (35 %), Benzin (23 %), Diesel (15 %), Erdgas (14 %), Wasserstoff (10 %) und Strom (3 %) zusammen.

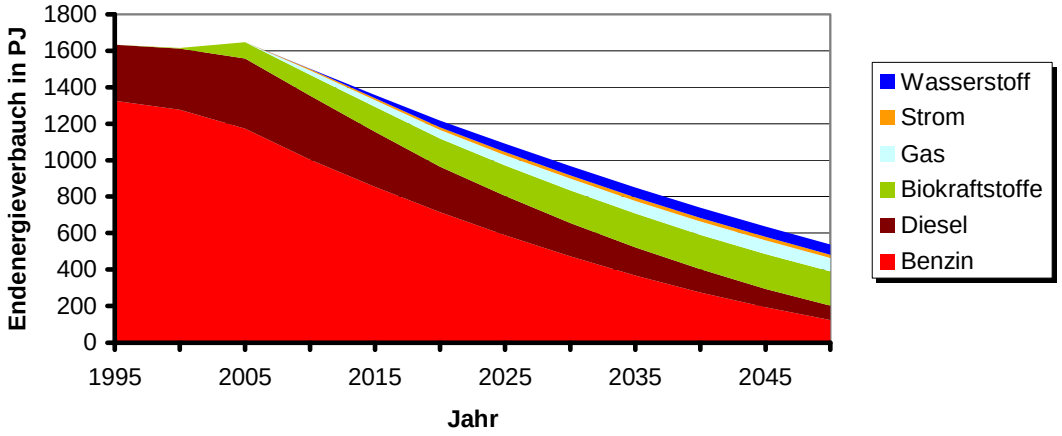

Abbildung 3-63: *Kraftstoffverbrauch im Personenverkehr*

Im Güterverkehr überlagern sich ähnlich wie im Personenverkehr die Effekte aus einer gemäßigten Entwicklung des Transportaufkommens, einer Verbesserung der jeweiligen Antriebstechnik sowie aus einem Wechsel zu den sehr effizienten Antriebstechniken der Brennstoffzellen und – soweit möglich im Güterverkehr – der Elektrostraßenfahrzeuge (**Abbildung 3-64**). Gegenüber 2005 wird somit in 2050 eine Reduzierung um 31 % erreicht, die Zusammensetzung der Kraftstoffe erfolgt zukünftig aus Diesel (45 %), Biokraftstoffen (37 %), Wasserstoff (16 %) und Strom (2 %). Bemerkenswert ist hierbei, dass die Wasserstoff betriebenen Fahrzeuge 30 % der Transportleistung übernehmen, die elektrisch angetriebenen Fahrzeuge 15 %.

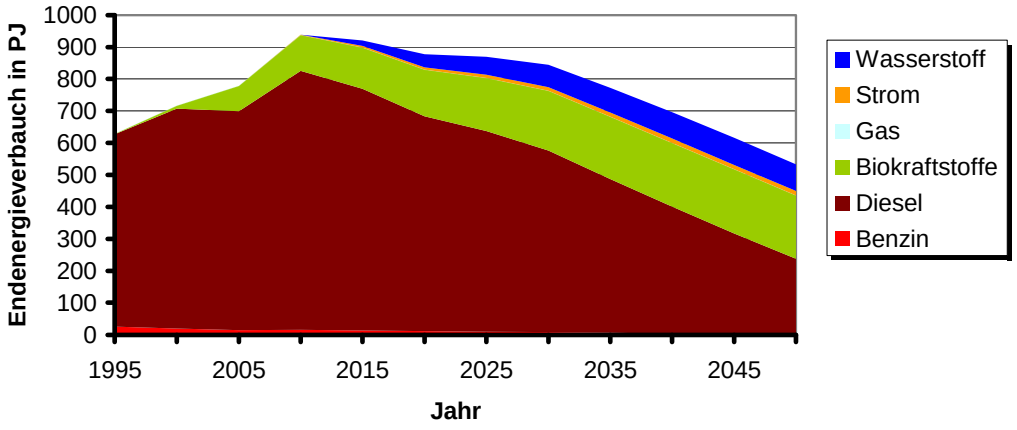

Abbildung 3-64: *Kraftstoffverbrauch im Güterverkehr*

Die im Straßenverkehr insgesamt umgesetzte Energie und dessen Bestandteile in Form des Güterstraßenverkehrs (GSV), des motorisierten Individualverkehrs (MIV) sowie des öffentlichen Personenverkehrs (ÖPV) sind in **Abbildung 3-65** dargestellt. Der Endenergieverbrauch im ÖPV ist gegenüber dem GSV und dem MIV von untergeordneter Rolle. Insgesamt reduziert sich der Verbrauch von 2.425 PJ (2005) auf 1.070 PJ (2050) und verringert sich damit um 56 %.

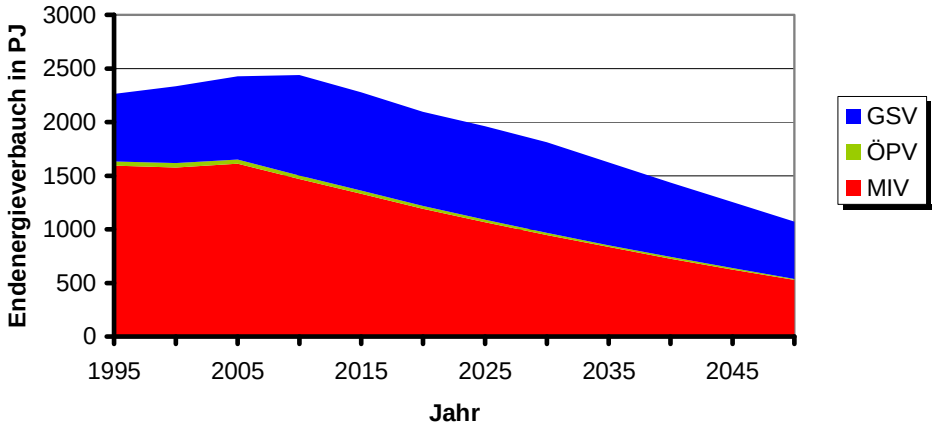

Abbildung 3-65: *Kraftstoffverbrauch im Straßenverkehr*

Luftverkehr

Im Luftverkehr steigt der Energieverbrauch bis 2050 weiter an, die Effizienzverbesserungen können die Zunahme der Verkehrsleistung nicht kompensieren (**Abbildung 3-66**). Während der dem Personenverkehr zuzurechnende Verbrauch nur mäßig von 241 PJ (2005) auf 306 PJ (Zunahme von 2005 bis 2050 um 27 %) steigt, entwickelt sich der Güterverkehr dynamischer (2005: 103 PJ, 2050: 281 PJ, Zunahme 174 %). In Summe steigt der Verbrauch von 2005 bis 2050 um ca. 70 %.

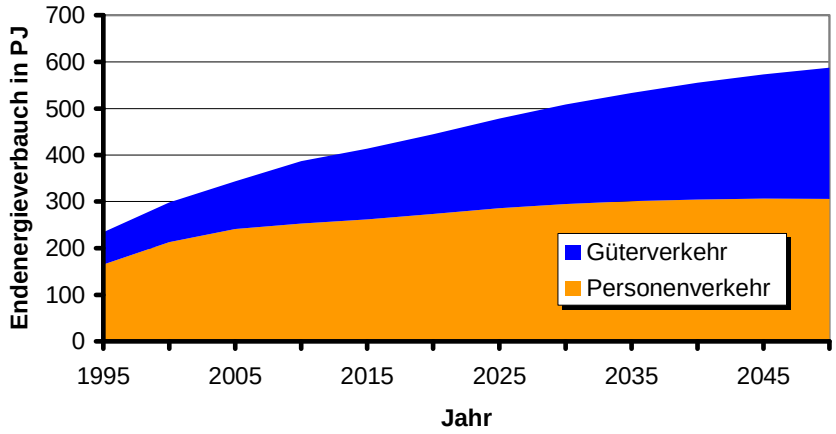

Abbildung 3-66: *Endenergieverbrauch im Luftverkehr*

Schienenverkehr

Der Schienenverkehr (**Abbildung 3-67**) nimmt hinsichtlich des Energieverbrauchs eine untergeordnete Rolle ein. Die Steigerung der Effizienz und der Auslastung kann die moderat wachsende Verkehrsleistung des Schienenverkehrs ausgleichen und sogar überkompensieren. Der Endenergieverbrauch der Diesel betriebenen Fahrzeuge ist vergleichsweise hoch, obwohl in 2050 nur 7 % des Personenverkehrs und 4 % des Güterverkehrs mit diesen Fahrzeugen bewältigt wird. Im Zeitraum von 2005 bis 2050 reduziert sich der Verbrauch um 20 %.

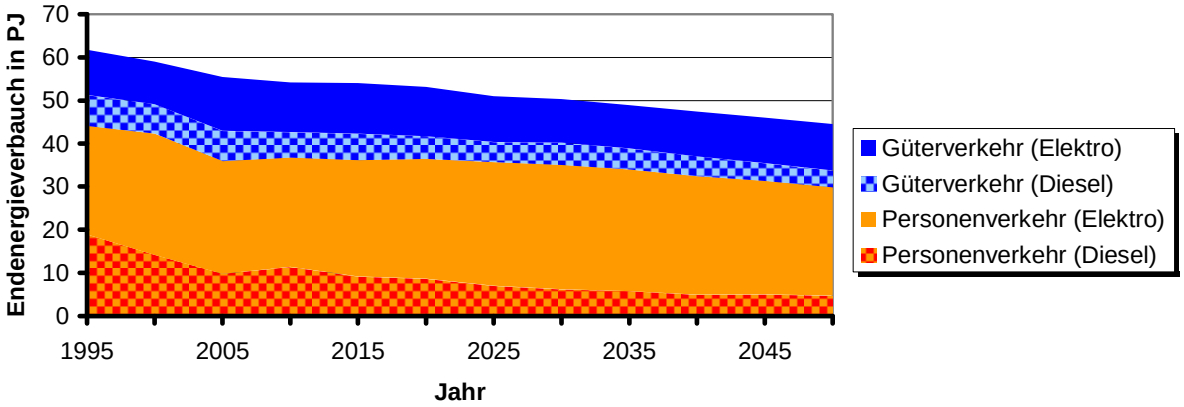

Abbildung 3-67: *Endenergieverbrauch im Schienenverkehr*

Schiffsverkehr

Der Endenergieverbrauch des Schiffsverkehrs ist vergleichsweise gering. Die Effizienzverbesserung überwiegt die moderat steigende Verkehrsleistung. Zwischen 2005 und 2050 reduziert sich der Verbrauch um 28 % (**Abbildung 3-68**).

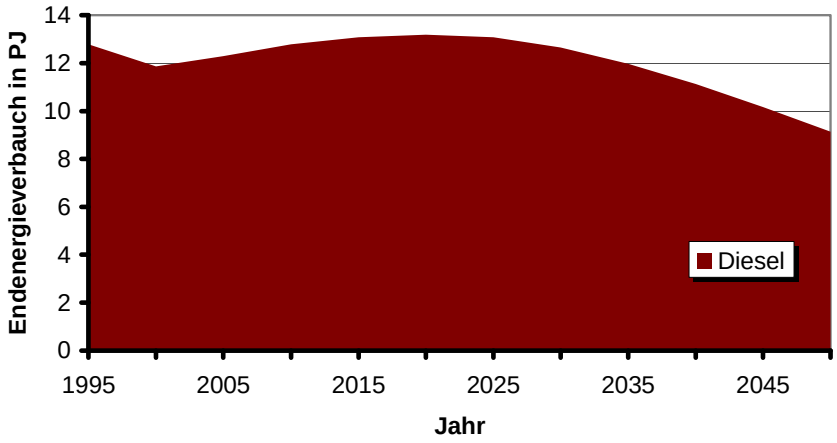

Abbildung 3-68: *Endenergieverbrauch im Schiffsverkehr*

Zusammenfassung des Verkehrssektors

Der gesamte Endenergieverbrauch kann durch Effizienzverbesserungsmaßnahmen erheblich reduziert werden (**Abbildung 3-69**). Die Verbrauchsspitze in 2010 beträgt mit ca. 2,9 EJ einen nur leicht geringeren Wert als im Referenzszenario (3,0 EJ), der folgende Rückgang bis 2050 ist hingegen deutlich ausgeprägter. Im Jahr 2050 wird ein Gesamtverbrauch von ca. 1,7 EJ erreicht, gegenüber dem Höchstwert in 2010 ist dies eine Reduzierung um 41 %. Am deutlichsten wird der Verbrauch des Personenstraßenverkehrs und des Güterstraßenverkehrs reduziert. Der Energieeinsatz für den Luftverkehr nimmt stetig zu und übertrifft 2050 den Verbrauch des motorisierten Individualverkehrs. Die Schifffahrt, der Schienenverkehr und der öffentliche Straßenverkehr sind hinsichtlich des Endenergieverbrauchs von untergeordneter Bedeutung.

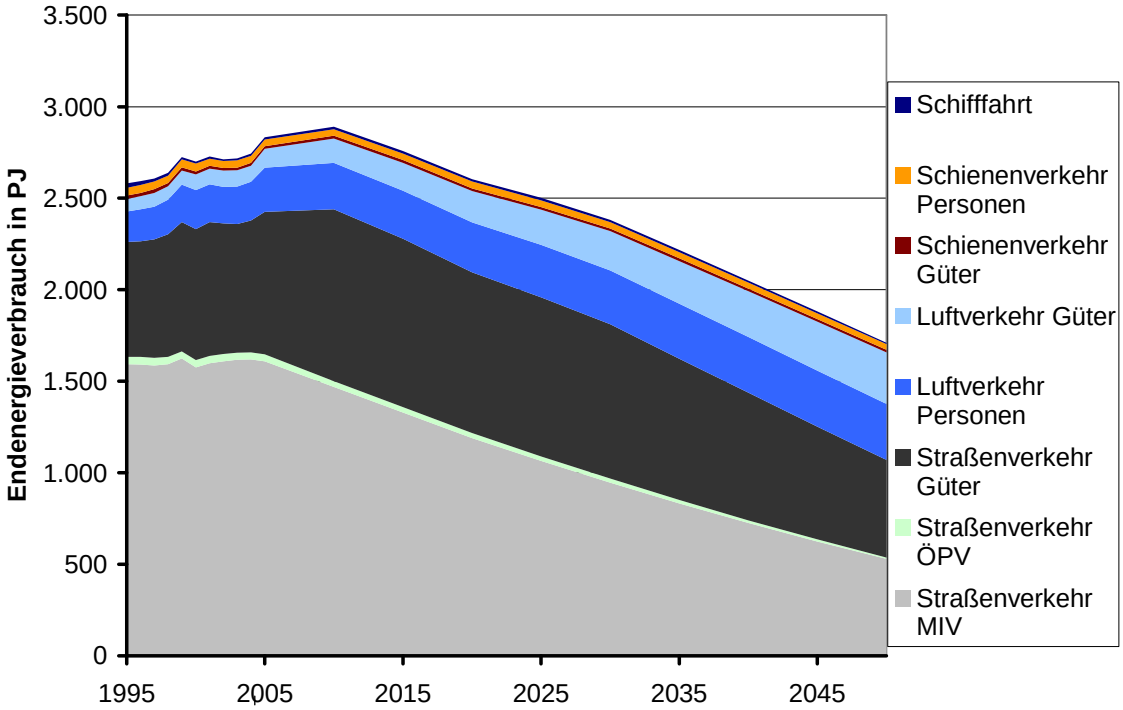

Abbildung 3-69: *Endenergieverbrauch im Verkehrssektor nach Verkehrsträgern*

Die Zusammensetzung des Endenergieverbrauchs nach Energieträgern ist in **Abbildung 3-70** dargestellt. Auffallend ist der Rückgang des Diesel- und Benzineinsatzes, der im Jahr 2005 den gesamten Verbrauch dominiert. Dieser wird durch Biokraftstoffe, Strom, Erd- und Flüssiggas sowie Wasserstoff abgelöst. Zu dieser Darstellung ist anzumerken, dass besonders für die Bereitstellung der Energieträger Wasserstoff und Strom ein großer energetischer Aufwand im Umwandlungssektor geleistet werden muss. In 2050 setzt sich der Kraftstoffverbrauch des Verkehrsektors wie folgt zusammen: Flugtreibstoffe (34 %), Biokraftstoffe (23 %), Diesel (19 %), Benzin (7 %), Wasserstoff (8 %), Erd- und Flüssiggas (4 %), Strom (4 %).

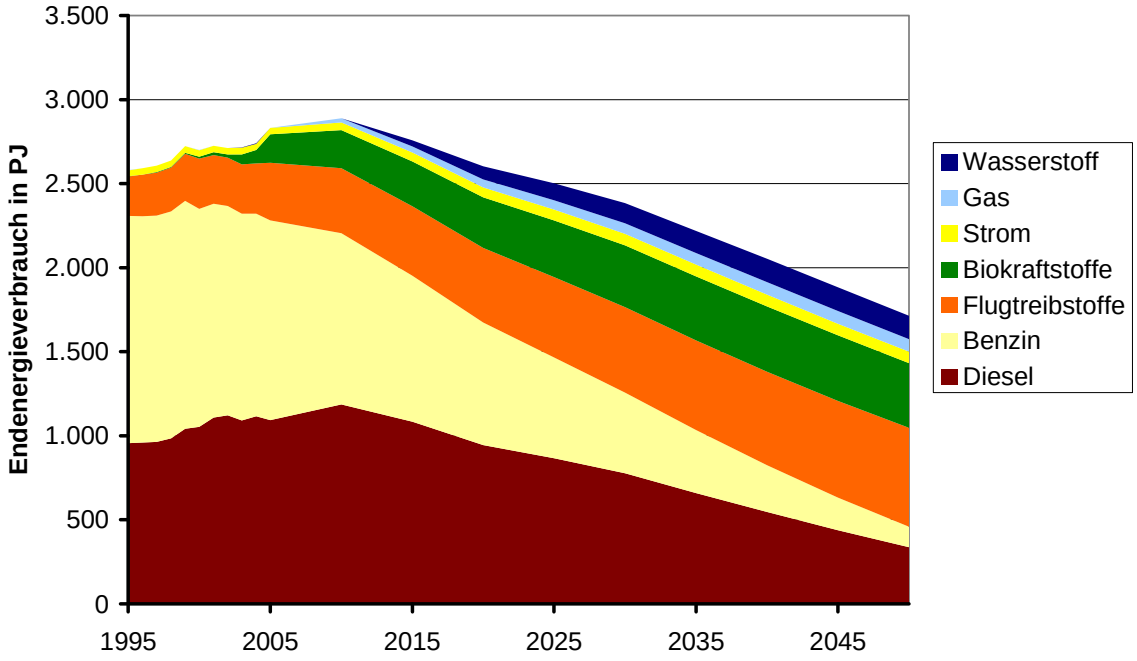

Abbildung 3-70: *Endenergieverbrauch im Verkehrssektor nach Energieträgern*

3.5 Entwicklung im Umwandlungssektor

3.5.1 Technikstruktur und Parameter

Gegenüber Szenario 1 steigt im Szenario „Erhöhte Technikeffizienz“ sowohl die Fern- und Nahwärmenachfrage als auch der Anteil der regenerativen Energien an der Stromerzeugung. In **Abbildung 3-71** ist die Wärmebereitstellung im Umwandlungssektor auf Basis der geänderten Bedarfsdeterminanten bis zum Jahr 2050 dargestellt. Demnach sinkt die Wärmebereitstellung im Umwandlungssektor ab 2030.

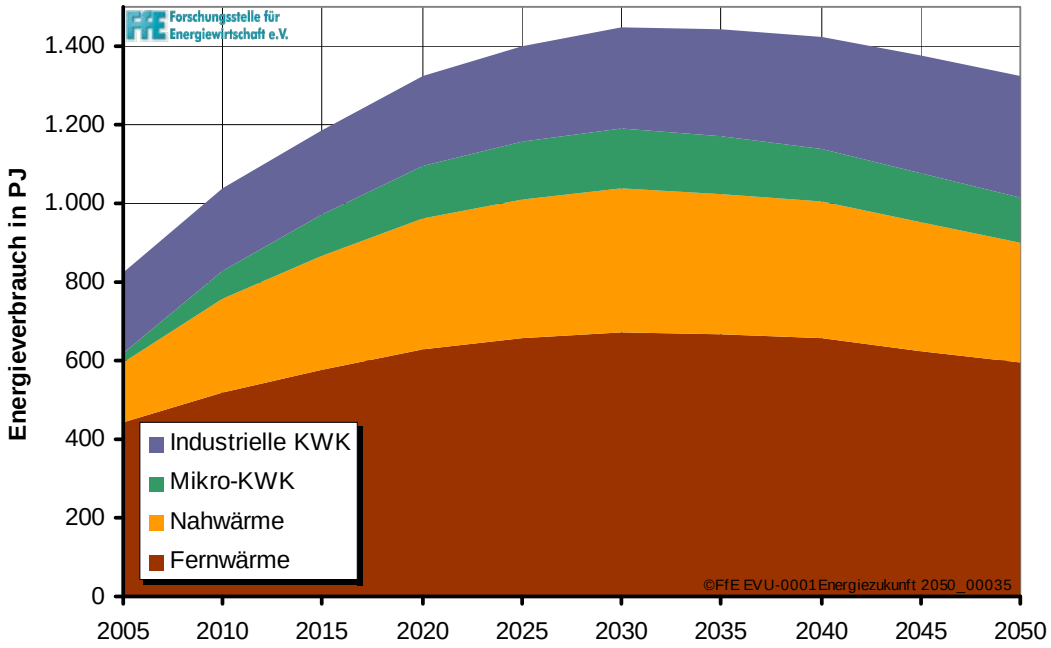

Abbildung 3-71: *Entwicklung der Wärmebereitstellung im Umwandlungssektor*

In **Abbildung 3-72** ist die aus der Wärmenachfrage abgeleitete KWK-Stromerzeugung für Szenario 2 dargestellt. Bis 2030 nimmt der KWK-Anteil beinahe linear auf 32 % zu, um sich gegen Ende des Betrachtungszeitraums konstant auf ca. 34 % einzustellen. Dies entspricht einer absoluten Stromerzeugung aus KWK-Anlagen von etwa 200 TWh. Das im Integrierten Energie- und Klimaprogramm der Bundesregierung /IEKP-01 07/ formulierte Ziel einer Verdoppelung der KWK-Stromerzeugung bis zum Jahr 2020 wird mit der angenommenen Entwicklung erreicht.

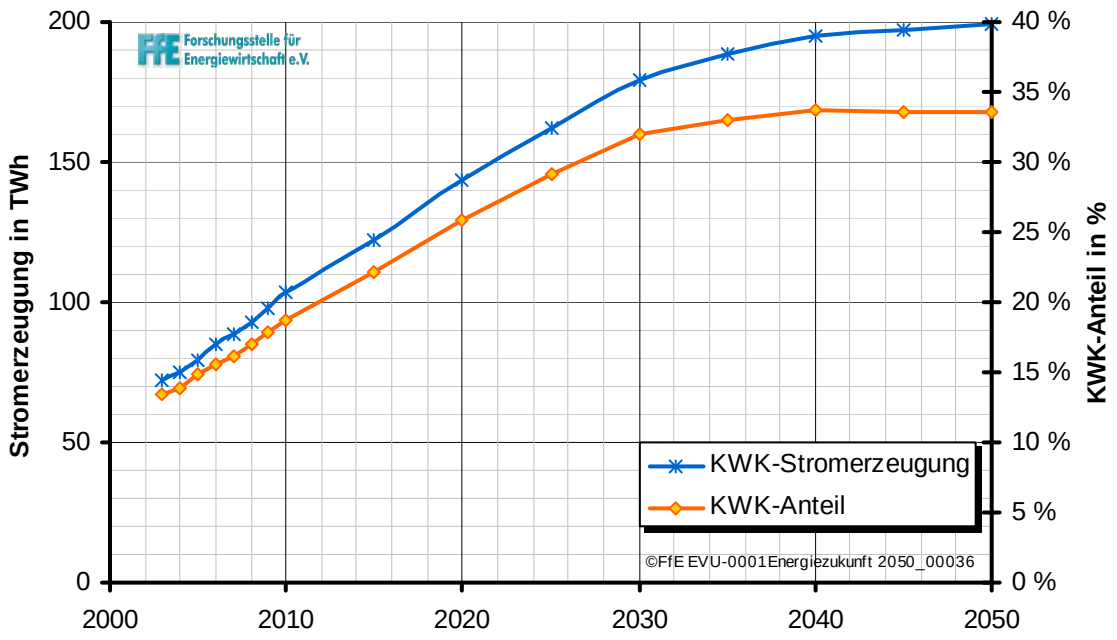

Abbildung 3-72: *Entwicklung der KWK-Stromerzeugung und des KWK-Anteils in Szenario 2*

Der Stromverbrauch der Anwendungssektoren bleibt, wie in **Abbildung 3-73** gezeigt, bei etwa 500 TWh nahezu konstant. Die Bruttostromerzeugung steigt demgegenüber ab dem Jahr 2025 kontinuierlich an, da im Verkehrssektor vermehrt Wasserstoff aus Elektrolyse eingesetzt wird.

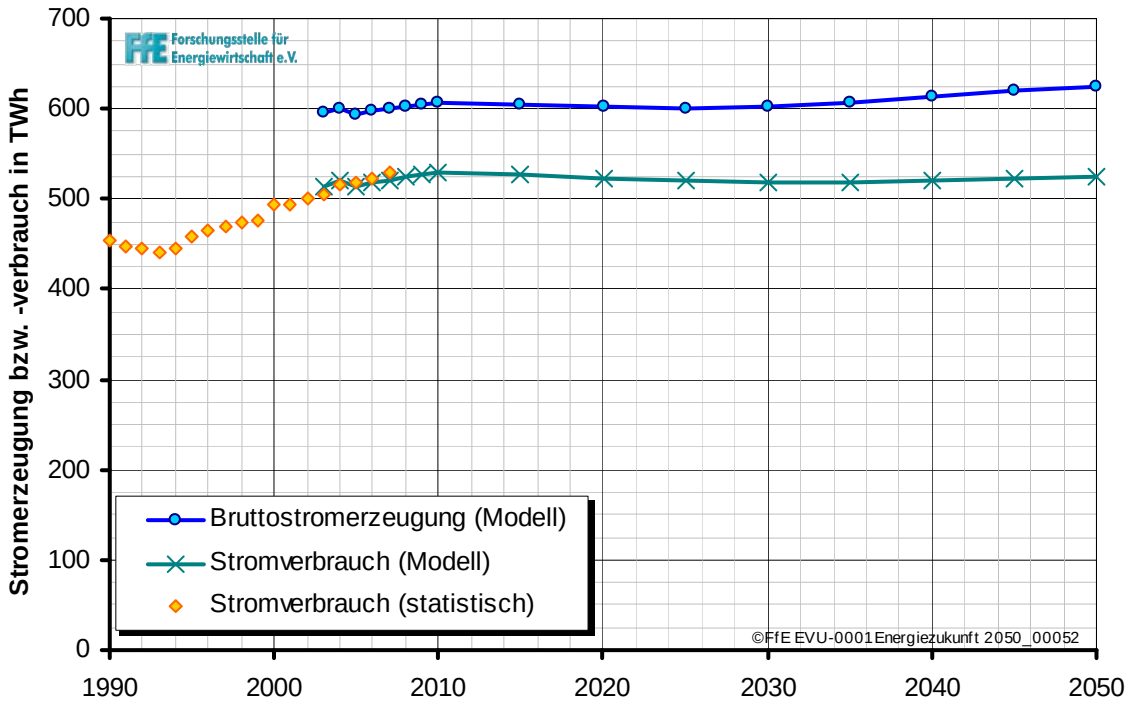

Abbildung 3-73: *Entwicklung des Stromverbrauchs und der Bruttostromerzeugung in Szenario 2 /AGEB 08/, /eigene Berechnungen/*

Die regenerative Stromerzeugung, die zusammen mit der KWK-Erzeugung in **Abbildung 3-74** gezeigt ist, steigt stärker als in Szenario 1 an.

Die Stromerzeugung der „must-run"-Anlagen erhöht sich in Szenario 2 bis 2050 um mehr als das Vierfache gegenüber 2003 und um etwa das 3,4-fache gegenüber 2005. Gegenüber der Referenzentwicklung kann Geothermie einen merklichen Anteil zur Gesamterzeugung beitragen. Bei den übrigen regenerativen Energieträgern wird sich der Ausbau mit der Zeit verlangsamen, da sich die Ausbaupotenziale erschöpfen bzw. schwerer zu erschließen sind. Mit knapp unter 60 % wird Wind im Jahr 2050 den weitaus größten Anteil an der regenerativen Stromerzeugung aufweisen.

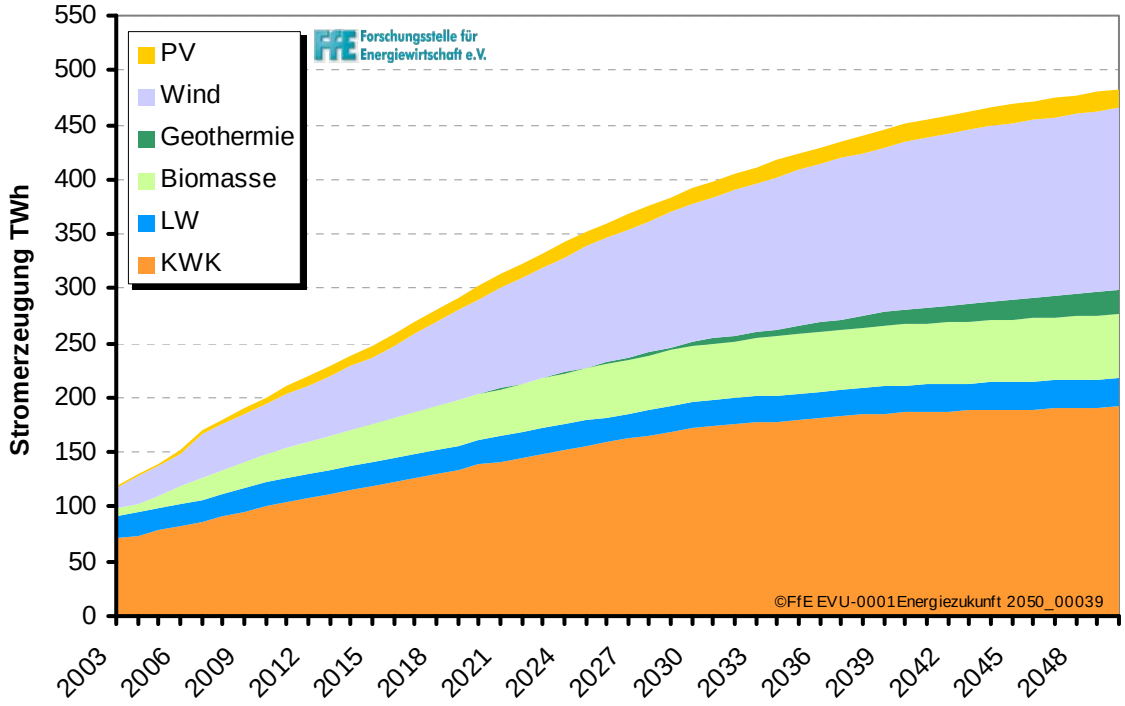

Abbildung 3-74: *Entwicklung der Stromerzeugung aus „must-run"-Anlagen in Szenario 2*

Mit dem stärkeren Ausbau der gesetzten Erzeugung wird auch eine höhere Speicherleistung von 18 GW im Modell vorgesehen. In **Abbildung 3-75** ist zu erkennen, dass im Jahr 2050 in etwa 2.000 h mehr Erzeugungsleistung am Netz ist, als benötigt wird. Die gespeicherte Energie kann mit der angesetzten Speichertechnologie – einem Mix aus Pump- und Druckluftspeicherkraftwerken – mehr als 3.000 h lang zur Ausregelung von Lastspitzen verwendet werden. Die geordnete Jahresdauerlinie wird dadurch geglättet und die maximale Leistung, die durch die reinen Kraftwerke bereitgestellt werden muss, sinkt auf etwa 35 GW.

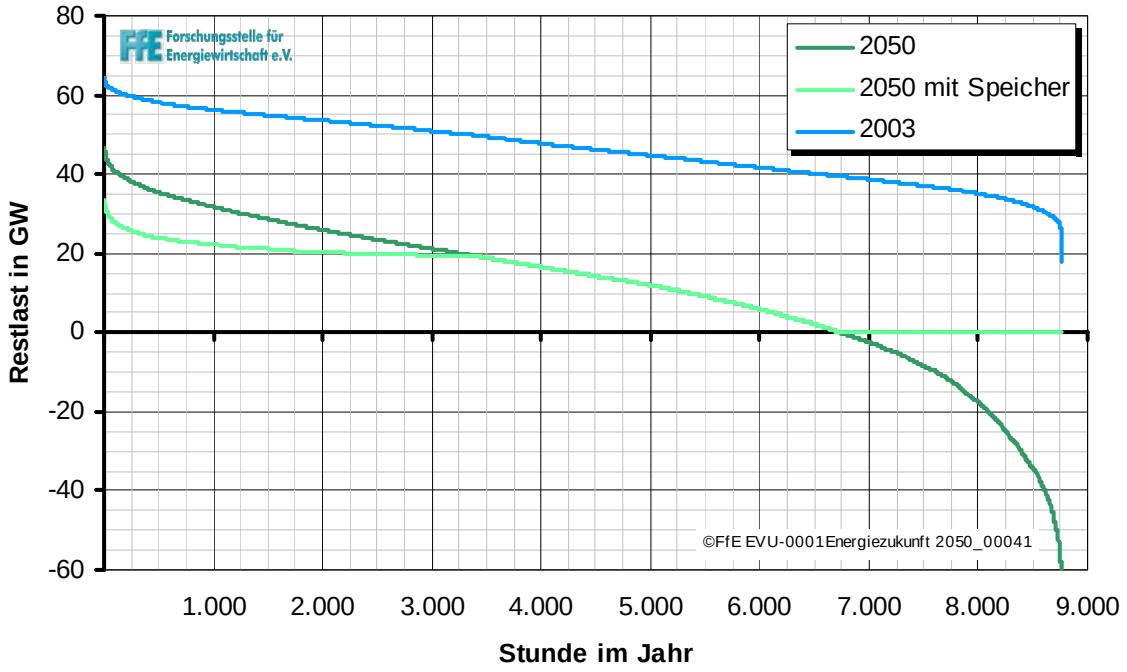

Abbildung 3-75: *Geordnete Jahresdauerlinie der zu deckenden Restlast in Szenario 2*

Die so erzeugten Jahresdauerlinien jedes Jahres werden von ifeon verwendet, um den Kraftwerkseinsatz zu simulieren und den Kraftwerkszubau für Szenario 2 zu berechnen.

In Szenario 2 wird gegenüber Szenario 1 von einer Verlängerung der Kernenergienutzung ausgegangen. Die Laufzeit verlängert sich dabei auf die ursprünglich projektierten 40 Jahre Lebensdauer. Ab 2020 können von ifeon neue Kernkraftwerke eingesetzt werden, wenn sich ihr Bau als wirtschaftlich erweist. Die Annahme der Verfügbarkeit von neu zu bauenden Kernkraftwerken orientiert sich an den Bauzeiten von 6 bis 9 Jahren der Kraftwerke in Olkiluoto und Flamanville sowie einem Zuschlag von 3 bis 4 Jahren für Planung und Genehmigung.

Um dem Aspekt einer früheren Einführung effizienterer Technik gemäß der Szenario-Definition gerecht zu werden, wird zudem die Verfügbarkeit der 700 °C-Technologie für Kohleverstromung für das Jahr 2020 angenommen. Ab 2025 kann das Modell CO_2-Abtrennung und Speicherung einplanen. Der Abscheidegrad von CO_2 für diese Technologie wurde mit 85 % angesetzt.

Abbildung 3-76 zeigt das Ergebnis der Optimierungsrechnung für den Kraftwerkspark der reinen Stromerzeugung. Durch die steigenden CO_2-Preise geht der Anteil der Braunkohlen stark zurück. Da bereits bei der Lastgangsynthese eine Speicherung vorgesehen wurde, wird auch der Anteil von Erdgas an der reinen Stromerzeugung zurückgehen. Insgesamt spielt Gas jedoch auch weiterhin eine tragende Rolle beim Einsatz in GuD-KWK-Anlagen. Unter den gesetzten Rahmenbedingungen – bei einer Laufzeitverlängerung der bestehenden Kernkraftwerke und der Option eines Neubaus – lässt sich die Investition in CCS-Technologie nicht wirtschaftlich darstellen. Lediglich zum Ende des Betrachtungszeitraumes wird ein CO_2-armes Braunkohlekraftwerk in Betrieb genommen. Im Jahr 2050 teilt sich der Brennstoffeinsatz zur Stromerzeugung dadurch nahezu zu 50 % auf Kernenergie und zu 50 % auf Steinkohle auf.

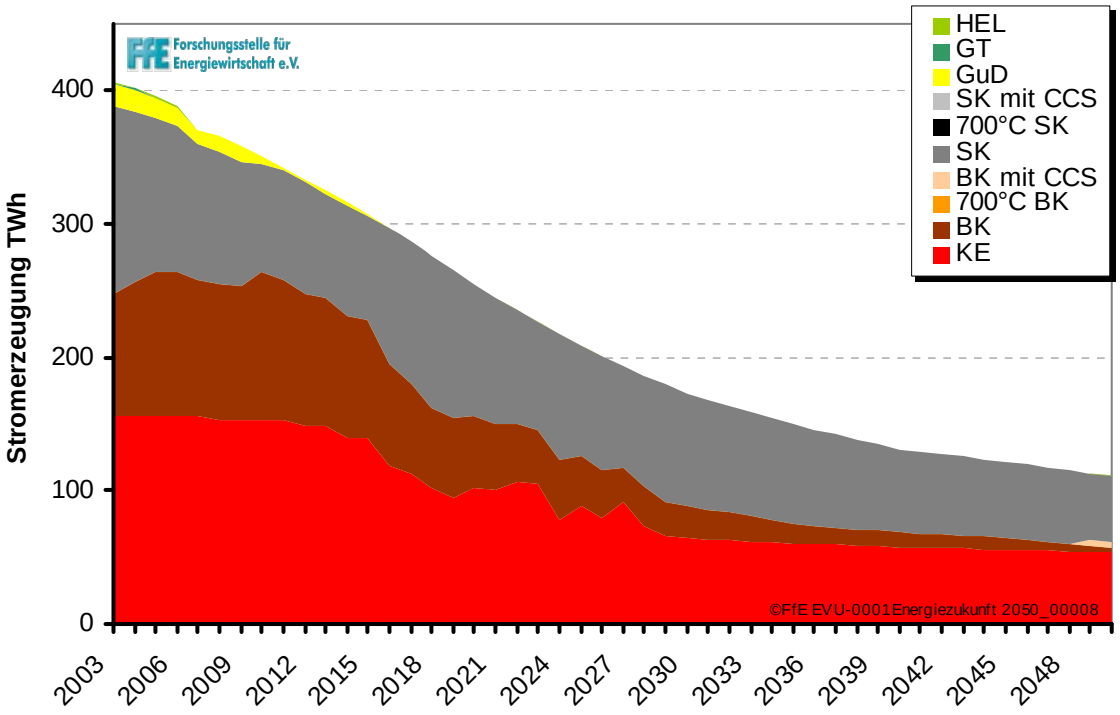

Abbildung 3-76: *Ergebnis der Simulation mit ifeon für die Stromerzeugung in den reinen Kraftwerken (Szenario 2)*

3.5.2 Primärenergieverbrauch

In **Abbildung 3-77** sind die Ergebnisse der Szenarienrechnung im „Zukunftsmodell Energie“ für die Entwicklung des Primärenergieeinsatzes für Szenario 2 dargestellt. Gegenüber Szenario 1 sinkt der Primärenergieverbrauch im gesamten Betrachtungszeitraum mit nahezu konstantem Gefälle. Insbesondere die Anteile der fossilen Energieträger gehen stark zurück, da die in Szenario 1 noch vorhandene Braunkohlenverstromung mit CCS in Szenario 2 durch Regenerative Erzeugung und Kernenergie ersetzt wird.

Im Jahr 2050 besteht der Primärenergieeinsatz zu einem Drittel aus Regenerativen Energien. Da der absolute Erdgaseinsatz konstant bleibt, steigt der relative Anteil von Erdgas am Gesamtverbrauch bis 2050 auf 25 % an. Auch Mineralöle und Steinkohlen erreichen mit 16 bzw. 12 % noch Anteile von über 10 %.

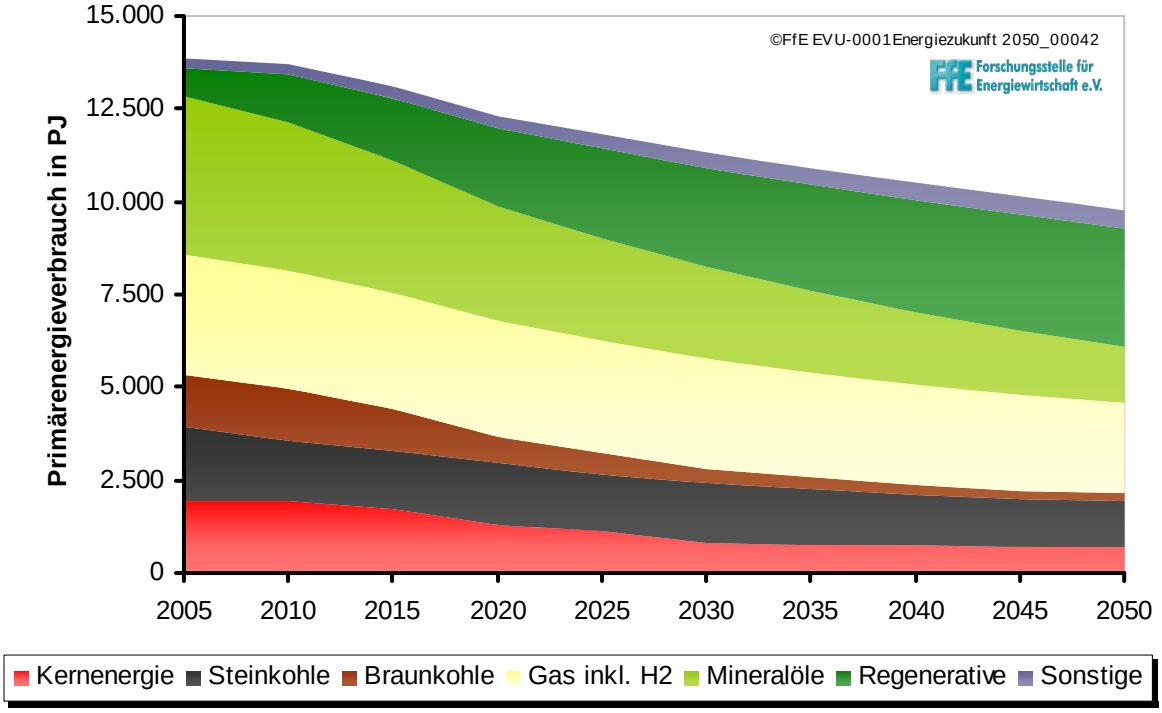

Abbildung 3-77: *Entwicklung des Primärenergieeinsatzes in Szenario 2*

3.5.3 CO_2-Emissionen

Szenario 2 ist durch den Einsatz energieeffizienter Technologien in den Anwendungssektoren, den verstärkten Ausbau regenerativer Stromerzeugung und KWK sowie der Laufzeitverlängerung und dem Neubau von Kernkraftwerken charakterisiert. So können die CO_2-Emissionen in Szenario 2 gegenüber der Referenzentwicklung deutlich gesenkt werden. **Abbildung 3-78** zeigt, dass das Kyoto-Ziel durch diesen Ausbaupfad erreicht werden kann. Die Emissionen sinken sukzessive von etwa 900 Mio. t im Startjahr der Simulation auf etwa 415 Mio. t CO_2 im Jahr 2050 ab und können sich so mehr als halbieren.

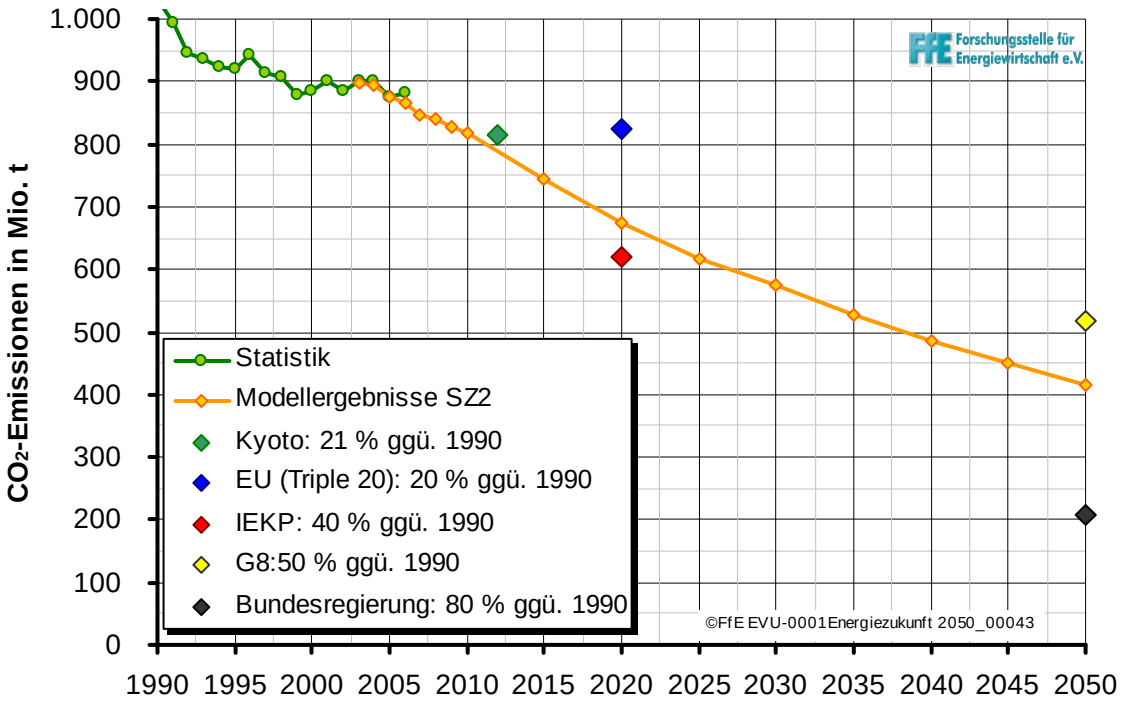

Abbildung 3-78: *Entwicklung der CO_2-Emissionen in Szenario 2 /BMWi 09/, /eigene Berechnungen/*

3.6 Zusammenfassung der Ergebnisse aus Szenario 2

In Szenario 2 – „Erhöhte Technikeffizienz“ wird ein gegenüber Szenario 1 unverändertes Verbraucherverhalten unterstellt. Die zugrundeliegenden Bedarfsdeterminanten, wie beheizte Flächen, Verkehrsleistungen oder Produktionsindizes, werden demzufolge nicht verändert. Jedoch wird bei Neuanschaffung oder Ersatz von Anlagen die beste verfügbare Technik im Sinne der Energieeffizienz eingesetzt.

Im Folgenden sind die Rahmenbedingungen für die einzelnen Sektoren stichpunktartig aufgelistet.

Haushalte

- Sukzessive thermische Sanierung der Gebäudehüllen, Umsetzung der EnEV bei Neubau und Sanierung
- Ausbau der Nah- und Fernwärme sowie verstärkter Einsatz von Solarthermie
- Effizienzsteigerung bei Haushaltsgeräten, Beleuchtung sowie im Bereich IuK

Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD)

- sukzessive thermische Sanierung der Gebäudehüllen, konsequente Umsetzung der EnEV beim Neubau und verstärkter Einsatz CO_2-armer Brennstoffe
- zunehmender Einsatz hocheffizienter Geräte und Systeme
- starke Konsolidierung im IT-Bereich durch Virtualisierung

Industrie

- Steigendes Umweltbewusstsein (gute Umweltberichte)
- CO_2-Zertifikatehandel, der auf alle Energieträger ausgeweitet wird
- staatliche Vorgabe eines Energiemanagements bei der Umstellung auf energieeffiziente Produktion
- langfristigere Investitionen in effiziente Technik werden als rentabel erkannt

Verkehr

- alternative Antriebskonzepte setzen sich rasch durch
- verstärkte Beimischung von regenerativen Kraftstoffen

Abbildung 3-79 stellt dar, wie sich der Endenergieeinsatz durch die Nutzung von Effizienzpotenzialen bei technischer Ausstattung um 24,0 % reduziert.

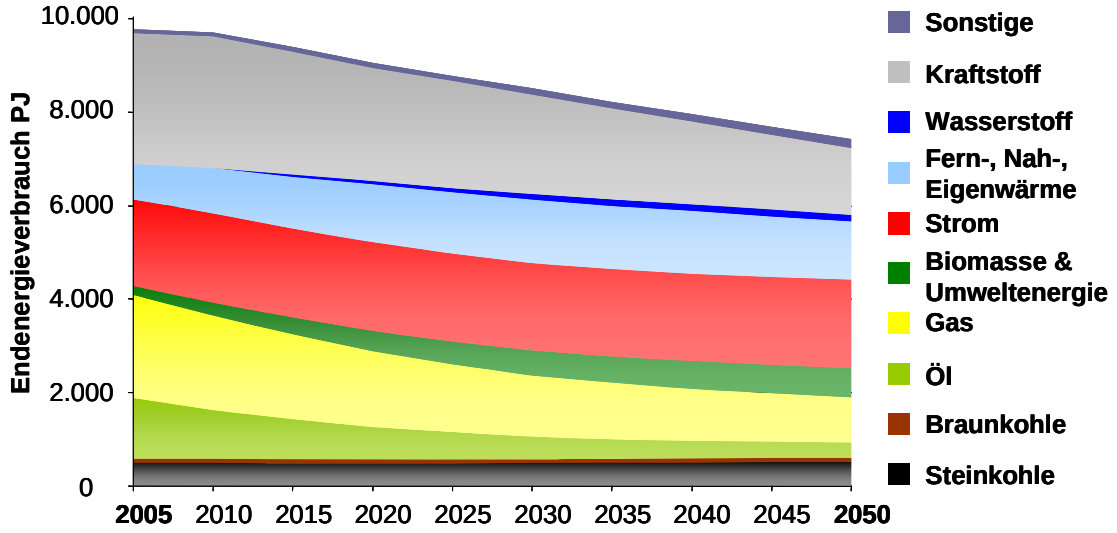

Abbildung 3-79: *Endenergieverbrauch nach Energieträgern in Szenario 2*

Große Einsparmöglichkeiten ergeben sich insbesondere im Verkehr und in den Haushalten. Deutlich ist dies in **Abbildung 3-80** sichtbar. Die Raumwärme, in 2005 noch für ein Drittel des Endenergieverbrauchs verantwortlich, reduziert sich bis 2050 auf ein Viertel des gesamten Verbrauchs. Die größte Reduzierung wird in GHD und Haushalten erzielt. Aber auch der Verkehr profitiert von effizienterer Technik. Lediglich die Industrie legt in allen Bereichen der Energieanwendung aufgrund steigender Wirtschaftsleistung zu.

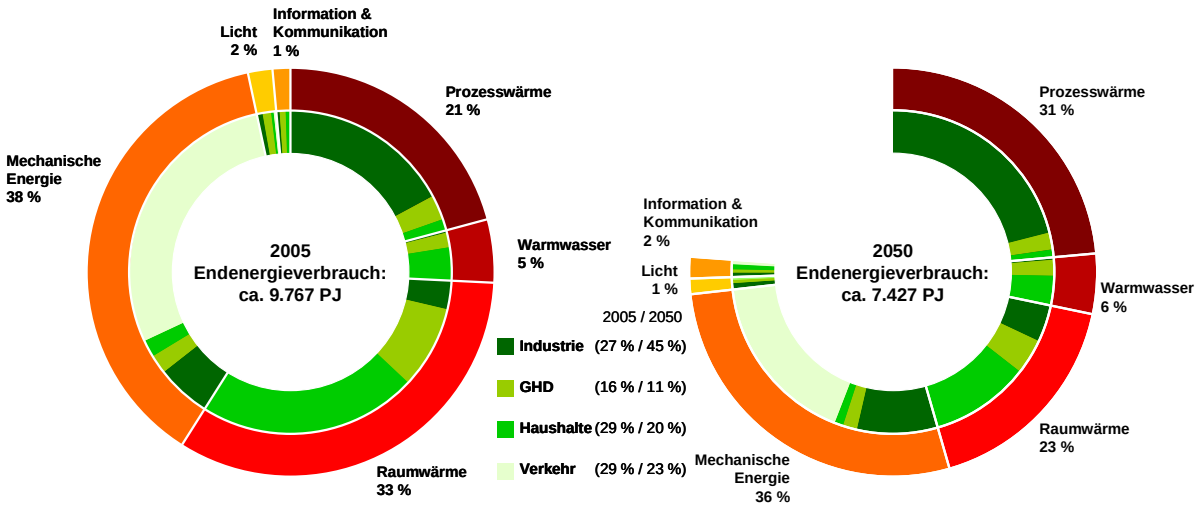

Abbildung 3-80: *Endenergie aufgeteilt auf Anwendungsart und Verwendungszweck in Szenario 2*

Die Rahmenbedingungen für den Umwandlungssektor in Szenario 2 stellen sich wie folgt dar:

- Der Ausbau der Regenerativen und der KWK beschleunigt sich.
- Die Ziele des IEKP für 2020 werden im Umwandlungssektor erreicht.
- 700 °C-Technologie in Kohlekraftwerken ist bereits ab 2020 einsetzbar.
- CO_2-Abtrennung und Speicherung ist ab 2025 verfügbar.

- Der Ausstiegsbeschluss aus der Kernenergie wird aufgehoben und die Laufzeit auf 40 Jahre erhöht.
- Ab 2020 können zudem Kernkraftwerke des Typs EPR neu gebaut werden.

Abbildung 3-81 zeigt den ermittelten Verlauf des Primärenergieeinsatzes für Szenario 2. Der Einsatz fossiler Energieträger geht zugunsten der Regenerativen, die einen Anteil von einem Drittel erreichen, stark zurück. Die aus dem Primärenergieträgermix in 2050 resultierenden CO_2-Emissionen liegen daher um mehr als die Hälfte unter denen von 2005.

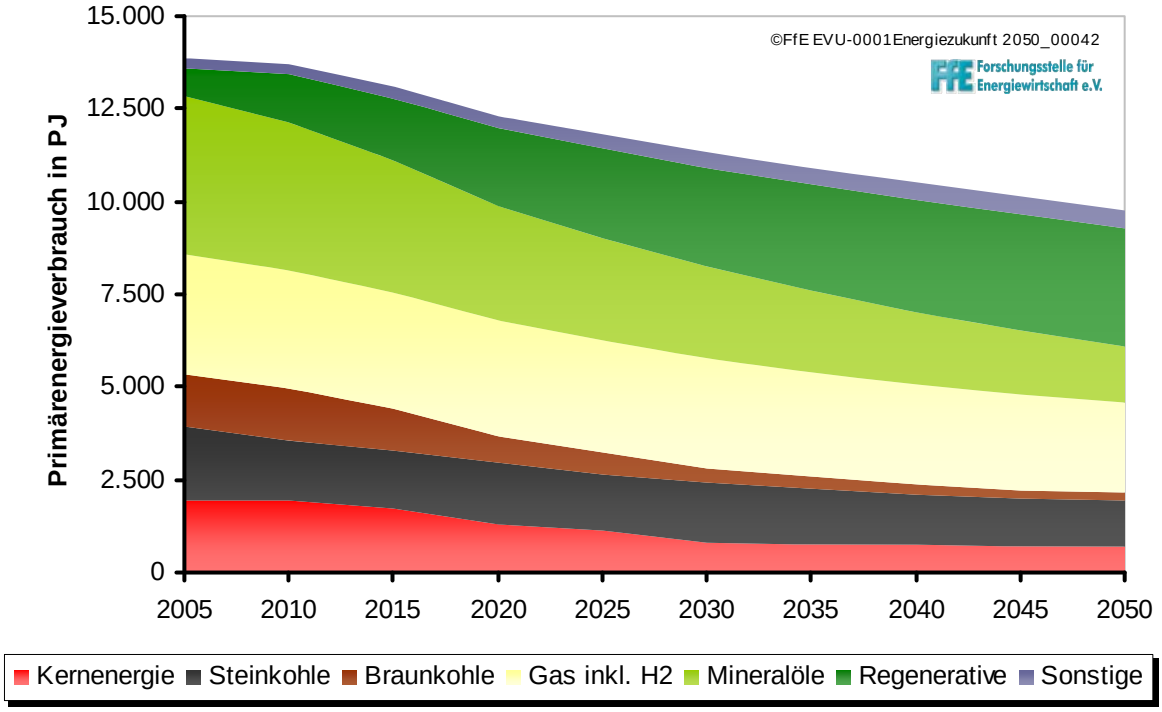

Abbildung 3-81: *Entwicklung des Primärenergieeinsatzes in Szenario 2*

4 Szenario 3 – Umweltbewusstes Handeln

4.1 Entwicklung im Sektor Haushalte

In diesem Szenario wird neben der Nutzung der effizientesten Technik (siehe Szenario 2) der optimale Umgang mit Energie untersucht. Dem Szenario wird unterstellt, dass bis zum Jahre 2050 innerhalb der öffentlichen Meinung der Energiespargedanke fest verankert ist. Durch verbesserte Regelung, die bereits in Szenario 2 unterstellt wurde, wird jedoch bereits ein großer Teil des Optimierungspotenzials vorweggenommen.

Die Eingriffsmöglichkeiten durch den Nutzer, wie richtiges Lüften, Kochen etc., werden bei den einzelnen Anwendungsbereichen beschrieben.

Die hierdurch entstehenden Rahmenbedingungen führen zu Einschränkungen der Nutzer. In einigen Fällen wird es sogar zu Komforteinbußen kommen. Ein Beispiel ist die Reduktion der Gebäudeinnentemperatur – „Pullover anstatt Heizen“. Diese werden jedoch von den Konsumenten im Rahmen des gesteigerten Umweltbewusstseins bewusst in Kauf genommen.

4.1.1 Maßgebliche Bedarfsdeterminanten

4.1.1.1 Raumwärme

Die Bedarfsdeterminanten entsprechen, was die Technik betrifft, denen aus Szenario 2, mit folgenden Unterschieden:

- Die Raumtemperatur wird um 1 K abgesenkt.
- Die Heimarbeit wird berücksichtigt.

Das Absenken der Raumtemperatur senkt den Heizenergiebedarf um etwa 6 %.

Es hat sich herausgestellt, dass die Auswirkungen der Heimarbeit auf den Raumwärmebedarf vernachlässigbar klein sind. Die Gründe hierfür sind:

- Es wird von einem Flächenbedarf von 10 m² für jeden zweiten Büroarbeitsplatz, der in den Haushalt verlegt wird, ausgegangen. Daraus ergeben sich bei knapp 1,3 Mio. Heimarbeitsplätzen (vgl. /IFO 09/) etwa 6,5 Mio. m², was im Vergleich zu den knapp 3.300 Mio. m² gesamter Wohnfläche im Jahr 2050, eine vernachlässigbare Größe darstellt. Selbst wenn unterstellt wird, dass Allgemeinräume wie die Küche aufgrund der Heimarbeit beheizt werden, sind die Auswirkungen auf den Raumwärmebedarf sehr gering.
- Das Büro zu Hause wird nur während der Arbeitstage für 8 h beheizt und nicht Rund um die Uhr. Das senkt den Anteil am gesamten Heizwärmebedarf weiter.
- Der Anteil des durch Heimarbeit verursachten Mehrverbrauchs an Energie sinkt weiter, da durch die stetige Verbesserung des Gebäudebestandes die Häuser thermisch träger werden und eine Tagesabsenkung nur mehr in geringem Maß notwendig ist.

4.1.1.2 Warmwasser

Warmwasser wird einerseits als Brauchwasser (überwiegend durch Heizkessel) zur Verfügung gestellt. Auf der anderen Seite zählt (nach AGEB) auch der Energieverbrauch der Waschmaschinen und Geschirrspüler zum Anwendungsbereich Warmwasser.

Durch bewussten Umgang mit Warmwasser durch die Nutzer wird eine Einsparung von 15 % der Warmwassermenge unterstellt. Im Bereich der Geschirrspüler und Waschmaschinen wird eine Energieeinsparung von 10 % bis 2050 angenommen.

Beim Warmwasserverbrauch der Geschirrspüler und Waschmaschinen wird eine Energieeinsparung von 10 % auf Grund des umsichtigeren Nutzerverhaltens veranschlagt.

4.1.1.3 Prozesswärme

Die Bedarfsdeterminanten sind die gleichen wie in Szenario 2 mit dem Unterschied, dass bis zum Jahr 2050 eine Energieeinsparung von 10 % beim Nutzerverhalten unterstellt wird. Durch fortgeschrittene Regelung bleibt die Einsparmöglichkeit für den Nutzer gering. Exemplarisch sollen hier die Einsparmöglichkeiten beim Kochen angeführt werden:

- Eierkocher verwenden
- Wasserkocher verwenden
- Deckel auf den Topf geben
- Optimale Topfdurchmesser wählen
- Schnellkochtopf verwenden

Beim Kochen im Sektor Haushalte gibt es einerseits den Trend zu mehr Fertiggerichten und andererseits die Entwicklung, dass wieder vermehrt frisch gekocht wird. Das Zubereiten von Fertiggerichten in der Mikrowelle benötigt erheblich weniger Energie als Frischkochen. Fertiggerichte verursachen allerdings zusätzlichen Energieverbrauch in der Lebensmittelindustrie. Andererseits wird, nicht zuletzt angeregt durch diverse Kochsendungen im Fernsehen, vermehrt frisch gekocht. Da es sich um gegenläufige Tendenzen handelt und die Prozesswärme nur knapp 6 % der Gesamtendenergie im Sektor Haushalte ausmacht, wurde die Untersuchung nicht tiefgreifender durchgeführt.

4.1.1.4 Beleuchtung

Der Unterschied zu Szenario 2 besteht darin, dass in diesem Szenario von umsichtigerem Nutzerverhalten ausgegangen wird. Das heißt es wird unterstellt, dass bis zum Jahr 2050 die Beleuchtungsdauer um 10 % zurückgeht. Diese Annahme erscheint durchaus realistisch, wenn man annimmt, dass die Benutzer vermehrt aufpassen und das Licht nur einschalten, wenn es wirklich benötigt wird (so wie in früheren Zeiten). Ein weiterer Faktor, der dieses Szenario 3 von den beiden anderen unterscheidet, ist die Berücksichtigung der Heimarbeit.

4.1.1.5 Mechanische Energie

Für die Bedarfsdeterminanten in diesem Anwendungsbereich gelten die folgenden Überlegungen.

Pumpen
Bei den Zirkulationspumpen wird unterstellt, dass die Nutzer ein Herunterfahren der Zirkulation von 1 Uhr bis 5 Uhr früh auf 20 % der Zirkulationsleistung akzeptieren, womit gewisse Komforteinbußen in Kauf genommen werden. Dadurch ergeben sich Energieeinsparungen von knapp 5 PJ bis 2050.

Aufzüge
Die Bedarfsdeterminanten sind gleich wie in Szenario 2, mit der Ausnahme, dass bis 2050 10 % der Aufzugsfahrten durch Treppensteigen ersetzt werden.

Hilfsenergie für Heizkessel und Solarthermieanlagen
Der direkte Einfluss des Nutzers auf den Eigenbedarf der Kessel und Solarkreispumpen wird im Szenario 3 nicht unterstellt. Für Szenario 3 gelten dieselben Annahmen bezüglich der Bestandsentwicklung und der Effizienzsteigerung wie für Szenario 2.

Haushaltsgeräte
Die Bedarfsdeterminanten sind die gleichen wie in Szenario 2. Beim Nutzerverhalten wird angenommen, dass bei den Kleingeräten durch bewussten Umgang mit Energie eine Energieeinsparung von 10 % bis 2050 möglich ist. Bei Kühlgeräten und Dunstabzugshauben wird von keiner Energiereduktion durch den Nutzer ausgegangen, da gewisse Hygienestandards erfüllt werden müssen (ausreichend kühle Temperaturen bzw. ausreichende Luftzirkulation).

4.1.1.6 Information und Kommunikation

Im Folgenden wird kurz auf die maßgeblichen Determinanten für den Energieverbrauch im Bereich von IuK eingegangen.

Anzahl der Geräte
Die Anzahl der Geräte entspricht der in Szenario 2 mit dem Unterschied, dass bei den Gerätegruppen Kommunikation und EDV die Heimarbeit berücksichtigt wurde.

Effizienz der Geräte
Die Annahmen zu den Geräteeffizienzen entsprechen denen aus Szenario 2.

Betriebsdauer
Im Szenario 3 wird unterstellt, dass die Betriebsdauer bis 2050 um 10 % gegenüber 2003 ansteigt. In diesem Szenario wird die Heimarbeit bei Geräten der Kommunikation und der EDV berücksichtigt (vgl. Tabelle 2-3).

4.1.2 Technikstruktur

Die Technikstruktur in allen sechs Energieanwendungsbereichen entspricht, wie eingangs beschrieben, jener aus Szenario 2, da in diesem Szenario die Energieeinspareffekte durch verändertes Nutzerverhalten untersucht werden.

4.1.3 Endenergieverbrauch

4.1.3.1 Raumwärme

In der **Abbildung 4-1** ist die Prognose des Endenergieverbrauchs im Bereich Raumwärme dargestellt.

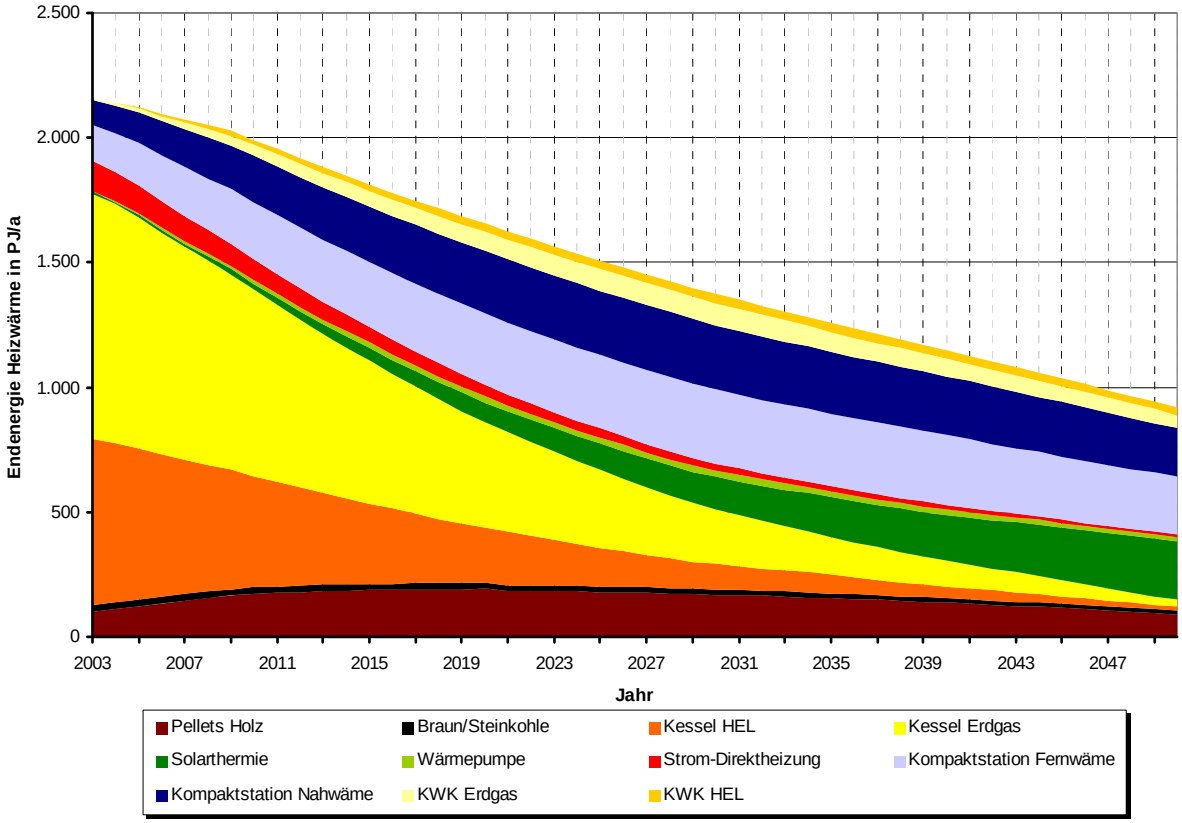

Abbildung 4-1: *Endenergiebedarf im Bereich der Raumwärme*

In diesem Szenario nimmt der Endenergieverbrauch für Raumwärme von 2.148 PJ im Jahr 2003 auf etwa 920 PJ im Jahr 2050 ab. Der Grund dafür liegt neben dem thermisch verbesserten Gebäudebestand und den höheren Nutzungsgraden der Heizsysteme, in der diesem Szenario zugrunde gelegten Absenkung der Raumtemperatur (Nutzerverhalten). Die Auswirkungen der Heimarbeit auf die Fortschreibung des Raumwärmeverbrauches sind sehr gering und wirken sich praktisch nicht aus.

4.1.3.2 Warmwasser

In der **Abbildung 4-2** wird die Prognose des Endenergieverbrauchs im Bereich Warmwasser (Brauchwasser) dargestellt. Die Darstellung entspricht, von den Anteilen der Energieträger her, im wesentlichen der Darstellung des Endenergieverbrauchs im Bereich Raumwärme, da Warmwasser mit den gleichen Systemen zur Verfügung gestellt wird.

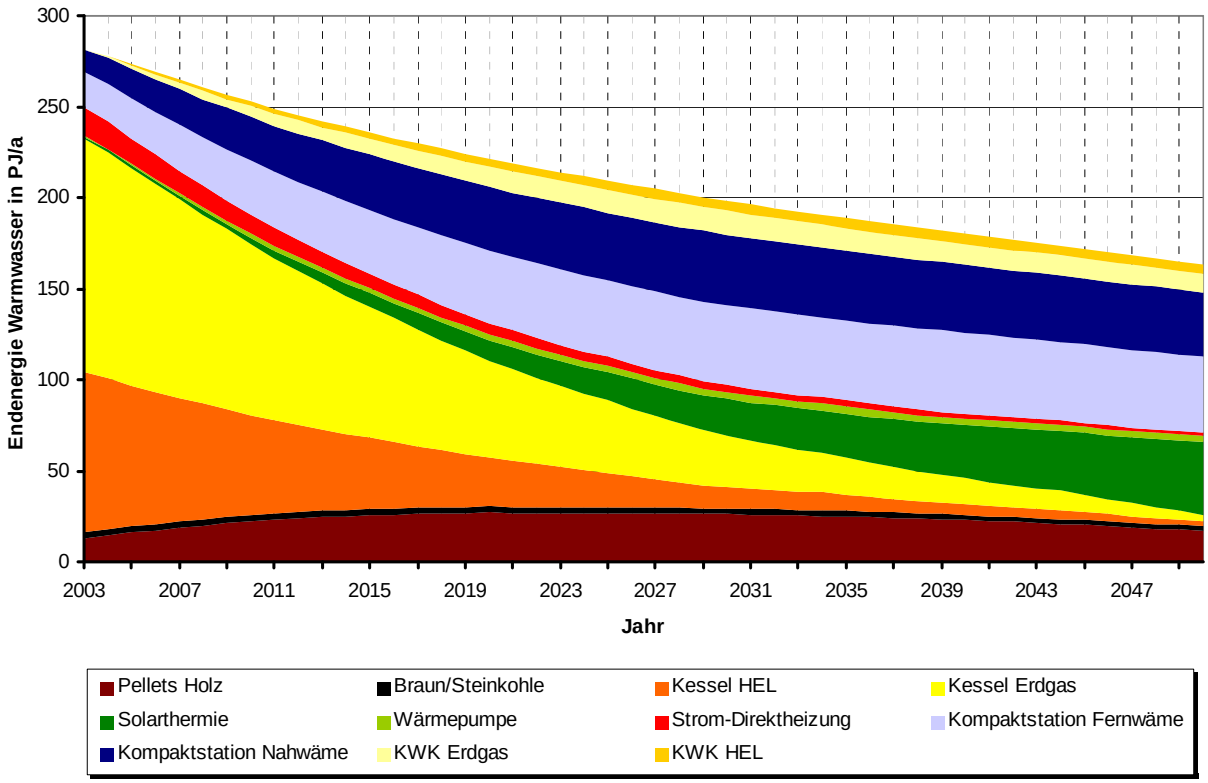

Abbildung 4-2: *Endenergiebedarf im Bereich Warmwasser (Brauchwasser)*

Der Endenergiebedarf für die Warmwasserbereitung wird im Szenario 3 von ca. 283 PJ im Jahr 2003 auf etwa 163 PJ im Jahr 2050 zurückgehen.

In der **Abbildung 4-3** ist die Prognose für den Endenergiebedarf im Bereich der Geschirrspüler und Waschmaschinen dargestellt.

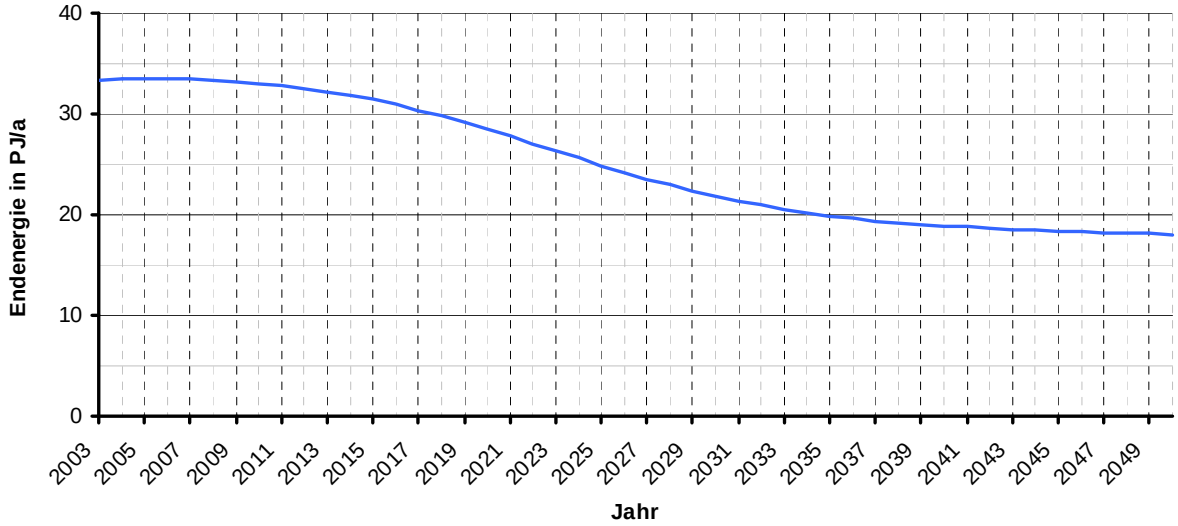

Abbildung 4-3: *Endenergiebedarf im Bereich Warmwasser*

Im diesem Szenario steigt der Energiebedarf, ausgehend von knapp 33,4 PJ im Jahr 2003, noch unwesentlich bis auf etwa 33,6 PJ an, sinkt danach aber aufgrund der

höheren Geräteeffizienz und dem verbesserten Nutzerverhalten auf etwa 18 PJ im Jahr 2050 ab.

4.1.3.3 Prozesswärme

In der folgenden **Abbildung 4-4** ist der Endenergieverbrauch von Strom, Biomasse und Gas dargestellt

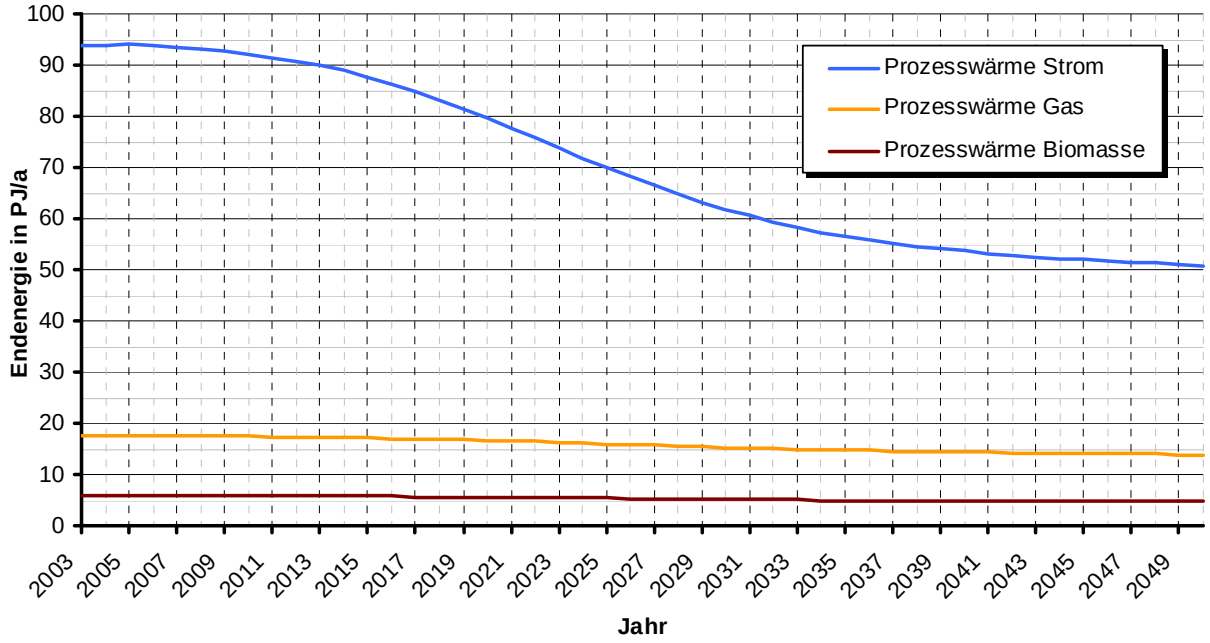

Abbildung 4-4: *Fortschreibung des Endenergieverbrauchs bei der Prozesswärme*

Bei der Prozesswärme, die durch Elektrizität zur Verfügung gestellt wird, nimmt der Energieverbrauch im Szenario 3 von knapp 93,8 PJ im Jahr 2003 aufgrund der höheren Geräteeffizienz, der Bevölkerungsabnahme und dem verbesserten Nutzerverhalten bis 2050 stetig auf ca. 50,8 PJ ab. Bei Gas ergibt sich ein Rückgang von 17,6 PJ auf knapp 13,9 PJ. Bei Biomasse geht die Endenergie von ca. 5,9 PJ im Jahr 2003 auf 4,7 PJ in 2050 zurück. Der Rückgang bei Gas und Biomasse (praktisch ausschließlich zum Kochen) ist lediglich auf den Bevölkerungsrückgang und das bessere Nutzerverhalten zurückzuführen, da die technologische Entwicklung bei Gas- und Holzherden als abgeschlossen betrachtet wird.

4.1.3.4 Beleuchtung

Unter den getroffenen Annahmen ergibt sich die in **Abbildung 4-5** dargestellte Fortschreibung des Endenergieverbrauchs.

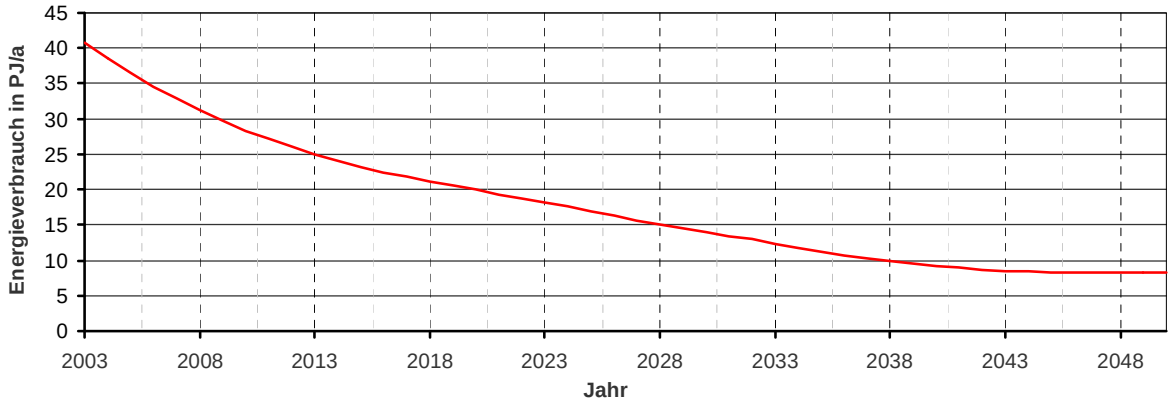

Abbildung 4-5: *Prognose des Endenergiebedarfs für Beleuchtung von 2003 bis 2050*

Im Szenario 3 geht der Endenergiebedarf von 40,8 PJ auf knapp 8,3 PJ zurück. Der Rückgang von Szenario 2 auf Szenario 3 beträgt nur mehr rund 1 PJ im Vergleich zu ca. 6 PJ, die sich im Vergleich zwischen Szenario 1 und Szenario 2 ergeben. Der Einfluss des Nutzers ist geringer als der der Technikverbesserung, da ein gewisses Lichtbedürfnis nicht unterschritten werden kann, wohingegen durch einen effizienten Leuchtmittelmix die jeweils geforderte Lichtmenge mit einem geringeren Energieeinsatz erzeugt werden kann.

4.1.3.5 Mechanische Energie

Pumpen

In der **Abbildung 4-6** ist das Ergebnis der Untersuchung – die Fortschreibung des Endenergieverbrauchs bis zum Jahr 2050 – dargestellt.

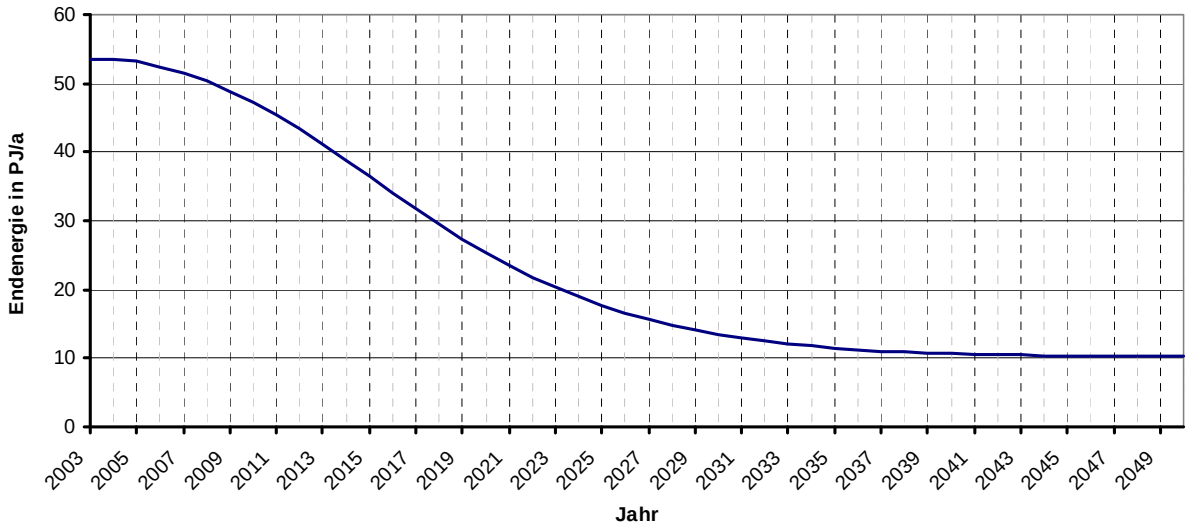

Abbildung 4-6: *Fortschreibung des Energieverbrauchs an mechanischer Energie der Pumpen*

Durch angepasste, richtig dimensionierte und geregelte Pumpen sowie verbessertes Nutzerverhalten kann der Endenergieverbrauch bei den Pumpen im Szenario 3 von 53,6 PJ auf 7,5 PJ reduziert werden.

Aufzüge

In der **Abbildung 4-7** ist die Entwicklung des Endenergieverbrauchs für mechanische Energie im Bereich der Aufzüge dargestellt.

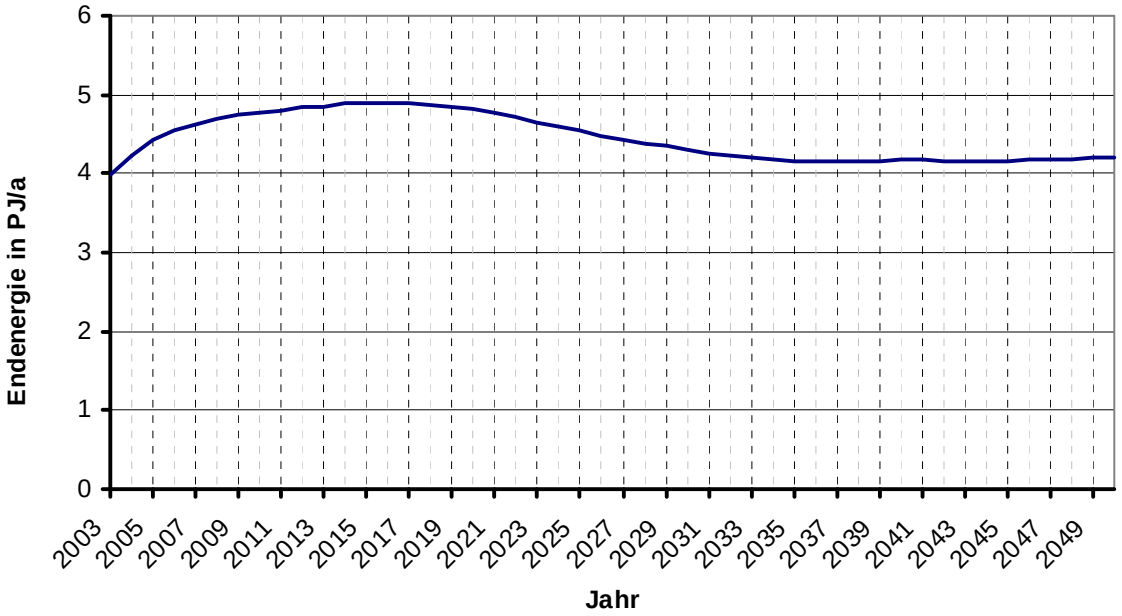

Abbildung 4-7: *Fortschreibung des Energieverbrauchs an mechanischer Energie der Aufzüge*

Der Energieverbrauch steigt mit dem Gebäudeneubau, ausgehend von knapp 4 PJ im Jahr 2003, zunächst auf etwa 4,9 PJ um das Jahr 2016 an. Durch die sich nach und nach verbessernde Effizienz und die vermehrte Treppenbenutzung sinkt der Energieverbrauch ab 2015 wieder ab. Gegen Ende des Betrachtungszeitraums nimmt der Bedarf, bedingt durch die weiterhin steigende Anzahl an Aufzügen, wieder leicht zu.

Im Jahr 2050 beträgt der Endenergiebedarf ca. 4,2 PJ und verändert sich damit im Vergleich zum Jahr 2003 kaum.

Hilfsenergie

Der prognostizierte Hilfsenergieverbrauch für Kessel und Solarkreispumpen entspricht dem im Szenario 2 und ist in **Abbildung 4-8** dargestellt.

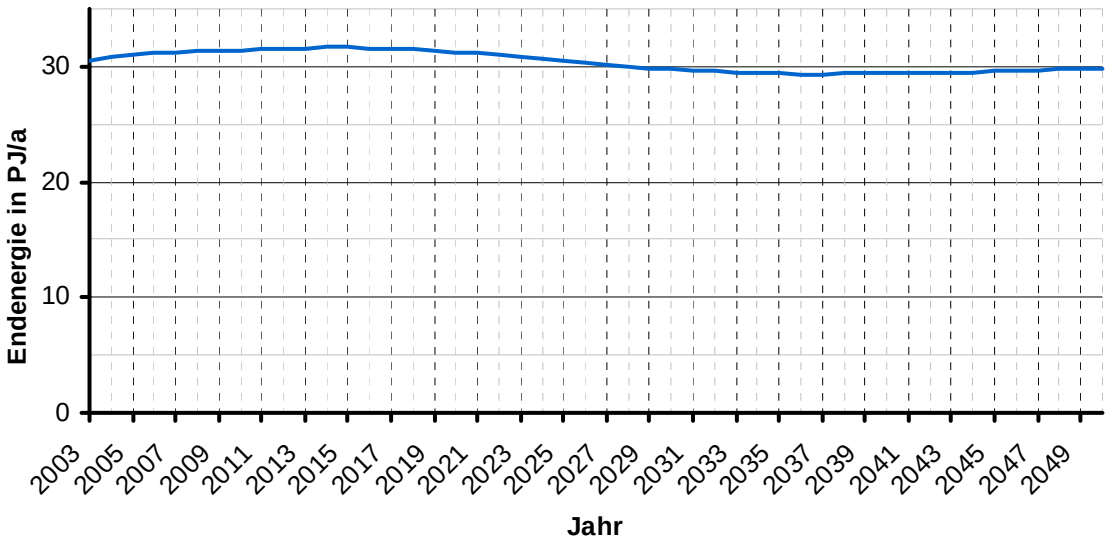

Abbildung 4-8: *Endenergiebedarf an mechanischer Energie bei der Hilfsenergie der Kessel und Solarthermie*

Eine genaue Erklärung des Kurvenverlaufs ist der Beschreibung von Szenario 2 zu entnehmen.

Haushaltsgeräte

Mit den Bedarfsdeterminanten lässt sich der Gesamtenergieverbrauch fortschreiben. Das Ergebnis der Berechnung ist in **Abbildung 4-9** dargestellt.

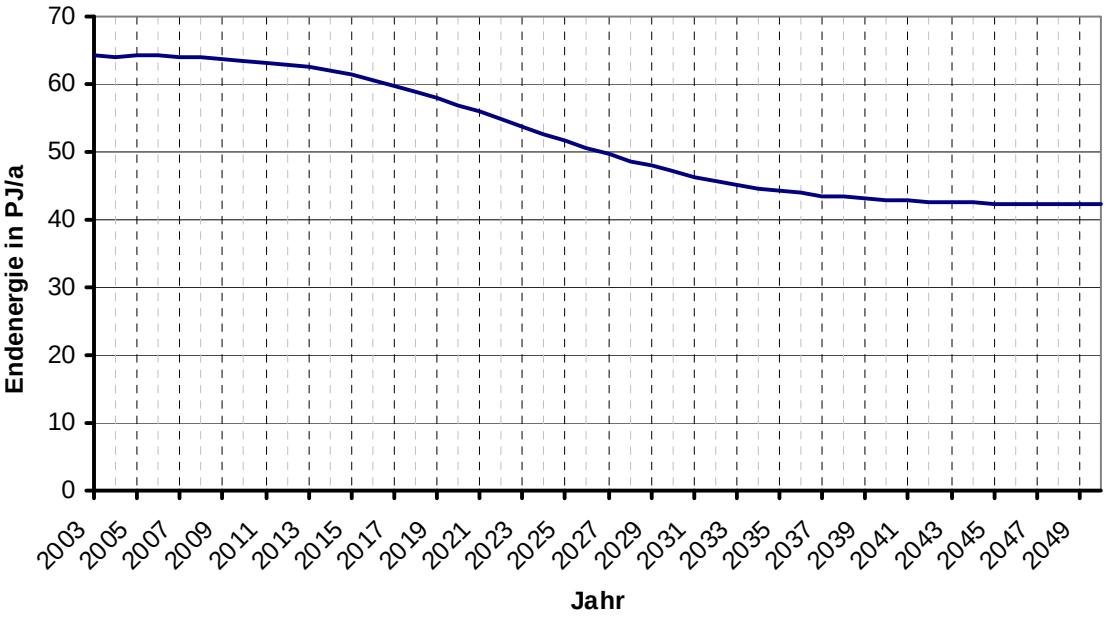

Abbildung 4-9: *Fortschreibung des Energieverbrauchs an mechanischer Energie der Haushalts- und Kleingeräte*

Der Endenergieverbrauch wird in diesem Szenario von ca. 64,2 PJ bis etwa zum Jahr 2006 leicht ansteigen und danach, bedingt durch die höhere Geräteeffizienz und die Abnahme der Bevölkerung, bis zum Jahr 2050 auf etwa 42,3 PJ abnehmen.

Durch das veränderte Nutzerverhalten, das lediglich die Kleingeräte betrifft, sind die Unterschiede zu Szenario 2 (Endenergiebedarf von 42,8 PJ) relativ klein.

4.1.3.6 Information und Kommunikation

In der **Abbildung 4-10** ist der prognostizierte Endenergiebedarf im Bereich IuK dargestellt.

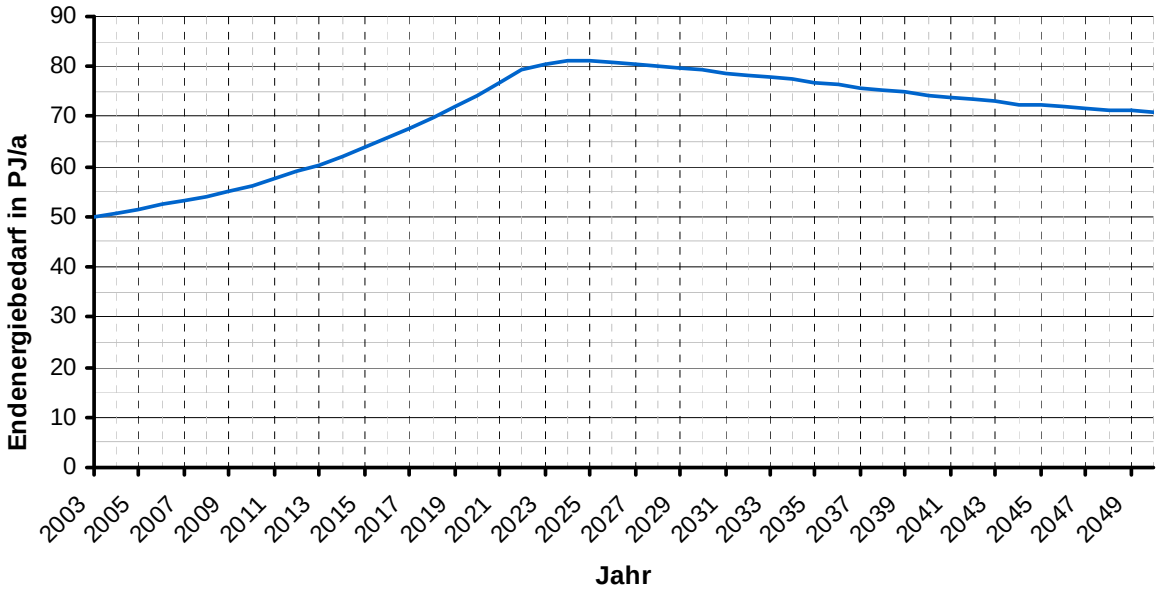

Abbildung 4-10: *Entwicklung des Energiebedarfs im Bereich IuK*

Ausgehend von 49,8 PJ im Jahr 2003, steigt der Endenergiebedarf im Szenario 3 bis etwa um das Jahr 2025 auf etwa 81,2 PJ an. Dies ist auf die steigenden Gerätezahlen zurückzuführen.

Anfangs steigt die Effizienz nur moderat (s-förmig, vgl. Abbildung 2-1), wirkt aber ab 2030 dem Energiebedarfsanstieg durch die höheren Gerätezahlen entgegen. Der Endenergiebedarf wird nach der Prognose von etwa 49,8 PJ in 2003 bis auf ca. 70,9 PJ im Jahr 2050 ansteigen.

4.2 Entwicklung im Sektor GHD

4.2.1 Maßgebliche Bedarfsdeterminanten

Szenario 3 beschäftigt sich mit dem Einfluss des Bedarfs auf die Entwicklung des Energieverbrauchs. Änderungen in den Bedarfsdeterminanten wirken sich auf die durchschnittlichen sektoralen Effizienzen der Anwendungen nur implizit, also durch einen veränderten Zu- und Rückbau von Komponenten der Technikstruktur, aus. Die zeitliche Entwicklung der einzelnen Technologien bleibt davon unberührt.

Eine wesentliche Änderung der Bedarfsdeterminanten erfolgt durch die Berücksichtigung von Homeoffice-Arbeitsplätzen bei den Beschäftigten büroähnlicher Betriebe. Im Schnitt reduziert sich die sektorale Bürofläche für jeden zuhause arbeitenden Beschäftigten um 10 m². Bis 2050 beläuft sich der Anteil der Homeoffice-Arbeitsplätze auf 10 % /IFO 09/. Über die Bedarfsdeterminanten „Beschäftigte“ bzw. „Bürobeschäftigte“ und „Fläche“ wirkt sich dieser Strukturwandel auf alle Anwendungsbereiche aus.

Hinzu kommt eine spezifische Reduzierung der Verkaufsflächen in Folge von Zentralisierung und Online-Handel um 15 % bis zum Ende des Betrachtungszeitraumes. Die Verkaufsflächen stellen etwa 20 % der gesamten (beheizten) sektoralen Fläche dar /IFO 09/.

4.2.1.1 Raumwärme

Hinsichtlich der Raumwärme wird des Weiteren eine erhöhte Temperaturtoleranz in Folge ökologischen Bewusstseins in der Bevölkerung angenommen. Diese spiegelt sich in einer um 1 °C reduzierten durchschnittlichen Raumtemperatur wider, die ihrerseits einen Bedarfsrückgang bei der Raumwärme um 6 % verursacht.

4.2.1.2 Beleuchtung

Durch Präsenzregelung und abgestimmte Beleuchtungskonzepte kann der Bedarf an Licht bis 2040 bei der Flächenbeleuchtung um 30 % verringert werden. Im Verkaufsbereich ist mit einer zeitlichen oder örtlichen Reduzierung der Beleuchtung hingegen nicht zu rechnen, weshalb der Bedarf bei der Spot-Beleuchtung unverändert bleibt.

4.2.1.3 Information und Kommunikation (IuK)

Im IuK-Bereich werden mehrere Tendenzen zugrunde gelegt. Zum einen wird von einer Reduzierung des Datenbedarfs bis zum Ende des Betrachtungszeitraumes von 40 % ausgegangen. Dieser resultiert aus einem geänderten Nutzerverhalten der privaten Haushalte. Aber auch innerhalb des Sektors zeigt sich ein Trend zum maßvollen Umgang mit der verfügbaren Technik. Dies spiegelt sich in den Ausstattungsgraden mit IuK-Endgeräten wider. Sowohl bei den Individualrechnern als auch bei den Arbeitsplatzdruckern sind diese rückläufig. In **Abbildung 4-11** ist die Entwicklung bei den Individualrechnern exemplarisch dargestellt.

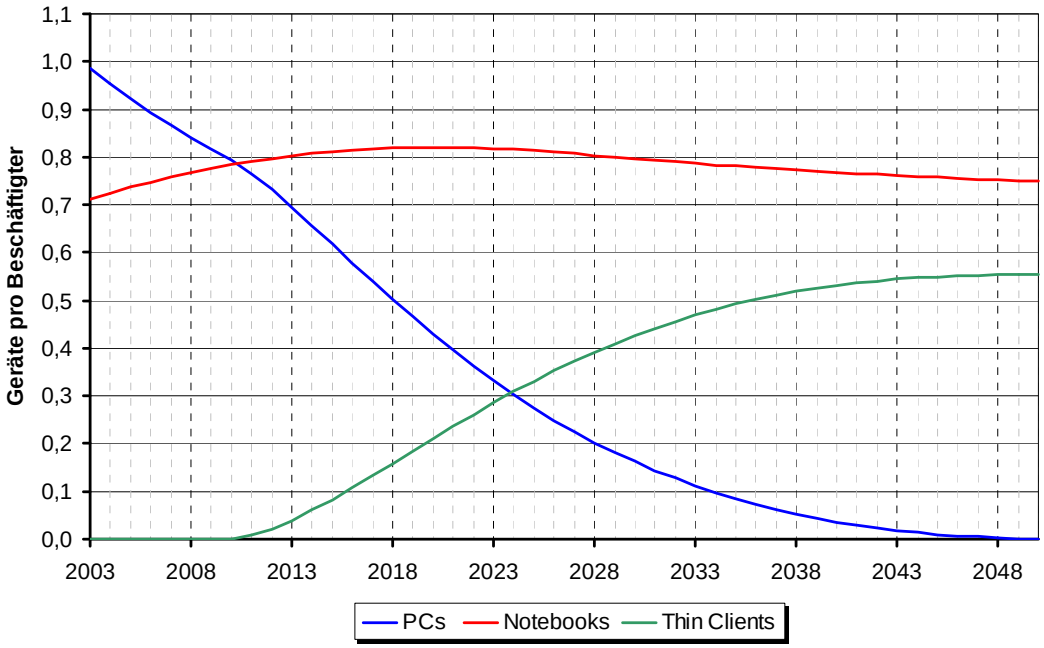

Abbildung 4-11: *Ausstattungsgrade für Arbeitsplatzrechner*

4.2.1.4 Mechanische Energie

Haustechnik

Zur Bedarfsreduktion bietet sich im Bereich der Haustechnik das vollständige Abschalten der Heizkreispumpen außerhalb der Heizperiode an. Der während dieser Zeit anfallende Energiebedarf ist bis 2050 durch den Einsatz gleitdruckgeregelter Pumpen ohnehin weitestgehend minimiert, jedoch können durch die konsequente Abschaltung der Pumpen überschlägig weitere 10 % eingespart werden.

Die Brauchwasserverteilung hingegen kann nicht saisonal bedingt vollständig abgeschaltet werden, da überwiegend von ganzjähriger Zapfung ausgegangen werden kann. Durch den fortschreitenden Einbau effizienter Systeme (entsprechend Szenario 2) ist hier in erster Näherung keine weitere Bedarfsreduktion ohne Komforteinbußen für den Nutzer möglich, da die Einschaltdauern durch die Pumpenregelungen weitestgehend optimiert sind. Entsprechend entwickelt sich der Bedarf parallel zum Wasserverbrauchsfaktor in der Bevölkerung (siehe hierzu auch Kapitel 4.2.1.5), da das Nutzerverhalten den verbleibenden Faktor hinsichtlich des Bedarfs darstellt.

Kältebereitstellung

Für Szenario 3 wird davon ausgegangen, dass sich bei der Ernährung eine Trendwende hinsichtlich des Konsums von Tiefkühlprodukten abzeichnet. Statt der in der Vergangenheit zu beobachtenden Tendenz zur Tiefkühlkost legt der Konsument in Szenario 3 zunehmenden Wert auf frische Lebensmittel. Hierdurch geht der Bedarf für die Kühlung von Nahrungsmitteln bis 2050 um 10 % zurück.

Der Kühlbedarf im Serverbereich folgt, wie schon in den vorangegangenen Szenarien, implizit aus dem Serverbestand.

Große Pumpen
Der Pumpenergiebedarf in Bädern und im Bereich der Ver- und Entsorgung entwickelt sich analog zu den vorhergehenden Szenarien parallel zum Wasserverbrauch der Bevölkerung und somit entsprechend dem Wasserverbrauchsfaktor (siehe hierzu auch Kapitel 4.2.1.5).

Sonstige mechanische Energie
Die unter sonstiger mechanischer Energie zusammengefassten Einzelanwendungen sind weder in ihrer Zusammensetzung noch in ihrem Umfang hinreichend bekannt, um Aussagen über eine mögliche Entwicklung des Nutzerverhaltens treffen zu können. Daher wird dieses als konstant erachtet und die Entwicklung des Bedarfs folgt ausschließlich der beheizten sektoralen Fläche, die für diesen Bereich die zugrunde liegende sozioökonomische Größe darstellt.

4.2.1.5 Prozesswärme/Warmwasser

Auch im Bereich der Warmwasserbereitstellung zeigt sich das gestiegene ökologische Bewusstsein in der Bevölkerung. Entgegen dem Nutzerverhalten in den vorangegangenen Szenarien, das von einem Wellness-Trend und entsprechend zunehmendem spezifischen Wasserbedarf gekennzeichnet ist, zeichnet sich hier eine gegenläufige Entwicklung ab und der spezifische Bedarf geht um 15 % bis 2050 zurück.

Auch im Bereich der Prozesswärme wird für dieses Szenario von einem geänderten Nutzerverhalten und in der Folge von einem Rückgang des spezifischen Bedarfs ausgegangen. Es wird angenommen, dass sich dieser bis zum Ende des Betrachtungszeitraums um 20 % reduziert.

4.2.2 Technikstruktur

Das Szenario 3 beschäftigt sich mit dem Einfluss des Nutzerverhaltens auf die Entwicklung des Energieverbrauchs. Eine Änderung des Nutzerverhaltens wirkt ausschließlich auf die Bedarfsdeterminanten. Um eine Aussage hinsichtlich der energetischen Auswirkungen treffen zu können, ist es notwendig, alle weiteren Parameter konstant zu halten. Dies betrifft primär die eingesetzte Technikstruktur. Aber auch hinsichtlich der Wahl der zur Bedarfsdeckung eingesetzten Energieträger dürfen keine willkürlichen Veränderungen vorgenommen werden, da dies bei differierenden Nutzungsgraden der Systeme auf den Energiebedarf rückwirkt. Aus grundlegenden Annahmen resultierende Änderungen des Energieträgereinsatzes sind hierdurch jedoch nicht betroffen. So bewirkt beispielsweise die vorrangige Nutzung regenerativer Energieträger, wie z. B. der Biomasse, im Falle einer Bedarfsreduktion einen stärkeren Rückgang bei der Nachfrage nach anderen Energieträgern, während das vorhandene regenerative Potenzial unverändert ausgeschöpft wird.

Änderungen der Bedarfsdeterminanten wirken sich auf die eingesetzte Technikstruktur nur quantitativ, jedoch nicht qualitativ aus.

4.2.3 Endenergieverbrauch

Der sektorale Endenergieverbrauch in GHD sinkt im Betrachtungszeitraum von 1.540 PJ im Jahr 2003 auf etwa 690 PJ in 2050 (vgl. **Abbildung 4-12**). Das stellt einen Rückgang um mehr als 55 % dar. Die größten relativen Einsparungen stellen sich auch

in Szenario 3 bei der Beleuchtung und der Raumwärmebereitstellung ein. Diese gehen auf etwa 15 % bzw. 37 % ihres ursprünglichen Wertes zurück.

Der Rückgang des Energieeinsatzes wirkt sich analog zu Szenario 1 am stärksten auf die fossilen Energieträger Öl und Gas aus. Der Energieträgereinsatz beim Öl erreicht nur noch gut 18 % des Verbrauchs aus 2003. Der Gasverbrauch geht auf etwas mehr als 27 % des Basiswertes zurück. Der Einsatz elektrischer Energie halbiert sich in etwa und erreicht in 2050 etwa ein Niveau von 240 PJ (vgl. **Abbildung 4-13**).

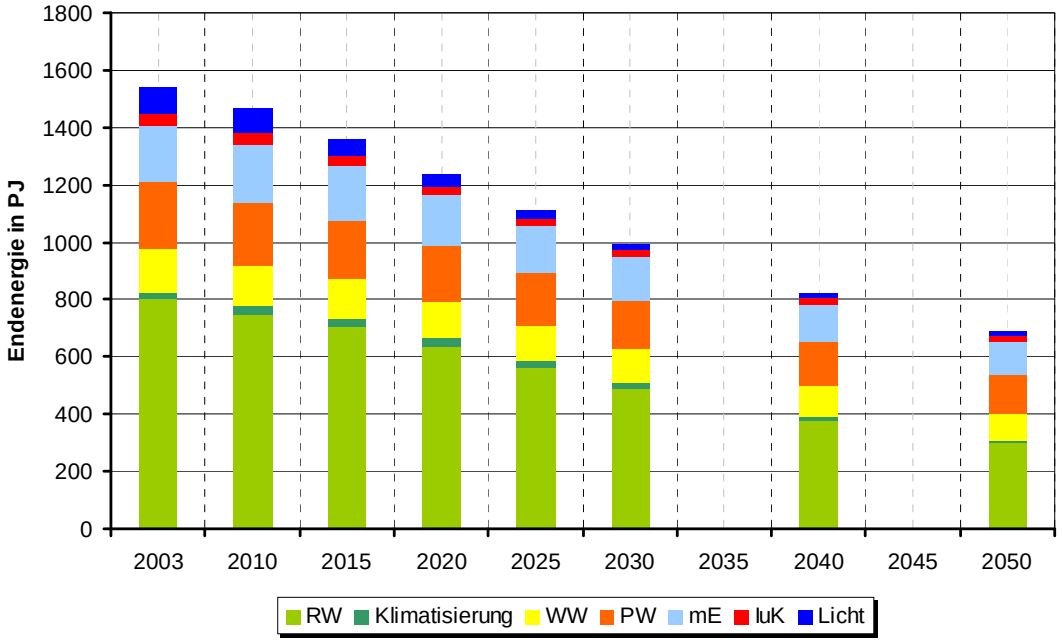

Abbildung 4-12: *Entwicklung des sektoralen Endenergieverbrauchs (nach Anwendungen)*

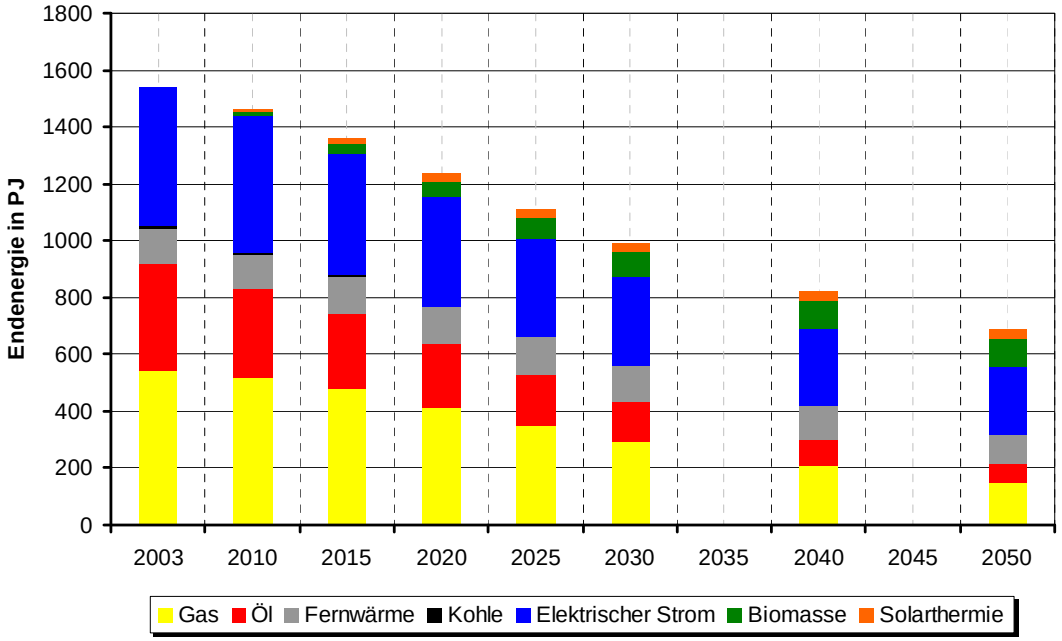

Abbildung 4-13: *Entwicklung des sektoralen Endenergieverbrauchs (nach Energieträgern)*

Ein Vergleich der Szenarien zeigt, dass sich am Ende des Betrachtungszeitraums der sektorale Endenergieverbrauch in Szenario 3 um ca. 300 PJ gegenüber Szenario 1 bzw. 134 PJ gegenüber Szenario 2 verringert (vgl. **Abbildung 4-14**). Gegenüber der Entwicklung des Referenzszenarios stellt dies einen Rückgang um mehr als 30 %, gegenüber Szenario 2 einen Rückgang um mehr als 16 % dar. Die Differenz zu Szenario 2 ist ausschließlich auf die veränderten Bedarfsdeterminanten und das energieextensivere Nutzerverhalten aufgrund des allgemein gestiegenen ökologischen Bewusstseins in diesem Szenario zurückzuführen.

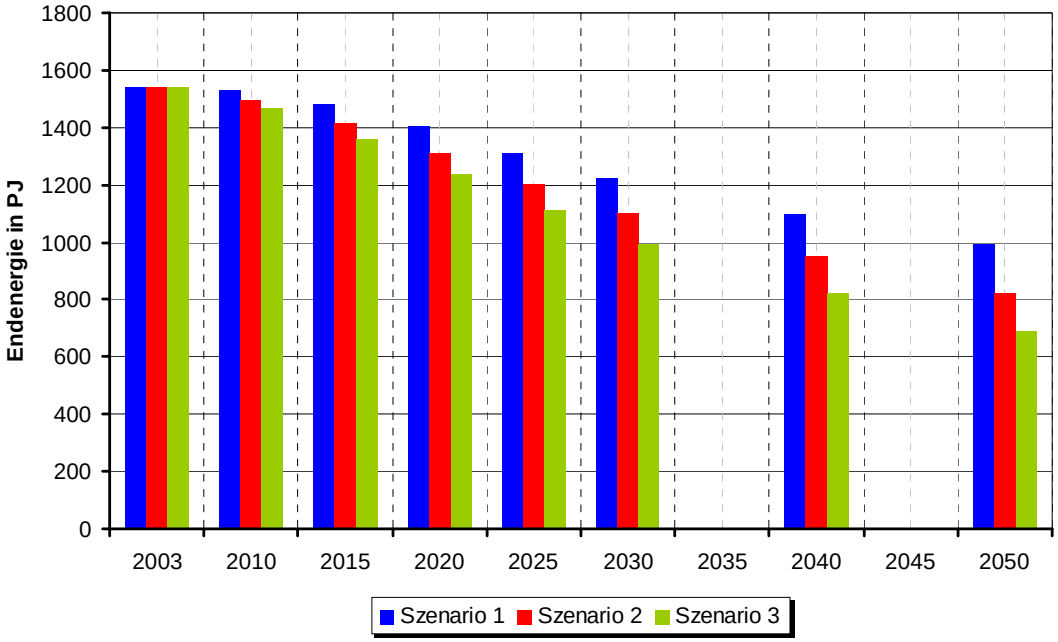

Abbildung 4-14: *Gegenüberstellung der sektoralen Endergieverbrauchsentwicklungen der Szenarien 1, 2 und 3*

4.2.3.1 Anwendungsbereich Raumwärme

Der Energieverbrauch für die Raumwärmebereitstellung liegt 2050 mit nur noch 297 PJ mehr als 500 PJ unter dem des Jahres 2003, wie **Abbildung 4-15** zu entnehmen ist. Somit erreicht der Energieverbrauch in 2050 gerade noch 37 % des Ausgangswertes aus 2003 und liegt 18 PJ unter dem aus Szenario 2. Auf dieses bezogen, entspricht das einer Reduktion um weitere 5,8 % aufgrund des veränderten Nutzerverhaltens und der reduzierten Flächenentwicklung.

Den größten Rückgang unter den eingesetzten Energieträgern verzeichnen auch in diesem Szenario mit Abstand Öl und Gas auf nur mehr 12 % bzw. 18 % des Ausgangswertes, wohingegen die Biomasse in 2050 mit fast 86 PJ zur Raumwärmebereitstellung beiträgt (vgl. **Abbildung 4-16**), was einem Anteil von nahezu 29 % entspricht. Der solarthermische Deckungsbeitrag bleibt mit ca. 22 PJ nahezu unverändert gegenüber Szenario 2.

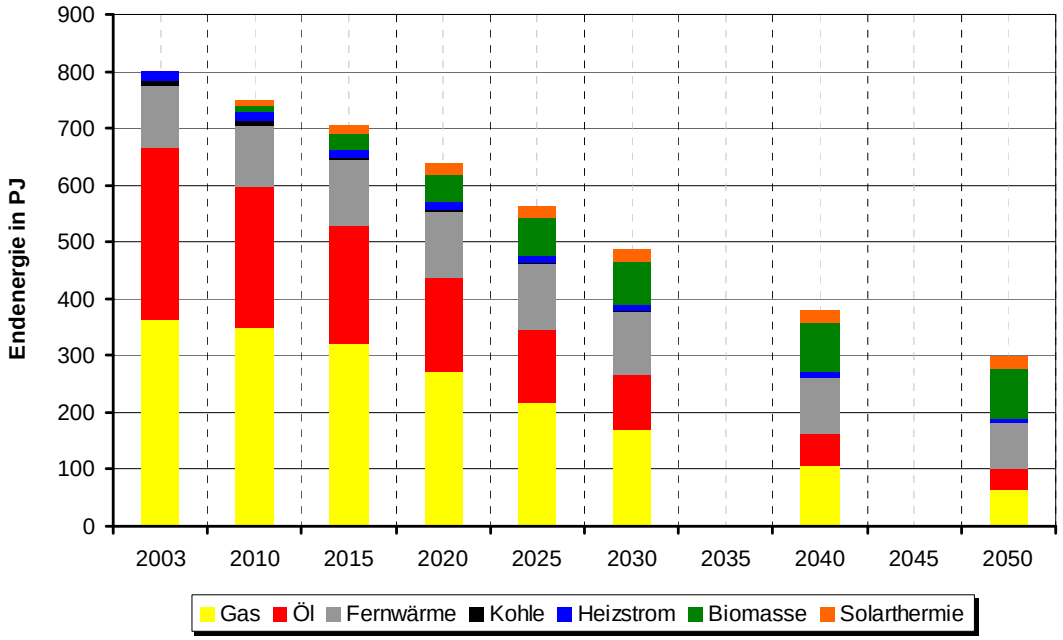

Abbildung 4-15: *Entwicklung des Endenergieverbrauchs für Raumwärme (nach Energieträgern)*

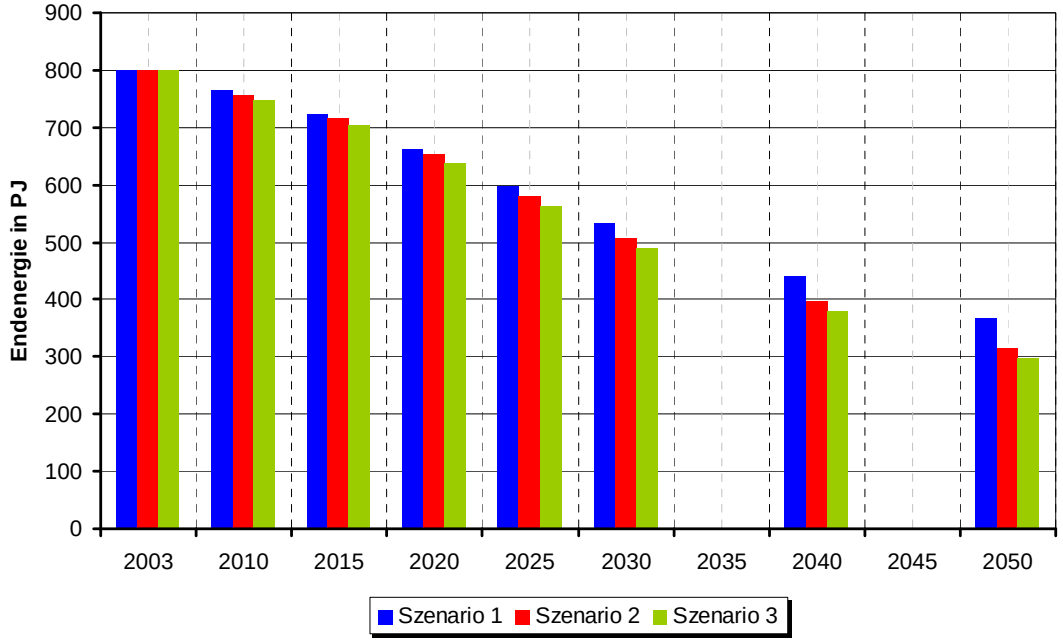

Abbildung 4-16: *Gegenüberstellung der Energieverbrauchsentwicklungen für die Raumwärmebereitstellung der Szenarien 1 bis 3*

4.2.3.2 Anwendungsbereich Beleuchtung

Der Einsatz elektrischer Energie geht im Beleuchtungsbereich auf knapp unter 14 PJ zurück (vgl. **Abbildung 4-17**), was einem Rückgang auf weniger als 15 % des Ausgangswertes entspricht. Im Beleuchtungsbereich zeichnet sich somit – wie schon in Szenario 1 und 2 – ein besonders starker Rückgang des Energieverbrauchs ab. Der Wert dieses Szenarios liegt am Ende des Betrachtungszeitraumes 10,8 PJ unter dem des Referenz-

szenarios bzw. 6 PJ unter dem Ergebnis des Szenario 2 (vgl. **Abbildung 4-18**). Betrachtet man das Szenario relativ zu Szenario 2, so zeigt sich, dass durch die Reduzierung des Bedarfs der Energieverbrauch um weitere 30 % gesenkt werden kann.

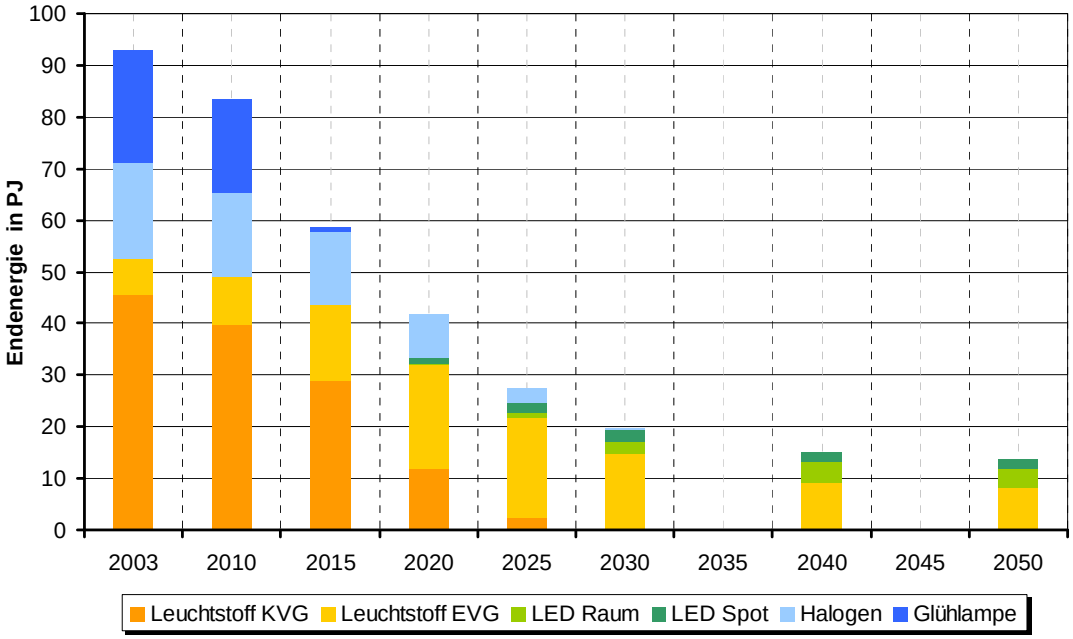

Abbildung 4-17: *Entwicklung des Endenergieverbrauchs für Beleuchtung*

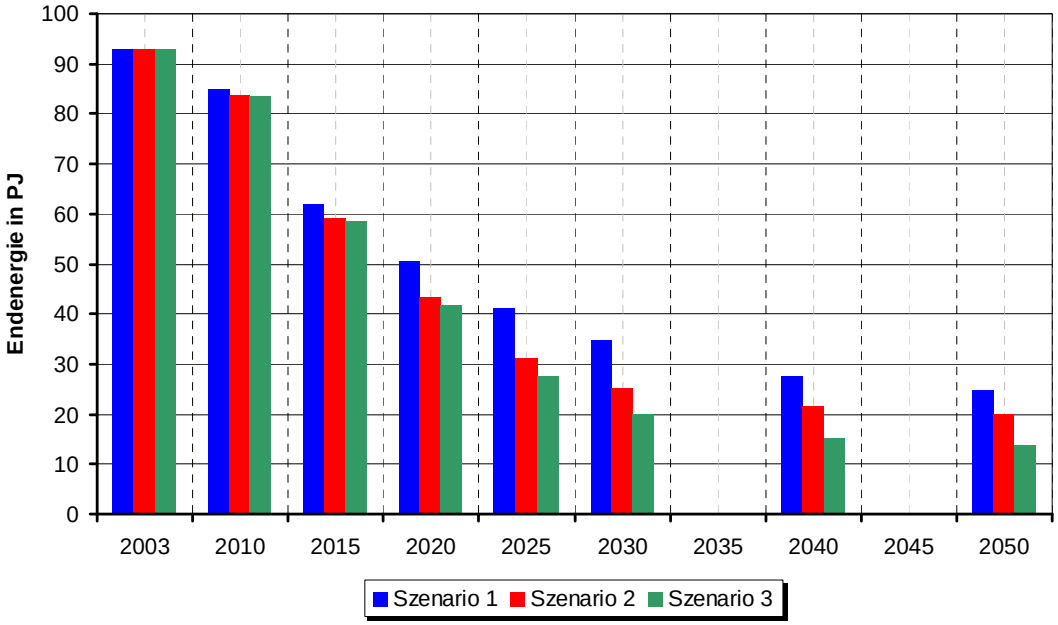

Abbildung 4-18: *Gegenüberstellung der Energieverbrauchsentwicklungen für Beleuchtung der Szenarien 1 bis 3*

4.2.3.3 Anwendungsbereich IuK

Die Entwicklung des Endenergieverbrauchs im Anwendungsbereich IuK ist in **Abbildung 4-19**, nach Verbrauchergruppen differenziert, dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass der Energiebedarf in den ersten Jahren analog zu Szenario 2 im

Wesentlichen vom Einsatz der Serversysteme bestimmt wird. Der reduzierte Datenbedarf in der Bevölkerung und die geringeren Ausstattungsgrade bei den Endgeräten machen sich gegen Ende des Betrachtungszeitraums zunehmend bemerkbar (vgl. **Abbildung 4-20**) und führen zu einem weiteren Rückgang des Energiebedarfs. Im Gegensatz zu den beiden Vorgängerszenarien kommt es in Szenario 3 so zu keinem erneuten Anstieg des Verbrauchs am Ende des Betrachtungszeitraumes.

Insgesamt liegt der Verbrauch durch den veränderten Bedarf zum Ende der Betrachtung mit ca. 23 PJ etwa 22 % niedriger als in Szenario 2.

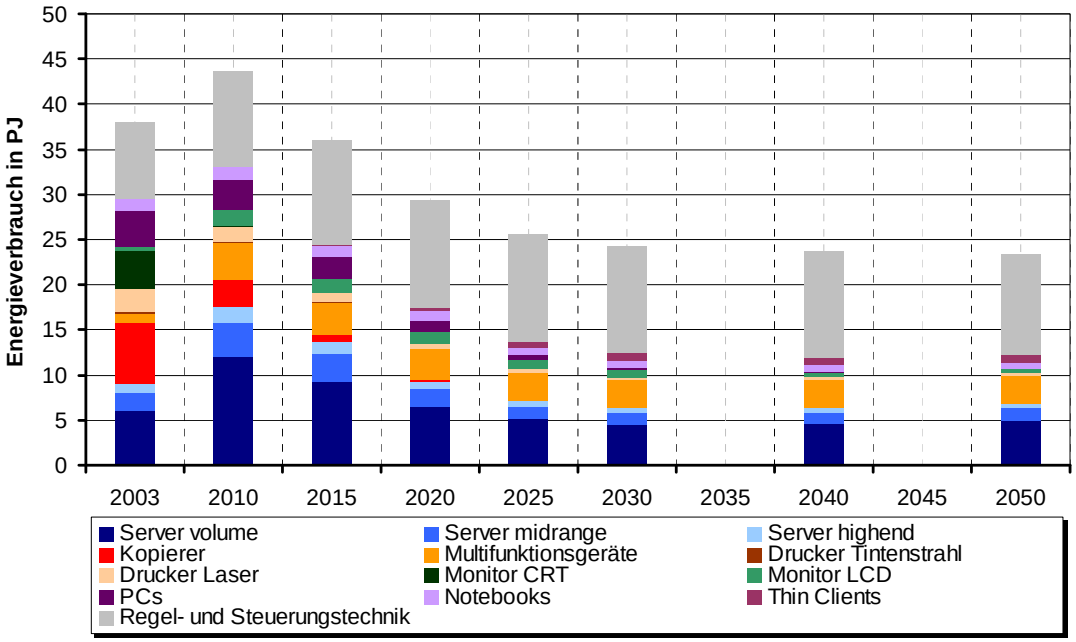

Abbildung 4-19: *Entwicklung des Endenergieverbrauchs für IuK*

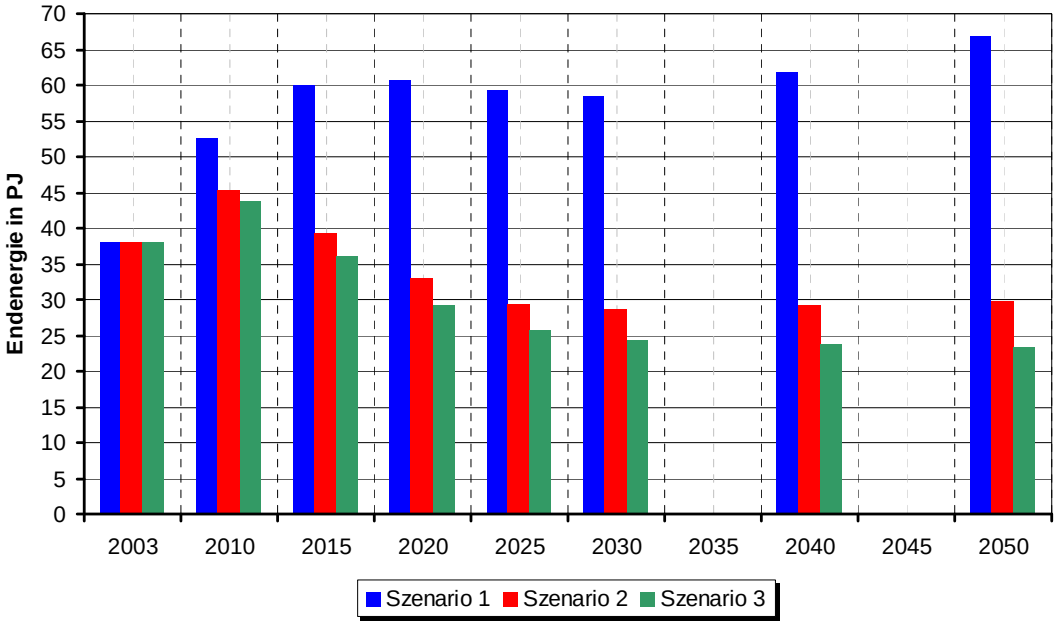

Abbildung 4-20: *Gegenüberstellung der Energieverbrauchsentwicklungen für IuK der Szenarien 1 bis 3*

4.2.3.4 Anwendungsbereich mechanische Energie

Das ausgeprägte Verbrauchsmaximum in den ersten Jahren durch die Entwicklung im Serverbereich und die erforderliche Kühlung – wie es in den Vorgängerszenarien zu sehen ist – ist in diesem Szenario nur noch schwach ausgeprägt (vgl. **Abbildung 4-21**). Wie schon in Szenario 2, zeigt sich auch hier bereits ab 2015 ein Verbrauchsrückgang. Der Energieverbrauch erreicht 2050 einen Wert von knapp unter 116 PJ und liegt am Ende der Betrachtungen somit 18 PJ unter der Entwicklung in Szenario 2. Aus dem veränderten Bedarf resultiert gegenüber Szenario 2 somit ein Verbrauchsrückgang um mehr als 13 % bis 2050, wie in **Abbildung 4-22** zu sehen ist.

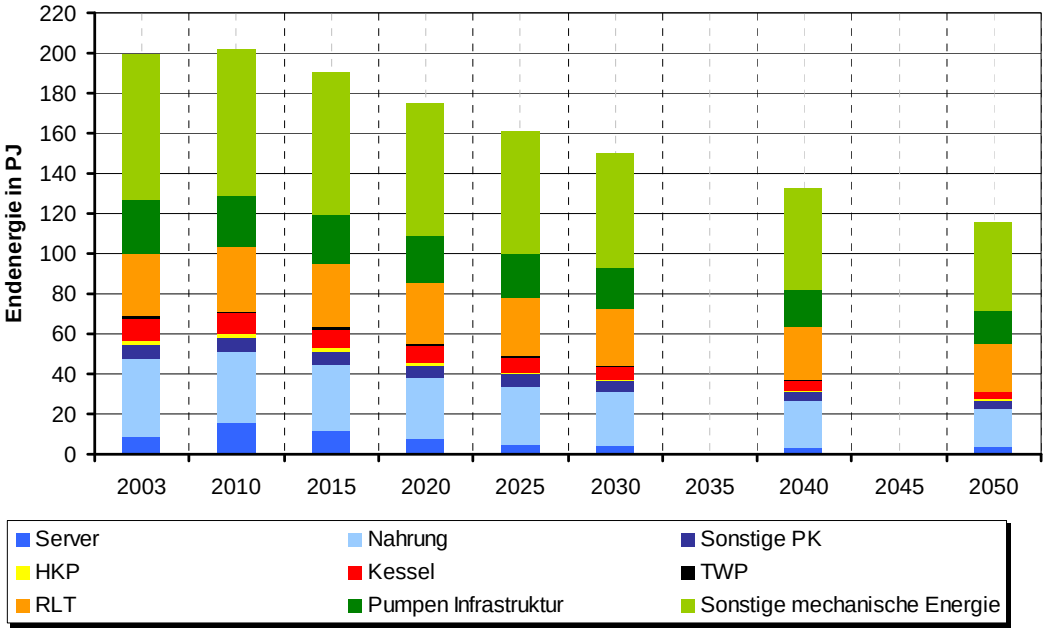

Abbildung 4-21: *Entwicklung des Endenergieverbrauchs für mechanische Energie*

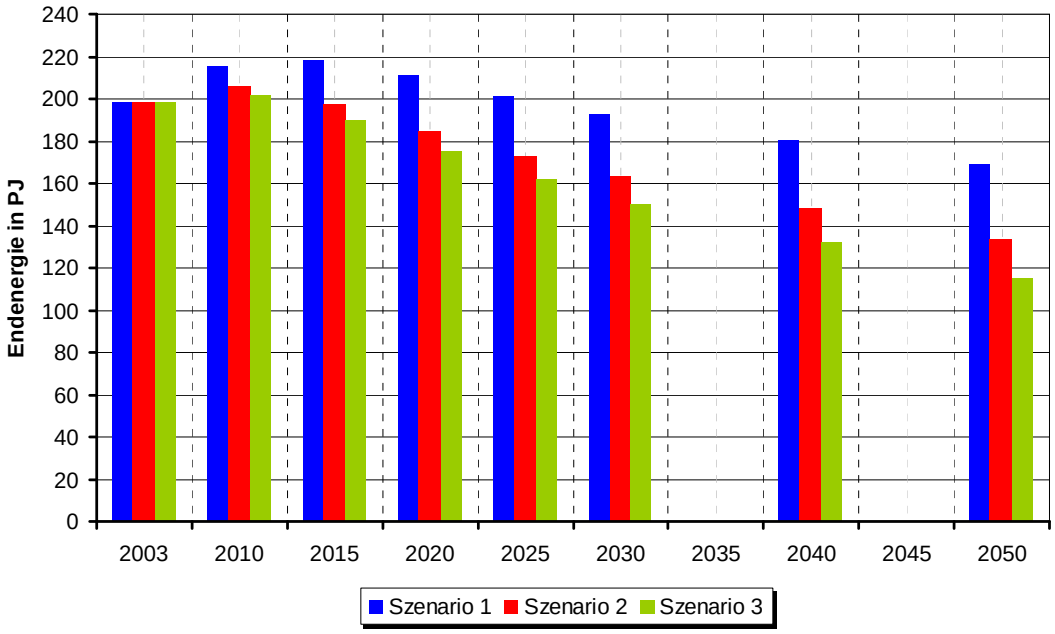

Abbildung 4-22: *Gegenüberstellung der Energieverbrauchsentwicklungen für mechanische Energie der Szenarien 1 bis 3*

4.2.3.5 Anwendungsbereich Prozesswärme/Warmwasser

Der Energiebedarf für die Bereitstellung von Warmwasser erreicht 2050 in Szenario 3 einen Wert von knapp 96 PJ, was einem Verbrauchsrückgang über den Betrachtungszeitraum von 57 PJ entspricht. Damit reduziert sich der Verbrauch gegenüber Szenario 2 um nahezu 34 PJ in Folge des reduzierten Bedarfs (vgl. **Abbildung 4-24**), was einer Minderung um 26 % entspricht. Der Verbrauchsrückgang macht sich bei allen Energieträgern bemerkbar. Bei den Regenerativen sowie der Fernwärme zeigt sich dies in einem geringeren Wachstum der absoluten Verbräuche als in Szenario 2. Bei elektrischem Strom, insbesondere jedoch bei den fossilen Energieträgern Öl und Gas, findet ein Verbrauchsrückgang statt. Am stärksten zeigt sich dieser beim Öl. Hier geht der Verbrauch über den Betrachtungszeitraum auf lediglich 16 % des Ausgangswertes zurück (vgl. **Abbildung 4-23**).

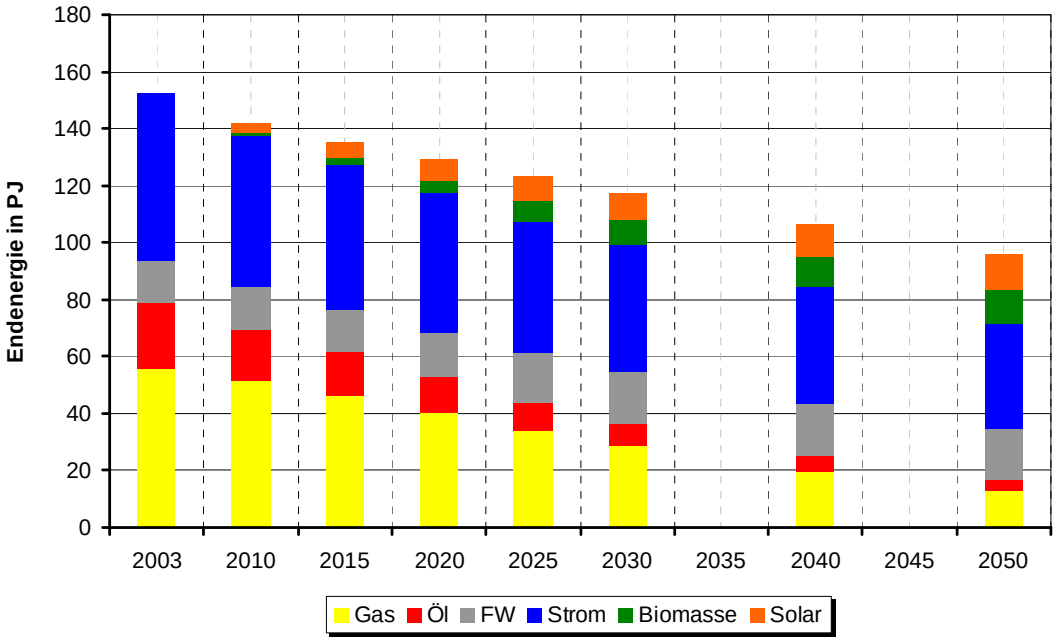

Abbildung 4-23: *Entwicklung des Endenergieverbrauchs für Warmwasser (nach Energieträgern)*

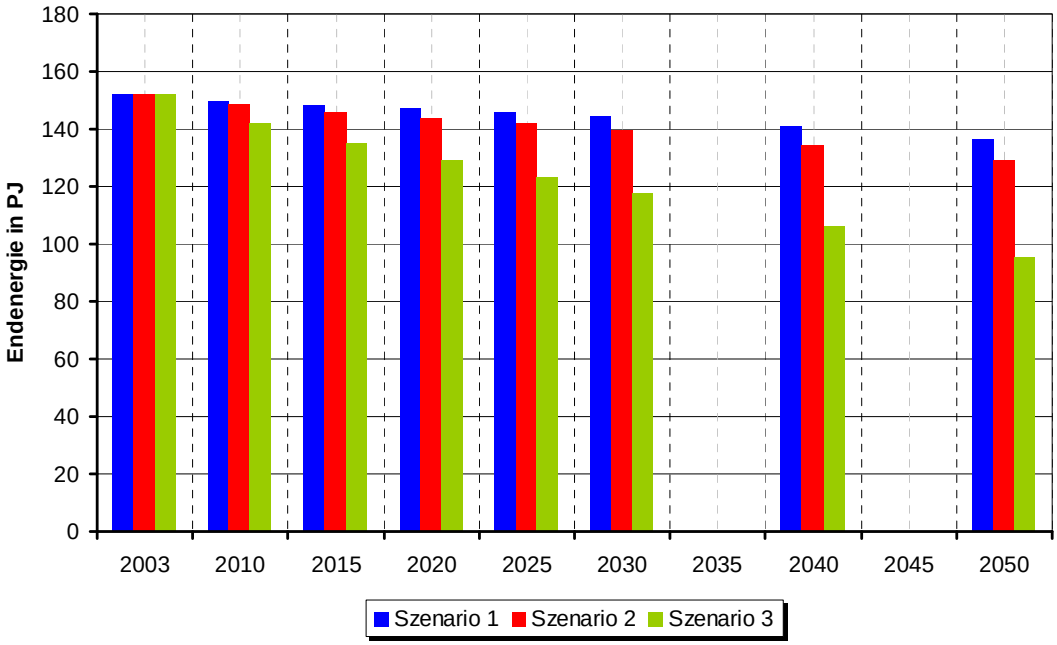

Abbildung 4-24: *Gegenüberstellung der Energieverbrauchsentwicklungen für die Warmwasserbereitstellung der Szenarien 1 bis 3*

Der Energiebedarf zur Prozesswärmebereitstellung erreicht in 2050 einen Wert von etwa 133 PJ, was einem Verbrauchsrückgang von nahezu 102 PJ über den Betrachtungszeitraum entspricht. Damit reduziert sich der Verbrauch gegenüber Szenario 2 in 2050 um weitere 33 PJ (vgl. **Abbildung 4-26**). Dies entspricht einer Minderung von 20 % aufgrund des reduzierten Bedarfs. Entsprechend der Ausführungen in Kapitel 2.2.3.5 kann die Solarthermie keinen Deckungsbeitrag zur Prozesswärme in GHD

liefern und der Verbrauchsrückgang verteilt sich analog zu den Vorgängerszenarien auf die eingesetzten Energieträger (vgl. **Abbildung 4-25**).

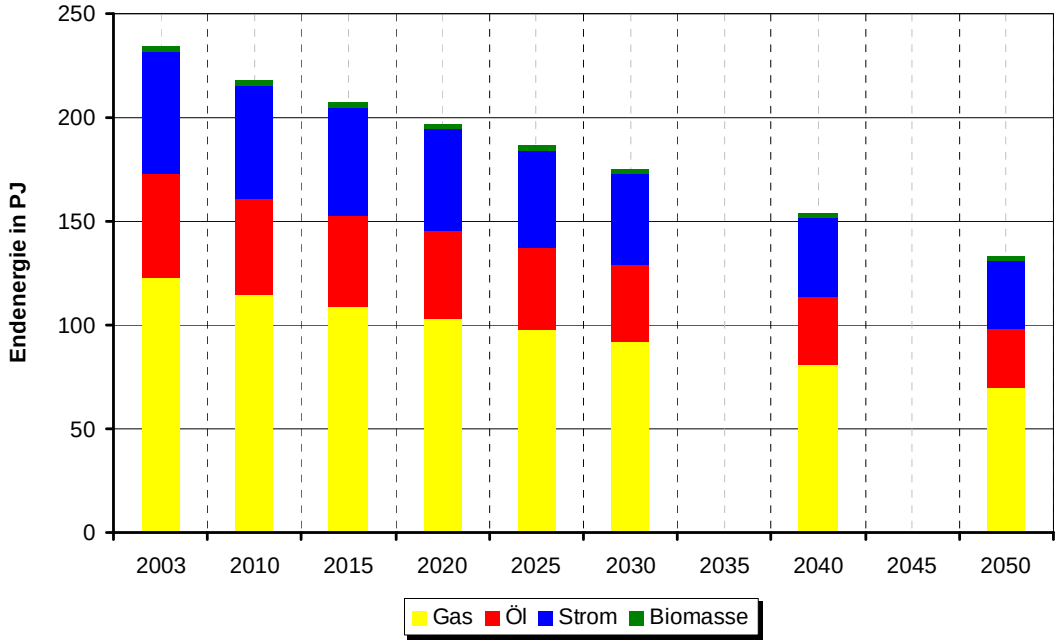

Abbildung 4-25: *Entwicklung des Endenergieverbrauchs für (sonstige) Prozesswärme (nach Energieträgern)*

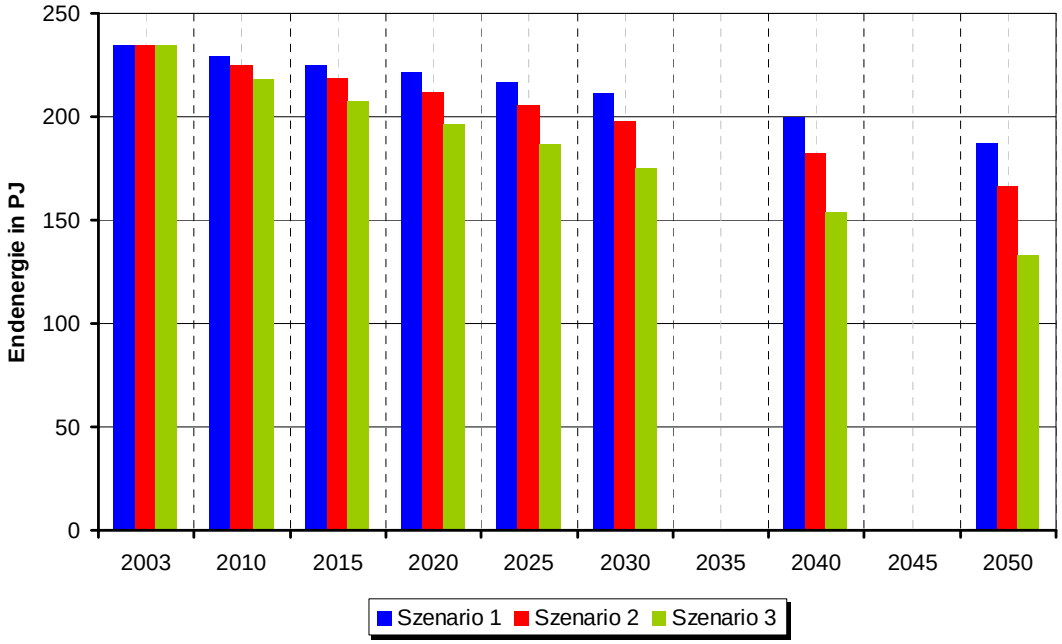

Abbildung 4-26: *Gegenüberstellung der Energieverbrauchsentwicklungen für die Prozesswärmebereitstellung der Szenarien 1 bis 3*

4.3 Entwicklung im Sektor Industrie

4.3.1 Maßgebliche Bedarfsdeterminanten

Im dritten Szenario werden die Bedarfsdeterminanten, welche von ifo in Zusammenarbeit mit der FfE vorgegeben wurden, unter der Voraussetzung des besten Nutzerverhaltens und der Anwendung der besten verfügbaren Technik angepasst. Im Bereich der Industrie betrifft dies den Produktionsindex in den einzelnen Industriesektoren. Die Abschwächung des Produktionswachstums kann zum einen auf die Reduktion des Energieeinsatzes je produziertem Gut durch eine Umstrukturierung der Prozesse zurückgeführt werden (Nutzerverhalten im Betrieb). Ebenso ist durch ein optimales Nutzerverhalten der Bevölkerung – einem sparsamen Umgang mit den vorhandenen Ressourcen – ein Produktionsrückgang gegenüber den ersten beiden Szenarien und damit ein geringerer Anstieg des Energiebedarfs in einigen Industriesektoren zu erwarten.

4.3.2 Technikstruktur

Die Technikstruktur bleibt durch das „beste Nutzerverhalten“ in Szenario 3 gegenüber den Vorgaben aus Szenario 2 unverändert.

4.3.3 Endenergieverbrauch

Da der Endenergieverbrauch direkt von der produzierten Gesamtmenge und dem spezifischen Energieverbrauch je produziertem Gut abhängt, spielt das Nutzerverhalten eine wichtige Rolle. Auf der anderen Seite kann in Produktionsprozesse nicht ohne weiteres im Sinne des „Szenario 3“ eingegriffen werden. Die Auswirkungen durch das geänderte Nutzerverhalten auf den Endenergieverbrauch fallen somit in diesem Bereich sehr gering aus. Ein weiterer Faktor ist das hohe Exportaufkommen in der Industrie. Das geänderte Nutzerverhalten der Konsumenten im Ausland bleibt unberücksichtigt, was zu einem weiter sinkenden Einfluss der veränderten Inlandsnachfrage auf den Produktionsindex führt.

4.3.3.1 Metallindustrie

Fortschreibung gesamt

Die gesamte Metallindustrie setzt sich aus den Branchen Metallerzeugung und erste Bearbeitung von Metallen sowie der Herstellung von Metallerzeugnissen zusammen. Für die starke Einbindung in die Weltwirtschaft spricht die aktuelle Exportquote der gesamten Industriesparte von rund 37 %. In diesem Bereich können Verhaltensänderungen bei verstärktem Recycling, bei einer längeren Nutzung von Erzeugnissen durch vermehrte Reparatur und bei der Substitution von Metallen durch andere Stoffe ansetzen. Recycling hat in der Metallindustrie seit jeher einen bedeutenden Stellenwert. Das gilt für die Buntmetalle, aber ebenso für Stahl und Eisen; beispielsweise ist Stahlschrott ein international gehandelter, begehrter Grundstoff für die Stahlerzeugung. Durch technische Fortschritte bei der Abfallbehandlung im Hinblick auf die Trennung und Aufbereitung der Stoffe hat der Stellenwert des Recycling in den letzten Jahrzehnten zugenommen. Knapp 12 % der Rohstoffe zur Stahlerzeugung sind Stahlschrott. Dazu kommt, dass die Rückführung metallischer Abfälle durch hohe Metallpreise ein

lukratives Geschäft ist. Schließlich haben die gesetzlichen Bestimmungen zu einer besseren Abfallverwertung beigetragen. Durch eine Änderung des Verhaltens bei der Verwertung von Altmetallen ist nur ein marginaler zusätzlicher Effekt zu erzielen. Der Energieverbrauch für die Produktion von Metallen wird davon auch nur in geringem Umfang verringert werden. Durch eine konsequente Reparatur von Geräten könnte die Produktion von Metallerzeugnissen spürbar beeinflusst werden. Relevant ist dieses Argument aber überwiegend für den privaten Bereich, es betrifft genau genommen nur die Gruppe, die aufgrund einer neuen Motivlage, wie z. B. einen Beitrag zum Klima- und Umweltschutz zu leisten, die Reparatur einer Neuanschaffung vorzieht. Daneben gibt es jedoch viele Konsumenten, die seit jeher ihre Geräte reparieren ließen, und Verbraucher, welche auch künftig Neuanschaffungen den Vorzug geben. Dabei ist weiter zu berücksichtigen, dass alte Geräte im Vergleich zu neuen zumeist einen höheren Energieverbrauch je Energiedienstleistung aufweisen. Im Bereich von Unternehmen unterliegt die Nutzung von Maschinen und Geräten ohnehin einem ökonomischen Kalkül.

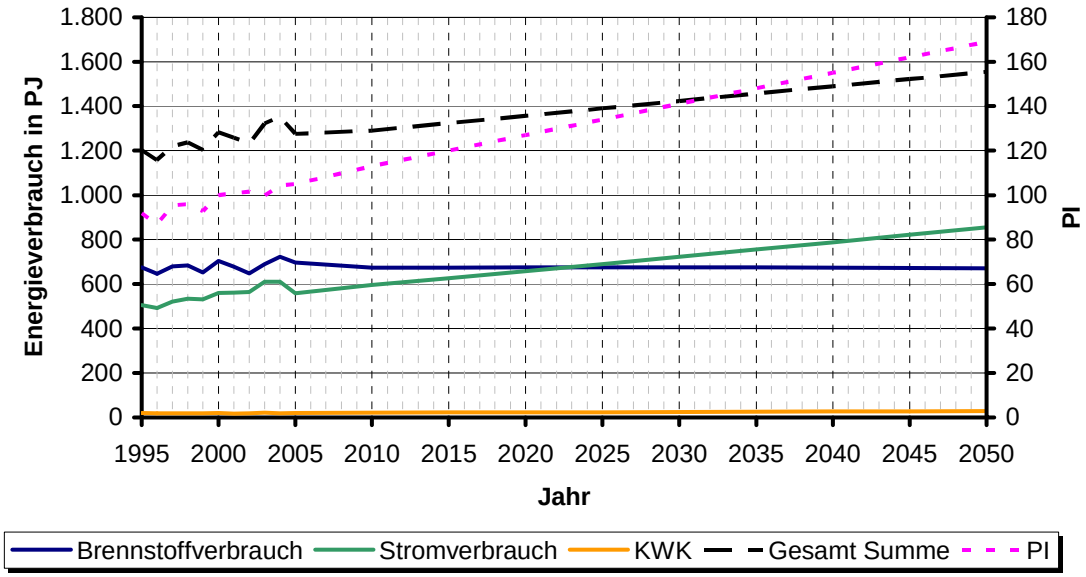

Abbildung 4-27: *Fortschreibung der Metallindustrie in Szenario 3*

Das Ziel der Aufrechterhaltung einer reibungslosen Produktion steht im Vordergrund; wie dies am Besten zu erreichen ist, durch Reparatur oder Neuanschaffung von Anlagen, wird nach wirtschaftlichen Kriterien entschieden. Neuanschaffungen kommen vor allem dann in Betracht, wenn die alten Anlagen nicht mehr die erforderliche Produktivität erbringen. Ein geringerer Bedarf von Erzeugnissen des Metallgewerbes könnte sich allenfalls dadurch ergeben, dass Güter der Metallindustrie durch andere Stoffe, wie z. B. Kunststoffe oder Holzprodukte, ersetzt werden. Dieser Vorgang ist allerdings schon seit vielen Jahren zu beobachten und stellt einen Teil des normalen Strukturwandels in der Wirtschaft dar. Vor diesem Hintergrund ist insgesamt davon auszugehen, dass sich Verhaltensänderungen nicht oder nur in geringem Umfang auf die Produktion in den beiden Metallbranchen auswirken. In **Abbildung 4-27** und **Abbildung 4-28** sind der gesamte Energieverbrauch und die Entwicklung des Brennstoffverbrauches für die Metallindustrie nochmals dargestellt.

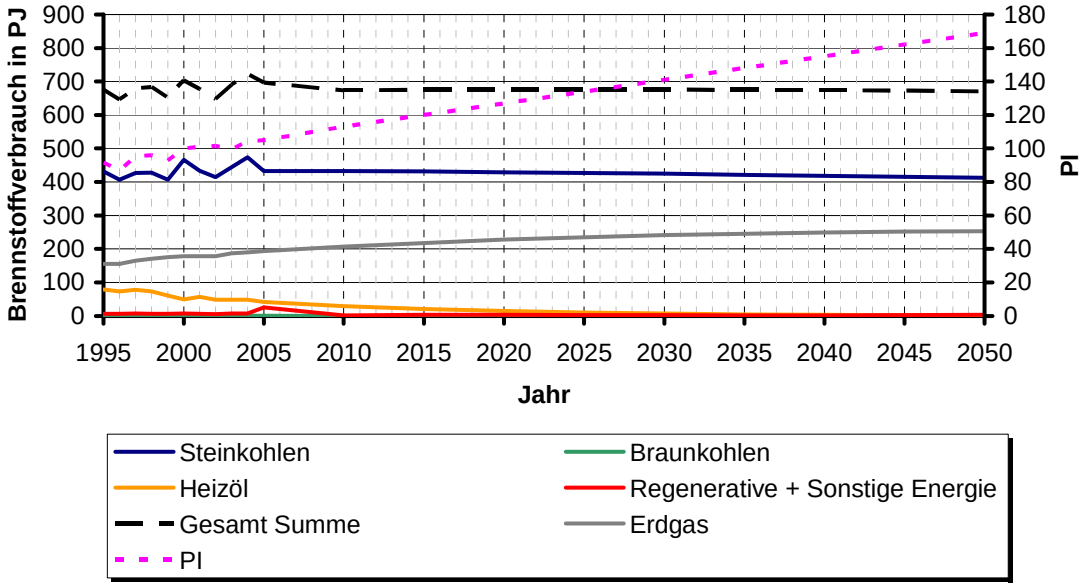

Abbildung 4-28: *Brennstoffverbrauch in der Metallindustrie in Szenario 3*

4.3.3.2 Chemieindustrie

Fortschreibung gesamt

Die deutsche chemische Industrie ist stark in die internationale Arbeitsteilung eingebunden, derzeit exportiert sie gut die Hälfte ihrer Produktion. Darüber hinaus gehen große Teile der Produktion als Vorprodukte in die inländische und ausländische Fertigung ein. Bedarfsveränderungen im Inland, die sich aus einer Veränderung der individuellen Konsumgewohnheiten ergeben, werden somit unmittelbar bei der Nachfrage nach den Endprodukten der Chemie, z. B. bei Seifen, Wasch-, Reinigungs- und Körperpflegemitteln, wirksam oder entstehen indirekt über die Güter anderer Branchen. Dies führt zu Anpassungen der Produktion. Durch den massiven Übergang zu biologischen Düngemitteln würde die Produktion chemischer Düngemittel und Stickstoffverbindungen zurückgehen. Allerdings ist das hier bestehende Potenzial vergleichsweise gering: 2006 entfielen auf diese Stoffe 1,77 % der gesamten Chemieproduktion. Zudem ist nicht von einem vollständigen Ersatz auszugehen. Das gilt analog für Schädlingsbekämpfungs-, Pflanzenschutz- und Desinfektionsmittel; ihr Anteil an der Produktion belief sich 2006 auf 0,93 %. Wird der Einsatz dieser Stoffe um 20 % verringert, dann fällt die Gesamtproduktion dadurch um rund 0,5 % niedriger aus. Durch die zu erwartende Entwicklung biotechnologisch veränderter Pflanzen, die infolge von Genveränderungen eine Resistenz gegen bestimmte Schädlinge aufweisen, könnte es auch zu einem geringeren Bedarf an Schädlingsbekämpfungsmitteln kommen. Die Kunststoffproduktion kann durch verstärktes Recycling von Kunststoffprodukten und durch einen geringeren Bedarf an Kunststoffen verringert werden. Dabei ist aber davon auszugehen, dass hochwertige Kunststoffe auch zukünftig in Primärformen bereitgestellt werden müssen. Dennoch dürfte in Teilbereichen beispielsweise durch Holzprodukte, Baumwolle, Wolle und andere Naturfasern ein hohes Substitutionspotenzial grundsätzlich möglich sein. Im Jahr 2006 machten Kunststoffe in Primärformen 19,79 % und Chemiefasern 3,17 % der deutschen Chemieproduktion aus. Eine plausible Annahme ist, dass etwa 15 % dieses Anteils bzw. rund 3,5 % der gesamten Produktion durch Bedarfs-

änderungen wegfallen. Chlor ist ein wichtiger Grundstoff für die chemische Industrie und findet sich in zahlreichen Produkten der Branche.

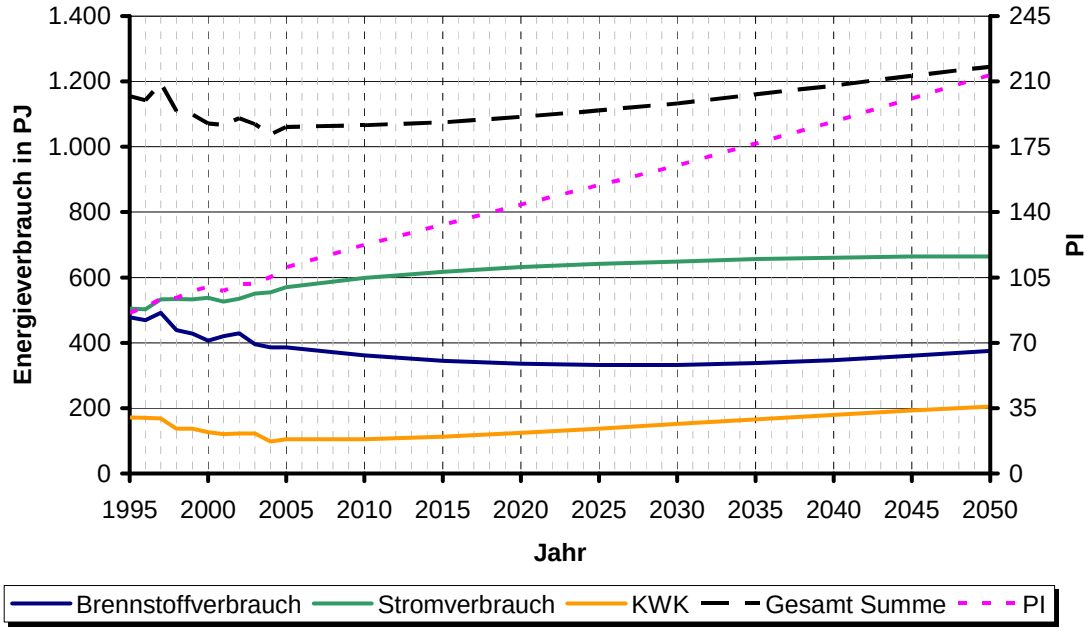

Abbildung 4-29: *Fortschreibung der Chemieindustrie in Szenario 3*

Es zählt zu den sonstigen anorganischen Grundstoffen und Chemikalien, die 2006 einen Anteil von 5,4 % an der Gesamtproduktion hatten. In Teilbereichen wird Chlor sicher durch andere Stoffe ersetzt werden, in der Breite der Anwendung auf absehbare Zeit aber nicht. Folglich kann allenfalls weniger als 10 % der Chlorproduktion, also etwa 0,5 % der gesamten Produktionsmenge, substituiert werden. Fasst man die einzelnen Bereiche zusammen, dann erhält man für 2050 eine um rund 4,5 % geringere Produktion. Das bedeutet in der gesamten Branche ein um ca. 0,1 % geringeres Wachstum pro Jahr über den gesamten Zeitraum der Jahre 2003 bis 2050. Der Energieeinsatz in der Chemieindustrie gegenüber Szenario 2 nimmt um 3,4 % ab. Es werden nicht die 4,5 % Rückgang erreicht, da sich der Produktionsrückgang nur auf den variablen Teil des Energieverbrauches auswirkt. Der Grundlastanteil bleibt hingegen unberührt. Insgesamt können im Vergleich zu Szenario 2 ca. 40 PJ, gegenüber Szenario 1 105 PJ eingespart werden. Dargestellt ist diese Entwicklung in **Abbildung 4-29** (Gesamtfortschreibung) und **Abbildung 4-30** (Brennstoffverbrauch).

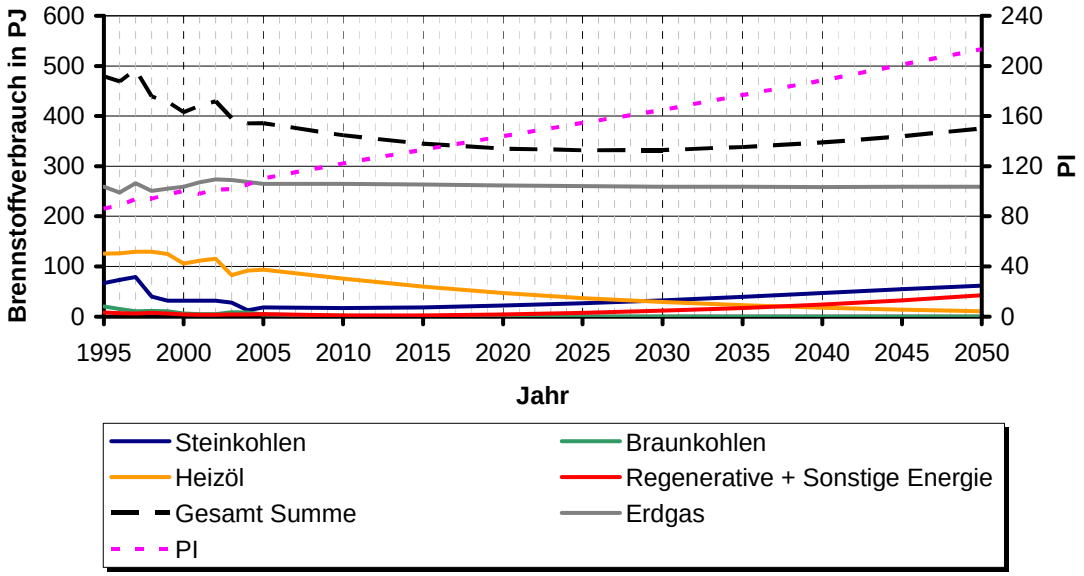

Abbildung 4-30: *Brennstoffverbrauch in der Chemieindustrie in Szenario 3*

4.3.3.3 Glasgewerbe, Verarbeitung von Steinen und Erden

Fortschreibung gesamt

Die deutsche Glasindustrie ist mit ihren Erzeugnissen stark auf dem Weltmarkt vertreten, ihre Exportquote beläuft sich auf rund 40 %. Durch Verhaltensänderungen der Verbraucher kann der Glasverbrauch nur in Teilbereichen, wie etwa dem Hohlglas, beeinflusst werden. In diesem Bereich kann sich der Konsument durch Unterstützung von Recyclingmaßnahmen aktiv beteiligen. Grundsätzlich ist festzuhalten, dass bei Glas die Recyclingquote sehr hoch ist. Diese Aktivitäten können sicher in Zukunft noch intensiviert werden. Der die Produktion beeinflussende Effekt ist als eher gering zu veranschlagen. Allerdings wird der Energieverbrauch zur Produktion in der Branche durch die vermehrte Verwendung von Altglas spürbar beeinflusst. Dieser Effekt wurde jedoch bereits in Szenario 2 berücksichtigt, da die Produktionsprozesse dadurch direkt betroffen sind. Einen weiteren Ansatz zur Einschränkung der Glasproduktion stellt der stärkere Umstieg von Einweg- auf Mehrwegflaschen dar. Das Potenzial dieser Maßnahme ist aber als sehr begrenzt anzusehen, da Mehrwegflaschen nicht beliebig oft verwendbar sind.

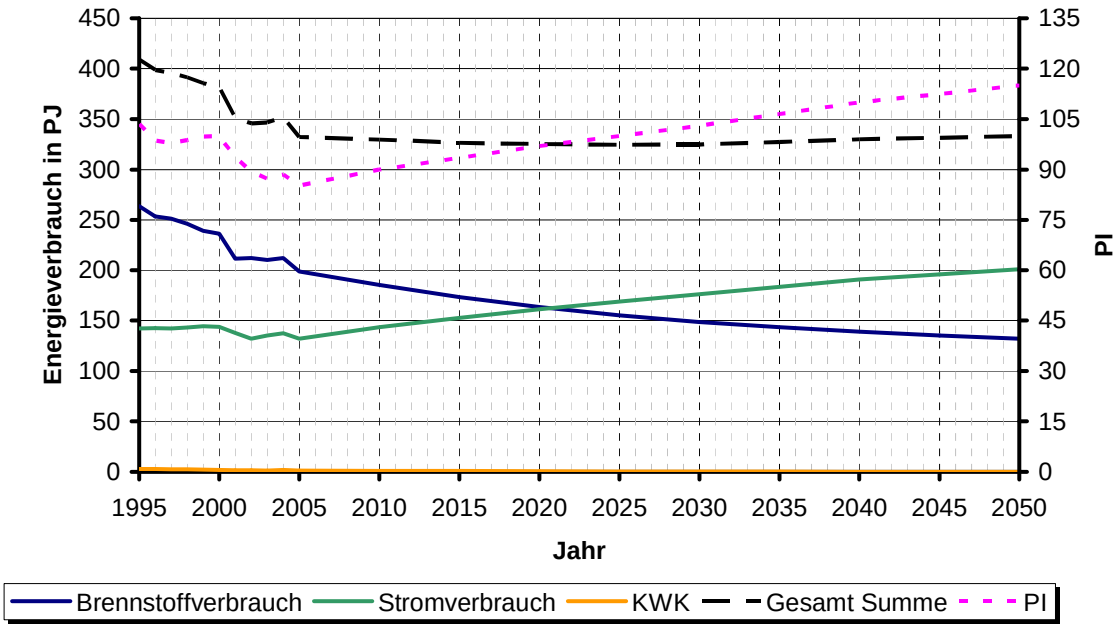

Abbildung 4-31: *Fortschreibung der Glasindustrie in Szenario 3*

Eine signifikante Veränderung der Glasproduktion infolge veränderter Bedarfsmuster ist daher nicht zu erwarten.

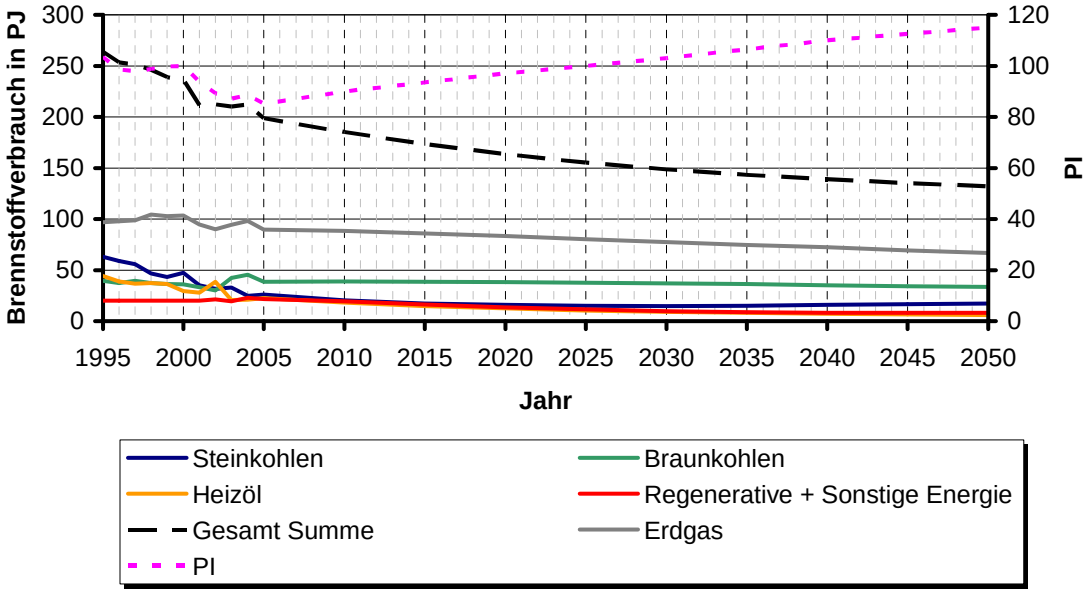

Abbildung 4-32: *Brennstoffverbrauch in der Glasindustrie im Szenario 3*

Insgesamt wird davon ausgegangen, dass sich im Bereich der Glasindustrie keine Veränderungen zum Szenario 2 ergeben. Dargestellt sind die Ergebnisse in **Abbildung 4-31** und **Abbildung 4-32**.

4.3.3.4 Papier-, Verlags- und Druckgewerbe

Fortschreibung gesamt

Für das deutsche Papiergewerbe, das derzeit etwa 40 % seiner Erzeugnisse im Ausland absetzt, kann die Höhe der Produktion durch verschiedenen Maßnahmen seiner

industriellen und privaten Abnehmer sowie durch den Wandel der Arbeitsstrukturen beeinflusst werden. Schon seit vielen Jahren spielt das Recycling eine zentrale Rolle. Dabei waren gesetzliche Bestimmungen, aber auch ökonomische Gesichtspunkte der Beschaffung und technische Verbesserungen bei der Aufbereitung von Altpapier entscheidende Anstöße für diese Entwicklung. Es ist davon auszugehen, dass sich dieser Trend zur verstärkten Nutzung von Altpapier fortsetzen wird. Derzeit werden bereits 70 % des Papiers aus Altpapier hergestellt. Die Höhe der Produktion wird davon kaum beeinflusst, eher der Energieverbrauch in den Produktionsprozessen selbst. Das Ausmaß der Nutzung von Papier kann auf längere Sicht auch dadurch beeinflusst werden, dass zunehmend elektronische Speichermedien an die Stelle von Papier treten; ein Schlagwort ist hier das „papierlose Büro".

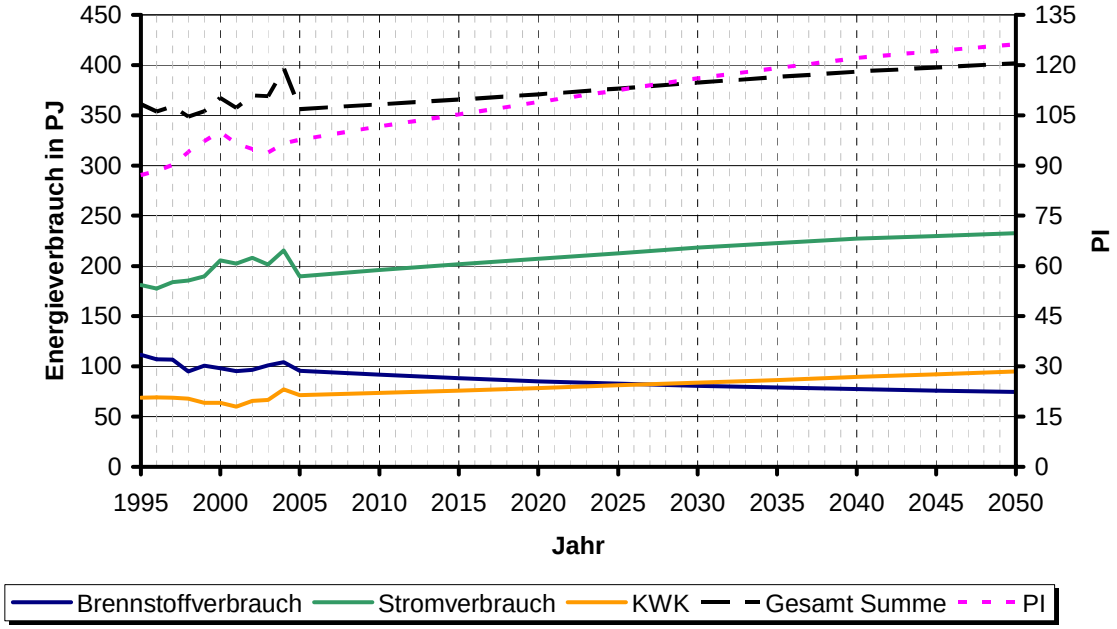

Abbildung 4-33: *Fortschreibung der Papierindustrie in Szenario 3*

Die Auswirkungen auf die Produktion des Papiergewerbes dürften aber hierdurch vergleichsweise gering sein, da der Anteil der Herstellung von Schreibwaren und Bürobedarf aus Papier und Pappe am Inlandsumsatz des deutschen Papiergewerbes 2007 nur bei rund 4,5 % lag. Außerdem ist derzeit die Langzeitstabilität elektronischer Speicher noch verbesserungsbedürftig. Trotz der auf diesem Feld in den kommenden Jahren sicher zu erzielenden Fortschritte ist davon auszugehen, dass nur ein Teil des Büropapiers substituiert werden kann. Unter der Annahme, dass die zunehmende Nutzung elektronischer Medien dazu führt, dass die Nachfrage nach Zeitungen in gedruckter Form im Lauf der kommenden Jahrzehnte zurückgehen wird, könnte es zu einem Rückgang beim Papierbedarf für Zeitungen um etwa 30 % kommen. Das bedeutet eine Verringerung des Papierbedarfs, der gegenwärtig bei etwa 2,5 Mio. t liegt, um 0,75 Mio. t. Bezogen auf die gesamte derzeitige Papierproduktion in Deutschland kann durch alle Maßnahmen von einer rund 3 %igen Reduktion der Papierherstellung ausgegangen werden. Dies ergibt einen Rückgang des Energieverbrauches um 8 PJ (2 %) gegenüber Szenario 2 und 33 PJ im Vergleich zu Szenario 1 (siehe **Abbildung 4-33** und **Abbildung 4-34**).

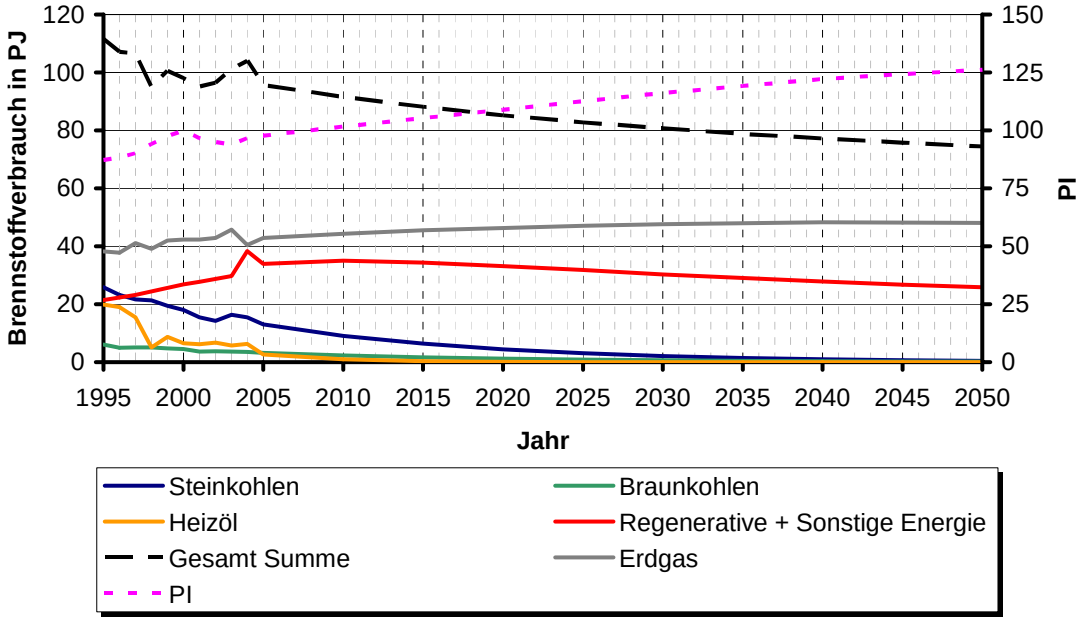

Abbildung 4-34: *Brennstoffverbrauch in der Papiersindustrie in Szenario 3*

4.3.3.5 Ernährungsgewerbe

Fortschreibung gesamt

Die Erzeugnisse des Ernährungsgewerbes sind direkt oder indirekt für Endverbraucher bestimmt. Die Inlandsorientierung der Branche wird dadurch zum Ausdruck gebracht, dass nur rund 17 % ihrer Produktion in den Export gehen. Hier bestehen somit durch eine Änderung des Verbraucherverhaltens besonders große Möglichkeiten der Einflussnahme auf den Umfang und die Struktur der Produktion. Ein wichtiger Ansatz besteht in der Änderung des Ernährungsbewusstseins. Die Ernährungsgewohnheiten können sich in der Weise verändern, dass das Gewicht vegetarischer Ernährung zunimmt oder die Verbraucher verstärkt Produkte aus ihrer Region bevorzugen. Auch eine zunehmende Präferenz für frische Waren könnte etwa die Produktion von Tiefkühlprodukten sinken lassen. Durch die starke Einbindung Deutschlands in den internationalen Handel bestände für die Industrie die Möglichkeit, durch Steigerung der Exporte die geringere inländische Nachfrage zu kompensieren. Insgesamt ist aber davon auszugehen, dass die Produktion nur vergleichsweise wenig auf den veränderten Bedarf reagieren wird.

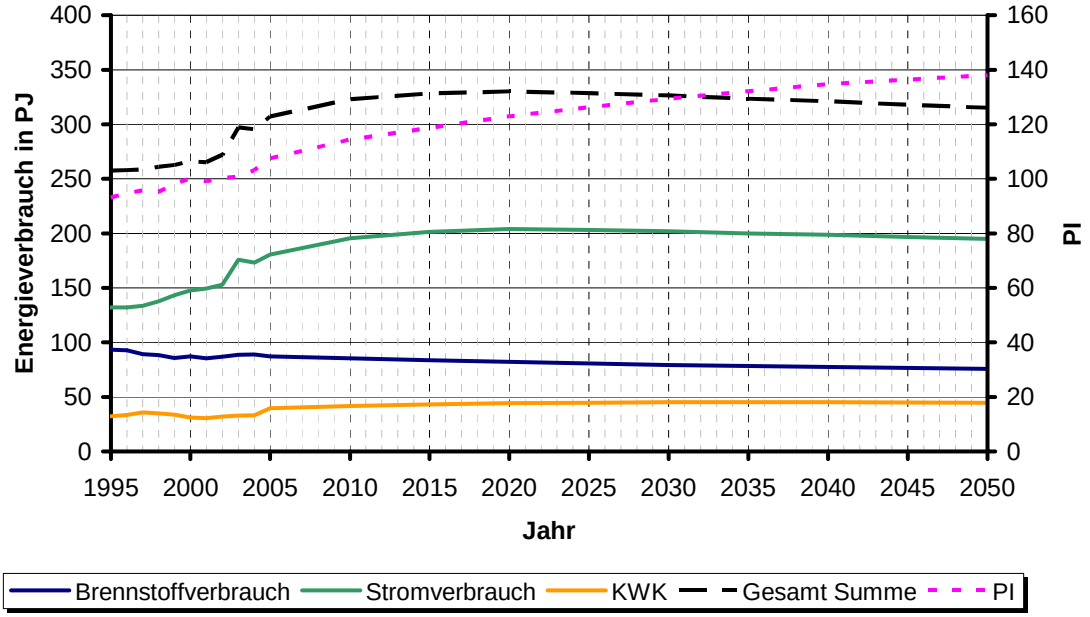

Abbildung 4-35: *Fortschreibung der Ernährungsindustrie in Szenario 3*

Andere Einflüsse, wie der Rückgang und die Alterung der Bevölkerung, dürften sich aber wesentlich stärker auf die Produktion des Ernährungsgewerbes auswirken. Insgesamt wird hier unterstellt, dass die Produktion in der Ernährungsindustrie bis 2050 um 2 % geringer ausfallen wird. Nur wenn sich die Einstellungen der Bevölkerung hinsichtlich der Ernährung wesentlich stärker verändern sollten, könnte es auch zu einem Rückgang der Produktion um rund 5 % kommen. Da das Szenario 3 das bestmögliche Nutzerverhalten unterstellt, wird von einer Reduktion um 5 % ausgegangen. Dargestellt sind die Ergebnisse, ein ca. 4 %iger (9 PJ) Rückgang des Energieverbrauches gegenüber Szenario 2, in **Abbildung 4-35** und **Abbildung 4-36**. Im Vergleich zu Szenario 1 sinkt der Energiebedarf in der Ernährungsindustrie um ca. 60 PJ.

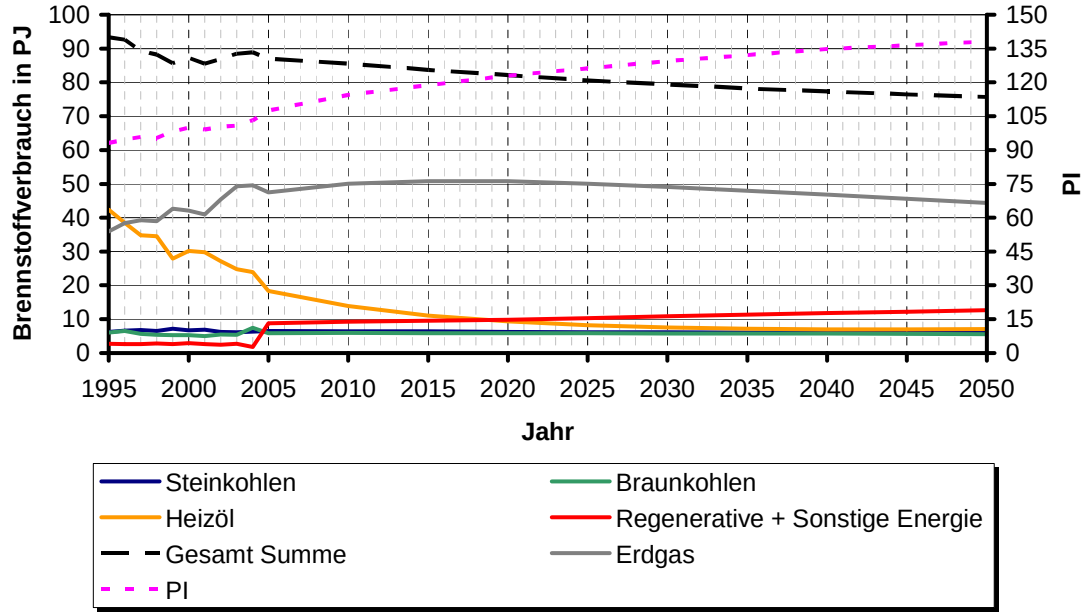

Abbildung 4-36: *Brennstoffverbrauch in der Ernährungsindustrie in Szenario 3*

4.3.3.6 Automobilindustrie

Fortschreibung gesamt

Die Automobilindustrie ist von den großen Branchen des verarbeitenden Gewerbes besonders stark in den Welthandel eingebunden. Gut 60 % der deutschen Produktion werden exportiert. Dazu kommt noch die Fertigung deutscher Hersteller im Ausland, die eine seit Jahren steigende Tendenz aufweist. Durch Verhaltensänderungen der heimischen Abnehmer sind die Auswirkungen auf die Produktion in Deutschland vor diesem Hintergrund begrenzt. Damit ein solcher Bedarfswandel spürbare Effekte nach sich zieht, müssen entsprechende Voraussetzungen gegeben sein. So ist vor allem das Angebot des öffentlichen Verkehrs entsprechend zu erhöhen. Nur dann ist ein Anreiz gegeben, von Kraftfahrzeugen auf diese Verkehrsträger umzusteigen. Aber auch von der weiteren Zunahme des Straßenverkehrs und der starken Ausnutzung der Verkehrswege können Effekte ausgehen. Bei Verkehrsteilnehmern kann eine nur temporäre Beteiligung am Individualverkehr, durch Nutzung von Mietwagen oder Carsharing-Modellen, attraktiv erscheinen. Dazu kommt, dass durch die Alterung der Bevölkerung die Neuanschaffung von Fahrzeugen eher in größeren zeitlichen Abständen erfolgen wird. Unabhängig davon ist heute schon zu beobachten, dass die Fahrzeuge zunehmend länger genutzt werden, eine Entwicklung, die sich in der Tendenz fortsetzen wird. Schließlich werden die Produktionswerte in der Automobilindustrie auch von der Art, Größe und Ausstattung der Fahrzeuge beeinflusst. Es kann unterstellt werden, dass die Fahrzeugtypen stärker an ihren Hauptverwendungszweck angepasst werden. Zu nennen ist insbesondere der Trend zu Platz sparenden Stadtfahrzeugen, die in Zukunft vermehrt mit Elektroantrieb angeboten werden. Sofern es, wie für den Sektor Verkehr angenommen, zu einer deutlichen Abnahme des motorisierten Personenverkehrs kommt, ist nicht auszuschließen, dass die Produktion der Branche langsamer wächst und bis 2050 um rund 5 % unter dem Niveau des Referenzszenarios liegt.

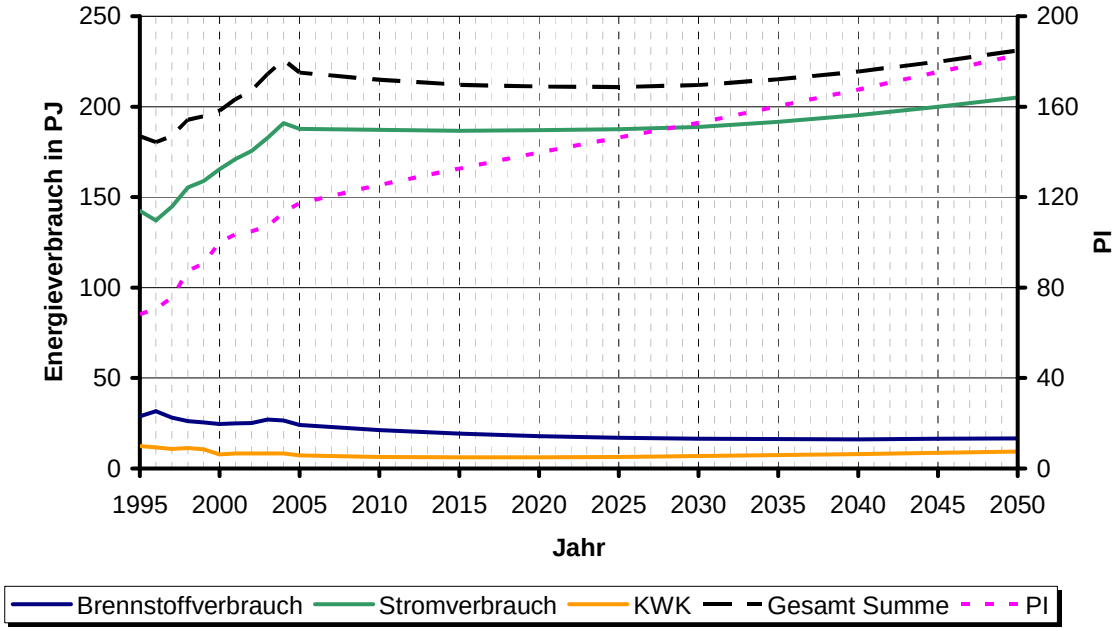

Abbildung 4-37: *Fortschreibung der Automobilindustrie in Szenario 3*

Insgesamt ergibt dieser Produktionsrückgang eine Reduktion des Energiebedarfs von 10 PJ (4,6 %) gegenüber Szenario 2. Dieser Wert liegt auf Grund des niedrigen Grundlastanteils in der Automobilindustrie im Bereich des Produktionsrückganges. Abgebildet werden der Verlauf des Energie- und Brennstoffverbrauches der Automobilindustrie in **Abbildung 4-37** und **Abbildung 4-38**.

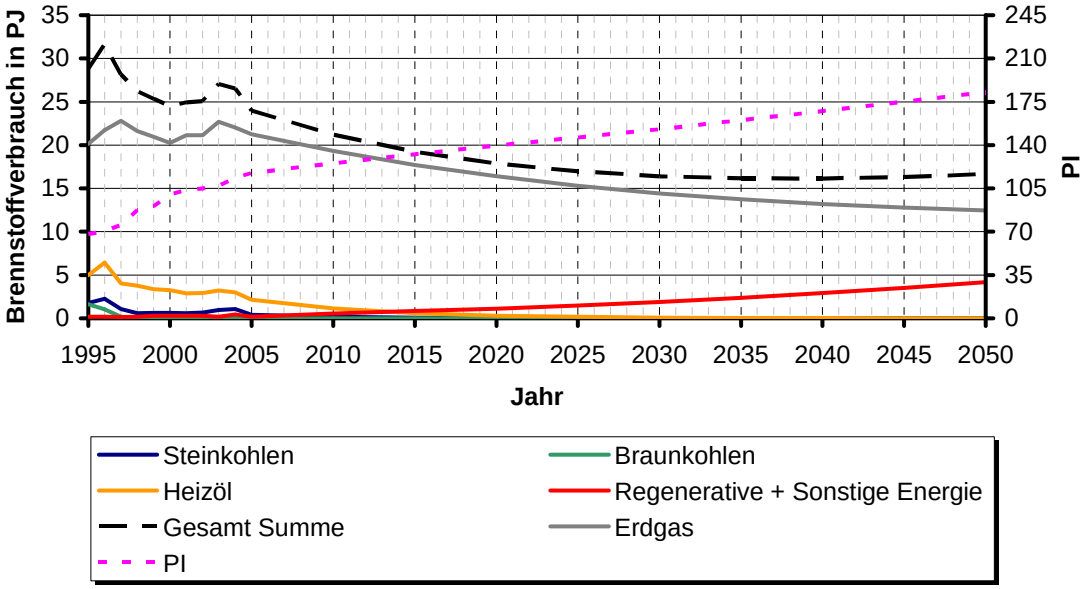

Abbildung 4-38: *Brennstoffverbrauch in der Automobilindustrie in Szenario 3*

4.3.3.7 Maschinenbau

Fortschreibung gesamt

Der Maschinenbau, der ebenfalls rund 60 % seiner Erzeugnisse exportiert, dürfte von Nutzungsänderungen seiner Abnehmer im Inland nur in geringem Umfang betroffen sein. Für die Abnehmer der Maschinen kommt es vor allem darauf an, mit einer hohen Produktivität zuverlässig und konkurrenzfähig ihre Güter herstellen zu können. Nutzungsänderungen, die auf längere Sicht das Produktionsniveau beeinflussen können, sind in organisatorischen Maßnahmen zu sehen, wie beispielsweis in einer längeren Nutzung des Maschinenparks. Ein Ansatzpunkt stellt eine kontinuierliche Wartung und Instandhaltung der Maschinen dar. Allerdings sind diese Maßnahmen schon seit jeher von zentraler Bedeutung für einen reibungslosen Betrieb. Es ist davon auszugehen, dass die hier eventuell möglichen Verbesserungspotenziale nach und nach mobilisiert werden. Dazu kommt noch eine verstärkte Nutzung professioneller Serviceangebote, die aber vor allem aus wirtschaftlichen Erwägungen in Anspruch genommen werden dürften. Dadurch könnten sich die Anschaffungszyklen von neuen Maschinen geringfügig vergrößern lassen, der davon ausgehende Einfluss auf die Produktion im Maschinenbau dürfte aber eher klein ausfallen.

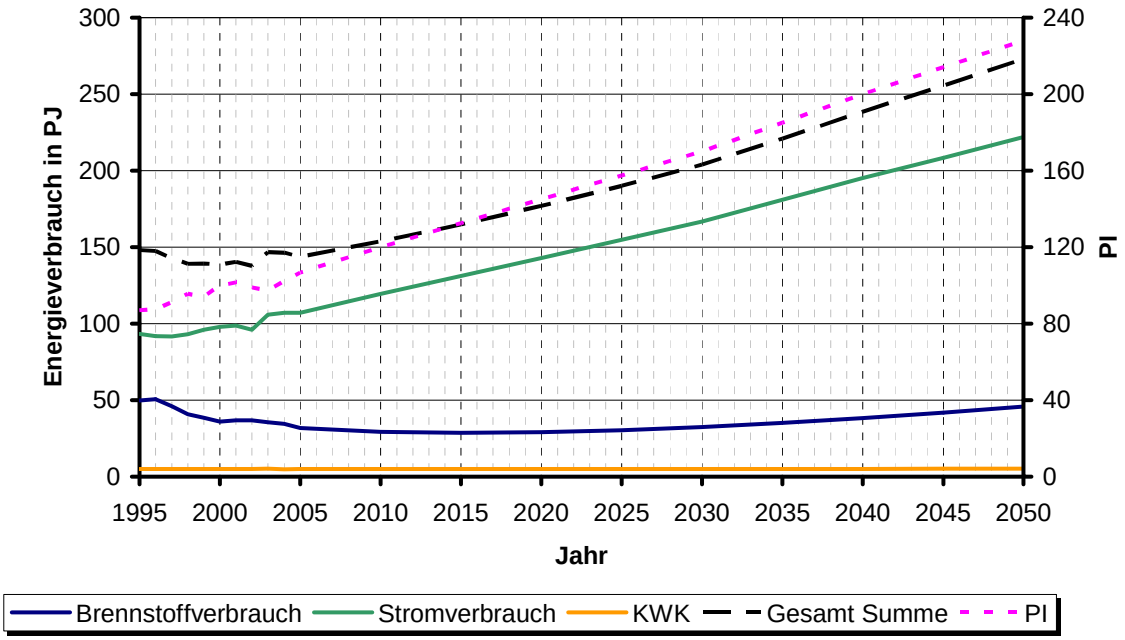

Abbildung 4-39: *Fortschreibung der Maschinenbauindustrie in Szenario 3*

Es wird daher von einer gegenüber dem Referenzfall unveränderten Produktion im Jahr 2050 ausgegangen. Somit verändert sich der Energiebedarf gegenüber dem Szenario 2 nicht (siehe **Abbildung 4-39** und **Abbildung 4-40**).

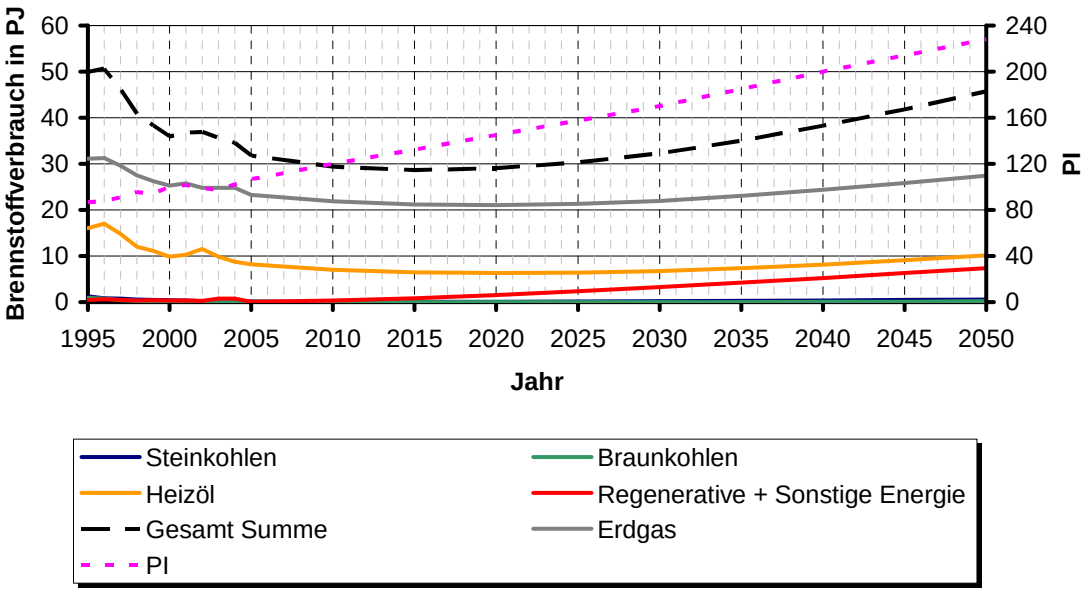

Abbildung 4-40: *Brennstoffverbrauch der Maschinenbauindustrie in Szenario 3*

4.3.3.8 Restliche Sektoren

Fortschreibung gesamt

In der restlichen Industrie wird davon ausgegangen, dass es keine Veränderung in den Bedarfsdeterminanten geben wird. Ein durch besseres Nutzerverhalten hervorgerufener geringfügiger Rückgang im Energieverbrauch wird durch den Substitutionseffekt einen Energiezuwachs in einem anderen Sektor zur Folge haben.

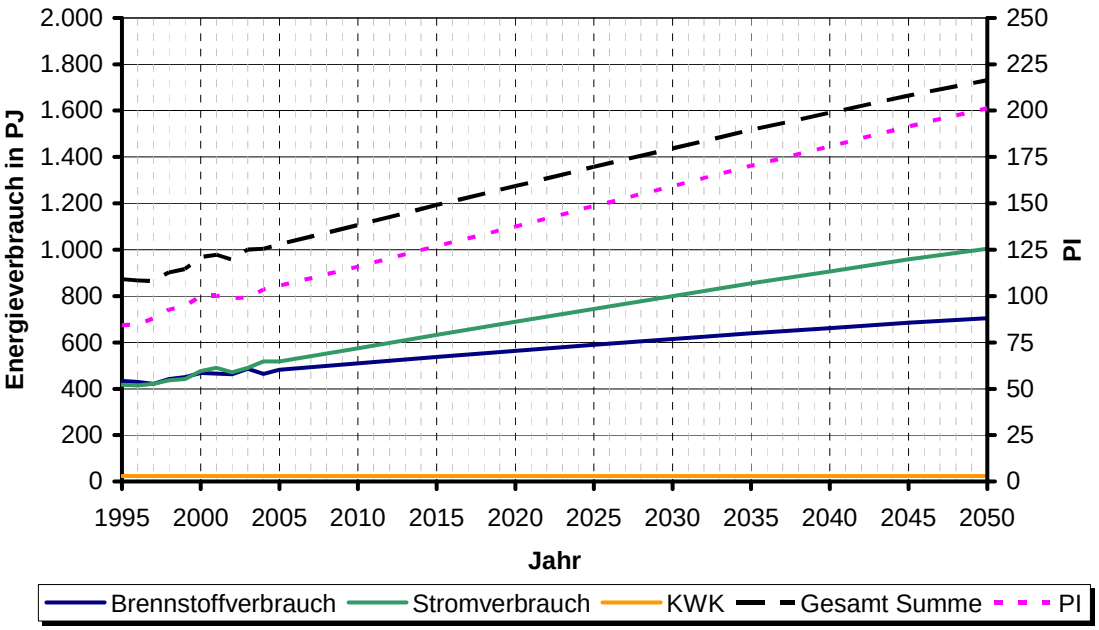

Abbildung 4-41: *Fortschreibung der restlichen Industrie in Szenario 3*

Ein teilweiser Verzicht auf ein bestimmtes Produkt wird durch die steigenden Qualitätsanforderungen in allen Bereichen und dem damit verbundenen höheren Energieaufwand zur Herstellung kompensiert. Somit ergeben sich für das 3. Szenario keine Veränderungen gegenüber Szenario 2 (**Abbildung 4-41** und **Abbildung 4-42**).

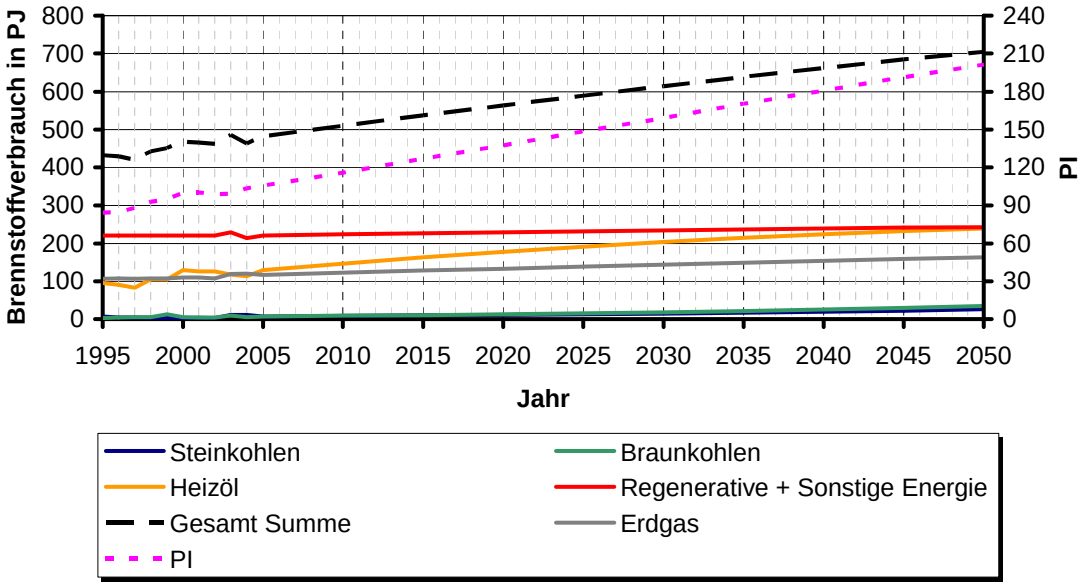

Abbildung 4-42: *Brennstoffverbrauch in der restlichen Industrie in Szenario 3*

4.3.3.9 Zusammenfassung Industrie – Szenario 3

Gegenüber Szenario 2 reduziert sich der gesamte Gesamtverbrauch um 1 %, was einer Energiemenge von etwa 40 PJ entspricht.

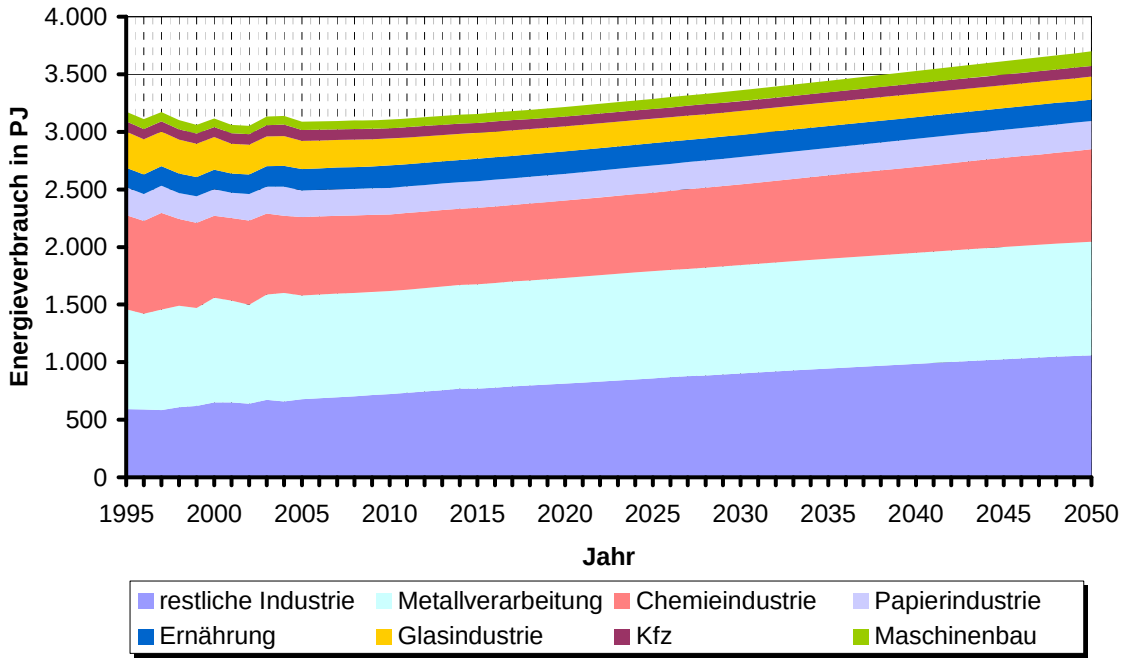

Abbildung 4-43: *Fortschreibung der Gesamtverbräuche in den Industriesektoren (Szenario 3)*

Der Energieverbrauch für Szenario 3 ist in **Abbildung 4-43** dargestellt. Die Aufteilung auf den Strom- und den Brennstoffverbrauch ist in **Abbildung 4-44** und **Abbildung 4-45** abgebildet. Diese sehr geringe Reduktion ist auf die starke Exportabhängigkeit der Industrie zurückzuführen. Dadurch kann ein großer Teil der eingesetzten Energie nicht über ein „bestes Nutzerverhalten" erreicht werden. Der zweite Punkt ist, dass das beste Verhalten der Industrie darin besteht, den Energieaufwand für ein produziertes Gut zu senken. Dies geschieht aber fast ausnahmslos über den Einsatz effizienter Techniken bei der Herstellung. Dieser Aspekt wird aber bereits in Szenario 2 betrachtet. Somit bleibt nur eine Verhaltensänderung der inländischen Bevölkerung. Dieser Teil wirkt sich jedoch nur in stark abgeschwächter Form auf den Energieverbrauch der Industrie aus, da die Industriegüter auch weiterhin benötigt werden.

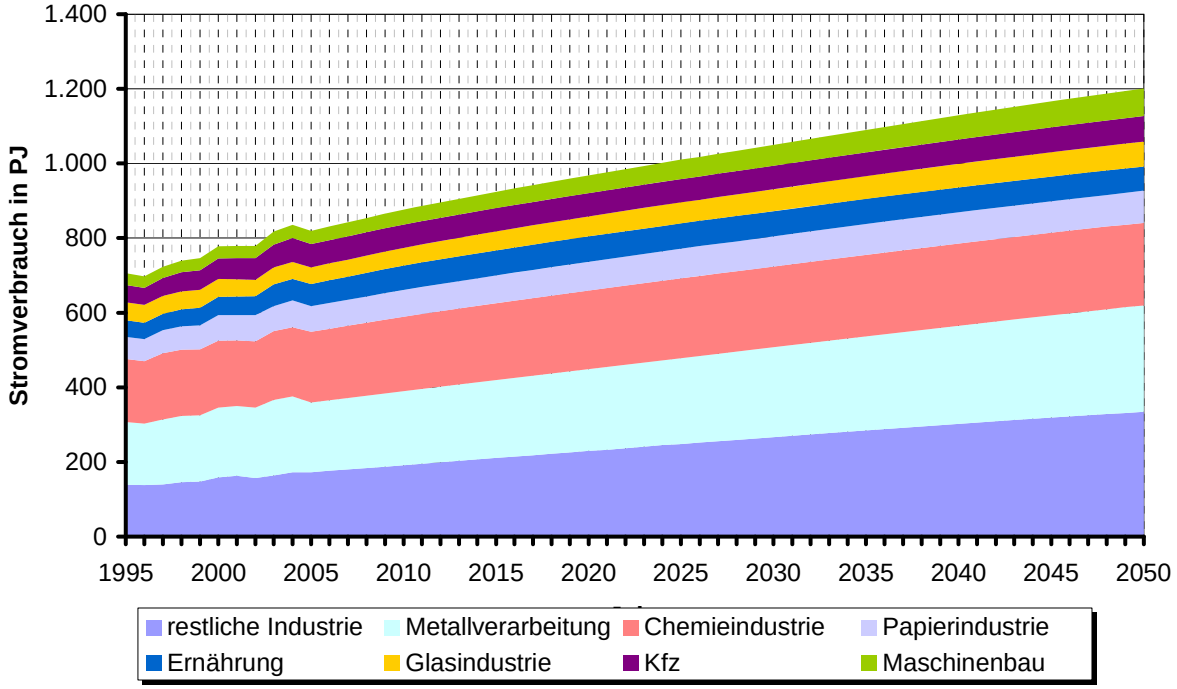

Abbildung 4-44: *Fortschreibung des Stromverbrauches im Industriesektor (Szenario 3)*

Produktionsrückgänge durch geändertes Nutzerverhalten können auch zum Teil durch eine Erhöhung der Exportquote wieder ausgeglichen werden.

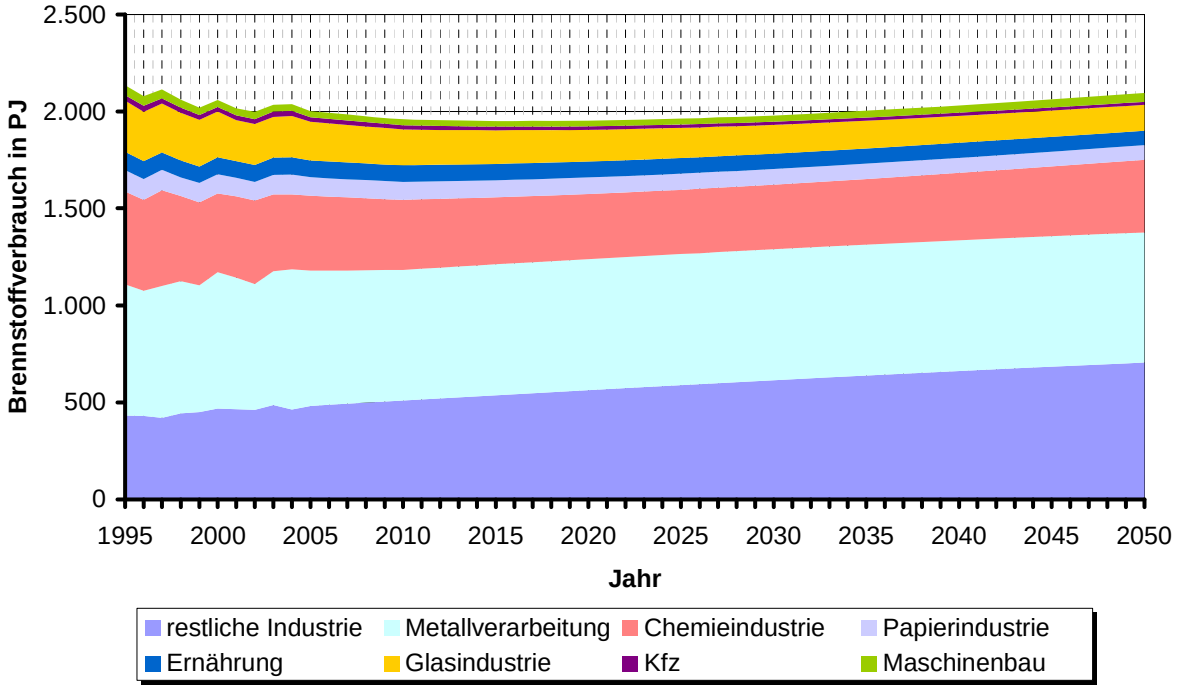

Abbildung 4-45: *Fortschreibung des Brennstoffverbrauches im Industriesektor (Szenario 3)*

4.4 Entwicklung im Sektor Verkehr

Dieses Szenario unterscheidet sich von dem Referenzszenario dadurch, dass sowohl die energieeffizienteste Technik entwickelt und eingesetzt wird, als auch energiebewusstes Nutzerverhalten weite Verbreitung findet. Die Fahrstrecken der Bevölkerung verringern sich moderat, da die Fahrten besser organisiert werden und Heimarbeit eine größere Verbreitung findet. Ein Umstieg auf energieeffizientere Verkehrsarten wird vorgenommen, sofern der Komfortverlust in Grenzen bleibt. Gegenüber dem Szenario 2 „Erhöhte Technikeffizienz“ finden die effizienteren Antriebe raschere Verbreitung.

4.4.1 Maßgebliche Bedarfsdeterminanten

Straßenverkehr

Während im Referenzszenario davon ausgegangen wird, dass im Durchschnitt jeder Einwohner jährlich ca. 11.000 km in einem Straßenfahrzeug zurücklegt, geht die individuelle Verkehrsleistung in diesem Szenario deutlich zurück und erreicht ca. 8.000 Pkm/(P•a) in 2050 (**Abbildung 4-46**). Dies wird durch ein Reduzieren unnötiger Fahrten, besseres Organisieren der Fahrten sowie durch Wechsel auf andere Verkehrsarten, vorrangig den Schienenverkehr, erreicht. Unter Berücksichtigung der Bevölkerungsentwicklung ergibt sich eine stark rückläufige kumulierte Verkehrsleistung. Die Beförderungsleistung der öffentlichen Straßenverkehrsmittel nimmt zu und erreicht in 2050 einen Anteil von 16,0 %. Im Jahr 2005 lag dieser Anteil noch bei 5,6 %.

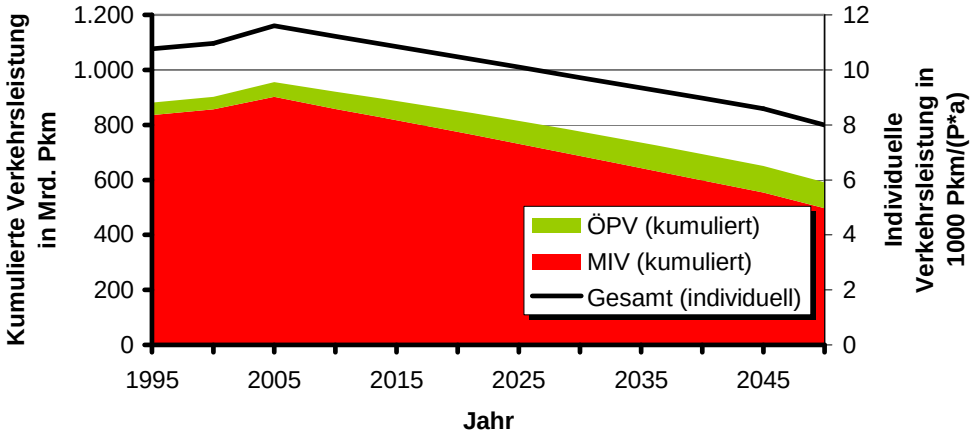

Abbildung 4-46: *Verkehrsleistung des Personenstraßenverkehrs*

Der Güterstraßenverkehr verläuft nicht stetig steigend wie im Referenzszenario, sondern entwickelt sich ab 2025 rückläufig (**Abbildung 4-47**). Am Höchstwert erreicht die Transportleistung ca. 400 Mrd. tkm, in 2050 geht sie auf ca. 350 Mrd. tkm zurück.

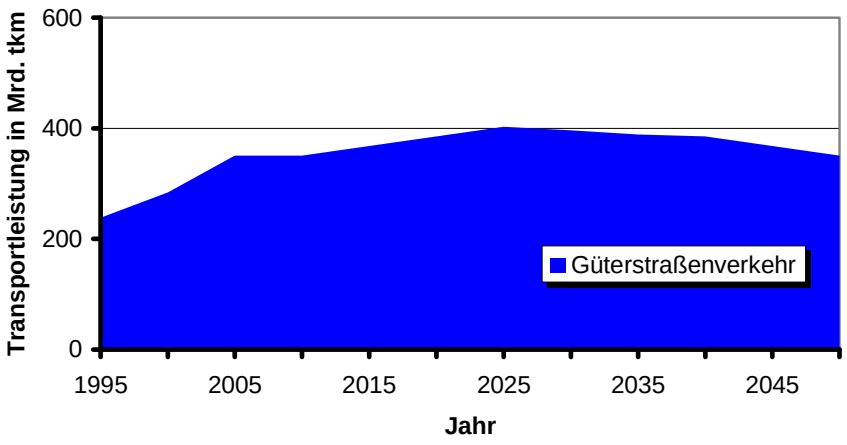

Abbildung 4-47: *Verkehrsleistung des Güterstraßenverkehrs*

Luftverkehr

Der Trend der stetig steigenden Kilometeranzahl, die im Durchschnitt jeder Einwohner im Jahr mit einem Flugzeug zurücklegt, wird nicht fortgesetzt (**Abbildung 4-48**). Dabei werden nur die Flüge bilanziert, die in Deutschland starten. Während dies in 2010 ca. 2.270 km waren, geht der Wert bis 2050 auf ca. 1.700 km zurück und entspricht somit etwa dem Niveau des Jahres 2000. Bezogen auf die gesamte Bevölkerung bedeutet dies einen Rückgang von 186 Mrd. Pkm (2010) auf 126 Mrd. Pkm.

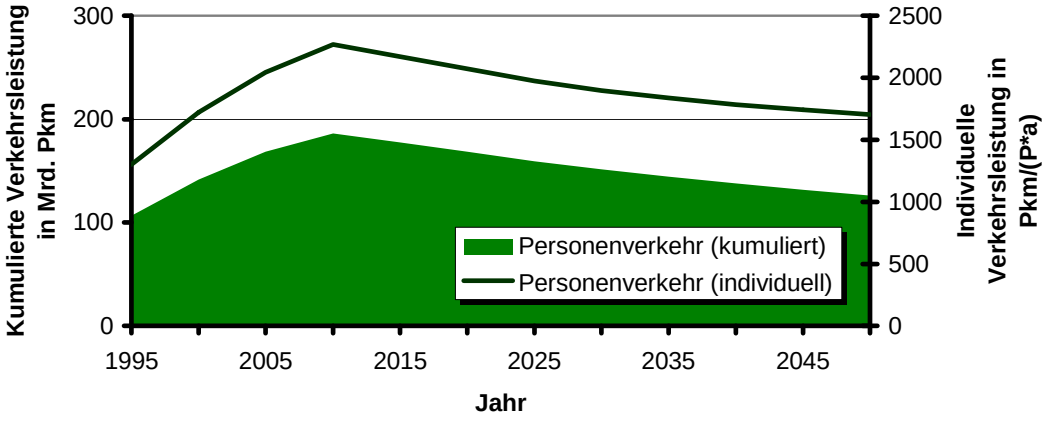

Abbildung 4-48: *Verkehrsleistung des Personenluftverkehrs*

Ähnliches gilt für den Güterluftverkehr (**Abbildung 4-49**). Die Zunahme der Transportleistung endet 2010 (8,5 Mrd. tkm) und wird von einem Rückgang bis 2050 auf 7,2 Mrd. tkm abgelöst. Die Transportleistung erreicht damit wieder das Niveau aus dem Jahr 2005.

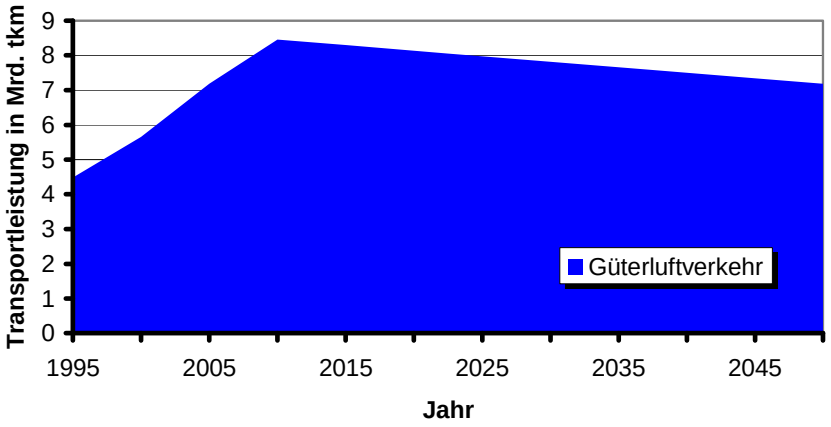

Abbildung 4-49: *Verkehrsleistung des Güterluftverkehrs*

Schienenverkehr

Der Schienenverkehr nimmt aufgrund der Verlagerung von der Straße auf die Schiene zu (**Abbildung 4-50**). Die durchschnittliche jährliche Strecke eines Bundesbürgers steigt von 900 km in 2000 auf 1.500 km in 2050. Bezogen auf die gesamte Bevölkerung ergibt sich ein Anstieg der kumulierten Verkehrsleistung von 75 Mrd. Pkm auf 110 Mrd. Pkm.

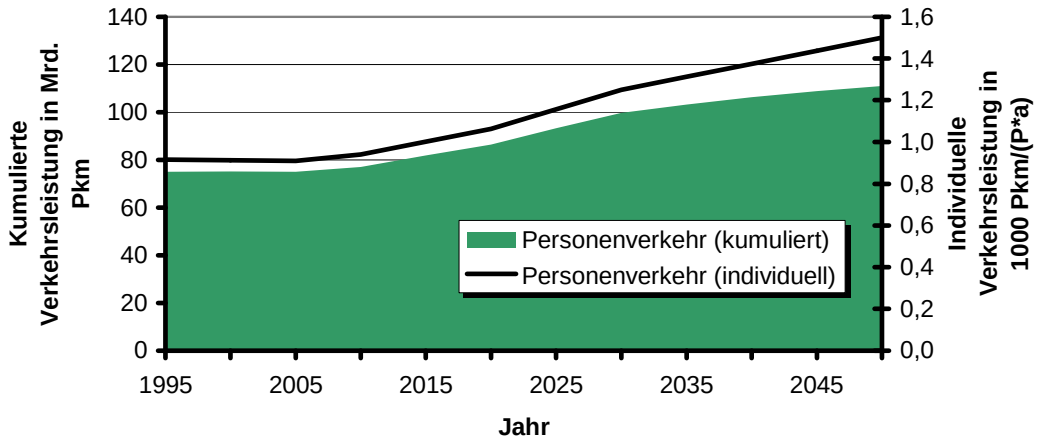

Abbildung 4-50: *Verkehrsleistung des Personenschienenverkehrs*

Der Güterschienenverkehr (**Abbildung 4-51**) steigt, bedingt durch die Verkehrsverlagerung von der Straße, stetig an und erreicht 2050 ca. 200 Mrd. tkm. Dies entspricht einer Zunahme von 94 % gegenüber 2005.

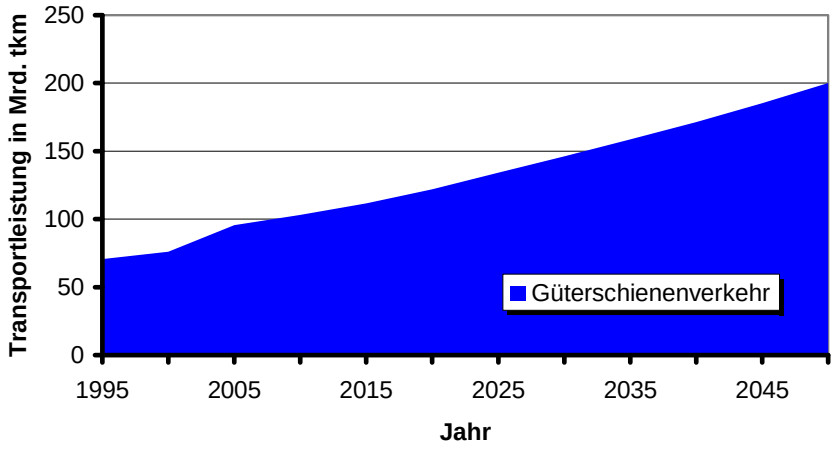

Abbildung 4-51: *Transportleistung des Güterschienenverkehrs*

Schiffsverkehr

Die Personenbeförderung im Schiffsverkehr ist sehr gering und wird in dieser Studie vernachlässigt. Die Entwicklung im Güterschiffsverkehr ist in **Abbildung 4-52** dargestellt. Während die Transportleistung im Binnenverkehr direkt angeben werden kann (2005: 64 Mrd. tkm, 2050: 150 Mrd. tkm), bietet sich im Seeverkehr die Beladung in deutschen Häfen als sinnvolle Bezugsgröße an. Aussagen über die Transportweite sind der Fracht nicht ohne weiteres zuzuordnen und zeigen keinen signifikanten Zusammenhang zu der in Deutschland aufgenommenen Kraftstoffmenge. Aufgrund der Verlagerung von der Straße steigen sowohl der Binnen- als auch der Seeverkehr deutlich an und erreichen 2050 eine Steigerung gegenüber 2005 um ca. 134 %.

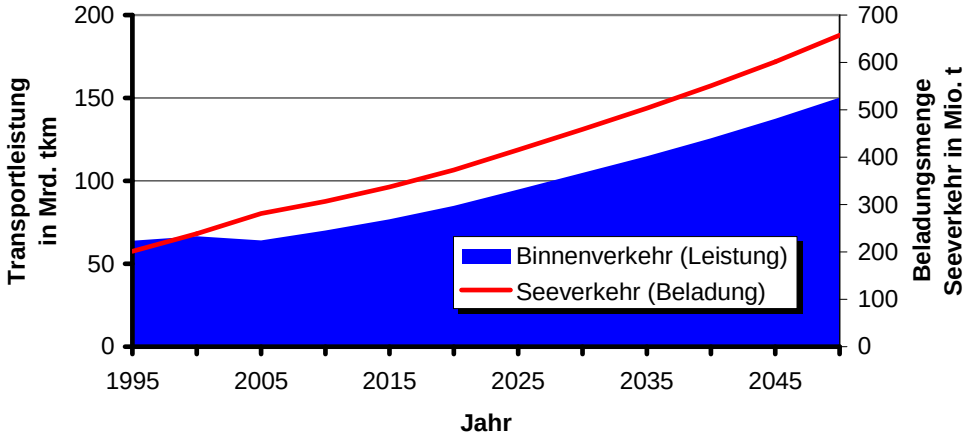

Abbildung 4-52: *Transportleistung des Güterschiffsverkehrs*

4.4.2 Technikstruktur

Die verfügbare Technikstruktur in diesem Szenario ist identisch mit der Struktur in Szenario 2 „Erhöhte Technikeffizienz“. Allerdings ändert sich der Grad, in dem diese Techniken von der Bevölkerung angenommen werden und den Markt durchdringen.

Straßenverkehr

Im motorisierten Individualverkehr (**Abbildung 4-53**) setzen sich Elektrostraßenfahrzeuge und Fahrzeuge mit Brennstoffzelle stark durch und dominieren 2050 die mit

diesen Fahrzeugen zurückgelegte Beförderungsleistung. Der Anteil der Elektrostraßenfahrzeuge erreicht 2050 35 %, der der Brennstoffzellenfahrzeuge 25 %. Diesel und Benzin betriebene Fahrzeuge sind zur Ausnahme geworden. Weiterhin werden noch Biokraftstoffe (20 %) sowie Erd- und Flüssiggas (10 %) getankt.

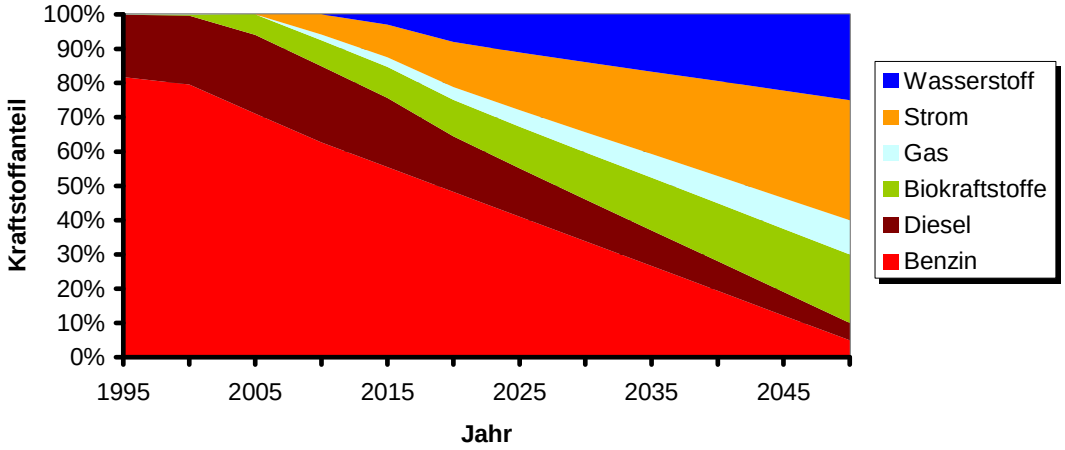

Abbildung 4-53: *Kraftstoffanteil bezüglich der Verkehrsleistung im motorisierten Individualverkehr (MIV)*

Im öffentlichen Personenverkehr (**Abbildung 4-54**) ergibt sich ein ähnliches Bild wie im MIV. Strom betriebene Fahrzeuge bieten bei innerstädtischen Fahrzyklen viele Vorteile und ereichen in 2050 einen Anteil von 40 %. Brennstoffzellenfahrzeuge und Fahrzeuge, die Biokraftstoffe verwenden, erreichen gemessen an der Beförderungsleistung jeweils einen Anteil von 25 %.

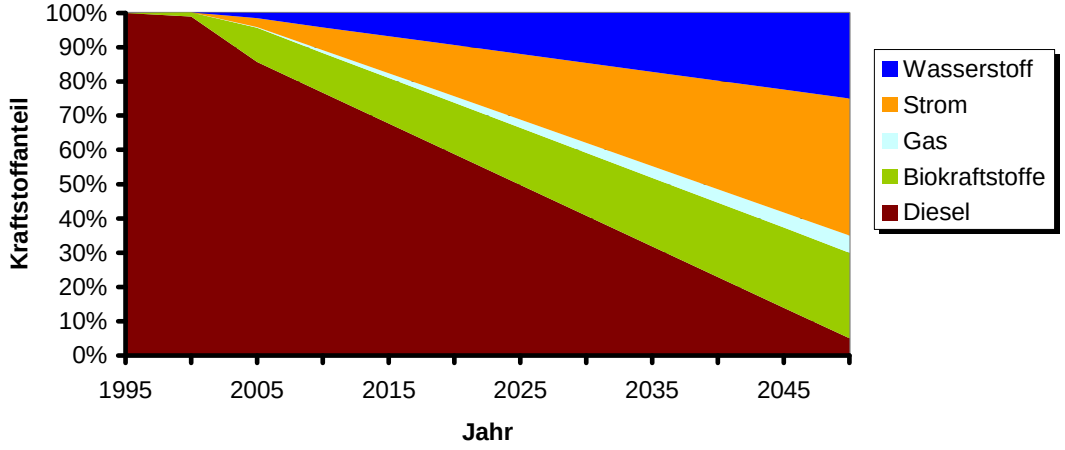

Abbildung 4-54: *Kraftstoffanteil bezüglich der Verkehrsleistung im öffentlichen Personenverkehr (ÖPV)*

Im Güterstraßenverkehr werden Dieselfahrzeuge weitaus weniger stark verdrängt als im Personenverkehr (**Abbildung 4-55**). Im Jahr 2050 nimmt deren Transportleistung noch einen Anteil von 20 % ein. Den weitesten Einsatz finden Brennstoffzellenfahrzeuge (2050: 35 %) und Fahrzeuge, die mit Biokraftstoffen betrieben werden (2050: 25 %). Elektrisch angetriebene Transporter werden verstärkt auf Kurzstrecken eingesetzt (2050: 20 %).

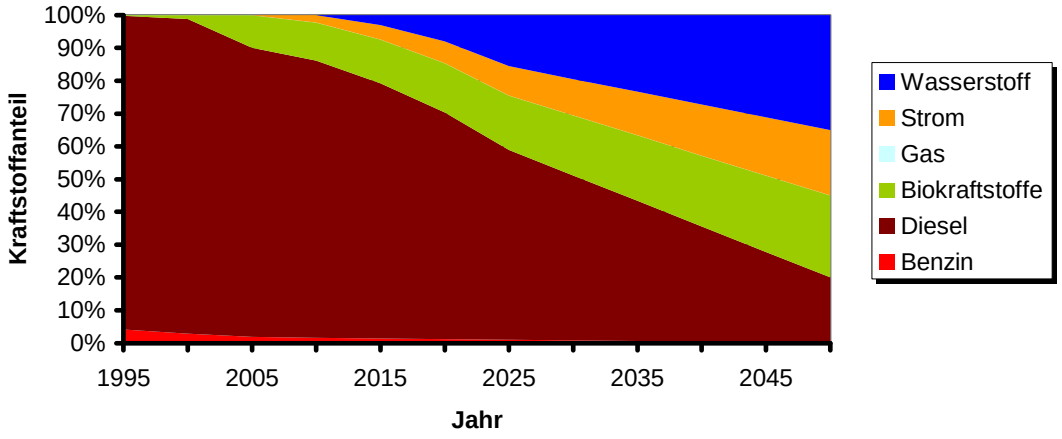

Abbildung 4-55: *Kraftstoffanteil bezüglich der Verkehrsleistung im Güterstraßenverkehr*

4.4.3 Endenergieverbrauch

Der Endenergieverbrauch im Verkehrssektor ergibt sich aus der Verkehrsleistung und dem spezifischen Verbrauch der jeweiligen Verkehrsträger. Die Verkehrsleistungen im Personen- und Güterverkehr sind gegenüber dem Referenzszenario reduziert, die Technikstruktur hingegen deutlich verbessert.

Straßenverkehr

Der Endenergieverbrauch im Personenstraßenverkehr weist einen starken Rückgang auf (**Abbildung 4-56**). Für den sinkenden Verbrauch sind die sinkende Bevölkerungsentwicklung, die Effizienzverbesserungen, die höhere Marktdurchdringung der effizienteren Technologien sowie das energiebewusste Nutzerverhalten hinsichtlich der Fahrtstrecken und der Wahl der Verkehrsart verantwortlich.

Durch die hohe Effizienz der Elektro- und Brennstoffzellenfahrzeuge tritt deren Endenergieverbrauch in Abbildung 4-56 kaum in Erscheinung, obwohl durch Elektrofahrzeuge rund 35 % und durch Brennstoffzellenfahrzeuge 25 % der Beförderungsleistung erbracht werden. Gegenüber 2005 wird ein drastischer Rückgang des Endenergieverbrauchs um 83 % erreicht. Dieser erklärt sich aus einem Rückgang der Verkehrsleistung im gleichen Zeitraum um 38 % und einer gleichzeitigen Verbrauchsreduzierung um durchschnittlich 40 %. Hinzu kommt ein breiter Wechsel von Benzin- und Dieselantrieben auf Wasserstoff- und Elektrofahrzeuge, deren Endenergieverbrauch um den Faktor 3 bzw. 9 geringer ist.

In 2050 setzt sich der gesamte Kraftstoffverbrauch des Personenstraßenverkehrs aus Biokraftstoffen (36 %), Erd- und Flüssiggas (18 %), Wasserstoff (18 %), Benzin (10 %), Diesel (10 %) und Strom (8 %) zusammen.

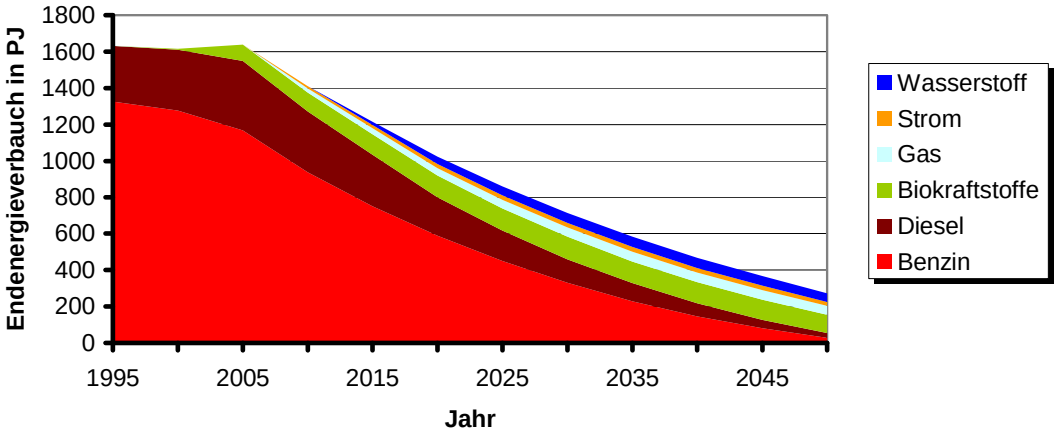

Abbildung 4-56: *Kraftstoffverbrauch im Personenverkehr*

Im Güterverkehr (**Abbildung 4-57**) reduziert sich der Endenergieverbrauch zwischen 2005 und 2050 um 73 % und damit ähnlich stark wie im Personenstraßenverkehr. Dieser Rückgang resultiert aus der etwa konstanten Transportleistung und dem sinkenden Kraftstoffverbrauch (Rückgang um 55 % im gleichen Zeitraum). Im Güterverkehr trägt ein Wechsel zu effizienteren Antriebsarten, vorrangig zu Brennstoffzellenfahrzeugen, in geringerem Umfang auch zu Elektroantrieben, zu der endenergetischen Verbrauchsreduzierung bei. In 2050 setzt sich der gesamte Kraftstoffverbrauch des Güterstraßenverkehrs aus Biokraftstoffen (42 %), Diesel (34 %), Wasserstoff (21 %) und Strom (4 %) zusammen.

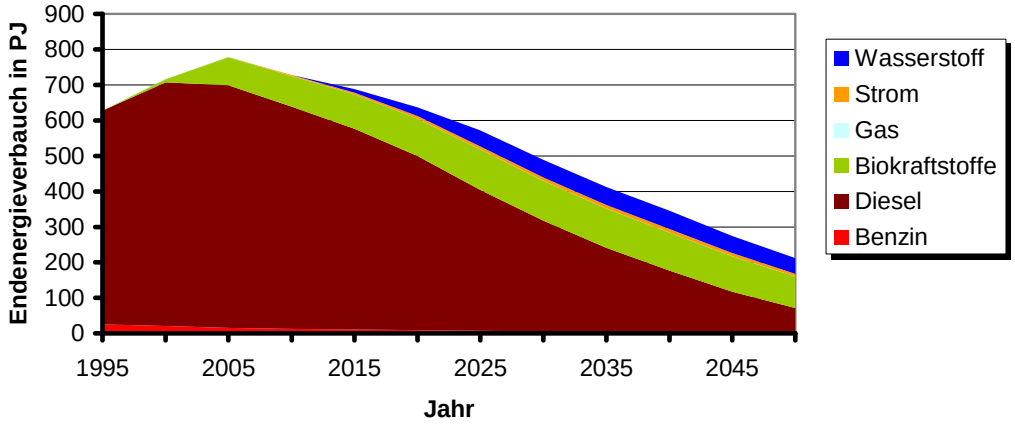

Abbildung 4-57: *Kraftstoffverbrauch im Güterverkehr*

Im gesamten Straßenverkehr (**Abbildung 4-58**) addieren sich die Verbräuche des Güter- und Personenverkehrs. Der öffentliche Personenverkehr spielt hinsichtlich seines Endenergieverbrauchs eine untergeordnete Rolle. Im Zeitraum von 2005 bis 2050 wird eine Verbrauchsreduzierung von 80 % erreicht.

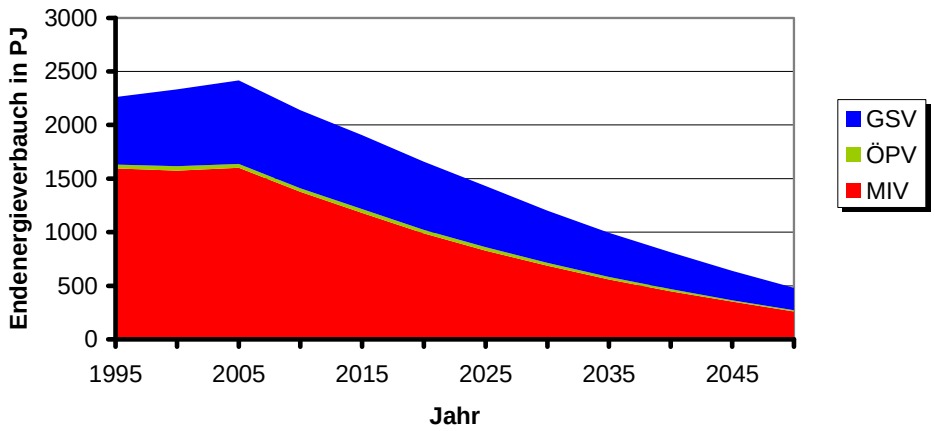

Abbildung 4-58: *Kraftstoffverbrauch im Straßenverkehr*

Luftverkehr

Der Luftverkehr (**Abbildung 4-59**) kann den Endenergieverbrauch ab 2020 deutlich reduzieren. In den Jahren 2010 bis 2050 tritt für den gesamten Luftverkehr ein Rückgang um 68 % auf. Der Endenergieverbrauch im Personenverkehr geht dabei um 61 %, der im Güterverkehr um 51 % zurück. Diese hohe Einsparung ergibt sich zum einen aus der sinkenden Verkehrsleistung (Rückgang der Beförderungsleistung um 32 % und der Transportleistung um 15 % zwischen 2010 und 2050), zum anderen aus der Reduzierung des spezifischen Verbrauchs (Rückgang um 43 % zwischen 2010 und 2050).

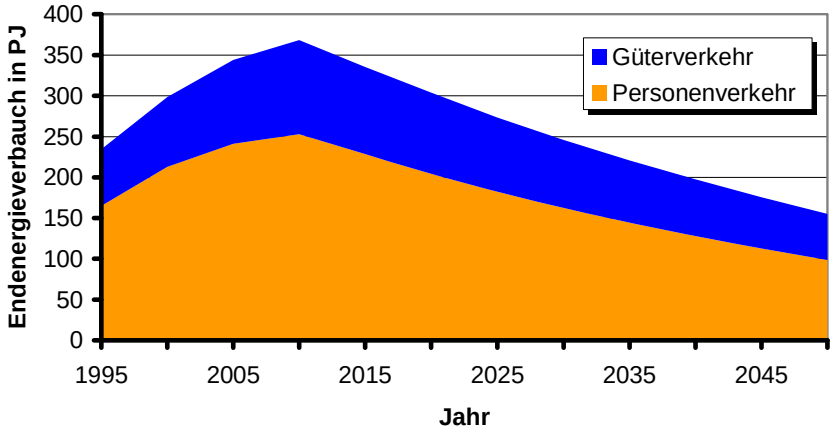

Abbildung 4-59: *Endenergieverbrauch im Luftverkehr*

Schienenverkehr

Der Endenergieverbrauch im Schienenverkehr (**Abbildung 4-60**) nimmt nur einen kleinen Anteil im Verkehrssektor ein. Trotz Zuwächsen in der Transport- und Beförderungsleistung steigt der endenergetische Verbrauch nicht an. Dies wird durch Wirkungsgradverbesserungen und den zunehmenden Wechsel von Diesel- auf Elektroantriebe erreicht. Im Zeitraum zwischen 2005 und 2050 reduziert sich der Verbrauch moderat, im Güterverkehr um 23 %, im Personenverkehr um 9 %.

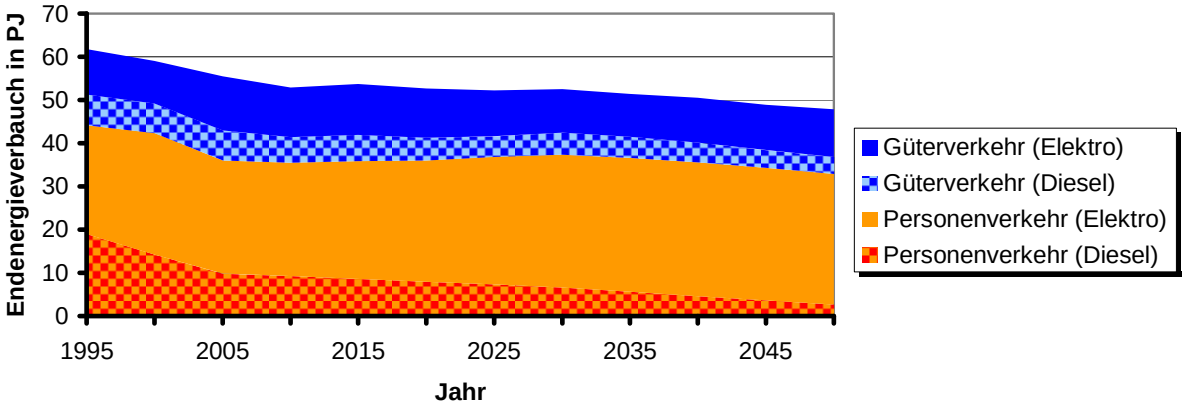

Abbildung 4-60: *Endenergieverbrauch im Schienenverkehr*

Schiffsverkehr

Die Verkehrsart mit dem geringsten Endenergieverbrauch ist die Schifffahrt (**Abbildung 4-61**). Die steigende Transportleistung hält sich mit der Wirkungsgradverbesserung etwa die Waage. In 2050 beträgt der Endenergieeinsatz der in Deutschland aufgenommen Kraftstoffe wie in 2005 ca. 12 PJ.

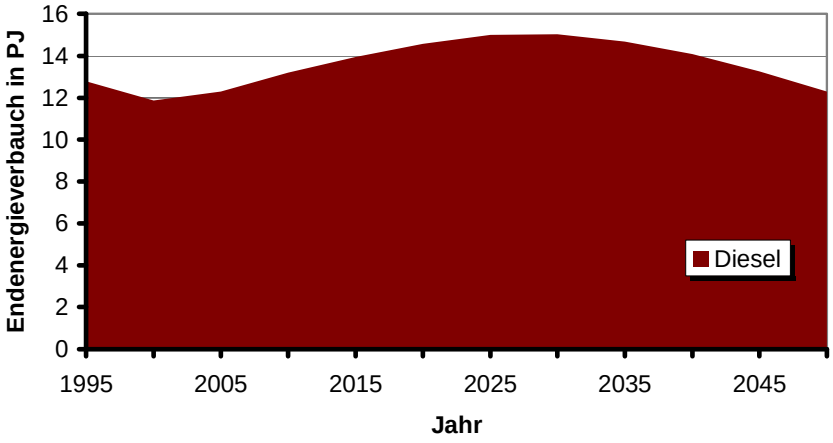

Abbildung 4-61: *Endenergieverbrauch im Schiffsverkehr*

Zusammenfassung des Verkehrssektors

Der gesamte Endenergieverbrauch ist in **Abbildung 4-62** dargestellt. Der drastische Rückgang zwischen 2005 und 2050 wird durch Effizienzverbesserungsmaßnahmen und Änderungen des Nutzerverhaltens erreicht. Der Höchstwert von 2,8 EJ wird bereits in 2005 erreicht, in 2010 ist durch das geänderte Nutzerverhalten bereits eine Verbrauchsreduzierung zu erwarten. Insgesamt tritt eine Reduzierung um 75 % auf, in 2050 summiert sich der Gesamtverbrauch auf ca. 700 PJ. Diese Einsparung wird im Wesentlichen im Straßenverkehr, aber auch im Luftverkehr erreicht. Die Schifffahrt, der Schienenverkehr und der öffentliche Straßenverkehr sind hinsichtlich des Endenergieverbrauchs von untergeordneter Bedeutung.

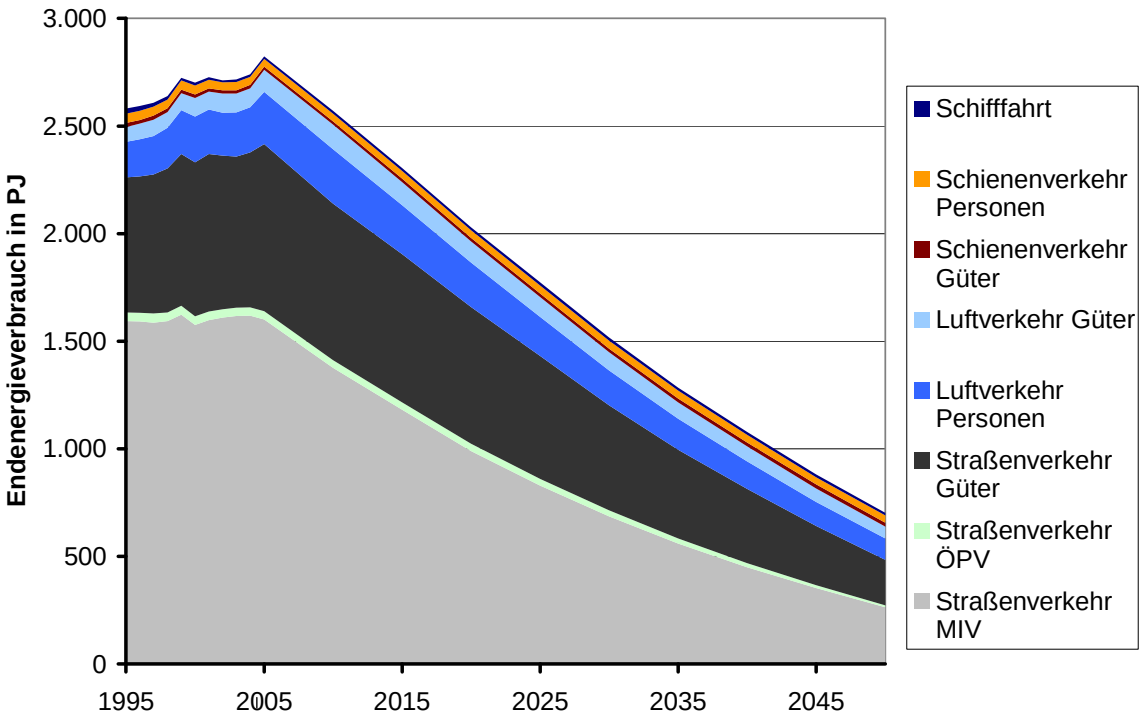

Abbildung 4-62: *Endenergieverbrauch im Verkehrssektor nach Verkehrsträgern*

Die Zusammensetzung der Endenergieträger ist in **Abbildung 4-63** dargestellt. Auffallend ist der Rückgang der Diesel- und Benzineinsätze, die im Jahr 2005 den gesamten Verbrauch dominieren. Diese werden durch Biokraftstoffe, Strom, Erd- und Flüssiggas sowie Wasserstoff abgelöst. Bei der Bereitstellung der Energieträger, insbesondere von Wasserstoff und Strom, ist ein großer energetischer Aufwand im Umwandlungssektor zu erbringen. In 2050 setzt sich der Kraftstoffverbrauch des Verkehrssektors wie folgt zusammen: Biokraftstoffe (27 %), Flugtreibstoffe (22 %), Diesel (16 %), Wasserstoff (13 %), Strom (11 %), Benzin (4 %) sowie Erd- und Flüssiggas (7 %).

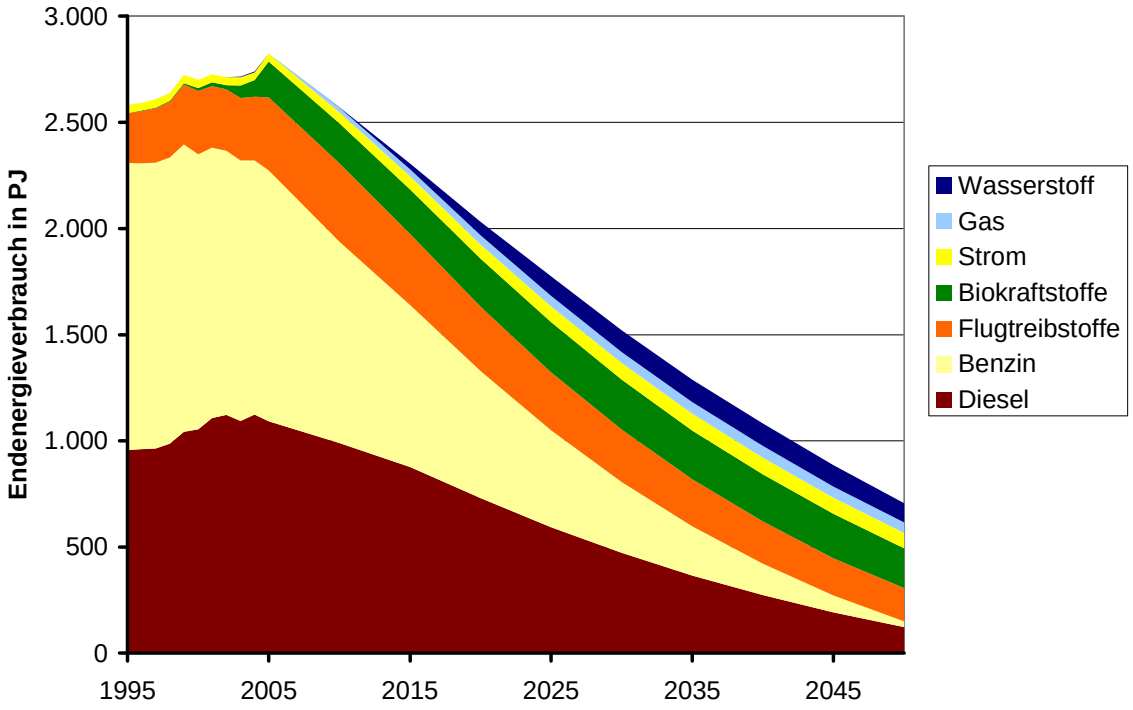

Abbildung 4-63: *Endenergieverbrauch im Verkehrssektor nach Energieträgern*

4.5 Entwicklung im Umwandlungssektor

4.5.1 Technikstruktur und Parameter

Da in Szenario 3 nicht nur die Technikeffizienz, sondern auch das Nutzerverhalten in den Anwendungssektoren variiert wird, sinkt die Energienachfrage gegenüber den anderen Szenarien weiter ab. Wie in **Abbildung 4-64** dargestellt, ist von dieser Reduzierung auch der Bedarf an Fern- und Nahwärme sowie die Wärmeerzeugung aus KWK-Anlagen von Industrie und Haushalten betroffen. Das Maximum der Wärmeerzeugung im Umwandlungssektor – in Szenario 2 noch knapp 1.450 PJ – sinkt im Szenario 3 auf etwa 1.375 PJ im Jahr 2030 ab. Bis zum Ende des Betrachtungszeitraums fällt die gesamte Wärmeerzeugung wieder auf das Niveau von 2015.

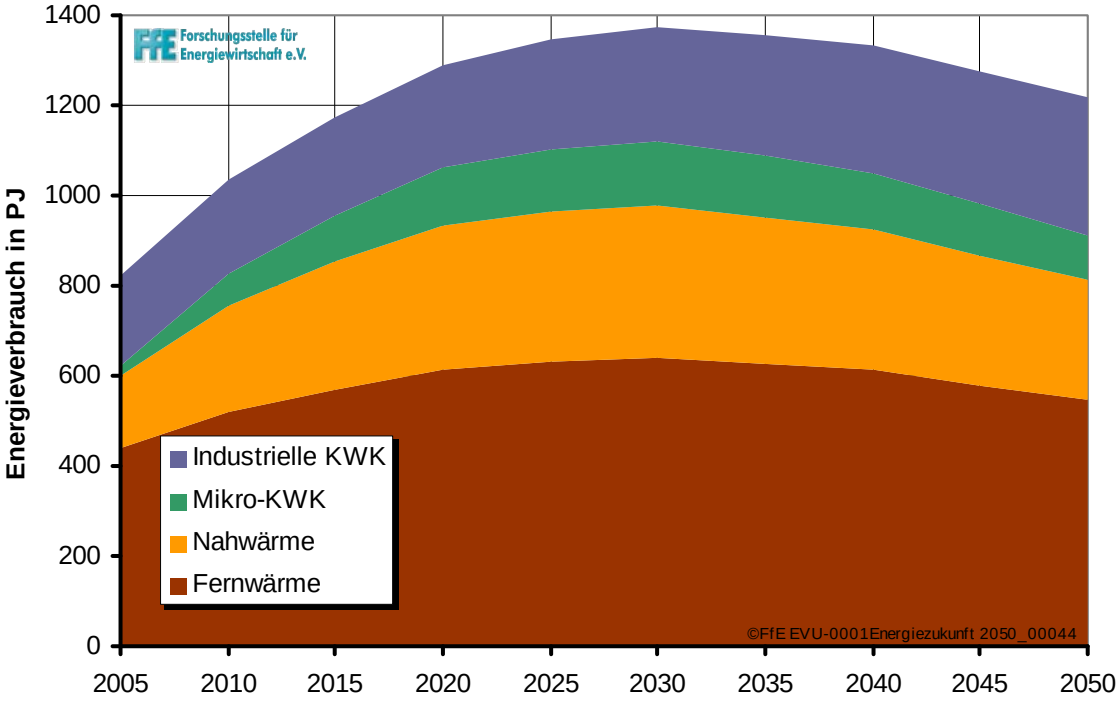

Abbildung 4-64: *Entwicklung der Wärmebereitstellung im Umwandlungssektor*

Daraus resultierend steigt auch die absolute KWK-Stromerzeugung, wie in **Abbildung 4-65** dargestellt, nicht so stark an. Der KWK-Anteil zeigt allerdings einen ähnlichen Verlauf wie in Szenario 2. Das IEKP-Ziel für 2020 wird erreicht und ab 2030 tritt durch den Nachfragerückgang ein Sättigungseffekt ein, der sich ab 2040 auf etwa 35 % stabilisiert.

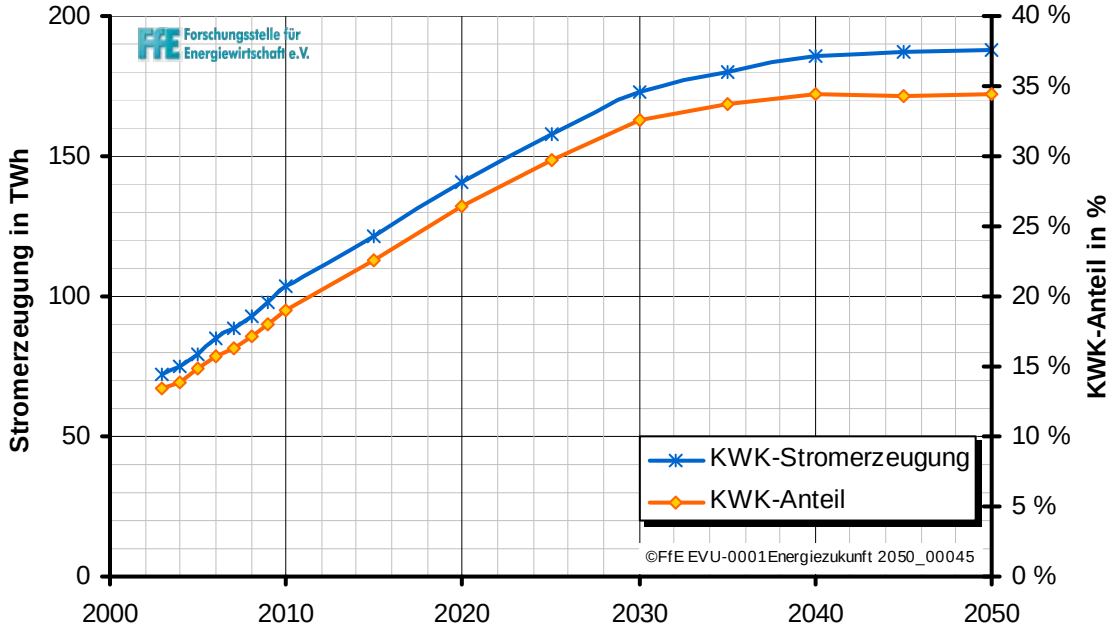

Abbildung 4-65: *Entwicklung der KWK-Stromerzeugung und des KWK-Anteils in Szenario 3*

Trotz eines energiebewussten Verhaltens seitens der Bevölkerung sinkt der Strombedarf in Szenario 3 im Vergleich zu Szenario 2 nur unwesentlich, wie es in **Abbildung 4-66** ersichtlich ist. Ab dem Jahr 2030 stellt sich ein konstanter Bedarf von ca. 490 TWh, damit etwa 35 TWh weniger als in Szenario 2, ein. Insbesondere steigende Stromanteile im Verkehr sind dafür verantwortlich; dass der Rückgang nicht stärker ausfällt.

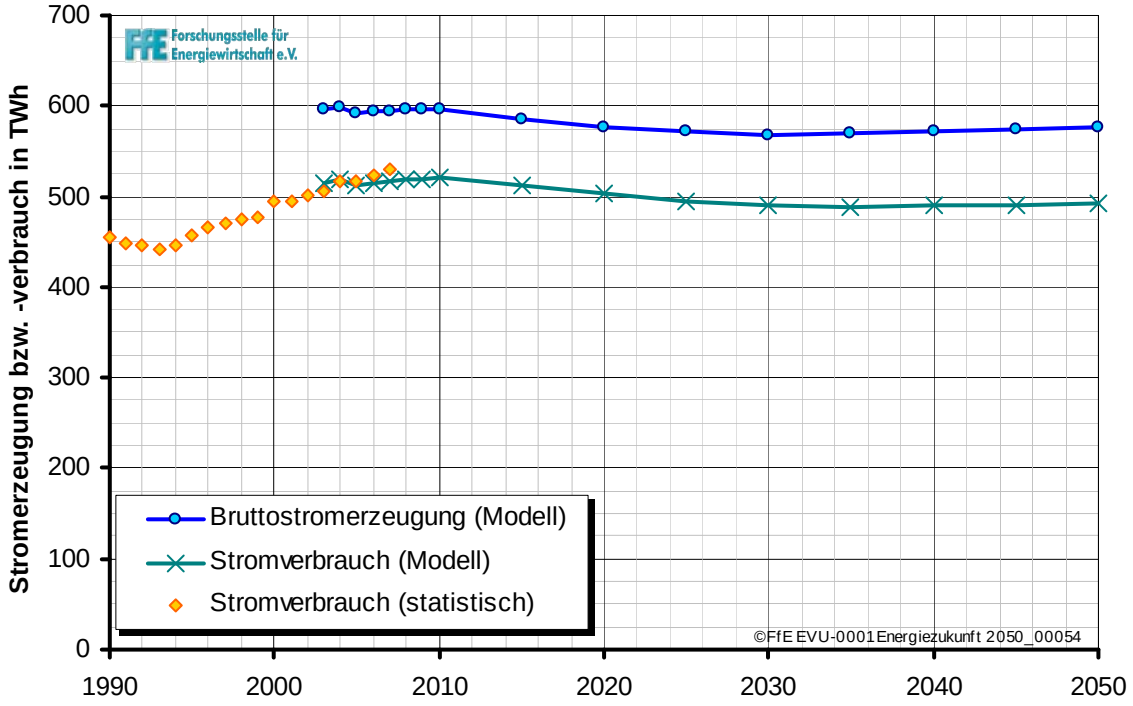

Abbildung 4-66: *Entwicklung des Stromverbrauchs und der Bruttostromerzeugung in Szenario 3 /AGEB 08/, /eigene Berechnungen/*

Abbildung 4-67 zeigt die angenommene Entwicklung der gesetzten Stromerzeugung für das Szenario „Umweltbewusstes Handeln“. Diese entspricht im Wesentlichen dem bereits in Szenario 2 angesetzten Ausbau der regenerativen Stromerzeugung sowie der in Abbildung 4-65 gezeigten Stromerzeugung aus KWK. Insgesamt wird damit in Szenario 3 weniger Strom in „must-run“-Anlagen produziert als in Szenario 2.

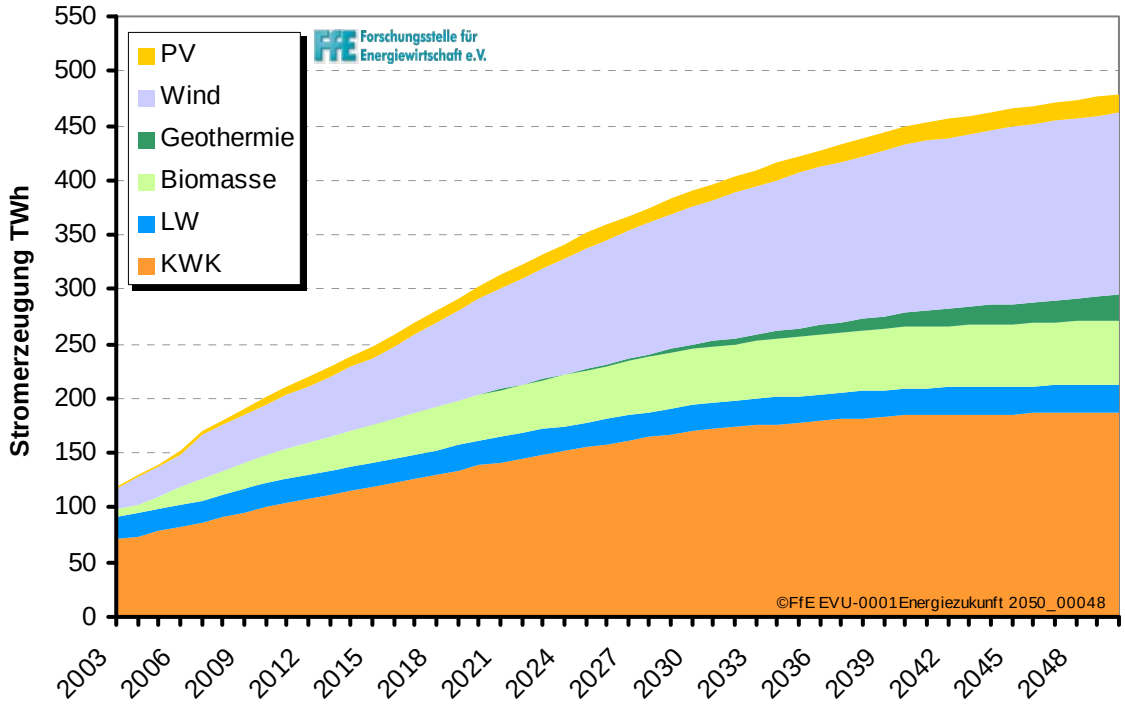

Abbildung 4-67: *Entwicklung der Stromerzeugung aus „must-run“-Anlagen in Szenario 3*

Für die regenerativen Energien wurde, wie in Szenario 2, eine Speicherleistung von 18 GW angesetzt. Dementsprechend ändert sich der Lastgang – in **Abbildung 4-68** als geordnete Jahresdauerlinie dargestellt – gegenüber Szenario 2 nur marginal.

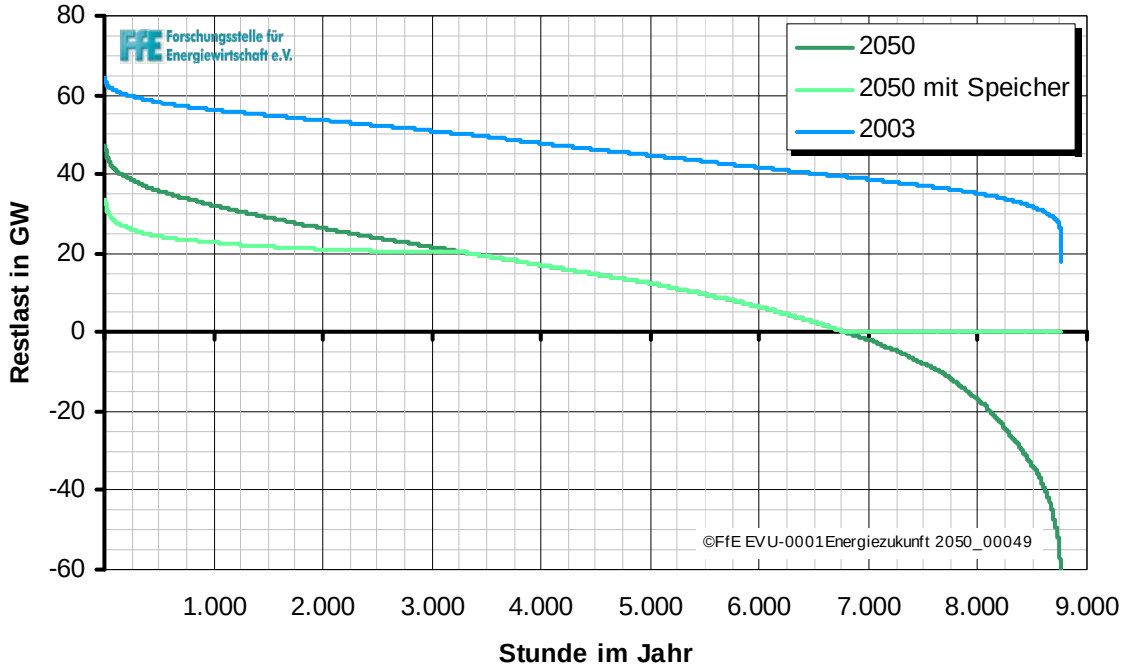

Abbildung 4-68: *Geordnete Jahresdauerlinie der zu deckenden Restlast in Szenario 3*

Als Variation der Rahmenbedingungen für den Umwandlungssektor wird in Szenario 3 die Laufzeit der Kernkraftwerke auf deren technische Lebensdauer von 60 Jahren erweitert. In den USA haben bereits 51 der insgesamt 104 dort betriebenen Kernkraftwerke eine Verlängerung ihrer Betriebsgenehmigung von 40 auf 60 Jahre von der United States Nuclear Regulatory Commission erhalten. Bei weiteren 19 Kraftwerken wird diese Option derzeit geprüft /NRC 09/.

Wie in Szenario 2 können von ifeon ab 2020 neue Kernkraftwerke eingesetzt werden, wenn sich ihr Bau als wirtschaftlich erweist. Die übrigen Rahmenbedingungen – Verfügbarkeit von 700 °C-Technologie ab 2020, CCS ab 2025 und auf 60 €/t steigende CO_2-Preise – bleiben gegenüber Szenario 2 unverändert.

In **Abbildung 4-69** ist das Ergebnis der Simulation für die reinen Kraftwerke aufgezeigt. Wie in Szenario 2 geht die Spitzenlastbereitstellung durch erdgasversorgte Kraftwerke aufgrund des Speichereinsatzes zurück. Deutlich sichtbar ist die Annahme einer Laufzeitverlängerung der Kernkraftwerke. Dadurch wird das letzte bestehende Kernkraftwerk erst im Jahr 2048 außer Betrieb gehen. Ab dem Jahr 2040 werden neue Kernkraftwerke in Betrieb genommen, welche die wegfallende CO_2-freie Leistung kompensieren.

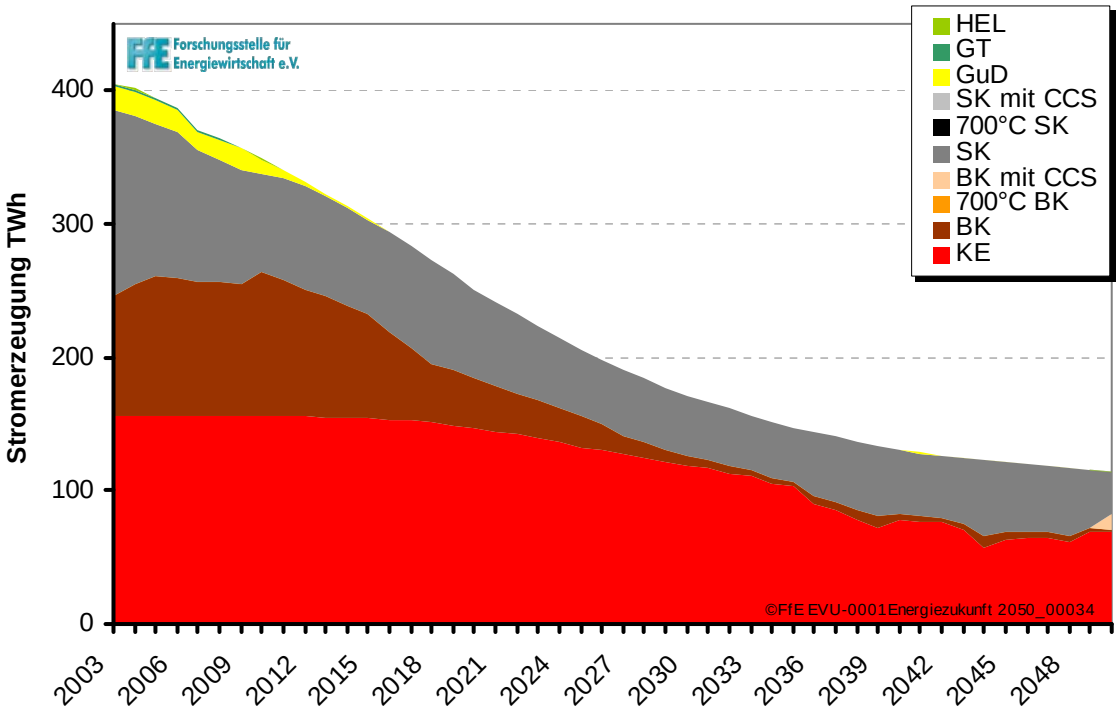

Abbildung 4-69: *Ergebnis der Simulation mit ifeon für die Stromerzeugung in den reinen Kraftwerken (Szenario 3)*

4.5.2 Primärenergieverbrauch

Die Ergebnisse des Szenarios „Umweltbewusstes Handeln“ für den Primärenergieverbrauch zeigt **Abbildung 4-70**. Dieser sinkt vor allem durch die hohe Endenergieeffizienz und die Änderung des Nutzerverhaltens deutlich stärker als in Szenario 2, auch wenn sich die Zusammensetzung kaum ändert. Im Jahr 2050 liegt der Endenergieverbrauch um etwas mehr als 40 % unter dem Wert von 2005. Der Anteil der Erneuerbaren steigt bis auf 36 % an und auch Erdgas trägt mit 27 % weiterhin erheblich zur Energiebedarfsdeckung bei. Demgegenüber sind weniger als 10 % des Primärenergieenergieverbrauchs im Jahr 2050 auf Mineralöle zurückzuführen.

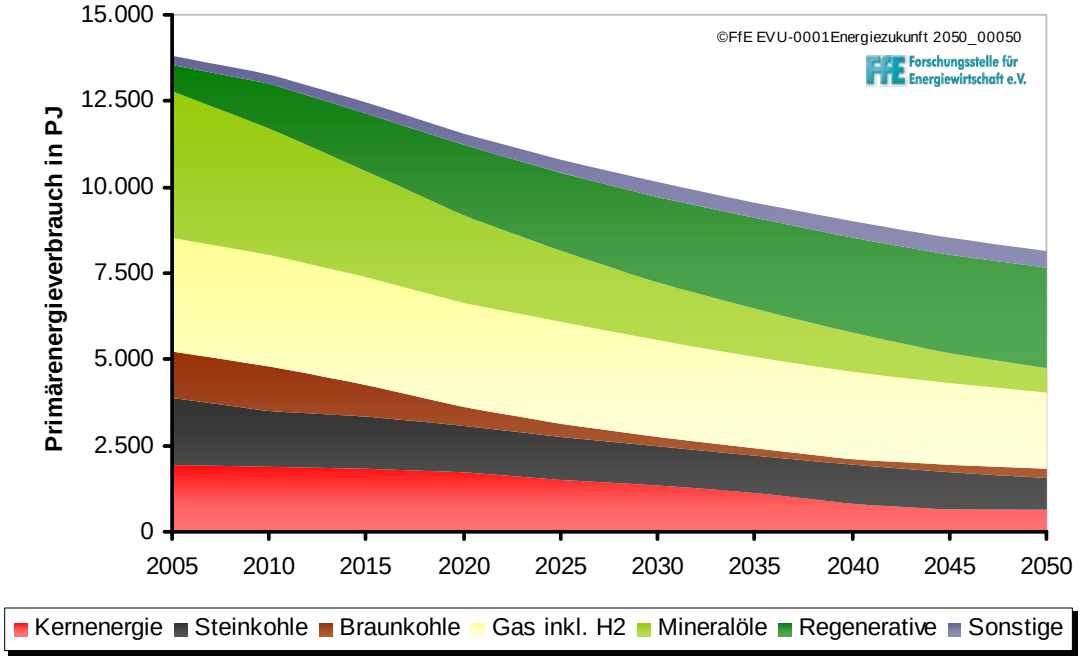

Abbildung 4-70: *Entwicklung des Primärenergieeinsatzes in Szenario 3*

4.5.3 CO_2-Emissionen

Wie erwartet, sinken die CO_2-Emissionen in Szenario 3 stärker als in den anderen Szenarien. **Abbildung 4-71** zeigt, dass das Kyoto-Ziel für 2012 nicht nur erreicht, sondern sogar übererfüllt wird. Bis zum Jahr 2030 werden die Emissionen gegenüber heute halbiert, bis 2050 um knapp 64 % reduziert. In absoluten Werten entspricht dies einer Reduktion von 580 Mio. t CO_2 pro Jahr von knapp 900 Mio. t in 2003 bis auf etwa 320 Mio. t im Jahr 2050.

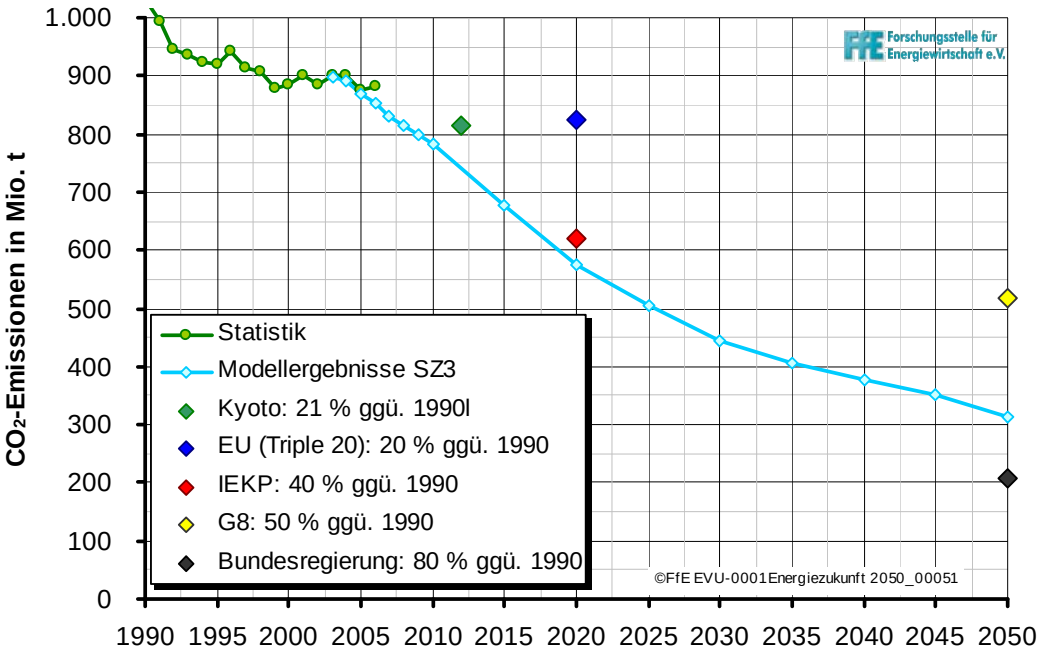

Abbildung 4-71: *Entwicklung der CO_2-Emissionen in Szenario 3 „Umweltbewusstes Handeln“ /BMWi 09/, /eigene Berechnungen/*

4.6 Zusammenfassung der Ergebnisse aus Szenario 3

In Szenario 3 – „Umweltbewusstes Handeln“ wird gegenüber den vorangegangenen Szenarien zusätzlich zur Technikeffizienz, wie in Szenario 2, auch noch eine Verhaltensänderung der Bevölkerung unterstellt. Die bewusstere und sparsamere Nutzung von Energie führt zu einer Reduktion des Bedarfs ggf. unter Tolerierung von Komfortteinbußen. Insgesamt stellen sich durch die Sensibilisierung der Bevölkerung Änderungen auf gesellschaftlicher Ebene ein, die sich senkend auf den Energiebedarf auswirken (z. B. HomeOffice oder Onlinehandel).

Im Folgenden sind die Rahmenbedingungen für die einzelnen Sektoren stichpunktartig aufgelistet.

Haushalte

- Der Energiespargedanke ist im Bewusstsein fest verankert
- Reduktion der Betriebszeiten (Beleuchtung, IuK), bewusster Umgang mit Energie beim Kochen, Absenken der Raumtemperatur und richtiges Lüften

Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD)

- Flächenreduktion durch verstärkten Trend zu HomeOffice und Onlinehandel
- Konsumverhalten der privaten Haushalte wirkt sich auch unmittelbar auf GHD aus

Industrie

- Durch hohe Exportquote kaum Verringerung der Produktion
- Da bereits in Szenario 2 hoher Automatisierungsgrad erreicht wurde, führt ein energiebewusstes Verhalten nur zu geringen weiteren Effizienzverbesserungen

Verkehr

- Verhaltensbedingte Bedarfsreduzierung vor allem beim Personenverkehr
- Ausgeprägte Nutzung alternativer Antriebskonzepte (Elektrofahrzeuge, Brennstoffzellenfahrzeuge)

Durch diese Änderungen in der Technikstruktur sowie der Nachfrage nach Energiedienstleistungen kann der Endenergieeinsatz um 37,4 % gegenüber 2005 reduziert werden. **Abbildung 4-72** zeigt die Veränderungen in der Energieträgerstruktur im zeitlichen Verlauf von 2005 bis 2050.

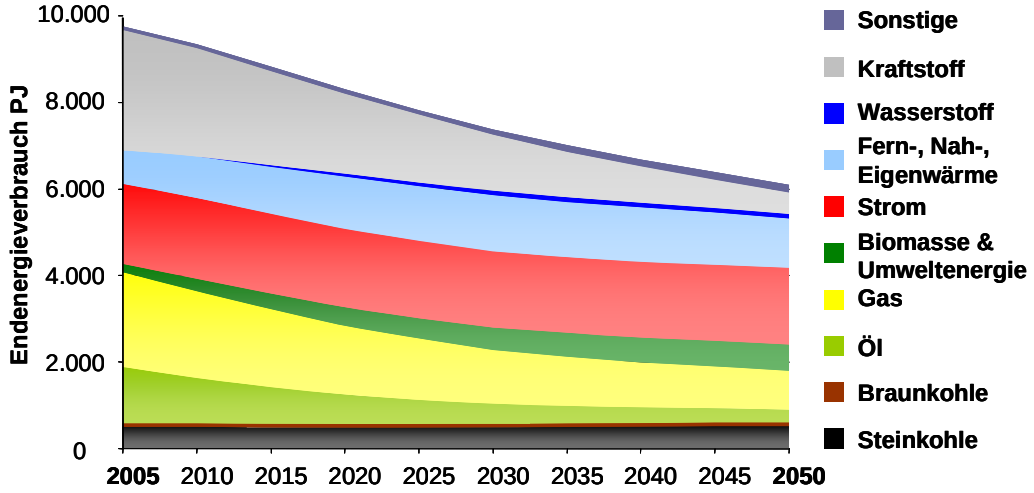

Abbildung 4-72: *Endenergieverbrauch nach Energieträgern in Szenario 3*

Insbesondere im Verkehr kann die Energienachfrage durch eine Verhaltensänderung massiv reduziert werden, wie **Abbildung 4-73** zeigt. In der Industrie ergibt sich in Szenario 3 kaum ein anderer Energieverbrauch als in Szenario 2. Die übrigen Sektoren können den Verbrauch jedoch weiter reduzieren.

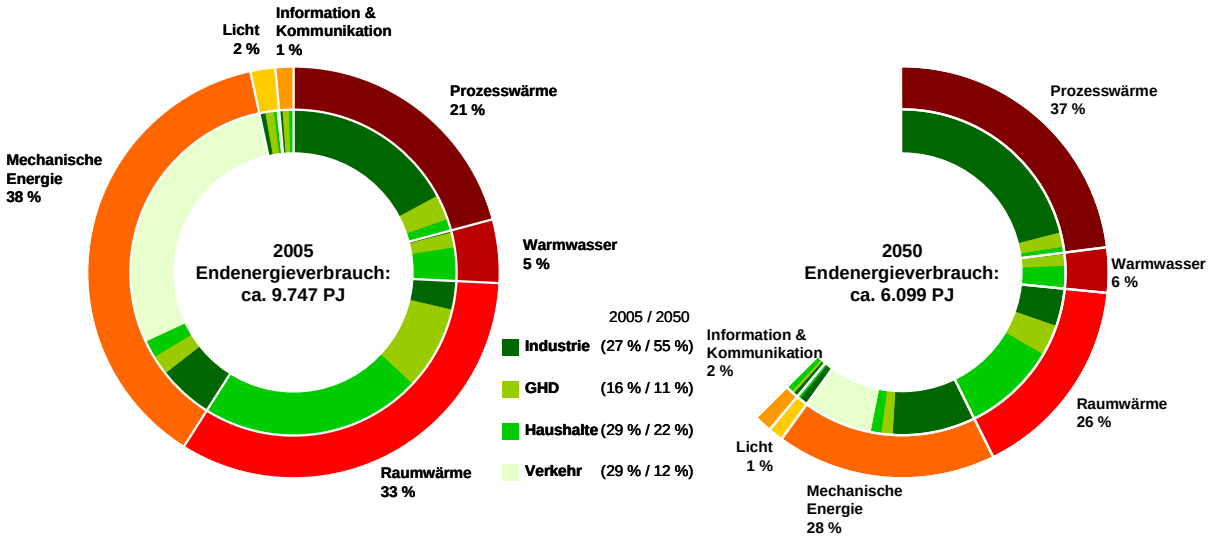

Abbildung 4-73: *Endenergie aufgeteilt auf Anwendungsart und Verwendungszweck in Szenario 3*

Im Umwandlungssektor werden für Szenario 3 die gleichen Randbedingungen wie in Szenario 2 angesetzt. Lediglich die Laufzeit der Kernkraftwerke wird durch Retrofit-Maßnahmen auf 60 Jahre erhöht. Mit diesen Randbedingungen geht der Einsatz fossiler Energieträger stark zurück, wie das Diagramm zur Entwicklung des Primärenergieverbrauchs in **Abbildung 4-74** zeigt. Mit diesem Energieträgermix können die CO_2-Emissionen weiter reduziert werden und sinken bis 2050 um 63,8 %.

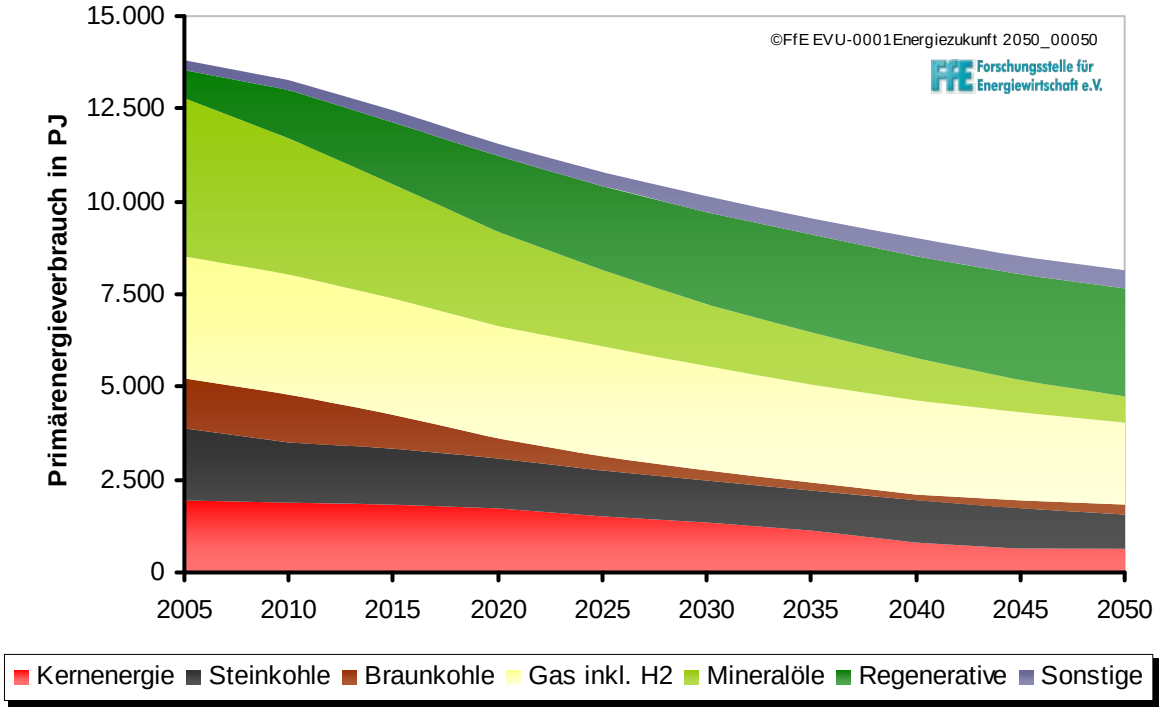

Abbildung 4-74: *Entwicklung des Primärenergieeinsatzes in Szenario 3*

5 Zusammenfassung und Ausblick

5.1 Zusammenfassung und Vergleich der Szenarien

Im Projekt "Energiezukunft 2050" wurde in drei aufeinander aufbauenden Szenarien die Entwicklung des Energiebedarfs und -verbrauchs untersucht. Als gemeinsame Basis für alle Szenarien wurden folgende Bedarfsdeterminanten verwendet:

- Bevölkerungsentwicklung und -struktur
- Beschäftigtenanzahl in Gewerbe-Handel-Dienstleistung
- Entwicklung des Bruttoinlandsproduktes und der Produktionsindizes
- Anzahl und Struktur der Wohngebäude
- Verkehrsleistungen für Personen- und Güterverkehr
- Energieträger- und CO_2-Zertifikatepreise

Dominierend für die zukünftige Entwicklung des gesamten Wirtschaftssystems und der Energiewirtschaft im Besonderen ist die demografische Entwicklung. Bis 2050 wird die Wohnbevölkerung um 10 % abnehmen. Zugleich wird sich der Anteil der über 65-Jährigen von etwa 17 % auf ca. 32 % nahezu verdoppeln /StBu 06/. Die Arbeitsproduktivität – das Bruttoinlandsprodukt je Beschäftigtem – nimmt nach /IFO 09/ um etwa 1,6 % jährlich zu. Das gesamte BIP-Wachstum bis 2050 wird aufgrund des Bevölkerungsrückganges weniger stark zunehmen. Die übrigen Randbedingungen sind stark an diese zwei Trends gekoppelt.

Die Rahmenbedingungen für die drei Szenarien sind in **Tabelle 5-1** zusammenfassend dargestellt. Aufbauend auf Szenario 1 wird in Szenario 2 und 3 die Technikentwicklung variiert und in Szenario 3 zusätzlich das Verbraucherverhalten geändert.

Tabelle 5-1: *Die drei Szenarien im Überblick*

	SZ1: Referenz	SZ2: Erhöhte Technikeffizienz	SZ3: Umweltbewusstes Handeln
Zugrunde gelegte Bedarfsdeterminanten	Bevölkerungsentwicklung und -struktur Beschäftigtenanzahl in Gewerbe-Handel-Dienstleistung Entwicklung des Bruttoinlandsproduktes und der Produktionsindizes Anzahl und Struktur der Wohngebäude Verkehrsleistungen für Personen- und Güterverkehr Energieträger- und CO_2-Zertifikatepreise		
Änderung gegenüber Szenario 1		Technikentwicklung: - Höhere Technikeffizienz - geringere CO_2-Emissionen - IEKP-Ziele für Regenerative und KWK werden erreicht - Laufzeit der Kernenergie 40 a, Neubau möglich	
Änderung gegenüber Szenario 1 und 2			Verhaltensänderung: - energiebewusstes Handeln - Senkung des Bedarfs Laufzeit der Kernenergie 60 a

Im Folgenden sind die drei Szenarien stichpunktartig beschrieben. Eine ausführliche Beschreibung findet sich in Kapitel 1.2.

Szenario 1: Referenzentwicklung
Die Nachfrage nach Energiedienstleistungen nimmt gemäß den Entwicklungen in der Vergangenheit weiter zu. Durch den Wunsch nach stetiger Verbesserung der eigenen Lebenssituation steigen auch die Komfortansprüche weiter an. Dies äußert sich im Bereich der Energieverwendung beispielsweise durch vermehrten Einsatz von Effektbeleuchtung, Wellness-Anwendungen im Haushalt oder den Trend zu mehr Unterhaltungselektronik.

Als Auswirkungen dieser Entwicklung seien beispielsweise genannt:

- Aufgrund der Überalterung der Gesellschaft und steigender Bequemlichkeit verdoppelt sich die Zahl der Aufzüge.
- Die steigende Bedeutung von Information und Kommunikation führt zu einer Verachtfachung der Serveranzahl.
- Durch einen Trend zur Urbanisierung wird die Verkehrsleistung im Individualverkehr sinken.

Im Umwandlungssektor sind folgende Randbedingungen berücksichtigt:

- Der Anteil der Stromerzeugung aus KWK und regenerativen Energieträgern – insbesondere Wind – steigt an und liegt 2020 fast doppelt so hoch wie heute.
- Die CCS-Technologie wird weiterentwickelt und ist ab 2030 einsetzbar.
- Der Kernenergieausstieg findet wie vereinbart statt.

Szenario 2: Erhöhte Technikeffizienz
In Szenario 2 – „Erhöhte Technikeffizienz“ wird ein gegenüber Szenario 1 unverändertes Verbraucherverhalten unterstellt. Die zugrundeliegenden Bedarfsdeterminanten, wie beheizte Flächen, Verkehrsleistungen oder Produktionsindizes, werden demzufolge nicht verändert. Jedoch wird bei Neuanschaffung oder Ersatz von Anlagen die beste verfügbare Technik im Sinne maximaler Energieeffizienz eingesetzt.

Im Vergleich zu Szenario 1 bedeutet dies:

- Die Nutzungsgrade insbesondere der Raumwärmebereitstellung steigen z.B. durch den Einsatz von Wärmepumpen stark an.
- Die enormen Effizienzpotenziale bei der Beleuchtung werden vollständig ausgeschöpft.
- Batterie- und wasserstoffgetriebene Elektrostraßenfahrzeuge steigern die Effizienz im Verkehr.

Im Bereich der Stromerzeugung werden in Szenario 2 die Randbedingungen variiert.

- Der KWK- und regenerative Stromerzeugungsanteil nimmt stärker zu, so dass die IEKP-Ziele erreicht werden.
- CO_2-Abtrennung und Speicherung ist bereits 2025 technisch verfügbar.
- Die Laufzeit der Kernkraftwerke wird, wie bei deren Bau vorgesehen, auf 40 Jahre festgelegt und neue Kernkraftwerke dürfen gebaut werden.

Szenario 3: Umweltbewusstes Handeln

In Szenario 3 – „Umweltbewusstes Handeln“ wird gegenüber den vorangegangenen Szenarien zusätzlich zur Technikeffizienz, wie in Szenario 2, auch noch eine Verhaltensänderung der Bevölkerung unterstellt. Die bewusstere und sparsamere Nutzung von Energie führt – ggf. unter Tolerierung von geringen Komforteinbußen – zu einer Reduktion des Energiebedarfs. Insgesamt stellen sich durch die Sensibilisierung der Bevölkerung Änderungen auf gesellschaftlicher Ebene ein, die auf eine Reduzierung des Energiebedarfs hinauslaufen.

- Beispielsweise könnte eine Absenkung der Raumtemperatur, die je Grad etwa 6 % Energieeinsparung bedeutet, durch wärmere Kleidung kompensiert werden.
- Jede zehnte Aufzugfahrt kann als vermeidbar angesehen werden und wird durch Treppensteigen ersetzt.
- HomeOffice und Onlinehandel sorgen dafür, dass die Verkehrsleistungen sowohl im Güter- als auch Personenverkehr stark zurückgehen.

Für den Umwandlungssektor wird gegenüber Szenario 2 die Laufzeit der Kernkraftwerke auf 60 Jahre erhöht, wie dies beispielsweise in den USA bereits überwiegend praktiziert wird.

Ergebnisse der Szenarienrechnung

An der Endenergieverbrauchsentwicklung, wie sie in **Abbildung 5-1** dargestellt ist, werden die Auswirkungen der verschiedenen Szenariovorgaben deutlich. Während der Endenergieverbrauch in Szenario 1 im gesamten Betrachtungszeitraum nur leicht abnimmt (-4,5 % gegenüber 2005), sinkt er in Szenario 2 durch den Einsatz effizienter Technik um nahezu ein Viertel. Im dritten Szenario sinkt der Endenergieverbrauch bis 2050 um ca. 37 % im Vergleich zu 2005 und liegt damit um mehr als ein Drittel unter dem in Szenario 1. Der Verbrauchsrückgang bewirkt insbesondere einen stark reduzierten Einsatz von fossilen Energieträgern. Demgegenüber sinkt der Stromverbrauch nur leicht (Szenario 3) oder steigt sogar in Zukunft weiter an.

Für die Zusammensetzung des Energieträgermixes in den Anwendungssektoren spielen die Energieträgerpreise häufig eine untergeordnete Rolle. Ob ein Energieträger eingesetzt wird hängt daneben von anderen Faktoren, wie der Regelbarkeit, dem Komfort oder vorhandenen Anlagenstrukturen, ab.

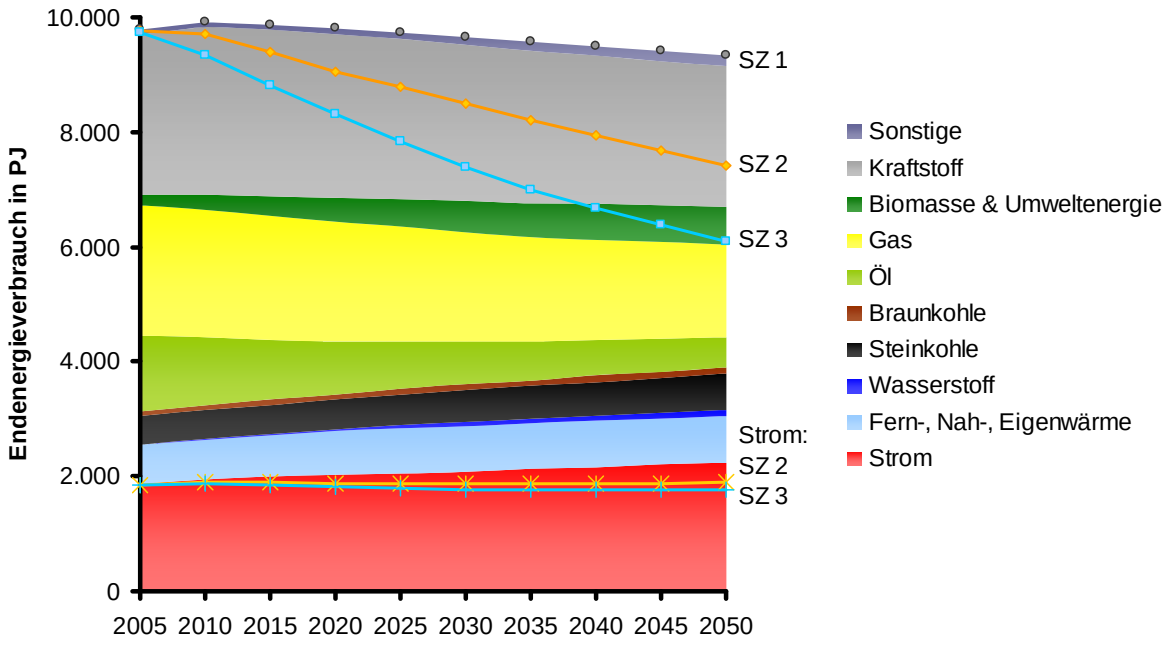

Abbildung 5-1: *Entwicklung des Endenergieverbrauchs der Szenarien im Vergleich*

Der aus den Szenarien resultierende Primärenergieverbrauch ist in **Abbildung 5-2** dargestellt.

Für Szenario 1 ist zusätzlich zum Gesamtverlauf die Aufteilung der einzelnen Energieträger eingetragen. Im gesamten Betrachtungszeitraum sinkt der Primärenergieverbrauch leicht – bis 2020 stärker als im Zeitraum bis 2050. Der Anteil der fossilen Energieträger sinkt stetig – bis auf Braunkohle, die ab 2030 in CCS-Kraftwerken eingesetzt wird und eine Renaissance erlebt. Der absolute Anteil der regenerativen Energien steigt bis 2050 um das 3,5-fache an.

In Szenario 2 sinkt der Primärenergieeinsatz stärker und liegt im Jahr 2050 um ca. 21 % unter dem Energieverbrauch der Referenzentwicklung. Durch die angesetzte Verhaltensänderung sowie die hohe Technikeffizienz in Szenario 3 beträgt der Primärenergieeinsatz zur Deckung der Energienachfrage im Jahr 2050 sogar nur noch zwei Drittel gegenüber Szenario 1.

Unterstellt man eine Verlängerung der Kernenergielaufzeiten und lässt einen Neubau von Kernkraftwerken zu, können Kraftwerke mit CCS nicht konkurrenzfähig betrieben werden.

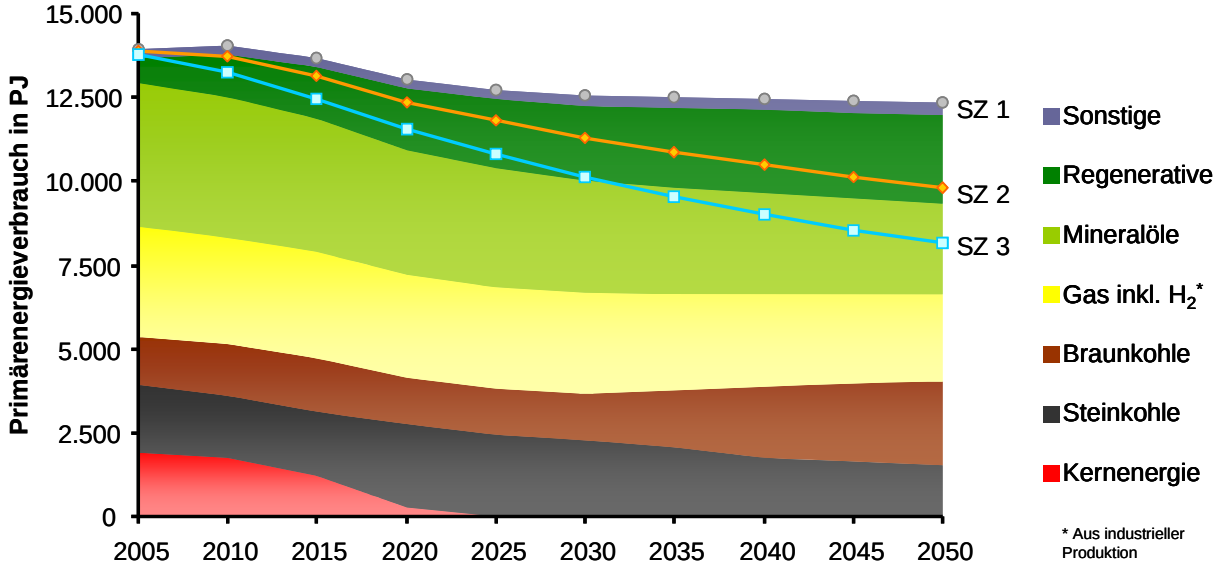

Abbildung 5-2: *Entwicklung des Primärenergieverbrauchs der drei Szenarien*

Durch die aus der Referenzentwicklung resultierenden CO_2-Emissionen wird die Reduzierung der Emissionen um 21 % bis 2012 gegenüber 1990 (Kyoto-Ziel) nicht erreicht, wie in **Abbildung 5-3** ersichtlich ist. Durch den Wegfall der Stromerzeugung aus Kernenergie, der im angenommenen Entwicklungspfad nicht durch die Regenerativen kompensiert werden kann, wird der im Kyoto-Protokoll vorgesehene Wert erst im Jahr 2035 erzielt. Ab diesem Jahr sinkt jedoch der CO_2-Ausstoß stark auf etwa 600 Mio. t pro Jahr in 2050 ab.

Im Entwicklungspfad nach Szenario 2 wird das Kyoto-Ziel 2012 erreicht und in Szenario 3 sogar übererfüllt. Durch eine erhöhte Technikeffizienz können so jährliche Emissionen von 415 Mio. t im Jahr 2050 erreicht werden. Ändert sich zusätzlich das Verbraucherverhalten, so können in 2050 etwa weitere 100 Mio. t CO_2 eingespart werden. Gegenüber 1990 entspricht dies einer Reduktion von etwa 70 %.

In Szenario 1 wird keines der verschiedenen, in Abbildung 5-3 eingezeichneten, CO_2-Minderungsziele erreicht. Die für die EU bzw. die G8-Staaten festgelegten Ziele werden in Szenario 2 und 3 übertroffen. Mit großer Anstrengung (Szenario 3) kann das IEKP-Ziel einer Reduzierung der Emissionen um 40 % bis 2020 gegenüber 1990 umgesetzt werden. Das Ziel der Bundesregierung, bis zum Jahr 2050 80 % an CO_2 gegenüber 1990 einzusparen, wird auch in diesem Extremszenario nicht erreicht.

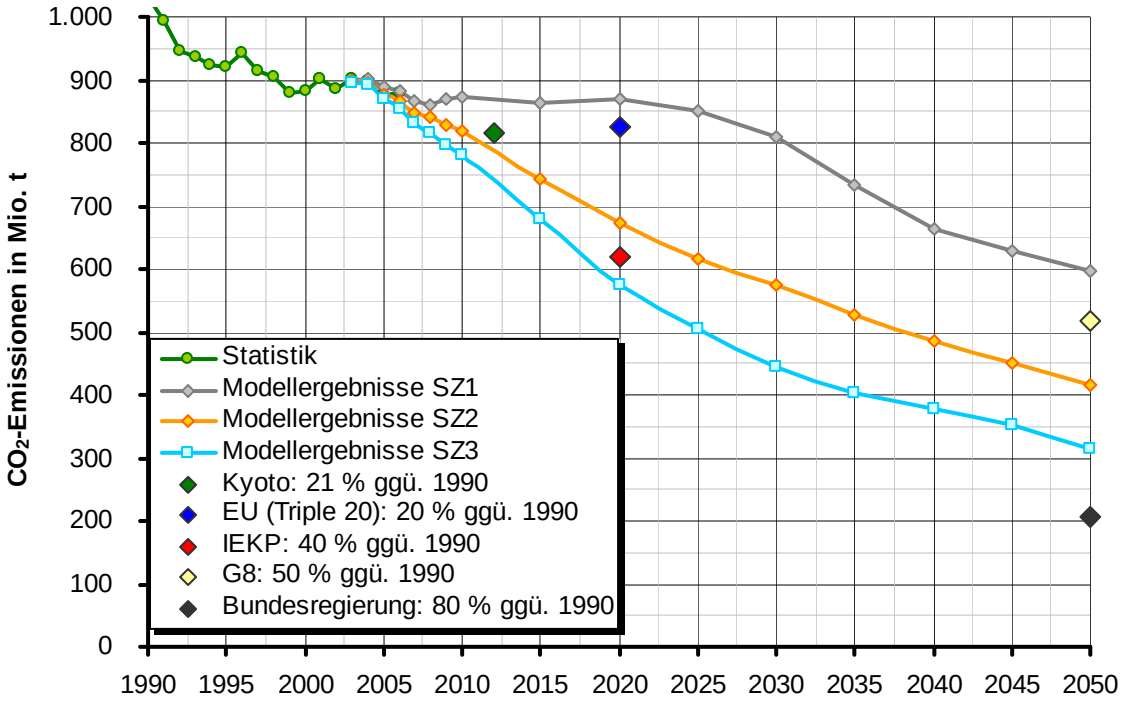

Abbildung 5-3: *CO_2-Emissionen der drei Szenarien und anvisierte Ziele*

5.2 Fazit und Ausblick

Der starke Rückgang des Energieverbrauchs, wie er in Szenario 2 und Szenario 3 errechnet wurde, ist keineswegs das Ergebnis einer natürlichen „Business-As-Usual"-Entwicklung. Sowohl die Einführung von Technologien mit höherer Energieeffizienz als auch die Änderung der Bedarfsdeterminanten gegenüber Szenario 1 sind mit Anstrengungen verbunden, die von der Bevölkerung nicht allein durch Appelle, sondern nur durch umfangreiche gesetzliche Vorgaben umgesetzt werden. Energie- und CO_2-Einsparungen sind allerdings nur möglich, wenn umweltbewusstes Verhalten für alle Akteure einen hohen Stellenwert einnimmt.

In den Sektoren Industrie und Energieversorgung mit wenigen großen Akteuren hat der Staat schon heute einfachere Möglichkeiten, durch restriktive Maßnahmen auf die Verhaltensänderung einzuwirken, z. B. durch die vorgeschriebene Teilnahme am CO_2-Zertfikatehandel. Ein Teil der externen Kosten der Energieversorgung kann so in die betriebswirtschaftliche Rechnung der Unternehmen aufgenommen und internalisiert werden. In Zukunft reicht die Beschränkung auf einen Teil der Emissionsverursacher nicht aus. Vielmehr müssen alle Akteure, d. h. auch Haushalte, GHD und der Verkehrssektor einen verpflichtenden Anteil zur Energieeinsparung leisten.

Während der Energieverbrauch in den Sektoren Verkehr, Haushalte und Gewerbe-Handel-Dienstleistung für alle drei Szenarien bis 2050 zurückgeht, steigt er in der Industrie auch in Zukunft weiter an. Dies ist primär bedingt durch ein weiteres langfristiges Wirtschaftswachstum in Deutschland. Der absolute Energieverbrauch sinkt bei stark reduzierter Energieintensität – also dem Energieverbrauch je BIP-Einheit – auf lange Sicht. Durch die seit vielen Jahren vergleichsweise hohe Besteuerung der Energie

sind deutsche Unternehmen deutlich energieeffizienter als Unternehmen in Ländern mit niedrigeren Energiekosten. Eine weitere starke Erhöhung der Effizienz ist nur mit hohem monetären Aufwand möglich.

Im Folgenden sollen weitere denkbare Hebel zur Energieeinsparung in der Industrie dargestellt werden, ohne Bewertung unerwünschter monetärer externer Effekte, wie z. B. volkswirtschaftliche Konsequenzen:

- Eine Beschleunigung der Effizienzerhöhung ist durch höhere Emissionssteuern bzw. Befreiung von diesen Steuern möglich, beispielsweise wenn die Unternehmen ein Energiemanagement, jährliche Maßnahmen und die Teilnahme an Energie-Effizienztischen nachweisen können.
- Ein weiterer Rückgang des Energieverbrauchs der Industrie ist nur durch die Abwanderung energieintensiver Prozesse und deren Nachfolgeprozesse möglich. Gegenüber den im Projekt betrachteten Effizienzverbesserungen würden deutlich stärkere Vorgaben dazu führen, dass die Produktion in anderen Ländern wesentlich billiger wird und ein Teil der Unternehmen abwandert. Die verbleibende Industrie würde auch effizienter produzieren bzw. wegen des Kostendrucks die Produktion einstellen. Dies kann beispielsweise durch ein Verbot von energieintensiven Prozessen erreicht werden.
- Jede Abwanderung der Grundstoffindustrie generiert auch eine Abwanderung eines Teils der Folgeprozesse und des KnowHows in andere Länder. Dies hat nicht nur die Schwächung des deutschen Wirtschaftsraumes, sondern auch eine weitere Erhöhung der Importabhängigkeit zur Folge.

Als Ergebnis der Szenarienrechnung und des Projektes „Energiezukunft 2050“ lassen sich folgende Ergebnisse festhalten und Schlussfolgerungen ziehen:

- Durch einen Entwicklungspfad wie in Szenario 3 – „Umweltbewusstes Handeln“ sind große Energie- und CO_2-Einsparungen möglich. Gegenüber 1990 lassen sich etwa 70 % an CO_2 jährlich einsparen. Das von der Bundesregierung erklärte Einsparziel von 80 % wird demnach selbst in diesem Extrem-Szenario nicht erreicht.
- Um dies zu erreichen, sind große Anstrengungen, insbesondere auf der Anwenderseite, notwendig. Nicht nur energieeffiziente Technologien müssen flächendeckend eingesetzt werden, sondern es muss auch zu einem Wechsel des Verbraucherverhaltens kommen. Die errechneten hohen Einsparungen sind teilweise mit Komforteinbußen verbunden.
- Durch eine Laufzeitverlängerung der Kernkraftwerke sowie die Neubauoption ist die Investition in Kohlekraftwerke mit CCS nicht wirtschaftlich darstellbar. Lediglich in Szenario 1 werden daher CO_2-arme Kohlekraftwerke eingesetzt. Die notwendigen rechtlichen und politischen Rahmenbedingungen für die Speichermöglichkeiten sind derzeit noch nicht vorhanden müssten geschaffen werden.
- Regenerative Energieträger werden in allen Szenarien und Sektoren eingesetzt. Bei steigendem Anteil der Erneuerbaren an der Stromerzeugung sind geeignete Speichermöglichkeiten notwendig.
- Die Politik ist gefordert, Rahmenbedingungen (durch Anreize, restriktive Gesetze und Verordnungen) zu schaffen, um den Anwendern Planungssicherheit zu geben. Derzeit greifen die meisten politischen Vorgaben nur bei EVU und Industrie, da dabei nur wenige Akteure und große Anlagen betrachtet werden müssen.

- Wichtig ist die laufende Überprüfung, ob die Gesetze und Verordnungen eingehalten werden. Untersuchungen zur EnEV zeigen in Deutschland eine Sanierungseffizienz von lediglich 30 % /KLE 00/, d. h. in nur einem Drittel der Sanierungen im Wohngebäudebereich werden die Vorgaben zur Energieeinsparung eingehalten.
- Eine Art „Gebäude-TÜV“ – die Überprüfung von Sanierungsmaßnahmen – könnte ein neues Aufgabenfeld etwa für zertifizierte Energieberater werden.
- Im Verkehrssektor wird Elektromobilität eine bedeutende Rolle zur Erhöhung der Effizienz spielen. Hierzu sind zusätzliche Investitionen in Forschung und Entwicklung notwendig, um diese Technologie zur Marktreife zu entwickeln. Die Konsequenz wäre trotz Effizienzgewinn eine Erhöhung des Stromverbrauchs in Deutschland. Saldiert mit den Einsparungen im Kraftstoffverbrauch kommt jedoch weniger Primärenergie und – energiepolitisch bedeutsam – ein anderer, diversifizierter Primärenergiemix zum Einsatz.
- Auch wenn mit derzeit etwa 2 % nur ein relativ geringer Anteil des gesamten Endenergieverbrauchs auf den Bereich der Beleuchtung entfällt, sind hier die relativ höchsten Effizienzpotenziale zu erwarten. Beim Einsatz energiesparender Leuchten kann etwa die fünffache Lichtausbeute gegenüber herkömmlichen Glühlampen erreicht werden.
- Im IT-Bereich, der in den letzten Jahren einen großen Zuwachs erlebt hat, können große Verbrauchsreduzierungen durch Konsolidierung und Virtualisierung von Serveranwendungen erreicht werden. Mehrere physikalisch getrennte Server, z. B. Mail-, Datenbanken-, Druckerserver etc., werden dazu per Software auf einer einzigen Hardware realisiert. Auch verschiedene Softwareapplikationen können auf einem „virtuellen“ Server betrieben werden, der dadurch besser ausgenutzt werden kann. Als Client können vergleichsweise energiesparende Computersysteme verwendet werden.

Deutschland ist eine exportorientierte Industrienation. Um die Energieeffizienz aller Sektoren und speziell der Industrie richtig zu bewerten, sollte demnach nicht nur der Energieverbrauch innerhalb der Grenzen Deutschlands, sondern der von deutschen Bürgern verursachte Energieverbrauch bestimmt werden. Dazu müssten sowohl der Export wie auch der Import von Gütern ganzheitlich, d. h. einschließlich deren energetischen Herstellungsaufwandes, erfasst und saldiert werden.

Für eine nachhaltige Energieversorgung stehen damit in den nächsten Jahren und Jahrzehnten Herausforderungen an, die jetzt in Angriff genommen und vorbereitet werden müssen.

6 Anhang

6.1 Sozioökonomische Rahmendaten

Tabelle 6-1: *Bruttowertschöpfung in Preisen von 2000*

Lfd. Nr.	WZ 2003	Wirtschaftsgliederung	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2010	2020	2030	2040	2050	Differenz 2050-2005	Durchschn. Veränd. 2050-2005
										Mrd. EUR							
1	A bis B	**Land- und Forstwirtschaft, Fischerei**	23,46	24,35	22,65	21,40	25,82	23,22	22,48	23,42	23,61	24,53	25,38	26,20	27,01	3,78	0,34
6	C bis F	**Produzierendes Gewerbe**	561,55	561,16	551,27	548,92	567,50	576,82	604,51	633,82	652,07	741,74	832,38	927,24	1027,61	450,79	1,29
7	C bis E	Produzierendes Gewerbe ohne Baugewerbe	465,34	470,38	463,77	465,73	487,50	500,58	530,05	557,46	576,73	670,88	765,29	863,50	966,90	466,32	1,47
16	D	Verarbeitendes Gewerbe	425,99	433,15	424,33	427,35	442,65	457,47	490,66	520,77	530,59	617,21	704,06	794,42	889,55	432,08	1,49
18	15	Ernährungsgewerbe	34,61	32,85	31,64	32,00	31,97	33,08	34,08	34,21	34,36	34,99	35,57	36,12	36,65	3,56	0,23
26	21	Papiergewerbe	9,81	9,43	9,34	9,28	9,92	10,39	10,99	11,23	11,42	12,32	13,19	14,06	14,94	4,54	0,81
28	DF	Kokerei,Mineralölverarbeitung,H.v.Brutstoffen	5,28	8,00	5,17	3,66	3,39	3,98	4,60	4,68	4,76	5,13	5,50	5,86	6,22	2,24	1,00
29	DG	H. v. chemischen Erzeugnissen	41,26	42,77	44,15	44,78	47,55	50,12	52,55	54,49	56,81	68,62	81,26	95,20	110,70	60,58	1,78
31	DI	Glasgewerbe,H.v.Keramik,Verarb.v.Steinen u.Erden	16,35	15,60	15,02	14,90	15,13	15,15	16,43	16,68	16,79	17,31	17,79	18,24	18,69	3,55	0,47
33	27	Metallerzeugung und -bearbeitung	16,57	17,51	18,15	17,11	15,73	15,97	16,13	16,41	16,63	17,67	18,66	19,64	20,61	4,65	0,57
35	DK	Maschinenbau	62,00	63,68	61,44	60,47	62,90	64,67	67,34	71,65	74,45	88,60	103,52	119,76	137,59	72,93	1,69
42	34	H. v. Kraftwagen und Kraftwagenteilen	49,11	57,25	56,41	60,33	60,78	61,43	68,69	71,23	74,01	88,07	102,90	119,05	136,77	75,34	1,79
		Übriges Verarb. Gewerbe	191,00	186,06	182,99	184,83	195,28	202,68	219,83	240,20	241,36	284,48	325,67	366,49	407,37	204,69	1,56
50	F	Baugewerbe	96,21	90,77	87,50	83,18	80,00	76,25	74,46	76,36	75,34	70,87	67,09	63,75	60,71	-15,53	-0,50
51	G bis P	**Dienstleistungsbereiche**	1 271,19	1 298,21	1 314,79	1 315,57	1 320,82	1 334,49	1 364,30	1 392,01	1 452,07	1 740,54	2 040,31	2 362,23	2 711,26	1376,77	1,59
52	G bis I	Handel, Gastgewerbe und Verkehr	337,27	346,98	346,17	345,40	351,00	357,57	372,62	374,44	389,78	461,08	536,57	619,06	710,04	352,46	1,54
53	G	Handel;Instandh.u.Rep.v.Kfz u.Gebrauchsgütern	205,33	212,09	207,73	208,37	206,54	214,65	222,11	217,94	227,58	274,91	325,55	381,39	443,46	228,81	1,63
57	H	Gastgewerbe	30,12	30,38	28,75	28,15	28,67	29,31	29,91	29,42	30,42	34,34	38,28	42,37	46,68	17,36	1,04
58	I	Verkehr und Nachrichtenübermittlung	101,82	104,52	109,69	108,88	115,79	113,61	120,60	127,08	131,78	151,84	172,75	195,30	219,90	106,29	1,48
59	60	Landverkehr;Transport i.Rohrfernleitungen	28,88	28,10	27,14	25,30	25,26	25,01	26,23	27,06	27,52	29,69	31,78	33,87	35,99	10,97	0,81
60	61	Schifffahrt	4,39	5,57	7,02	5,54	8,23	9,10	8,33	8,88	9,19	10,69	12,24	13,89	15,68	6,58	1,22
61	62	Luftfahrt	6,76	5,21	4,37	4,97	5,66	5,71	5,85	6,03	6,18	6,87	7,55	8,25	8,98	3,28	1,01
62	63	Hilfs-u.Nebentätigkeiten f.d.Verkehr,Verkehrsverm.	25,72	27,23	28,74	29,32	30,50	32,68	35,32	37,92	39,73	49,08	59,31	70,80	83,81	51,13	2,12
63	64	Nachrichtenübermittlung	36,07	38,41	42,43	43,92	47,15	42,09	45,62	47,87	49,16	55,50	61,87	68,48	75,44	33,35	1,31
64	J bis K	Finanzierung, Vermietung u. Untern.dienstleister	510,94	526,68	535,82	537,71	535,72	541,29	552,89	573,02	602,65	744,68	891,37	1047,97	1216,76	675,47	1,82
65	J	Kredit- und Versicherungsgewerbe	77,76	75,12	78,63	70,69	69,95	68,72	73,59	77,30	77,56	78,75	79,83	80,86	81,85	13,13	0,39
69	K	Grundstückswesen, Verm., Untern.dienstleister	433,18	451,59	457,18	467,36	466,23	473,86	479,23	495,43	525,09	665,92	811,53	967,11	1134,91	661,05	1,96
75	L bis P	Öffentliche und private Dienstleister	422,98	424,55	432,79	432,45	434,10	435,63	438,80	444,55	459,64	534,78	612,38	695,20	784,47	348,84	1,32
78	N	Gesundheits-, Veterinär- und Sozialwesen	124,07	127,66	137,02	138,93	141,49	141,15	145,43	149,39	158,08	204,21	256,83	318,33	390,57	249,42	2,29
79	O	Sonstige öff. u. priv. Dienstleister	91,24	90,80	88,57	88,06	89,34	89,09	88,47	89,55	91,06	98,25	105,16	112,07	119,07	29,99	0,65
84	P	Häusliche Dienste	6,22	6,20	6,08	6,10	6,16	6,17	6,29	6,40	6,58	7,43	8,28	9,16	10,09	3,93	1,10
85	A bis P	**Alle Wirtschaftsbereiche**	1 856,20	1 883,67	1 888,68	1 885,90	1 913,19	1 934,35	1 990,77	2 048,87	2127,80	2506,71	2898,01	3315,65	3765,81	1831,47	1,49
86		+ Gütersteuern	216,69	214,67	209,21	207,26	202,74	201,04	207,55	204,01	200,00	200,00	200,00	200,00	200,00	-1,04	-0,01
87		– Gütersubventionen	10,39	10,34	9,91	9,74	9,99	9,92	9,70	9,65	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	0,08	0,02
88		= Bruttoinlandsprodukt	2 062,50	2 088,08	2 088,08	2 083,54	2 105,61	2 124,99	2 187,90	2 241,73	2317,80	2696,71	3088,01	3505,65	3955,81	1830,82	1,39

Tabelle 6-2: *Bruttowertschöpfung in Preisen von 2000 -Struktur-*

Lfd. Nr.	WZ 2003	Wirtschaftsgliederung	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2010	2020	2030	2040	2050	Differenz 2050-2005	Proz. Veränd. 2050-2005
			Anteile in %														
1	A bis B	**Land- und Forstwirtschaft, Fischerei**	1,26	1,29	1,20	1,13	1,35	1,20	1,13	1,14	1,11	0,98	0,88	0,79	0,72	-0,48	-40,26
6	C bis F	**Produzierendes Gewerbe**	30,25	29,79	29,19	29,11	29,66	29,82	30,37	30,94	30,65	29,59	28,72	27,97	27,29	-2,53	-8,49
7	C bis E	Produzierendes Gewerbe ohne Baugewerbe	25,07	24,97	24,56	24,70	25,48	25,88	26,63	27,21	27,10	26,76	26,41	26,04	25,68	-0,20	-0,78
16	D	Verarbeitendes Gewerbe	22,95	22,99	22,47	22,66	23,14	23,65	24,65	25,42	24,94	24,62	24,29	23,96	23,62	-0,03	-0,12
18	15	Ernährungsgewerbe	1,86	1,74	1,68	1,70	1,67	1,71	1,71	1,67	1,61	1,40	1,23	1,09	0,97	-0,74	-43,10
19	21	Papiergewerbe	0,53	0,50	0,49	0,49	0,52	0,54	0,55	0,55	0,54	0,49	0,46	0,42	0,40	-0,14	-26,18
25	DF	Kokerei,Mineralölverarbeitung,H.v.Brutstoffen	0,28	0,42	0,27	0,19	0,18	0,21	0,23	0,23	0,22	0,20	0,19	0,18	0,17	-0,04	-19,74
26	DG	H. v. chemischen Erzeugnissen	2,22	2,27	2,34	2,37	2,49	2,59	2,64	2,66	2,67	2,74	2,80	2,87	2,94	0,35	13,45
27	DI	Glasgewerbe,H.v.Keramik,Verarb.v.Steinen u.Erden	0,88	0,83	0,80	0,79	0,79	0,78	0,83	0,81	0,79	0,69	0,61	0,55	0,50	-0,29	-36,61
29	27	Metallerzeugung und -bearbeitung	0,89	0,93	0,96	0,91	0,82	0,83	0,81	0,80	0,78	0,71	0,64	0,59	0,55	-0,28	-33,68
31	DK	Maschinenbau	3,34	3,38	3,25	3,21	3,29	3,34	3,38	3,50	3,50	3,53	3,57	3,61	3,65	0,31	9,29
32	34	H. v. Kraftwagen und Kraftwagenteilen	2,65	3,04	2,99	3,20	3,18	3,18	3,45	3,48	3,48	3,51	3,55	3,59	3,63	0,46	14,36
33		Übriges Verarb. Gewerbe	10,29	9,88	9,69	9,80	10,21	10,48	11,04	11,72	11,34	11,35	11,24	11,05	10,82	0,34	3,24
50	F	Baugewerbe	5,18	4,82	4,63	4,41	4,18	3,94	3,74	3,73	3,54	2,83	2,32	1,92	1,61	-2,33	-59,10
51	G bis P	**Dienstleistungsbereiche**	68,48	68,92	69,61	69,76	69,04	68,99	68,53	67,94	68,24	69,44	70,40	71,24	72,00	3,01	4,36
52	G bis I	Handel, Gastgewerbe und Verkehr	18,17	18,42	18,33	18,31	18,35	18,49	18,72	18,28	18,32	18,39	18,52	18,67	18,85	0,37	2,00
53	G	Handel;Instandh.u.Rep.v.Kfz u.Gebrauchsgütern	11,06	11,26	11,00	11,05	10,80	11,10	11,16	10,64	10,70	10,97	11,23	11,50	11,78	0,68	6,12
57	H	Gastgewerbe	1,62	1,61	1,52	1,49	1,50	1,52	1,50	1,44	1,43	1,37	1,32	1,28	1,24	-0,28	-18,20
58	I	Verkehr und Nachrichtenübermittlung	5,49	5,55	5,81	5,77	6,05	5,87	6,06	6,20	6,19	6,06	5,96	5,89	5,84	-0,03	-0,58
59	60	Landverkehr;Transport i.Rohrfernleitungen	1,56	1,49	1,44	1,34	1,32	1,29	1,32	1,32	1,29	1,18	1,10	1,02	0,96	-0,34	-26,10
60	61	Schifffahrt	0,24	0,30	0,37	0,29	0,43	0,47	0,42	0,43	0,43	0,43	0,42	0,42	0,42	-0,05	-11,50
61	62	Luftfahrt	0,36	0,28	0,23	0,26	0,30	0,30	0,29	0,29	0,29	0,27	0,26	0,25	0,24	-0,06	-19,13
62	63	Hilfs-u.Nebentätigkeiten f.d.Verkehr,Verkehrsverm.	1,39	1,45	1,52	1,55	1,59	1,69	1,77	1,85	1,87	1,96	2,05	2,14	2,23	0,54	31,74
63	64	Nachrichtenübermittlung	1,94	2,04	2,25	2,33	2,46	2,18	2,29	2,34	2,31	2,21	2,13	2,07	2,00	-0,17	-7,93
64	J bis K	Finanzierung, Vermietung u. Untern.dienstleister	27,53	27,96	28,37	28,51	28,00	27,98	27,77	27,97	28,32	29,71	30,76	31,61	32,31	4,33	15,46
65	J	Kredit- und Versicherungsgewerbe	4,19	3,99	4,16	3,75	3,66	3,55	3,70	3,77	3,65	3,14	2,75	2,44	2,17	-1,38	-38,82
69	K	Grundstückswesen, Verm., Untern.dienstleister	23,34	23,97	24,21	24,78	24,37	24,50	24,07	24,18	24,68	26,57	28,00	29,17	30,14	5,64	23,02
75	L bis P	Öffentliche und private Dienstleister	22,79	22,54	22,92	22,93	22,69	22,52	22,04	21,70	21,60	21,33	21,13	20,97	20,83	-1,69	-7,50
78	N	Gesundheits-, Veterinär- und Sozialwesen	6,68	6,78	7,25	7,37	7,40	7,30	7,31	7,29	7,43	8,15	8,86	9,60	10,37	3,07	42,13
79	O	Sonstige öff. u. priv. Dienstleister	4,92	4,82	4,69	4,67	4,67	4,61	4,44	4,37	4,28	3,92	3,63	3,38	3,16	-1,44	-31,34
84	P	Häusliche Dienste	0,34	0,33	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,31	0,31	0,30	0,29	0,28	0,27	-0,05	-15,94
85	A bis P	**Alle Wirtschaftsbereiche**	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	0,00	0,00

Tabelle 6-3: *Bruttowertschöpfung in Preisen von 2000 –Entwicklung-*

Lfd. Nr.	WZ 2003	Wirtschaftsgliederung	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2010	2020	2030	2040	2050	Differenz 2050-2005	Proz. Veränd. 2050-2005
										Anteile in %							
1	A bis B	**Land- und Forstwirtschaft, Fischerei**	100,00	103,79	96,55	91,23	110,07	98,99	95,84	99,81	100,65	104,56	108,18	111,68	115,12	16,13	16,29
6	C bis F	**Produzierendes Gewerbe**	100,00	99,93	98,17	97,75	101,06	102,72	107,65	112,87	116,12	132,09	148,23	165,12	183,00	80,28	78,15
7	C bis E	Produzierendes Gewerbe ohne Baugewerbe	100,00	101,08	99,66	100,08	104,76	107,57	113,91	119,80	123,94	144,17	164,46	185,56	207,78	100,21	93,16
16	D	Verarbeitendes Gewerbe	100,00	101,68	99,61	100,32	103,91	107,39	115,18	122,25	124,56	144,89	165,28	186,49	208,82	101,43	94,45
17	15	Ernährungsgewerbe	100,00	94,91	91,43	92,45	92,37	95,59	98,47	98,83	99,27	101,10	102,76	104,35	105,88	10,29	10,77
18	21	Papiergewerbe	100,00	96,13	95,20	94,57	101,08	105,95	112,03	114,51	116,44	125,64	134,47	143,31	152,26	46,31	43,71
19	DF	Kokerei,Mineralölverarbeitung,H.v.Brutstoffen	100,00	151,52	97,95	69,39	64,25	75,42	87,13	88,63	90,13	97,24	104,08	110,92	117,85	42,43	56,26
25	DG	H. v. chemischen Erzeugnissen	100,00	103,66	107,01	108,52	115,25	121,47	127,37	132,07	137,69	166,32	196,96	230,74	268,29	146,82	120,87
26	DI	Glasgewerbe,H.v.Keramik,Verarb.v.Steinen u.Erden	100,00	95,41	91,88	91,12	92,52	92,65	100,51	101,99	102,68	105,86	108,78	111,59	114,33	21,68	23,40
27	27	Metallerzeugung und -bearbeitung	100,00	105,67	109,54	103,27	94,95	96,35	97,36	99,04	100,37	106,67	112,63	118,52	124,41	28,06	29,12
29	DK	Maschinenbau	100,00	102,71	99,10	97,53	101,45	104,30	108,62	115,57	120,09	142,90	166,97	193,16	221,93	117,63	112,78
31	34	H. v. Kraftwagen und Kraftwagenteilen	100,00	116,58	114,87	122,84	123,76	125,09	139,87	145,03	150,70	179,33	209,53	242,41	278,50	153,41	122,64
32		Übriges Verarb. Gewerbe	100,00	97,41	95,81	96,77	102,24	106,12	115,09	125,76	126,37	148,94	170,51	191,88	213,28	107,17	100,99
50	F	Baugewerbe	100,00	94,35	90,95	86,46	83,15	79,25	77,39	79,37	78,31	73,66	69,74	66,26	63,11	-16,14	-20,37
51	G bis P	**Dienstleistungsbereiche**	100,00	102,13	103,43	103,49	103,90	104,98	107,32	109,50	114,23	136,92	160,50	185,83	213,29	108,31	103,17
52	G bis I	Handel, Gastgewerbe und Verkehr	100,00	102,88	102,64	102,41	104,07	106,02	110,48	111,02	115,57	136,71	159,09	183,55	210,52	104,50	98,57
53	G	Handel;Instandh.u.Rep.v.Kfz u.Gebrauchsgütern	100,00	103,29	101,17	101,48	100,59	104,54	108,17	106,14	110,84	133,88	158,55	185,75	215,97	111,43	106,60
57	H	Gastgewerbe	100,00	100,86	95,45	93,47	95,17	97,31	99,32	97,67	100,98	114,01	127,08	140,67	154,96	57,65	59,24
58	I	Verkehr und Nachrichtenübermittlung	100,00	102,65	107,73	106,93	113,72	111,58	118,44	124,81	129,42	149,12	169,66	191,81	215,97	104,39	93,56
59	60	Landverkehr;Transport i.Rohrfernleitungen	100,00	97,30	93,96	87,59	87,47	86,61	90,81	93,71	95,30	102,82	110,05	117,28	124,61	38,00	43,87
60	61	Schifffahrt	100,00	126,88	160,01	126,19	187,38	207,26	189,76	202,37	209,23	243,44	278,76	316,46	357,10	149,84	72,30
61	62	Luftfahrt	100,00	77,03	64,62	73,50	83,75	84,42	86,47	89,24	91,35	101,59	111,71	122,11	132,90	48,48	57,43
62	63	Hilfs-u.Nebentätigkeiten f.d.Verkehr,Verkehrsverm.	100,00	105,87	111,73	114,01	118,60	127,05	137,31	147,45	154,48	190,84	230,58	275,27	325,86	198,81	156,48
63	64	Nachrichtenübermittlung	100,00	106,49	117,62	121,76	130,73	116,69	126,48	132,70	136,30	153,88	171,52	189,86	209,15	92,46	79,24
64	J bis K	Finanzierung, Vermietung u. Untern.dienstleister	100,00	103,08	104,87	105,24	104,85	105,94	108,21	112,15	117,95	145,75	174,46	205,11	238,14	132,20	124,79
65	J	Kredit- und Versicherungsgewerbe	100,00	96,60	101,12	90,91	89,95	88,37	94,64	99,41	99,74	101,28	102,67	103,98	105,26	16,89	19,11
69	K	Grundstückswesen, Verm., Untern.dienstleister	100,00	104,25	105,54	107,89	107,63	109,39	110,63	114,37	121,22	153,73	187,34	223,26	261,99	152,60	139,51
75	L bis P	Öffentliche und private Dienstleister	100,00	100,37	102,32	102,24	102,63	102,99	103,74	105,10	108,67	126,43	144,78	164,36	185,46	82,47	80,08
78	N	Gesundheits-, Veterinär- und Sozialwesen	100,00	102,89	110,44	111,98	114,04	113,77	117,22	120,41	127,41	164,59	207,00	256,58	314,80	201,03	176,70
79	O	Sonstige öff. u. priv. Dienstleister	100,00	99,52	97,07	96,52	97,92	97,64	96,96	98,15	99,81	107,69	115,26	122,83	130,51	32,87	33,66
84	P	Häusliche Dienste	100,00	99,68	97,78	98,09	99,00	99,15	101,20	102,95	105,74	119,38	133,06	147,29	162,26	63,11	63,65
85	A bis P	**Alle Wirtschaftsbereiche**	100,00	101,48	101,75	101,60	103,07	104,21	107,25	110,38	114,63	135,05	156,13	178,63	202,88	98,67	94,68

Tabelle 6-4: *Produktionsmengen ausgewählter Erzeugnisse*

Jahr	Zellstoff, insgesamt	Holzstoff Mittel	Altpapier	Verpackungs-papiere	Grafische Papiere	Spezial-papiere	Hygiene-papiere
				in Tsd. t			
1995	718	1.266	8.599	5.783	7.265	1.038	741
1996	728	1.243	9.028	6.044	7.594	1.085	775
1997	738	1.220	9.457	6.062	7.817	1.117	957
1998	770	1.261	9.969	6.568	8.252	1.179	842
1999	821	1.301	10.480	6.829	8.580	1.226	876
2000	873	1.342	10.992	7.091	8.909	1.273	909
2001	874	1.229	11.526	6.973	8.761	1.252	894
2002	896	1.252	12.038	7.225	9.078	1.297	926
2003	848	1.344	12.449	7.480	9.458	1.319	1.053
2004	1.106	1.396	13.219	7.758	10.127	1.436	1.070
2005	1.169	1.475	13.970	8.199	10.703	1.518	1.131
2010	1.218	1.406	15.243	8.389	10.951	1.553	1.157
2020	1.375	1.578	17.540	9.577	12.502	1.773	1.321
2030	1.402	1.824	19.534	10.678	14.027	1.942	1.617
2040	1.920	1.989	21.779	11.628	15.770	2.220	1.725
2050	2.112	2.188	23.957	12.791	17.347	2.442	1.898

Tabelle 6-5: *Produktionsmengen ausgewählter Erzeugnisse*

Jahr	Polyethylen	Polypropylen	Polyvinyl-chlorid	Polystyrol	Polyurethan	Summe ausgewählter Kunststoffe
			in Tsd. t			
1995	1.834.435	472.200	1.264.968	562.260	1.128.965	5.262.828
1997	1.725.000	515.948	1.392.338	609.834	718.814	4.961.934
1998	1.795.000	884.336	1.273.689	654.499	761.697	5.369.221
1999	1.870.000	1.246.200	1.365.451	689.941	734.570	5.906.162
2000	2.037.000	1.337.265	1.410.132	766.873	765.430	6.316.700
2001	2.201.000	1.299.577	1.495.614	696.932	768.982	6.462.105
2002	2.542.000	1.754.598	1.632.495	736.755	826.684	7.492.532
2003	2.540.000	1.664.161	1.634.264	740.025	850.182	7.428.632
2004	2.538.000	1.791.360	1.742.654	773.977	921.236	7.767.227
2005	2.700.453	1.906.022	1.854.198	823.518	980.203	8.264.395
2010	2.873.305	2.028.023	1.972.883	876.230	1.042.944	8.793.385
2020	3.057.221	2.157.834	2.099.164	932.316	1.109.701	9.356.236
2030	3.252.908	2.295.954	2.233.528	991.992	1.180.731	9.955.113
2040	3.461.122	2.442.914	2.376.492	1.055.488	1.256.308	10.592.324
2050	3.682.663	2.599.281	2.528.608	1.123.048	1.336.722	11.270.322

Tabelle 6-6: *Metallerzeugung und -bearbeitung*

Jahr	Sinter	Roheisen	Oxygenstahl	Elektrostahl	Aluminium, primär	Aluminium, sekundär
in Tsd. t						
1995	28.243	30.012	31.908	10.143	575	419
1996	27.268	27.722	29.447	10.346	576	417
1997	28.759	30.940	33.134	11.873	572	432
1998	28.883	30.162	31.951	12.096	612	453
1999	26.740	27.934	29.795	12.267	634	483
2000	27.959	30.845	33.051	13.324	644	572
2001	27.055	29.184	31.654	13.149	652	623
2002	26.104	29.427	31.809	13.206	653	666
2003	26.811	29.481	31.377	13.432	661	680
2004	27.892	30.018	32.158	14.216	668	704
2005	27.149	29.218	31.301	13.622	672	722
2010	27.534	29.633	31.745	14.254	714	826
2020	27.809	29.929	32.062	15.617	805	1.047
2030	28.085	30.225	32.380	16.609	885	1.239
2040	28.085	30.225	32.380	17.352	952	1.377
2050	27.534	29.633	31.745	17.972	1.007	1.432

Tabelle 6-7: *Glas, Keramik, Steine und Erden*

Jahr	Zement	Kalk	Flachglas	Hohlglas	Glas, insgesamt
in Tsd. t					
1995	35.862	6.774	1.830	4.579	7.105
1996	34.318	6.774	1.770	4.505	7.370
1997	34.148	7.061	1.988	4.294	7.497
1998	35.601	6.823	1.799	4.323	7.420
1999	37.438	7.068	2.020	4.358	7.703
2000	35.414	7.279	1.923	4.257	7.565
2001	32.118	7.409	1.802	4.268	7.600
2002	31.009	6.952	1.786	4.128	7.404
2003	32.749	6.518	1.500	4.208	7.206
2004	31.954	7.117	1.508	4.105	7.154
2005	32.733	7.291	1.424	3.875	6.753
2010	33.636	7.492	1.495	4.070	7.092
2020	34.456	7.674	1.609	4.379	7.632
2030	35.277	7.857	1.706	4.645	8.095
2040	36.097	8.040	1.820	4.954	8.634
2050	36.917	8.222	1.901	5.175	9.020

Tabelle 6-8: *Entwicklung der Anzahl an Krankenhäusern und deren Inanspruchnahme*

	2000	2002	2003	2010	2020	2030	2040	2050
Krankenhäuser, Anzahl	2.242	2.221	2.197	2.120	2.100	2.070	2.040	2.000
Betten, Anzahl	559.651	547.284	541.901	508.642	487.968	470.525	440.542	414.165
- je 100.000 Einwohner	681	664	657	620	600	590	570	560
Patienten, Anzahl in Tsd.	17.263	17.432	17.296	16.572	16.428	16.269	15.921	15.383
- je 100.000 Einwohner	21.004	21.135	20.960	20.200	20.200	20.400	20.600	20.800
Belegungstage, in Tsd.	167.789	159.937	153.518	142.518	139.640	136.660	133.739	129.219
durchschn. Verweildauer; Tage	9,7	9,2	8,9	8,6	8,5	8,4	8,4	8,4
durchschn. Bettenauslastung; %	81,9	80,1	77,6	76,8	78,4	79,6	83,2	85,5

Tabelle 6-9: *Entwicklung der Schüler und Studierenden*

	2000	2003	2010	2020	2030	2040	2050
	Anzahl in Tsd.						
Allgemeinbildende Schulen							
- Einschulungen	812	844	780	750	730	740	750
- Schüler insgesamt	9.960	9.727	8.739	8.146	8.014	7.609	7.167
- Absolventen/Abgänger	938	948	880	800	760	740	750
Studierende	1.799	2.019	1.851	1.777	1.818	1.795	1.758
Summe	11.759	11.746	10.590	9.922	9.832	9.404	8.925
Entwicklung, 2003=100	100	100	90	84	84	80	76
Bevölkerung unter 20 Jahren	17.402	16.920	15.051	13.754	13.266	12.349	11.403
Entwicklung, 2003=100	103	100	89	81	78	73	67
Bevölkerung u. 20 J., Anteil in %	68	69	70	72	74	76	78

Tabelle 6-10: *Beschäftigtenentwicklung im Dienstleistungssektor*

	2000	2003	2005	2010	2020	2030	2040	2050
	Anzahl in Tsd.							
Dienstleistungen[a)]	18.565	19.136	19.608	20.784	20.764	19.601	19.013	18.347
davon								
Verkehr und Nachrichtenübermittlung	2.133	2.118	2.108	2.076	2.034	1.973	1.914	1.856
Kredit- und Versicherungsgewerbe	1.277	1.262	1.244	1.224	1.187	1.140	1.106	1.073
Grundstücks- und Wohnungswesen, Vermietung beweglicher Sachen usw.	4.525	4.865	5.158	5.838	5.780	5.317	5.158	5.003
Öffentliche Verwaltung, Verteidigung, Sozialversicherung	2.857	2.754	2.670	2.561	2.459	2.360	2.266	2.175
Erziehung und Unterricht	2.150	2.225	2.278	2.403	2.451	2.329	2.259	2.146
Gesundheits-, Veterinär- und Sozialwesen	3.668	3.904	4.038	4.451	4.540	4.267	4.139	4.015
Sonstige öffentliche und persönliche Dienstleistungen	1.955	2.008	2.112	2.232	2.313	2.215	2.172	2.079

[a)] Dienstleistungen ohne Handel, Gastgewerbe, Verarbeiter mit weniger als 20 Beschäftigten und private Haushalte.

Tabelle 6-11: *Bestand an Wohnungen und Gebäuden 1995 bis 2050*

Jahr	Wohnge-bäude in Tsd.	Wohnungen je Gebäude	Wohnungen in Tsd	Wohnungen je 1000 Einwohner	Wohnfläche in Mio. m^2	Wohnfläche je Wohnung in m^2	Wohnfläche je Einwohner in m^2
Istwerte							
1995	15.732,4	2,24	35.266,6	431,0	2.944,8	83,5	36,0
1996	15.924,3	2,25	35.789,2	436,4	2.992,5	83,6	36,5
1997	16.137,3	2,25	36.330,8	442,7	3.043,2	83,8	37,1
1998	16.352,9	2,25	36.796,6	448,5	3.089,8	84,0	37,7
1999	16.583,1	2,25	37.240,3	453,7	3.136,7	84,2	38,2
2000	16.802,3	2,24	37.629,5	457,8	3.179,7	84,5	38,7
2001	16.977,7	2,23	37.921,2	460,5	3.214,0	84,8	39,0
2002	17.139,1	2,23	38.157,9	462,6	3.243,4	85,0	39,3
2003	17.293,7	2,22	38.370,0	465,0	3.272,0	85,3	39,7
2004	17.458,7	2,21	38.586,5	467,7	3.301,3	85,6	40,0
2005	17.599,8	2,20	38.771,8	470,3	3.326,8	85,8	40,4
Schätzwerte							
2010	17.906,2	2,19	39.214,6	478,0	3.403,8	86,8	41,5
2020	18.653,2	2,18	40.664,0	500,0	3.566,2	87,7	43,9
2030	19.331,1	2,17	41.948,5	526,0	3.708,2	88,4	46,5
2040	19.894,5	2,16	42.972,1	556,0	3.820,2	88,9	49,4
2050	20.157,9	2,15	43.339,4	586,0	3.859,4	89,1	52,2

Tabelle 6-12: *Bestand an Wohnungen und Gebäuden 1995 bis 2050*

Jahr	Wohngebäude in Tsd.	Wohnungen je Gebäude	Wohnungen in Tsd.	Wohnfläche in Mio. m^2	Wohnfläche je Wohnung in m^2
Wohnungen und Gebäude 1995 bis 2050, mit 1 und 2 Wohnungen					
Istwerte					
1995	12.898,0	1,25	16.107,7	1.686,8	104,7
1996	13.049,6	1,25	16.300,2	1.711,3	105,0
1997	13.223,8	1,25	16.516,5	1.739,0	105,3
1998	13.409,2	1,25	16.741,7	1.768,2	105,6
1999	13.613,2	1,25	16.986,1	1.799,9	106,0
2000	13.811,1	1,25	17.220,0	1.830,8	106,3
2001	13.971,2	1,25	17.408,6	1.856,2	106,6
2002	14.121,5	1,25	17.585,1	1.879,7	106,9
2003	14.266,7	1,24	17.754,0	1.903,3	107,2
2004	14.422,8	1,24	17.933,8	1.928,1	107,5
2005	14.556,5	1,24	18.087,9	1.949,5	107,8
Schätzwerte					
2010	14.860,0	1,24	18.470,1	2.013,9	109,0
2020	15.552,7	1,26	19.518,7	2.143,2	109,8
2030	16.160,3	1,26	20.387,0	2.252,8	110,5
2040	16.668,4	1,26	21.034,9	2.335,1	111,0
2050	16.913,8	1,26	21.279,6	2.364,8	111,1
Wohnungen und Gebäude 1995 bis 2050, mit 3 und mehr Wohnungen					
Istwerte					
1995	2.834,5	6,76	19.158,9	1.258,0	65,7
1996	2.874,7	6,78	19.488,9	1.281,2	65,7
1997	2.913,5	6,80	19.814,3	1.304,2	65,8
1998	2.943,7	6,81	20.054,9	1.321,6	65,9
1999	2.969,9	6,82	20.254,2	1.336,8	66,0
2000	2.991,2	6,82	20.409,6	1.348,9	66,1
2001	3.006,5	6,82	20.512,5	1.357,8	66,2
2002	3.017,6	6,82	20.572,8	1.363,6	66,3
2003	3.027,0	6,81	20.615,9	1.368,6	66,4
2004	3.035,8	6,80	20.652,7	1.373,2	66,5
2005	3.043,3	6,80	20.684,0	1.377,3	66,6
Schätzwerte					
2010	3.046,2	6,81	20.744,5	1.389,9	67,0
2020	3.100,5	6,82	21.145,3	1.423,1	67,3
2030	3.170,8	6,80	21.561,5	1.455,4	67,5
2040	3.226,1	6,80	21.937,3	1.485,2	67,7
2050	3.244,1	6,80	22.059,7	1.494,5	67,8

7 Quellen

/AGEB 03/ Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V. (AGEB): *Statistiken zur Energiebilanz in Deutschland*, Berlin, 2008

/AGEB 08/ Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e. V.: *Auswertungstabellen zur Energiebilanz für die Bundesrepublik Deutschland,* Berlin und Köln, verschiedene Jahre, September 2008

/AGFW 06/ Arbeitsgemeinschaft Fernwärme e. V. (AGFW): *Branchenreport 2006 der AGFW*, Frankfurt, 2007, www.agfw.de, 17.05.2007

/AIECE 08/ Association d'Instituts Europeens de Conjuncture Economique (AIECE): *World Commodity Prices 2008 – mid 2010*, Kiel 2008

/BA 07/ Bundesagentur für Arbeit: *Statistik der Arbeitslosengeldempfänger*, Nürnberg, 2007

/BEE 07/ Beer, M. et al.: *Energie-Daten und Analyse R&D (EduaR&D), Teilprojekt: Ganzheitliche und dynamische Bewertung der KWK mit Brennstoffzellentechnologie*, Forschungsstelle für Energiewirtschaft e. V., München, 2007

/BLA 06/ Blasche, U. G.: *Die Szenariotechnik als Modell für komplexe Probleme. Mit Unsicherheiten leben lernen.* in: Szenariotechnik – Vom Umgang mit der Zukunft (Hrsg. Wilms F. E. P.). Haupt Verlag, Bern, Stuttgart Wien, 2006

/BMJ-01 02/ Bundesgesetzblatt Jahrgang 2002 Teil I Nr. 26: *Gesetz zur geordneten Beendigung der Kernenergienutzung zur gewerblichen Erzeugung von Elektrizität,* Bundesministerium der Justiz, Bonn, 2002

/BMU 05/ Naumann, S.; Igel, F.: *Leitfaden für die Vergütung von Strom aus Wasserkraft nach dem Erneuerbare-Energien-Gesetz für die Neuerrichtung und Modernisierung von Wasserkraftanlagen,* Bundesamt für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Berlin, 2005

/BMWi 07/ Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWI): *Energiestatistiken der Erneuerbaren Energien*, Berlin, Mai 2007

/BMWi 09/ Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi): *Energiedaten – Nationale und internationale Entwicklung*, Berlin, verschiedene Jahre, Februar 2009

/BÜN 07/ Bünger, U.; Wietschl, M.: *Results of Hyways for Germany*, Hyways, Ottobrunn, 2007

/BUT 08/ Buttner W.: *Einführung Beleuchtungstechnik*; Präsentation im Rahmen des Fachforums: Kosten- und Energiesparen durch effiziente Beleuchtungssysteme; Nürnberg, 2008

/DAI 08a/ Daimler AG: *Nachhaltigkeitsbericht 2008*, Stuttgart, 2008

/DAI 08b/ Daimler AG: *Generation B – F-Cell: Vom Prüfstand in den Wintertest*, Stuttgart, 2008

/DBAG 01/ Deutsche Bahn AG: *Daten und Fakten 2000,* Berlin, 2001

/DBAG 06a/ Deutsche Bahn AG: *Daten und Fakten 2005,* Berlin, 2006

/DBAG 06b/ Seifert, A.; Löchter, A.: *Persönliche Mitteilung,* Deutsche Bahn AG, 2006

/DENA 05/ Studie im Auftrag der Deutschen Energie-Agentur GmbH (dena): *Energiewirtschaftliche Planung für die Netzintegration von Windenergie in Deutschland an Land und Offshore bis zum Jahr 2020*, Berlin, 2005

/DEWI 06/ Deutsches Windenergie-Institut GmbH: *Leistung und Erzeugung von Windenergieanlagen*, Wilhelmshaven, Mai 2007, www.dewi.de

/DIW 03/ *Mobilität in Deutschland 2002 – Tabellenband*, Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung (DIW), Berlin, 2003

/DIW 07/ Kalinowska, D.; Kunert, U.: *Kraftfahrzeugverkehr 2006 trotz konjunkturellen Aufschwungs nur wenig gestiegen* in: Wochenbericht, Nr. 40/2007, Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung (DIW), Berlin, 2007

/DKS 07/ Deutsches Nationalkomitee für Denkmalschutz, Bonn, 2007, www.nationalkomitee.de

/DLR-01 08/ Nitsch, Dr. J.: *Leitstudie 2008 – Weiterentwicklung der „Ausbaustrategie Erneuerbare Energien" vor dem Hintergrund der aktuellen Klimaschutzziele Deutschlands und Europas,* Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), Berlin, 2008

/DWD 06/ Deutscher Wetterdienst: *Solarstrahlungsatlas der Globalstrahlung für 2005*, Offenbach, 2006

/EBE 06/ Eberhard, M.; Tarpenning, M.: *The 21st Century Electric Car,* Tesla Motors Inc., San Carlos, USA, 2006

/EON 09/ Auskunft von E.ON Ruhrgas AG, 2009

/EU 05/ I*ntegrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung – Referenzdokument über die besten verfügbaren Techniken für die Herstellung organischer Feinchemikalien*, Europäische Kommision – Generaldirektion GFS Gemeinsame Forschungsstelle Institut für technologische Zukunftsforschung, Berlin, 2005

/EUCO 03/ European Commission: *Hydrogen Energy and Fuel Cells – A vision of our future,* Office for Official Publications of the European Communities, Luxemburg, 2003

/EXX 06/ ExxonMobil Central Europe Holding GmbH, *OELDORADO 2006*, Hamburg, 2006

/FAZ 08/ Preuß, S.: *Im Gespräch: Shai Agassi, der Gründer des Unternehmens Project Better Place* in: Frankfurter Allgemeine Zeitung, 06.09.2008,

Nr. 209, S. 17, Frankfurter Allgemeine Zeitung (FAZ), Frankfurt am Main, 2008

/FFE 07/ Blank, T.: *Elektrostraßenfahrzeuge – Elektrizitätswirtschaftliche Einbindung von Elektrostraßenfahrzeugen,* Forschungsstelle für Energiewirtschaft e. V. (FfE), München, 2007

/FFE 08a/ Beer, M. et al.: *CO_2-Verminderung in Deutschland*, Forschungsstelle für Energiewirtschaft e. V., München, 2008

/FFE 08b/ Forschungsstelle für Energiewirtschaft e. V.: *laufende Aktualisierung der internen unveröffentlichten Kraftwerksdatenbank,* München, Januar 2008

/FRI 08/ Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE: *Wärmepumpen-Effizienz – Feldtest des Fraunhofer ISE*, Freiburg, 2008

/HEI 05/ Heimerl, S.: *Wasserkraft in Deutschland – wie geht's weiter?* 2. Konferenz der Elektrizitätswirtschaft „Regenerative Energien – Mut zum Wandel" des VDEW, Stuttgart, 6./7. April 2005

/HWWI 08/ Hamburgisches WeltwirtschaftsInstitut (HWWI): *HWWI-Rohstoffpreisindex*, Hamburg, 2008, www.hwwi.de

/IEA 03/ International Energy Agency: *World Energy Investment Outlook*, Paris 2003

/IEA 07/ International Energy Agency: *Word Energy Outlook 2007*, www.worldenergyoutlook.org

/IEKP-01 07/ *Das Integrierte Energie- und Klimaprogramm der Bundesregierung – IEKP*. Berlin: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi), 2007

/IfE 08/ Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik: *Unveröffentlichte interne Studie*, Technische Universität München, 2008

/IFE-01 08/ Roth, H.; Kuhn, P.: *Technik- und Kostenszenarien der Strombereitstellung in Deutschland bis 2040 – Endbericht zum Teilprojekt E1 des Forschungsverbunds KW21* in: IfE Schriftenreihe Heft 55, Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik (IfE), TU München, 2008

/IFEU 05a/ *Energieverbrauch und Schadstoffemissionen des motorisierten Verkehrs in Deutschland 1960-2030 – Fortschreibung „Daten- und Rechenmodell",* Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH (IFEU), Heidelberg, 2005

/IFEU 05b/ Knörr, W.; Reuter, C.: *EcoTransIT: Ecological Transport Information Tool – Environmental Methodology and Data,* Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH (IFEU), Heidelberg, 2005

/IFO 06/ CESifo GmbH: *Statistische Daten zur Entwicklung des Gebäudebestands,* München, 2006

/IFO 07/ Gluch, E., Behring K.: Institut für Wirtschaftsforschung (ifo) *Bauvorausschätzung 2006 – 2011/2016*, München, 2007

/IFO 09/ Institut für Wirtschaftsforschung (ifo): *Energiezukunft 2050*, München, 2006 bis 2009

/ISO 00/ Forschungsstelle für Energiewirtschaft e. V.: *Innovative Systeme und optimierte Techniken zur energetischen Gebäudesanierung (ISOTEG),* München, 2000

/KAL 93/ Kaltschmitt, M.; Wiese, A.: *Erneuerbare Energieträger in Deutschland*, Springer Verlag, Berlin, 1993

/KLE 00/ Kleemann, M. et al.: *Die Entwicklung des Energiebedarfs zur Wärmebereitstellung in Gebäuden*, Bericht des Bremer Energie-Instituts, April 2000

/KOH 06/ Kohler, Prof. Dr. H.: *Die Rolle der Biokraftstoffe für die Mobilität von morgen,* Daimler Crysler, Stuttgart, 2006

/LfL 07/ Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft: *Temperaturen und Wetterdaten*, Freising, 2007, www.lfl.bayern.de, 17.05.2007

/LIN 02/ Lindemann, U.: *Methoden der Produktentwicklung,* Technische Universität München, 2002

/LIN 06/ Lindenberger, D.: *Auswirkungen höherer Ölpreise auf Energieangebot und -nachfrage – Ölpreisvariante der energiewirtschaftlichen Referenzprognose 2030,* Prognos AG, Energiewirtschaftliches Institut an der Universität zu Köln (EWI), Basel, Köln, 2006

/NRC 09/ UNITED STATES NUCLEAR REGULATORY COMMISSION: *Status of License Renewal Applications and Industry Activities*, März 2009, www.nrc.gov

/OSR 08/ Deutschsprachige Unternehmensseite von Osram: *Halogen Airfield/IRC-Technologie*, 23.03.2008, www.osram.de

/PES 90/ Peschel, M.; Mende, W.; Albrecht, K.: *The Evolon Growth Model: Possible scientometrical evaluations,* Scientometrics, Vol. 18, Nos 1-2, 123-136, 1990

/PHO 02/ Bernreuter, J.: *Ein riesiges Potenzial,* Photon, September 2002

/PHO 06/ persönliche Mitteilung von Felten, H.: *installierte PV-Leistung*, Photon, 10.10.2006

/ROO 06/ von Roon, S.: *Verdrängungsmix durch Kraft-Wärme-Kopplung für das Jahr 1998*; im Auftrag des VDEW, Forschungsstelle für Energiewirtschaft e. V., München, November 2006

/ROTH-01 08/ Roth, H.: *Modellentwicklung zur Kraftwerksparkoptimierung mit Hilfe von Evolutionsstrategien* – Dissertation in: IfE Schriftenreihe Heft 57, Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik (IfE), TU München, 2008

/RWE 08/ „e-mobility Berlin“: *Daimler und RWE starten ins Zeitalter der Elektromobilität – Presseinformation*, RWE AG, Berlin, 2008

/SCH 04/ Schlomann, B. et al.: *Technische und rechtliche Anwendungsmöglichkeiten einer verpflichtenden Kennzeichnung des Leerlaufverbrauchs strombetriebener Haushalts- und Bürogeräte,* Fraunhofer-Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung (ISI), Karlsruhe, 2004

/SCH 07/ Schlesinger M. et al.: *Energieszenarien für den Energiegipfel 2007,* Prognos AG, Energiewirtschaftliches Institut an der Universität zu Köln (EWI), Köln, Basel, 2007

/SCMI 98/ Fink, A.; Köthe, S.: *Werder 2000 und 10 – Alternative Zukünfte durchdenken,* Nachdruck eines Beitrages in: Werder Bremen – 100 Jahre Sport im Rampenlicht, Bremerhaven, 1998

/SLM 04/ Schlomann, B. et al.: *Energieverbrauch der privaten Haushalte und des Sektors Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD) – Abschlussbericht an das BMWA*, Berlin, Nürnberg, Leipzig, München, 2004

/SLW 08/ Bundesverband Solarwirtschaft e. V.: *Statistische Zahlen der deutschen Solarwärmebranche Februar 2008*, Berlin, 2008, www.solarwirtschaft.de

/SMA 07/ SMA Technologie AG: *Die optimale Auslegung einer netzgekoppelten PV-Anlage,* Niestetal, 2007

/StBu 05/ Statistisches Bundesamt*: Produzierendes Gewerbe, Fachserie 4 Reihe 4.2.1*, *Jahr 2005,* Wiesbaden, 2007

/StBu 06/ Statistisches Bundesamt: *11. koordinierte Bevölkerungsvorausberechnung – Annahmen und Ergebnisse,* Wiesbaden, 2006

/StBu 07a/ Statistisches Bundesamt: *Volkswirtschaftliche Gesamtrechnungen 2006*, *Fachserie 18 Reihe 1.4,* Wiesbaden, 2007

/StBu 07b/ Statistisches Bundesamt: *Produzierendes Gewerbe, Indizes der Produktion und der Arbeitsproduktivität im Produzierenden Gewerbe*, *Fachserie 4 Reihe 2.1, Dezember 2007,* Wiesbaden 2008

/StBu 07c/ Statistisches Bundesamt: *Bautätigkeit und Wohnungen, Bautätigkeit, Fachserie 5 Reihe 1, 2006,* Wiesbaden, 2007

/StBu 08a/ Statistisches Bundesamt: *Monatsberichte über die Elektrizitätsversorgung*, laufende Aktualisierung, verschiedene Monate, Wiesbaden, 2008

/StBu 08b/ Statistisches Bundesamt: *Statistische Jahrbücher der Jahrgänge 1996 bis 2008*, Wiesbaden, 1996 bis 2008

/StK 08/ Statistik der Kohlenwirtschaft e. V.: *Entwicklung ausgewählter Energiepreise*, Köln, 2008, www.kohlenstatistik.de

/STO 07/ Gobmaier, T.; Corradini, R.: *Strukturoptimierung in Ballungsgebieten – Energiebedarfsprognose für die Stadt München*, Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V., München, 2007

/STR 08/ www.stromtip.de: *Stromverbrauch durch Handy-Ladegeräte*, Stand: Dezember 2008

/TÖN 08/ Tönsing, E.; *Stromsparende Beleuchtungssysteme – mehr Licht für weniger Kosten*; Fachartikel vom Fraunhofer Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung; 27.03.2008, www.isi.fraunhofer.de

/TON 81/ Tonnemacher, J.: *Methodische Probleme der Medienprognose*, in: Prognose-Planung-Entscheidung (Hrsg. Rogge P.G. und Timmermann M.). C.E.Poeschel Verlag Stuttgart, 1981

/UBA 01a/ *Beste verfügbare Technik in der Chloralkaliindustrie*, Umweltbundesamt, Berlin, 2001

/UBA 01b/ *Best Available Techniques Reference Document on the Production of Iron and Steel*, Umweltbundesamt, Berlin, 2001

/UBA 01c/ *Reference Document on Best Available Techniques in the Ferrous Metals Processing Industry*, Umweltbundesamt, Berlin, 2001

/UBA 01d/ *Merkblatt über beste verfügbare Technik in der Glasindustrie*, Umweltbundesamt, Berlin, 2001

/UBA 03/ *Referenzdokument über die besten verfügbaren Techniken in der Zellstoff- und Papierindustrie*, Umweltbundesamt, Berlin, 2003

/UBA 05/ *Merkblatt über die besten verfügbaren Techniken in der Nahrungsmittel-, Getränke- und Milchindustrie*, Umweltbundesamt, Berlin, 2005

/UCTE 09/ Union for the Co-ordination of transmission of electricity: *System Adequacy Retrospect,* Brüssel, verschiedene Jahre bis 2007

/VDA 08/ *Das Nutzfahrzeug – umweltfreundlich und effizient,* Verband der Automobilindustrie (VDA), Frankfurt am Main, 2008

/VDEW 01/ Verband der Deutschen Elektrizitätswirtschaft (VDEW): *Erhebung zum Ablauf der wasserrechtlichen Genehmigungen*. 2001

/VDN 00/ Verband der Netzbetreiber beim VDEW: *Leistungsbilanzen in Deutschland – Rahmen, Zielsetzung und Systematik,* Berlin, 2000

/VDN 07a/ Verband deutscher Netzbetreiber e. V. (VDN) beim VDEW: *Leistungsbilanz der allgemeinen Stromversorgung in Deutschland Rückschau,* verschiedene Jahre, Berlin, 2007

/VDN 07b/ Verband deutscher Netzbetreiber e. V. (VDN) beim VDEW: *verschiedene Angaben zu KWK-Erzeugung und regenerativen Energien*, Berlin, Mai 2007, www.vdn-berlin.de

/VDN 07c/ Verband deutscher Netzbetreiber e. V. (VDN) beim VDEW: *Netzkennzahlen der vier Übertragungsnetzbetreiber*, laufende Aktualisierung, Berlin, 2007, www.vdn-berlin.de

/VDV 08/ *Statistik 2007,* Verband Deutscher Verkehrsunternehmen (VDV), Köln, 2008

/VIK 07/ Verband der Industriellen Energie- und Kraftwirtschaft e. V. (VIK): *Statistik der Energiewirtschaft*, Essen, verschiedene Jahre bis 2007

/WES 08/ Wessels J.; *Innovationen bei Leuchtmitteln in Hinblick auf Energieeffizienz*; Präsentation im Rahmen des Fachforums: Kosten- und Energiesparen durch effiziente Beleuchtungssysteme, Nürnberg, 2008

/WI 08/ Schallaböck, K. O.: *Luftverkehrsstudie 2007: Im Steigflug in die Klimakatastrophe?* Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH, Wuppertal, 2008

/WIL 06/ Wilms, F. E. P.: *Szenarien sind Systeme.* in: Szenariotechnik – Vom Umgang mit der Zukunft (Hrsg. Wilms F. E. P.). Haupt Verlag, Bern, Stuttgart, Wien, 2006

/ZEE 01/ *Leitfaden zur Vorschaltgeräte Richtlinie 2000/55/EG*; Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V.; Frankfurt, 2001