

5 Szenario „Innovation“

5.1 Das Szenario im Überblick

Tabelle 5.1-1: Numerische Annahmen und Ergebnisse des Innovationsszenarios, ohne CCS

	Einheit	Innovationssz. (ohne CCS)				
		2005	2020	2030	2040	2050
Ölpreis real (Preisbasis 2007)	USD (2007) / bbl	54	100	125	160	210
Preis für CO ₂ -Zertifikate real (Preisbasis 2007)	EUR (2007) / t	-	20	30	40	50
Sozioökonomische Rahmendaten Deutschland						
Bevölkerung	Mio.	82,5	79,8	78,6	76,0	72,2
Private Haushalte	Mio.	39,3	40,3	40,7	40,6	38,8
BIP real (Preisbasis 2000)	Mrd. EUR (2000)	2.124	2.457	2.598	2.743	2.981
Industrieproduktion real (Preisbasis 2000)	Mrd. EUR (2000)	430	521	537	551	578
PKW-Bestand	Mio.	45,5	48,5	48,7	47,8	45,8
Personenverkehrsleistung	Mrd. Pkm	1.084	1.101	1.087	1.052	998
Güterverkehrsleistung	Mrd. tkm	563	779	876	953	1.047
Preise Haushalte (inkl. MwSt), real (Preisbasis 2005)						
Heizöl leicht	Cent(2005) / l	53,6	92,5	131,3	191,9	287,3
Erdgas	Cent(2005) / kWh	5,3	8,8	11,8	16,1	22,7
Strom	Cent(2005) / kWh	18,2	28,9	34,3	41,8	50,3
Normalbenzin	Cent(2005) / l	120,0	186,9	244,2	327,9	450,9
Preise Großhandel (ohne MwSt), real (Preisbasis 2005)						
Heizöl leicht (Industrie)	EUR(2005) / t	499	884	1.244	1.802	2.694
Erdgas (Industrie)	Cent(2005) / kWh	2,5	5,1	7,0	10,0	14,6
Strom (Industrie)	Cent(2005) / kWh	6,8	13,2	15,6	19,5	23,9
Primärenergieverbrauch	PJ	13.532	9.936	7.680	6.294	5.766
Mineralöl	%	32,6	28,3	21,0	13,8	6,7
Gase	%	23,9	22,8	21,0	18,3	15,2
Steinkohle	%	12,9	14,9	10,6	5,2	1,0
Braunkohle	%	12,3	8,4	5,8	3,7	0,4
Kernenergie	%	12,3	3,3	0,0	0,0	0,0
Biomassen	%	3,1	11,0	20,9	26,6	29,8
Sonstige Erneuerbare	%	3,1	11,3	20,7	32,4	46,8
Endenergieverbrauch	PJ	9.208	7.144	5.596	4.546	3.857
Private Haushalte	%	29,7	28,0	26,2	22,4	17,2
Dienstleistungen	%	15,9	14,4	12,9	12,6	12,6
Industrie	%	26,3	24,8	24,9	26,4	29,8
Verkehr	%	28,1	32,8	36,1	38,6	40,4
Mineralölprodukte	%	41,2	36,8	26,9	17,8	9,4
Naturgase	%	27,0	23,9	20,4	19,4	19,9
Kohle	%	4,3	3,7	3,0	2,4	2,0
Strom	%	19,9	21,2	23,6	26,9	30,2
Fernwärme	%	3,3	3,2	2,9	2,5	1,9
Erneuerbare	%	4,3	11,3	23,2	31,0	36,6
Erneuerbare incl. Anteil Umwandlung	%	5,7	18,1	36,2	52,3	67,2
Nettostromerzeugung	TWh	583	485	428	403	405
Kernkraft	%	25,9	6,2	0,0	0,0	0,0
Steinkohle	%	21,9	26,5	15,9	5,5	0,0
Braunkohle	%	26,1	17,7	11,6	5,7	0,0
Erdgas	%	11,5	10,2	10,9	7,0	2,8
Erneuerbare Energien	%	9,8	33,7	53,3	70,1	81,1
Sonstige	%	4,8	5,6	8,3	11,7	16,1
Effizienzindikatoren						
PEV pro Kopf	GJ / Kopf	164	125	98	83	80
BIP real 2000 / PEV	EUR / GJ	157	247	338	436	517
Industrieprod. / EEV Ind.	EUR / GJ	177	295	386	460	503
Personen-km. / EEV Pers-verk.	Pkm / GJ	576	669	813	968	1.124
Tonnen-km. / EEV Güterverk.	tkm / GJ	800	1.121	1.282	1.424	1.557
THG-Emissionen						
Insgesamt THG-Emissionen	Mio. t	1.031	709	447	276	157
Kumulierte THG-Emissionen ab 2005	Mio. t	1.031	14.924	20.620	24.066	26.083
Insgesamt CO ₂ -Emissionen	Mio. t	913	634	387	227	117
Kumulierte CO ₂ -Emissionen ab 2005	Mio. t	913	12.796	17.828	20.737	22.318
Energiebedingte CO ₂ -Emissionen	Mio. t	844	580	347	196	95
Energiebedingte THG-Emissionen	Mio. t	852	588	352	199	97
Sonstige THG-Emissionen	Mio. t	180	121	95	77	60
THG-Indikatoren						
THG-Emissionen / BIP real	g / EUR(2000)	485	289	172	101	53
CO ₂ -Emissionen / BIP real	g / EUR(2000)	430	258	149	83	39
Energiebed. THG-Emissionen / BIP real	g / EUR(2000)	401	239	136	73	32
THG-Emissionen / Einwohner	t / Kopf	12,5	8,9	5,7	3,6	2,2
CO ₂ -Emissionen / Einwohner	t / Kopf	11,1	7,9	4,9	3,0	1,6
Energiebed. THG-Emissionen / Einwohner	t / Kopf	10,3	7,4	4,5	2,6	1,3

Quelle: Prognos 2009

5.2 Allgemeine Szenarienannahmen

5.2.1 Szenariobeschreibung

Das Referenzszenario hat gezeigt, wie weit eine politische und technische Entwicklung führt, die vor allem auf stetige Effizienzsteigerungen bei bekannten Prozessen und Technologien setzt. Doch dabei gibt es physikalische Grenzen, und die politischen Rahmenbedingungen reichen nicht aus, um eine konsequente Entwicklung von neuen Prozesstechnologien, die Einführung neuer Verkehrslösungen sowie die Deckung der Energienachfrage hauptsächlich aus erneuerbaren Energien zu bewerkstelligen.

Dies sind Aufgaben für das Innovationszenario.

Definitionsgemäß geht es im Innovationsszenario darum, ein ambitioniertes Emissionsziel zu erreichen, ohne das System so weit zu verändern, dass man sich im Bereich der Utopie bewegen würde.

Ähnlichkeiten

Grundsätzlich gehen wir davon aus, dass die Rahmendaten der Bevölkerungs- und Wirtschaftsentwicklung ähnlich bleiben und sich die Welt gegenüber einer „Welt, wie wir sie kennen“ nicht zur Unkenntlichkeit verändert:

- Menschen leben immer noch in Häusern und nutzen den Individualverkehr, um ihr Mobilitätsbedürfnis zu erfüllen.
- Wirtschaft und Wertschöpfung wird weiterhin arbeitsteilig in verschiedenen Branchen und im weltweiten Austausch organisiert. Deutschland bleibt ein industrialisiertes Land mit Hightech-Anspruch.
- Informationstransfer wird mit Computern und über Netze bewerkstelligt.

Trends zur Globalisierung, zu hoher internationaler Mobilität und zur weiteren Entwicklung zur Dienstleistungsgesellschaft setzen sich ähnlich fort wie im Referenzszenario.

Veränderungen

Die ambitionierte Zielsetzung im Klimaschutz ist gesellschaftlich als überlebensnotwendig und anerkannt und genießt hohe Priorität. In Teilen wird sie als Chance zur Entwicklung neuer Märkte begriffen und genutzt. Deutschland als Hochtechnologieland mit guter Infrastruktur und einem gut ausgebildeten Fachkräftepotenzial kann hiervon profitieren.

Es wird davon ausgegangen, dass es einen internationalen Konsens zu gemeinsamen und verstärkten Klimaschutzanstrengungen gibt, der zu arbeitsteiliger Technologieentwicklung führt. Es wird davon ausgegangen, dass es ein weltweites völkerrechtlich verbindliches Abkommen über Klimaschutzverpflichtungen mit funktionierenden Instrumenten gibt. Dabei spielt der grenzüberschreitende Handel mit Emissionsrechten eine bedeutende Rolle. Außerdem wird angenommen, dass Kompensationssysteme verhindern, dass Entwicklungs- und Schwellenländer über Gebühr belastet und in ihren Entwicklungsmöglichkeiten eingeschränkt werden. Dies kann z. B. durch den Transfer von Effizienz- und

Regenerativtechnologien und/oder durch finanzielle Ausgleichszahlungen geschehen. Es wird angenommen, dass es keine oder nur sehr stark verringerte Leakage-Effekte gibt.

Alle Verbrauchssektoren müssen intensiv durch Effizienzmaßnahmen und z. T. starke technische Umstellungen zur Zielerreichung beitragen. Die Entlastung einzelner Sektoren und Branchen auf Kosten anderer ist weder ökonomisch noch ökologisch effizient.

Die technischen Umstellungen sind z. T. erheblich und führen etwa in den Jahren 2015 bis 2043 zu volkswirtschaftlichen Mehrkosten, die letztlich vom Verbraucher oder vom Steuerzahler zu tragen sind. Die Umstellungen führen zum Umbau der Märkte, zu einer Verstärkung der Dienstleistungstendenz und zu leicht veränderten Branchenstrukturen.

Für die Umsetzung des Innovationsszenarios werden in den einzelnen Sektoren jeweils **strategische Maßnahmenbündel** unterstellt:

- Gebäude: Die Standards werden allmählich soweit verschärft, dass Neubauten und Sanierungen bereits ab 2020 auf Passivhausstandard erfolgen und der Heizenergiebedarf bis 2050 auf nahezu Null absinkt (Durchschnitt 5 kWh/m²a). Der gesamte Gebäudepark muss bis 2050 auf diese Standards gebracht werden. Dies bedeutet (mindestens) eine Verdoppelung der Sanierungsrate. Es dürfen nur noch energetische Sanierungen auf hohem Standard durchgeführt werden, da ansonsten das Ziel nicht zu erreichen ist. Für die Erzeugung von Raumwärme werden keine fossilen Heizenergieträger mehr genutzt. In Ausnahmefällen wird Gas in hocheffizienten Anwendungen (Brennstoffzellen, KWK, Wärmepumpen mit Kühlungsfunktion) [Prognos 2009] eingesetzt.
- Verkehr: Güterverkehr wird in signifikantem Umfang auf die Schiene verlagert (Erhöhung des Anteils der Schiene um knapp 10 Prozentpunkte). Hierbei wird zunächst keine flächendeckende neue Schieneninfrastruktur unterstellt, wohl aber Reaktivierungen und ein insgesamt besserer Zustand der Schieneninfrastruktur. Der höhere Anteil der Schiene am Güterverkehr wird vor allem durch verbesserte Auslastung und Netzregelung erreicht.
- Die individuelle Mobilität wird konsequent und strategisch auf (teilweise, mit Ziel einer vollen) Elektromobilität umgestellt. Dies wird durch Technologieeinführung mit den Zwischenstufen Hybrid, Plug-in-Hybrid umgesetzt.
- Im Straßengüterverkehr werden 2050 ausschließlich Biokraftstoffe eingesetzt, keine fossilen Kraftstoffe mehr. Dies ist eine strategische Setzung, die aus der in Kap. 2.5.2 diskutierten Alternativlosigkeit und Begrenzung der Biomassepotenziale resultiert. Die dazu notwendige Biomasse wird vorrangig in Deutschland produziert; in begrenztem Umfang werden Importe zugelassen, falls diese heimischen Potenziale nicht ausreichen. Dabei wird sicher gestellt, dass importierte Biomasse nachhaltig produziert wird (dies ist eine politisch-strategische Aufgabe).
- Industrie und Dienstleistungen produzieren u.a. die notwendigen Materialien und Techniken für die Veränderungen im Gebäude- und Verkehrsbereich. Die Sanierungstätigkeit wird verstärkt. Alle eingesetzten Materialien werden konsequent auf einen geringen Rohstoff- und Energieaufwand über die gesamte Prozesskette hin ausgerichtet. Bei Stromanwendungen und bei der Krafterzeugung gibt es eine „Zweite Effizienzrevolution“. Die deutlichen Veränderungen beim Bauen, im Fahr-

zeugbau und in der Materialproduktion bewirken entsprechende Veränderungen in der Branchenstruktur, die in Kapitel 5.3.3 ausführlicher dargestellt werden.

- In der Stromerzeugung werden erneuerbare Energien systematisch und strategisch ausgebaut. Die Stromerzeugung auf Basis erneuerbarer Energien im Sonnengürtel der Erde und Import nach Europa wird ernsthaft verfolgt. Im Innovationsszenario wird nicht prioritär auf diese Option gesetzt, sie wird aber auch nicht ausgeschlossen.

5.2.2 Energie- und Klimaschutzpolitik

Der Umbau zu einer stark emissionsreduzierten Gesellschaft ist ein strategisches Politikziel. Deutschland und die EU-Staaten bleiben auch unter diesen Voraussetzungen im Kern hochtechnisierte, exportorientierte und von Ressourcenimporten abhängige Industrieländer.

Die Politik setzt jeweils sektoral effektive Rahmenbedingungen zur Umgestaltung der Märkte. Z. T. (beispielsweise im Gebäudesektor) greift striktes Ordnungsrecht mit hohen Vollzugsstandards. Dies wird von Instrumenten flankiert, die die Wirtschaftlichkeit für die Entscheider ermöglichen.

Die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien wird mit dem Ziel der Vollversorgung gefördert. Die Mechanismen des Strommarkts werden so umgebaut, dass die Erneuerbaren reguläre Marktteilnehmer sind. Die Speicher- und Regelergiekapazitäten werden entsprechend ausgebaut.

Prioritär werden heimische erneuerbare Energieträger eingesetzt, deren Potenziale begrenzt sind (als quantitative Grenzen werden zunächst die Angaben von [Nitsch/DLR 2008] verwendet).

Es wird davon ausgegangen, dass Biomasse oder Biokraftstoffe bis 2050 nur in sehr begrenztem Maße importiert werden können, da der entsprechende Eigenbedarf aller Länder bei möglichst zu vermeidenden Flächenkonkurrenzen mit der Nahrungskette steigt. Ein heimisches Primärenergiepotenzial an Biomasse aus geeigneten Flächen und Reststoffen wird zunächst bei 1.200 PJ gesehen. Daher wird die Verwendung von Biomasse strategisch in die Produktion von Kraftstoffen gelenkt.

CCS ist eine Fallback-Option in der Stromerzeugung, falls der Ausbau der Erneuerbaren oder der Fortschritt der Effizienz nicht schnell genug voran kommt. Daher werden auch im Innovationsszenario zwei Varianten „mit CCS“ und „ohne CCS“ betrachtet.

5.2.3 Technologieentwicklungen

Insbesondere die neuen Schlüsseltechnologien werden systematisch in Richtung Energie- und Materialeffizienz entwickelt. Entsprechend technologische Zielsetzungen werden in die Pläne zur angewandten Forschungsförderung aufgenommen. An dieser Stelle kann und soll keine Technologieprognose gewagt werden. Vielmehr wird teilweise indikativ benannt, welche Technologien auf Basis bereits sichtbarer Forschungsergebnisse in einem

extremen Klimaschutzszenario förderlich sein könnten. Die genaue Ausgestaltung muss der Innovationsfähigkeit und Kreativität der Forschung und Industrie überlassen werden. Hier können allenfalls z. T. Kriterien genannt werden, denen die Technologien genügen müssen.

Im Einzelnen werden z. B. angenommen:

Gebäude

- weiter entwickelte Hochleistungsdämmstoffe, die einfach zu handhaben, nicht zu voluminös, dauerhaft und vor allem im Bestand nachzurüsten sind, um die hohen energetischen Sanierungsraten zu ermöglichen,
- „intelligente“ Fensterbeschichtungen mit schaltbaren und an die Umgebungsbedingungen anpassungsfähigen Gesamtenergiedurchlassgraden,
- neue Systeme zur verstärkten Tageslichtnutzung (z. B. Tageslichtlenkung, Lichtleiter, Konzentratoren etc.),
- Kühltechnologie auf Basis hocheffizienter Absorptions- und Adsorptionsprozesse sowie elektromagnetische Kühlung.

Geräte

- Ersatz von Reinigungsprozessen mit Lösemitteln, Wasser oder Dampf durch Reinigungs- und Desinfektionsprozesse mit UV-Licht oder katalytische/enzymatische Prozesse,
- miniaturisierte und „dezentrale“ Produktion (3D-Druck); Prozessenergieanwendungen „innerhalb“ der Werkstücke, nicht „außerhalb“ (z. B. konzentrierender Infrarotlaser),
- Magnetkühlschränke serienmäßig,
- wasserlose Waschmaschine, die Trockner überflüssig macht,
- weitere Miniaturisierung (z. B. Visoren statt Bildschirme).

Materialien

- neue spezifische energieeffiziente Materialien, insbesondere aus dem Bereich der Mikro- und Nanotechnologie und der Funktionskunststoffe,
- Ersatz von Stahl in statischen und elastischen Eigenschaften durch maßgeschneiderte Keramik- und Kompositwerkstoffe,
- mit spezifischen Werkstoffen „maßgeschneiderte“ Oberflächen, die Reibung bei mechanischen Prozessen und damit Kraftbedarf verringern,
- Verringerung des Einsatzes von strategischen Metallen durch neue Werkstoffe auf organochemischer Basis,

- Verringerung von Medikamentenmengen und Größenordnungen durch spezifische Carrier.

Prozesse

- zunehmende Anwendung katalytischer und biologischer Prozesse, vor allem in der Chemie, bei der Werkstoffherstellung, Oberflächenbearbeitung etc.,
- Einsatz von gezielten Infrarotlasern zur Erzeugung von „lokaler Prozesswärme“,
- Ersatz von Trocknungsprozessen,
- verstärkter Einsatz von Optoelektronik.

Energie

- Entwicklung hoch- und höchsteffizienter Stromspeicher, die den gesamten Größenklassenbereich von portablen Anwendungen über Fahrzeugbatterien bis zu Leistungen zur Ausregelung von mehreren GW umfassen,
- Entwicklung der Photovoltaik der dritten Generation (auf der Basis von organochemischen Materialien, z. B. Farbstoffen) in die Massenmarkttauglichkeit,
- Entwicklung von Elektroautos über mehrere Stufen in die breite Markteinführung,
- Entwicklung und Effektivierung von Produktionsprozessen künftiger maßgeschneiderter Biokraftstoffe auf der Basis eines breiten biogenen Ausgangsspektrums (z. B. biologischer Voraufschluss stark zellulosehaltiger Abfallstoffe).

Die hier genannten Technologien mögen zunächst spekulativ klingen. Es handelt sich aber um Entwicklungen aus der akademischen und industriellen Forschung, die alle bereits prototypische Phasen und Machbarkeitsstudien durchlaufen haben und deren Entwicklung zur Anwendungsreife für möglich gehalten wird [Prognos Technologiereports, MPI-Veröffentlichungen etc.]. Grundsätzlich sind bei einem langfristig orientierten Innovationsszenario spekulative Elemente nicht auszuschließen, sowohl auf der technologischen als auch auf der sozialen Ebene. Dies ist insbesondere verständlich, da das Referenzszenario gezeigt hat, dass das Klimaschutzziel im Rahmen der bisher bekannten Instrumente und Technologien nicht erreichbar scheint.

Grundsätzlich werden diese Technologieentwicklungen nicht als „Allheilmittel“ verstanden. Es muss vielmehr davon ausgegangen werden, dass neue Technologien auch neue Risiken beinhalten. Bei Bio- und Nanotechnologien gehören hierzu die Folgen unkontrollierter Freisetzung, unvorhersehbarer Gesundheitsrisiken und unvorhergesehener Einflüsse auf biologische und ökologische Wirkungsketten. Es wird unterstellt, dass die Technologien mit Augenmaß und Verantwortung weiter entwickelt werden und bei der Produktentwicklung (vom Labor bis zur Markteinführung) an strategischen Stellen Benchmarks, Technikfolgenabschätzungen und ethische Einschätzungen vorgenommen werden. Jede einzelne neue Technologie muss genau auf ihre Risiken und Nachhaltigkeit geprüft werden, bevor sie großtechnisch zum Einsatz kommt.

Auf die Innovationsfähigkeit und Problemlösungskompetenz einer Industriegesellschaft kann und muss angesichts der Herausforderungen des Klimaschutzes gesetzt werden. Denn mit bislang verfügbaren Techniken ist das ambitionierte Ziel nicht zu erreichen.

5.3 Ergebnisse

5.3.1 Energieverbrauch der privaten Haushalte

5.3.1.1 Endenergieverbrauch zur Bereitstellung von Raumwärme

5.3.1.1.1 Entwicklung von Wohnflächen und Beheizungsstruktur

Grundsätzlich wird im Innovationsszenario eine mit dem Referenzszenario identische Entwicklung der Wohngebäude und Wohnflächen zu Grunde gelegt. Unterschiede zwischen den Szenarien ergeben sich bei der Beheizungsstruktur. Die Entwicklung der Beheizungsstruktur der Wohnungsneubauten gemäß dem Innovationsszenario ist in Tabelle 5.3-1 dargestellt. Ab 2015 werden in Wohnungsneubauten keine Öl-, Kohle- oder Stromdirektheizungen mehr eingebaut.

Gas verliert an Bedeutung. Im Jahr 2050 werden nur noch rund 30 % der Wohnfläche in neu erstellten Gebäuden mit Gas beheizt. Dazu werden vorwiegend Gas-Brennstoffzellen basierte Heizanlagen eingesetzt (Anteil ~75 %). Die konventionellen Gas-Niedertemperatur- oder Brennwertheizungen spielen kaum noch eine Rolle. Die Anteile der mit Gas betriebenen Wärmepumpen, Mini- und Mikro-BHKW sind kleiner als 5 %. Teilweise wird Erdgas durch Biogas ersetzt, der Anteil von Biogas am Gasverbrauch beläuft sich auf knapp 8 %. Diese Fälle kommen z. B. in ländlichen Gegenden vor, wo gleichzeitig Biogas effizient für Produktionszwecke genutzt wird. Wegen der Begrenztheit der Bioenergiepotenziale ist der Einsatz von Biogas im Sektor der privaten Haushalte aber keine Strategie, sondern eine Ausnahme.

Der Einsatz von Holz in Wohnungsneubauten steigt bis etwa 2020 noch deutlich an und stagniert dann. Dies ist unter anderem auf die zunehmende Nutzungskonkurrenz um die Ressource Holz zurückzuführen. Wir nehmen an, dass Holz ab ca. 2020 effizient in Prozessen zur Erzeugung von Biotreibstoffen der zweiten Generation eingesetzt werden kann.

Tabelle 5.3-1: Szenario „Innovation“: Beheizungsstruktur der Wohnungsneubauten 2005 – 2050, in % der neuen Wohnfläche

	Innovationsszenario				
	2005	2020	2030	2040	2050
Ein- und Zweifamilienhäuser					
Fernwärme	3,9%	0,8%	0,9%	1,1%	1,1%
Öl	12,7%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Gas	74,2%	43,3%	31,0%	26,3%	25,0%
Kohle	0,2%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Holz	2,9%	15,1%	16,1%	16,6%	16,6%
Strom (ohne WP)	1,5%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
el. Wärmepumpen	4,3%	35,6%	38,9%	33,9%	33,6%
Solar	0,3%	5,2%	13,1%	22,1%	23,7%
Drei- und Mehrfamilienhäuser					
Fernwärme	20,0%	20,0%	20,9%	22,0%	23,0%
Öl	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Gas	62,3%	62,3%	52,3%	43,8%	37,0%
Kohle	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Holz	5,7%	5,7%	6,4%	6,4%	6,4%
Strom (ohne WP)	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
el. Wärmepumpen	9,0%	9,0%	13,9%	18,8%	23,5%
Solar	3,0%	3,0%	6,5%	9,0%	10,0%
Nichtwohngebäude					
Fernwärme	20,2%	20,2%	21,2%	22,4%	23,3%
Öl	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Gas	62,3%	62,3%	52,8%	44,4%	37,8%
Kohle	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Holz	5,5%	5,5%	6,0%	6,0%	6,3%
Strom (ohne WP)	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
el. Wärmepumpen	9,0%	9,0%	13,5%	18,2%	22,6%
Solar	2,9%	2,9%	6,4%	8,9%	10,1%
Alle Gebäude					
Fernwärme	5,4%	5,4%	5,4%	5,7%	5,9%
Öl	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Gas	47,8%	47,8%	35,8%	30,2%	27,7%
Kohle	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Holz	12,8%	12,8%	13,9%	14,3%	14,4%
Strom (ohne WP)	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
el. Wärmepumpen	29,3%	29,3%	33,3%	30,6%	31,4%
Solar	4,7%	4,7%	11,7%	19,2%	20,6%

Quelle: Prognos 2009

Neben dem Neubau ist die Substitution alter durch neue Heizanlagen im Wohnungsbestand von großer Bedeutung für die Veränderung der Beheizungsstruktur. Die Substitutionsrate ist im Innovationszenario höher als im Referenzszenario. Substitutionsgewinner sind die solare Strahlung und die Umgebungswärme, meist in Kombination mit einem Langzeitspeicher. KWK und Fernwärme verlieren längerfristig an Attraktivität, da die Nachfrage nach Wärme deutlich abnimmt.

Am Ende des Betrachtungszeitraums sind Öl-, Kohle- und elektrische Widerstandsheizungen beinahe vollständig verdrängt, ihr Anteil an der beheizten Wohnfläche sinkt auf 0,5 % (Tabelle 5.3-2). Die mit Gas beheizte Wohnfläche verringert sich ab dem Jahr 2010 und ist im Jahr 2050 nur noch rund halb so groß wie im Jahr 2005.

Der größte Zuwachs in Bezug auf die versorgte Wohnfläche ergibt sich für die Solaranlagen. Die mit Solarstrahlung beheizte Wohnfläche weitet sich von 2 Mio. m² im Jahr 2005 auf beinahe über 1.200 Mio. m² im Jahr 2050 aus. Rund 80 % des Zuwachses entfallen

auf Ein- und Zweifamilienhäuser. Mit einem Anteil von über 34 % an der beheizten Wohnfläche werden Solaranlagen zum wichtigsten Heizsystem (Tabelle 5.3-2). Einen höheren Anteil zu unterstellen wäre wenig realistisch, da die Solarnutzung eine geeignete Dachflächenausrichtung (Südost bis Südwest) voraussetzt, die im Durchschnitt nur bei ca. 25 % der Gebäude gegeben ist (falls die Ausrichtungen gleich verteilt sind). Bei Flachdächern sind Aufständermöglichkeiten gegeben, was die Durchdringungsoptionen erhöht. Darüber hinaus kann Solarheizung bei Ein- und Zweifamiliengebäuden aufgrund des Verhältnisses von Dachfläche zu Wohnfläche gut funktionieren; bei mehrstöckigen Gebäuden reicht im allgemeinen die Dachfläche nicht mehr aus, um ein Vielfaches an Wohnfläche mit Heizwärme und Warmwasser zu versorgen.

Die holzbeheizte Wohnfläche wird im Betrachtungszeitraum um 450 Mio. m² ausgeweitet, die mit elektrischen Wärmepumpen beheizte um 416 Mio. m² und die mit Fernwärme beheizte um 213 Mio. m².

Tabelle 5.3-2: Szenario „Innovation“: Beheizungsstruktur des Wohnungsbestandes 2005 – 2050, in Mio. m² (bewohnte Wohnungen)

	2005	Innovationsszenario			
		2020	2030	2040	2050
Alle Wohnungen					
Fernwärme	307	381	441	486	524
Öl	1.082	833	569	288	13
Gas	1.537	1.500	1.309	1.078	842
Kohle	60	36	25	12	1
Holz	41	160	279	391	494
Elektroheizungen ohne WP	175	133	91	46	2
Wärmepumpen	18	142	248	348	440
Solar	2	300	621	926	1.207
Gesamt Wohnungsbestand	3.223	3.484	3.582	3.574	3.524
darunter Ein- / Zweifamilienhäuser					
Fernwärme	49	94	135	172	205
Öl	761	585	399	202	9
Gas	867	803	634	448	262
Kohle	33	21	14	7	0
Holz	29	134	239	339	430
Strom (ohne WP)	100	76	52	26	1
Wärmepumpen	15	119	208	292	369
Solar	1	237	491	733	957
Gesamt Ein- / Zweifamilienhäuser	1.856	2.069	2.171	2.220	2.235

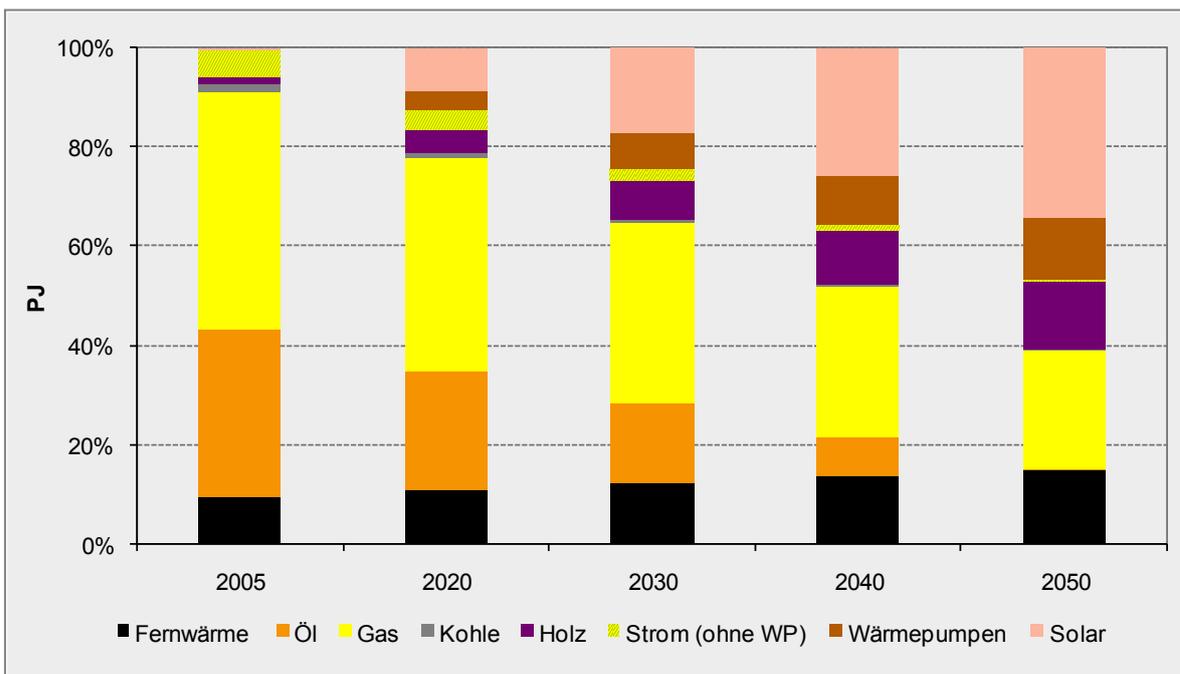
Quelle: Prognos 2009

Tabelle 5.3-3: Szenario „Innovation“: Beheizungsstruktur des Wohnflächenbestandes 2005 – 2050, in % (bewohnte Wohnungen)

	Innovationsszenario				
	2005	2020	2030	2040	2050
Fernwärme	9,5%	10,9%	12,3%	13,6%	14,9%
Öl	33,6%	23,9%	15,9%	8,0%	0,4%
Gas	47,7%	43,0%	36,6%	30,1%	23,9%
Kohle	1,9%	1,0%	0,7%	0,3%	0,0%
Holz	1,3%	4,6%	7,8%	10,9%	14,0%
Strom (ohne WP)	5,4%	3,8%	2,5%	1,3%	0,1%
Wärmepumpen	0,5%	4,1%	6,9%	9,7%	12,5%
Solar	0,1%	8,6%	17,3%	25,9%	34,3%
Gesamt Wohnflächebestand	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%

Quelle: Prognos 2009

Abbildung 5.3-1: Szenario „Innovation“: Beheizungsstruktur des Wohnflächenbestandes 2005 – 2050, in % (bewohnte Wohnungen)



Quelle: Prognos 2009

5.3.1.1.2 Die energetische Qualität von Wohnflächen und Heizanlagen

Bei den Wohnungsneubauten wird im Innovationsszenario gegenüber dem Referenzszenario von einer schnelleren und stärkeren Absenkung des Wärmeleistungsbedarfs ausgegangen. Bereits ab 2020 wird bei den Neubauten der Passivhausstandard mit einem jährlichen Heizwärmebedarf von 15 kWh/m² erreicht. Danach sinkt der Jahresheizwärmebedarf bei Neubauten weiter in Richtung Null-Energiehaus. Hierbei muss berücksichtigt werden, dass auch bei einem Null-Energiehaus nicht garantiert werden kann, dass der Raumwärmebedarf im Durchschnitt in allen Witterungssituationen verschwindet. Im Kon-

zept des Nullenergiehauses werden verschiedene Bedarfs- und Erzeugungsoptionen bilanziert. Bei der hier angewendeten strikten Betrachtung muss aus physikalischen Gründen ein Rest an Raumwärmebedarf verbleiben. Im Jahr 2050 wird ein spezifischer Bedarfswert von (durchschnittlich) rund 5 kWh/m² erreicht.

Um das Emissionsziel zu erreichen, müssen zudem die Sanierungsrate und die Sanierungseffizienz gegenüber der Referenzentwicklung deutlich erhöht werden. Die Sanierungsrate wird in der Berechnung auf über 2 % p.a. angehoben (Tabelle 5.3-4). Folglich wird im Betrachtungszeitraum jedes Gebäude mit Baualter vor 2005 mindestens einmal energetisch saniert.

Durch die Sanierungsmaßnahmen soll ein Raumwärmebedarf erreicht werden, der demjenigen von Neubauten (in 2050 ebenfalls 5 kWh/m²a) entspricht. Da dies nicht als durchwegs erreichbar angenommen werden kann, wird der Durchschnitt insbesondere bei der Sanierung älterer Gebäude, als konservative Annahme, für die Rechnungen geringfügig höher angesetzt (ca. 10 kWh/m²a). Dies hat zur Folge, dass die Sanierungseffizienz, die Verbesserung des Heizenergiebedarfs je Sanierungsfall, gegen 90 % ansteigt. Dies kann nur mit einer verordneten Bauteilsanierung erreicht werden: wird an einem Gebäude ein Bauteil ersetzt, soll stets das energetisch beste Teil eingebaut werden. Eine solche gesetzliche Regelung muss dann auch strikt vollzogen werden. Damit solche anspruchsvollen Sanierungen flächendeckend umgesetzt werden können, ist es notwendig, dass extrem leistungsfähige (und damit dünne) Dämmstoffe entwickelt werden, die langlebig und einfach in der Handhabung sind, ggf. auch für Innendämmung geeignet, und für komplizierte Architekturen und technische Anforderungen Lösungen bieten.

Tabelle 5.3-4: Szenario „Innovation“: Energetische Sanierungshäufigkeit in Abhängigkeit vom Gebäudealter, in % p.a.

Gebäudealter Jahrgang	Innovationsszenario									
	2001-2005	2006-2010	2011-2015	2016-2020	2021-2025	2026-2030	2031-2035	2036-2040	2041-2045	2046-2050
Ein- und Zweifamilienhäuser										
bis 1918	3,2%	2,7%	2,3%	2,3%	2,3%	2,3%	2,3%	2,3%	2,3%	2,3%
1919-1948	3,2%	2,7%	2,3%	2,3%	2,3%	2,3%	2,3%	2,3%	2,3%	2,3%
1949-1968	3,2%	2,7%	2,3%	2,3%	2,3%	2,3%	2,3%	2,3%	2,3%	2,3%
1969-1978	2,1%	1,8%	1,5%	2,0%	2,3%	2,3%	2,3%	2,3%	2,3%	2,3%
1979-1987	1,6%	1,3%	1,1%	1,5%	2,3%	2,3%	2,3%	2,3%	2,3%	2,3%
1987-1991	0,6%	1,1%	0,9%	1,2%	2,3%	2,3%	2,3%	2,3%	2,3%	2,3%
1992-1995	0,0%	0,1%	0,2%	0,3%	0,5%	0,9%	2,3%	2,3%	2,3%	2,3%
1996-1997	0,0%	0,2%	0,2%	0,3%	0,5%	0,9%	2,3%	2,3%	2,3%	2,3%
1998-2000	0,0%	0,1%	0,1%	0,2%	0,4%	0,5%	0,9%	2,3%	2,3%	2,3%
2001-2005		0,0%	0,1%	0,2%	0,4%	0,5%	0,9%	2,3%	2,3%	2,3%
2006-2010			0,0%	0,2%	0,4%	0,4%	0,5%	0,9%	2,3%	2,3%
2011-2015				0,1%	0,3%	0,4%	0,4%	0,5%	0,9%	2,3%
2016-2020					0,1%	0,3%	0,4%	0,4%	0,5%	0,9%
2021-2025						0,1%	0,3%	0,4%	0,4%	0,5%
2026-2030							0,1%	0,3%	0,4%	0,4%
2031-2035								0,1%	0,3%	0,4%
2036-2040									0,1%	0,3%
2041-2046										0,1%
Mehrfamilienhäuser / NWG										
bis 1918	3,2%	2,2%	2,6%	1,8%	1,3%	1,3%	0,9%	0,9%	0,9%	0,9%
1919-1948	3,2%	2,2%	2,6%	1,8%	1,3%	1,3%	0,9%	0,9%	0,9%	0,9%
1949-1968	3,2%	2,2%	2,6%	1,8%	1,3%	1,3%	0,9%	0,9%	0,9%	0,9%
1969-1978	2,5%	2,2%	2,7%	2,8%	2,3%	2,3%	1,8%	1,8%	0,9%	0,9%
1979-1987	2,1%	1,8%	2,3%	2,3%	2,3%	2,3%	1,8%	1,8%	1,8%	0,9%
1987-1991	1,9%	1,6%	2,3%	2,3%	2,3%	2,3%	1,8%	1,8%	1,8%	1,8%
1992-1995	0,1%	0,7%	2,0%	2,1%	2,2%	2,3%	2,2%	2,2%	1,8%	1,8%
1996-1997	0,1%	0,7%	2,0%	2,1%	2,2%	2,1%	2,2%	2,2%	2,2%	1,8%
1998-2000	0,0%	0,1%	1,1%	2,0%	2,1%	2,3%	2,2%	2,2%	2,2%	2,2%
2001-2005		0,1%	1,1%	2,0%	2,1%	2,2%	2,4%	2,2%	2,2%	2,2%
2006-2010			0,1%	1,2%	2,0%	2,1%	2,3%	2,4%	2,2%	2,2%
2011-2015				0,1%	1,2%	2,0%	2,1%	2,3%	2,4%	2,2%
2016-2020					0,1%	1,2%	2,1%	2,1%	2,3%	2,4%
2021-2025						0,1%	1,2%	2,1%	2,1%	2,3%
2026-2030							0,1%	1,2%	2,1%	2,1%
2031-2035								0,1%	1,2%	2,1%
2036-2040									0,1%	1,2%
2041-2046										0,1%

Quelle: Prognos 2009

Als Folge der hohen Sanierungseffizienzen und Sanierungsraten sowie der strengen Anforderungen an die Neubauten verringert sich der spezifische Raumwärmebedarf des Wohnungsbestandes im Betrachtungszeitraum um über 85 % (Tabelle 5.3-5). Die forcierte Substitution in Richtung Heizanlagen mit hohem Wirkungsgrad (Wärmepumpen, Solaranlagen) hebt den durchschnittlichen Anlagennutzungsgrad auf 111 %. Der spezifische Endenergieverbrauch reduziert sich im Betrachtungszeitraum um knapp 90 %.

Tabelle 5.3-5: Szenario „Innovation“: mittlerer spezifischer Raumwärmebedarf, Nutzungsgrad und Endenergieverbrauch des Wohngebäudebestandes 2005 – 2050

	Innovationsszenario				
	2005	2020	2030	2040	2050
Heizenergiebedarf (MJ/m2)	473	333	229	141	67
Nutzungsgrad %	83	94	102	107	111
Endenergieverbrauch (MJ/m2)	573	353	224	132	61

Quelle: Prognos 2009

Insgesamt verringert sich im Innovationsszenario der Endenergieverbrauch zur Bereitstellung von Raumwärme zwischen 2005 und 2050 um 86 %. Die jährliche Erhöhung der Energieproduktivität steigt an von anfänglich 1 % auf über 6 % gegen Ende des Betrachtungszeitraums, die durchschnittliche jährliche Effizienzsteigerung beläuft sich auf 4,3 %. Bei den in Tabelle 5.3-6 ausgewiesenen Endenergieverbräuchen zur Erzeugung von Raumwärme handelt es sich um witterungsneutrale Werte, bei denen die Klimaerwärmung um 1,75 °C bis 2050 berücksichtigt ist.

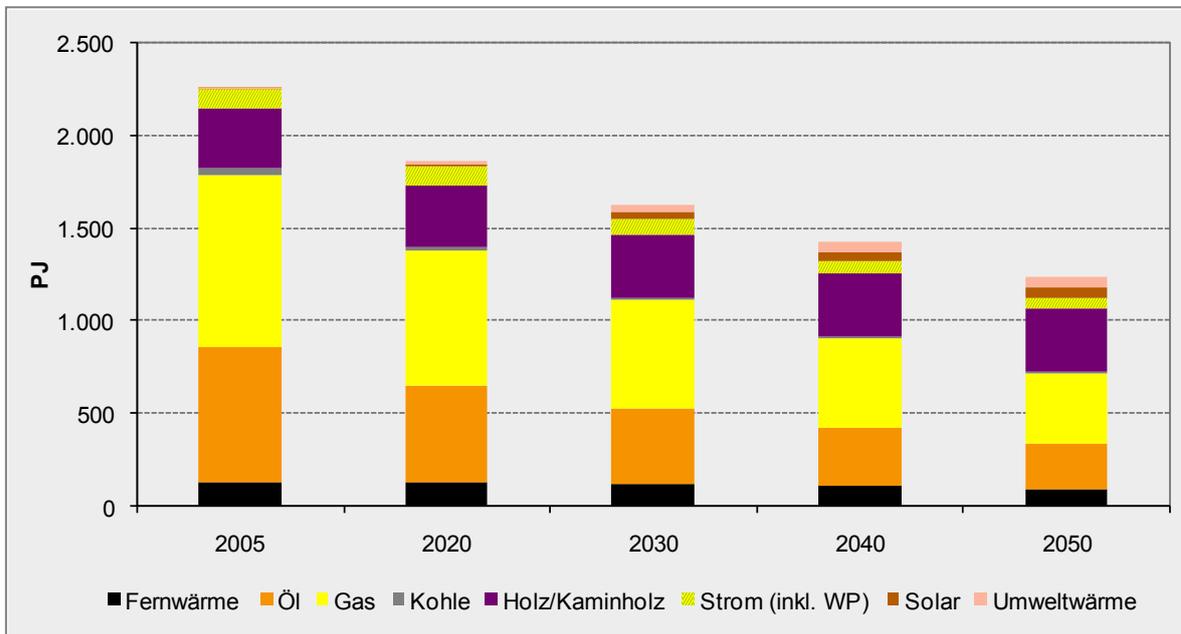
Im Jahr 2050 ist die Solarstrahlung mit einem Anteil von 26 % der wichtigste Energieträger zur Erzeugung von Raumwärme. Von großer Bedeutung ist auch das Holz (inkl. Kaminholz) mit einem Anteil von 21 %. Auf Strom entfallen rund 7 %.

Tabelle 5.3-6: Szenario „Innovation“: Endenergieverbrauch zur Erzeugung von Raumwärme 2005 – 2050, in PJ

	Innovationsszenario				
	2005	2020	2030	2040	2050
witterungsbereinigt					
Fernwärme	137	124	101	72	38
Öl	730	360	157	47	1
Gas	919	567	298	141	49
Kohle	38	17	8	2	0
Holz	177	184	164	121	66
Elektroheizungen ohne WP	74	42	21	7	0
elektrische Wärmepumpen	3	11	12	10	6
Solar	1	87	149	135	83
Umweltwärme	4	36	54	49	31
+ Kaminholz	149	115	81	50	23
+ Strom Direktheizung	15	11	6	2	0
+ Strom Hilfsenergie	21	21	19	17	16
Gesamt Endenergieverbrauch	2.268	1.573	1.070	653	315
nicht witterungsbereinigt					
Gesamt Endenergieverbrauch	2.145	1.458	989	603	291

Quelle: Prognos 2009

Abbildung 5.3-2: Szenario „Innovation“: Endenergieverbrauch zur Erzeugung von Raumwärme 2005 – 2050, in PJ



Quelle: Prognos 2009

5.3.1.2 Endenergieverbrauch zur Bereitstellung von Warmwasser

Die Fortschreibung der Struktur der Warmwasserversorgung der Bevölkerung beruht auf folgenden Annahmen:

- Die herkömmlichen zentralen Warmwassersysteme auf Basis von Fernwärme, Öl, Gas, Kohle und Holz und dezentrale Öl- und Gasanlagen verschwinden fast vollständig aus dem Bestand.
- Solaranlagen werden zum wichtigsten Erzeugungssystem. Der Marktanteil der Solaranlagen steigt von 3 % im Jahr 2005 auf 56 % im Jahr 2050. Hierzu gilt das bereits im vorherigen Abschnitt Gesagte.
- Elektrobetriebene Warmwasseranlagen inklusive der Wärmepumpen gewinnen ebenfalls leicht hinzu, ihr Anteil steigt im Betrachtungszeitraum von 27 % auf 43 %.

Tabelle 5.3-7: Szenario „Innovation“: Struktur der Warmwasserversorgung der Bevölkerung 2005 – 2050, in Mio. Personen

	2005	Innovationsszenario			
		2020	2030	2040	2050
Warmwasserversorgung durch Zentrale heizungsgekop. Systeme					
Fernwärme	7,0	5,0	3,1	0,7	0,0
Öl	16,9	8,6	3,4	2,2	0,2
Gas	27,7	17,6	9,3	3,2	0,9
Kohle	0,3	0,2	0,1	0,1	0,0
Holz	0,2	1,2	1,7	0,1	0,1
Zentrale ungekoppelte Systeme					
Solar*	2,6	10,5	21,6	31,8	40,2
Wärmepumpen	1,0	4,8	7,4	9,1	10,0
Dezentrale Systeme					
Strom	21,2	29,2	31,9	28,9	20,9
Gas	4,1	2,3	0,0	0,0	0,0
Gesamt versorgte Personen	81,0	79,5	78,5	76,1	72,4
ohne eigene Warmwasserversorgung	1,4	0,2	0,0	0,0	0,0

*umgerechnet auf Vollversorgung

Quelle: Prognos 2009

Tabelle 5.3-8: Szenario „Innovation“: Nutzungsgrade der Warmwasserversorgung 2005 – 2050, in %

	2005	Innovationsszenario			
		2020	2030	2040	2050
Zentrale heizungsgekop. Systeme					
Fernwärme	78	81	83	84	86
Öl	63	72	77	81	84
Gas	69	81	90	98	103
Kohle	52	56	58	61	64
Holz	57	63	64	66	67
Zentrale ungekoppelte Systeme					
Solar*	100	100	100	100	100
Wärmepumpen	206	221	231	241	251
Dezentrale Systeme					
Strom	92	92	92	92	92
Gas	73	77	79	79	79
Insgesamt Warmwasserversorgung	74	89	97	103	106

*umgerechnet auf Vollversorgung

Quelle: Prognos 2009

Aufgrund des höheren Anteils an elektrischen Wärmepumpen liegt im Innovationsszenario der durchschnittliche Gesamtwirkungsgrad der Warmwasseranlagen im Jahr 2050 mit 106 % höher als im Referenzszenario (Tabelle 5.3-8).

Die beiden Szenarien unterscheiden sich ebenfalls in Bezug auf die nachgefragte Warmwassermenge. Im Innovationsszenario wird von einer Reduktion des Warmwasserverbrauchs pro Kopf auf knapp 40 l/Tag ausgegangen. Dies wird erreicht durch wassersparende Armaturen, die den Wasserdurchfluss reduzieren.

Darüber hinaus wird im Innovationsszenario von einer verstärkten Umlagerung ausgegangen: Das von Waschmaschinen und Geschirrspülern benötigte Warmwasser wird weitgehend durch die zentrale Warmwasserversorgung bereit gestellt und nicht durch Elektroheizungen in den Geräten selbst erzeugt. Dadurch verschiebt sich ein Teil des Energieverbrauchs von Elektrogeräten hin zum Energieverbrauch zur Bereitstellung von Warmwasser (+7 PJ im Jahr 2050).

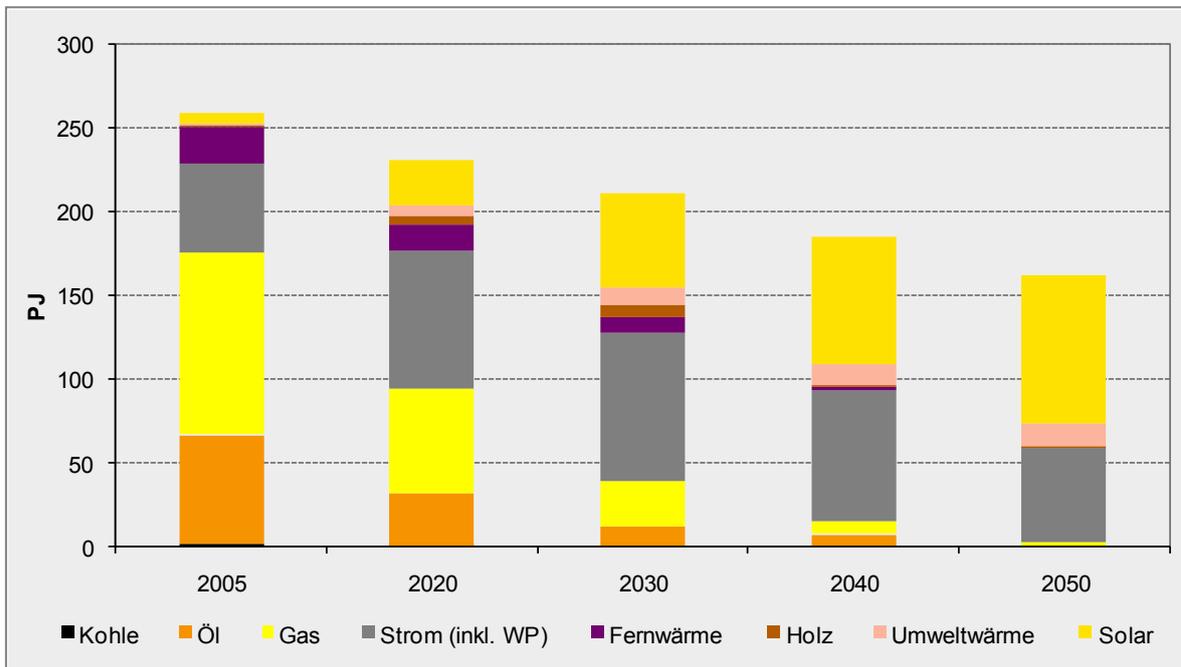
Aufgrund des stärkeren Anstiegs des Wirkungsgrades der Warmwasseranlagen und des Rückgangs der nachgefragten Warmwassermenge verringert sich der Energieverbrauch zur Erzeugung von Warmwasser im Innovationsszenario stärker als im Referenzszenario. Im Betrachtungszeitraum nimmt der Energieverbrauch zur Erzeugung von Warmwasser um 37 % ab (Tabelle 5.3-9).

Tabelle 5.3-9: Szenario „Innovation“: Endenergieverbrauch für die Erzeugung von Warmwasser 2005 – 2050, in PJ

	2005	Innovationsszenario			
		2020	2030	2040	2050
Fernwärme	21,8	15,8	9,6	2,1	0,0
Öl	64,8	30,4	11,5	6,5	0,4
Gas	109,1	62,5	26,8	7,9	2,0
Kohle	1,5	0,7	0,4	0,4	0,0
Holz	0,9	5,0	6,7	0,3	0,2
Strom (inkl. WP)	53,0	82,1	88,5	78,3	56,4
Zwischensumme	251,0	196,5	143,4	95,4	59,1
Solar	6,3	26,6	55,7	76,1	89,4
Umweltwärme	1,3	6,7	10,8	12,8	13,4
Gesamt Endenergieverbrauch WW	258,6	229,8	209,9	184,3	161,9

Quelle: Prognos 2009

Abbildung 5.3-3: Szenario „Innovation“: Endenergieverbrauch für die Erzeugung von Warmwasser 2005 – 2050, in PJ



Quelle: Prognos 2009

5.3.1.3 Endenergieverbrauch für das Kochen

Im Innovationsszenario wird von einer rascheren Marktdurchdringung mit Elektro-Induktionsherden ausgegangen. Dadurch sinkt der spezifische Verbrauch etwas rascher als im Referenzszenario. Da in Bezug auf die demografische Entwicklung, den Verlauf der Ausstattungsgrade, die Verteilung auf die Kochherdtypen und das Nutzerverhalten von identischen Annahmen ausgegangen wird, unterscheiden sich die beiden Szenarien im Energieverbrauch für das Kochen nicht wesentlich.

Insgesamt liegt der Energieverbrauch für das Kochen im Jahr 2050 mit 32 PJ um rund 46 % niedriger als im Jahr 2005 (Tabelle 5.3-10). 85 % des Energieverbrauchs entfallen auf Elektroherde, der Rest auf Gasherde.

Tabelle 5.3-10: Szenario „Innovation“: Endenergieverbrauch für das Kochen 2005 – 2050

	Innovationsszenario				
	2005	2020	2030	2040	2050
Ausstattungsgrad mit Kochherden, in %	99,0%	98,0%	97,0%	96,0%	95,0%
Elektroherd	79,4%	82,9%	83,9%	84,4%	84,2%
Gasherd	18,7%	14,9%	13,1%	11,6%	10,8%
Holzherd /Kohleherd	0,8%	0,1%	0,0%	0,0%	0,0%
Genutzte Geräte, in Mio.					
Elektroherd	31,2	33,5	34,1	34,4	32,8
Gasherd	7,4	6,0	5,3	4,7	4,2
Holzherd/Kohleherd	0,3	0,1	0,0	0,0	0,0
Spezifischer Verbrauch, in kWh pro Gerät und Jahr					
Elektroherd	383,2	327,0	283,6	250,4	230,7
Gasherd	576,4	477,3	405,8	351,2	317,1
Holzherd /Kohleherd	622,8	617,0	591,1	548,7	531,4
Endenergieverbrauch, in PJ					
Elektroherd	43,0	39,4	34,8	31,0	27,2
Gasherd	15,3	10,4	7,8	6,0	4,8
Holzherd/Kohleherd	0,7	0,1	0,0	0,0	0,0
Gesamt Endenergieverbrauch	59,0	49,9	42,7	37,0	32,1

Quelle: Prognos 2009

5.3.1.4 Stromverbrauch der Elektrogeräte

Im Innovationsszenario werden die Potenziale zur Steigerung der technischen Energieeffizienz etwas besser ausgenutzt als im Referenzszenario, insbesondere in den Bereichen Kühlen und Gefrieren sowie Waschen und Trocknen. Dadurch senken sich die entsprechenden mittleren spezifischen Geräteverbräuche stärker ab (Tabelle 5.3-11).

Die höhere Effizienzsteigerung wird unter anderem durch eine starke Marktdurchdringung mit wasserfreien Waschmaschinen, die keinen Trockner mehr benötigen und mit Magnet-Stromkühlschränken erreicht. Eine gewisse Bedeutung hat auch die Miniaturisierung von Geräten, beispielsweise die Verwendung von Visoren anstelle von Bildschirmen.

Tabelle 5.3-11: Szenario „Innovation“: Entwicklung der Technikkomponente des spezifischen Verbrauchs 2005 – 2050, in kWh pro Gerät und Jahr (= mittlerer Geräte-Jahresverbrauch im Bestand)

	Innovationsszenario				
	2005	2020	2030	2040	2050
Licht	281	125	105	42	33
Kühlschrank	256	191	126	92	70
Kühl-Gefrier-Gerät	329	229	145	102	79
Gefrier-Gerät	299	218	152	114	89
Waschmaschine	223	163	113	76	42
Waschtrockner	613	480	340	232	147
Wäschetrockner	298	227	173	129	90
Geschirrspüler	243	200	176	153	133
Farb-TV	162	207	148	94	79
Radio-HiFi	51	48	46	44	42
Video / DVD	40	8	8	8	8
Bügeleisen	25	24	23	22	20
Staubsauger	24	23	22	21	20
Kaffeemaschine	85	85	68	68	68
Toaster	25	24	23	22	20
Fön	25	24	23	22	20
Dunstabzugshaube	45	43	41	39	37
Mikrowelle	35	33	32	30	29
PC (inkl. Nutzungskomponenten)	196	84	62	62	62
Gemeinschaftsbeleuchtung u.ä.	28	21	20	17	17

Quelle: Prognos 2009

In Bezug auf die Zahl der Elektrogeräte unterscheiden sich die beiden Szenarien nicht, es wird von einer identischen Bevölkerungs- und Haushaltsentwicklung und von identischen Ausstattungsgraden ausgegangen. Eine Ausnahme bildet die Entwicklung der Klimageräte. Im Innovationsszenario wird die Nachfrage nach Klimatisierung durch einen stärkeren Einsatz bautechnischer Maßnahmen, beispielsweise durch bessere Gebäudedämmung oder wassergekühlte Baukerne, gedämpft. Zudem werden vermehrt solare Kühlsysteme mit Hochleistungskollektoren eingesetzt. Dadurch steigt der Stromverbrauch zur Raumklimatisierung weniger stark an als im Referenzszenario.

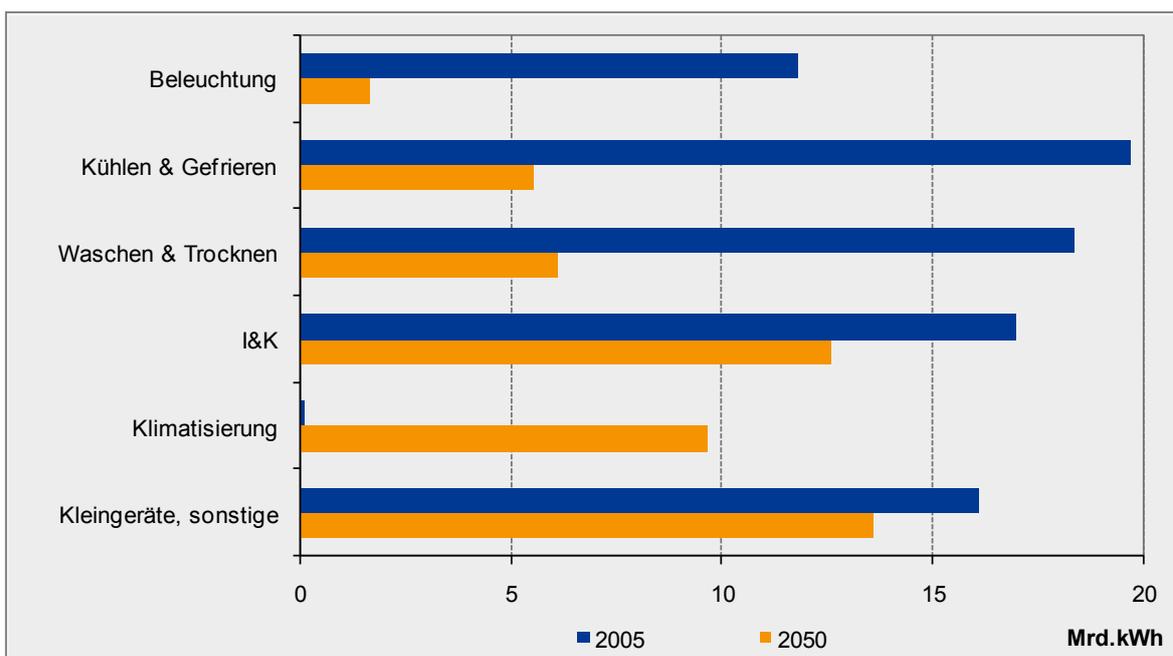
Insgesamt reduziert sich der Stromverbrauch von Elektrogeräten und Klimatisierung innerhalb des Referenzzeitraumes um 41 % und beläuft sich im Jahr 2050 auf 49 TWh (Tabelle 5.3-12). Der größte Rückgang zeigt sich im Bereich Kühlen und Gefrieren mit einer Verbrauchsreduktion von 14 TWh (-71 %; Abbildung 5.3-4). Der Verbrauch für das Waschen und Trocknen verringert sich im Betrachtungszeitraum um 12 TWh. Der Stromverbrauch zur Raumklimatisierung steigt bis ins Jahr 2050 auf knapp 10 TWh. Dadurch werden am Ende des Betrachtungszeitraums rund 20 % des Stromverbrauchs der privaten Haushalte für die Raumklimatisierung eingesetzt.

Tabelle 5.3-12: Szenario „Innovation“: Endenergieverbrauch für Elektrogeräte in privaten Haushalten 2005 – 2050, in Mrd. kWh

	Innovationsszenario				
	2005	2020	2030	2040	2050
Licht	11,2	5,2	4,4	1,8	1,3
Kühlschrank	7,6	5,1	3,2	1,9	1,2
Kühl-Gefrier-Gerät	4,2	3,6	2,4	2,0	1,6
Gefrier-Gerät	7,9	6,3	4,5	3,4	2,7
Waschmaschine	7,1	4,1	1,7	0,8	0,3
Waschtrockner	1,8	2,8	3,2	3,7	3,0
Wäschetrockner	4,1	3,3	2,4	1,4	0,7
Geschirrspüler	5,3	4,7	2,8	2,4	2,1
TV	7,0	9,8	7,4	4,9	4,2
Radio-HiFi	1,9	1,8	1,7	1,6	1,5
Video / DVD	1,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Bügeleisen	0,9	0,8	0,8	0,7	0,7
Staubsauger	0,9	0,9	0,8	0,8	0,7
Kaffeemaschine	3,1	3,2	2,6	2,6	2,4
Toaster	0,9	0,9	0,8	0,8	0,7
Fön	0,8	0,8	0,7	0,7	0,7
Dunstabzugshaube	1,0	1,1	1,1	1,0	1,0
Mikrowelle	0,9	1,1	1,1	1,1	1,0
PC (inkl. Nutzungskomponenten)	6,8	6,7	5,7	6,3	6,6
Gemeinschaftsbeleuchtung u.ä.	0,6	0,5	0,4	0,4	0,3
Klimatisierung	0,0	1,9	4,5	6,9	9,7
Sonstige Verbräuche	7,7	8,9	9,4	7,9	6,4
Gesamt Endenergieverbrauch	83,0	73,5	62,2	53,5	49,1

Quelle: Prognos 2009

Abbildung 5.3-4: Szenario „Innovation“: Endenergieverbrauch für Elektrogeräte in privaten Haushalten nach Verwendungszwecken 2005 – 2050, in Mrd. kWh



Quelle: Prognos 2009

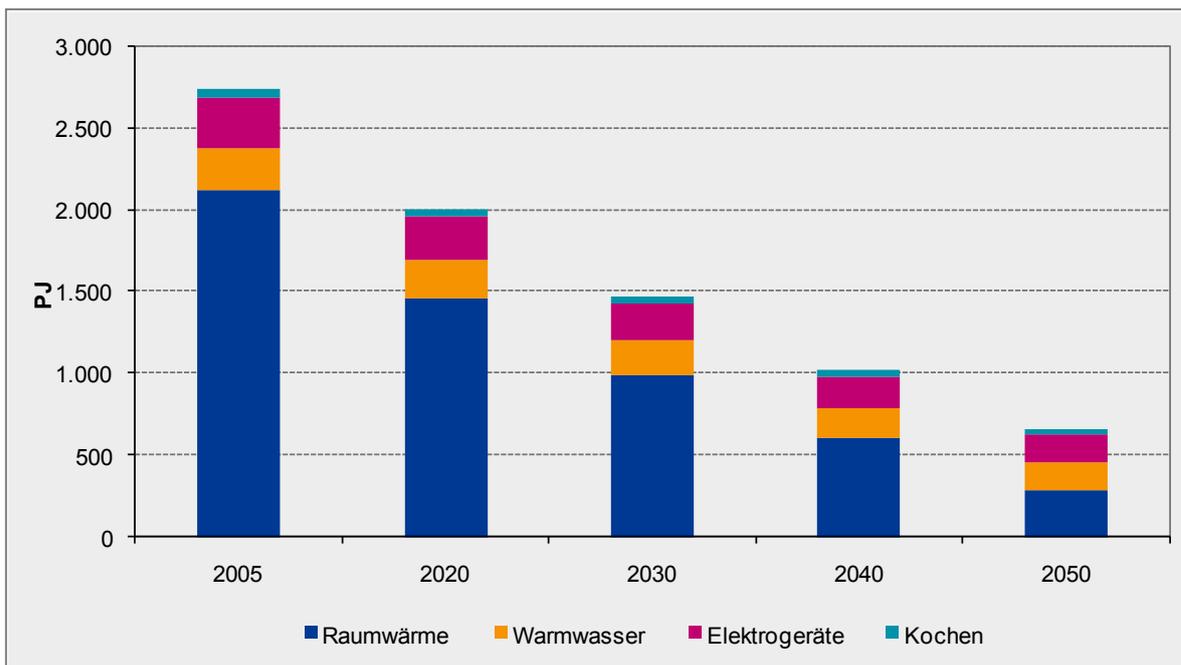
5.3.1.5 Endenergieverbrauch der privaten Haushalte

Die grundsätzlichen Rahmendaten bezüglich Bevölkerung, Flächen und Wohnungszahlen verändern sich nicht.

Im Innovationsszenario verringert sich der Energieverbrauch der privaten Haushalte von 2.735 PJ im Jahr 2007 auf 662 PJ im Jahr 2050 (-75 %; Tabelle 5.3-13).

Aufgrund der deutlichen Unterschiede in Bezug auf die Effizienzentwicklung zeigt sich eine ausgeprägte Verschiebung der Anteile der Verwendungszwecke am Gesamtenergieverbrauch: Mit einem Anteil von 44 % im Jahr 2050 verbleibt die Erzeugung von Raumwärme der dominierende Verwendungszweck, gegenüber dem Jahr 2005 bedeutet dies jedoch einen Rückgang im Anteil um mehr als 31 %-Punkte (Tabelle 5.3-13). Hingegen steigen die Anteile zur Erzeugung von Warmwasser um 14 %-Punkte und der Elektrogeräte (inklusive Klimatisierung) um knapp 16 %-Punkte. Mit einem Anteil von 5 % am Gesamtenergieverbrauch im Jahr 2050 bleibt die Bedeutung des Energieverbrauchs für das Kochen gering.

Abbildung 5.3-5: Szenario „Innovation“: Endenergieverbrauch der privaten Haushalte nach Verwendungszwecken (Raumwärme, Warmwasser, Elektrogeräte, Kochen) 2005 – 2050, in PJ



Quelle: Prognos 2009

Der Verbrauch an fossilen Brennstoffen geht sehr stark zurück, der Verbrauch von Heizöl und Kohle verringert sich jeweils um mehr als 99 %. Der Erdgasverbrauch geht um 95 % zurück. Damit fällt der Anteil von fossilem Gas am Gesamtenergieverbrauch der privaten Haushalte bis ins Jahr 2050 auf 8 % (Tabelle 5.3-14).

Tabelle 5.3-13: Szenario „Innovation“: Endenergieverbrauch der privaten Haushalte 1990 – 2050 nach Verwendungszwecken, in PJ

	2005	Innovationsszenario			
		2020	2030	2040	2050
Verwendungszwecke					
Raumwärme	2.118	1.458	989	603	291
Warmwasser	259	230	210	184	162
Kochen	59	50	43	37	32
Elektrogeräte	299	265	224	193	177
Gesamt Endenergieverbrauch	2.735	2.003	1.465	1.017	662
Anteile, in %					
Raumwärme	77,5%	72,8%	67,5%	59,3%	44,0%
Warmwasser	9,5%	11,5%	14,3%	18,1%	24,5%
Kochen	2,2%	2,5%	2,9%	3,6%	4,8%
Elektrogeräte	10,9%	13,2%	15,3%	18,9%	26,7%

Quelle: Prognos

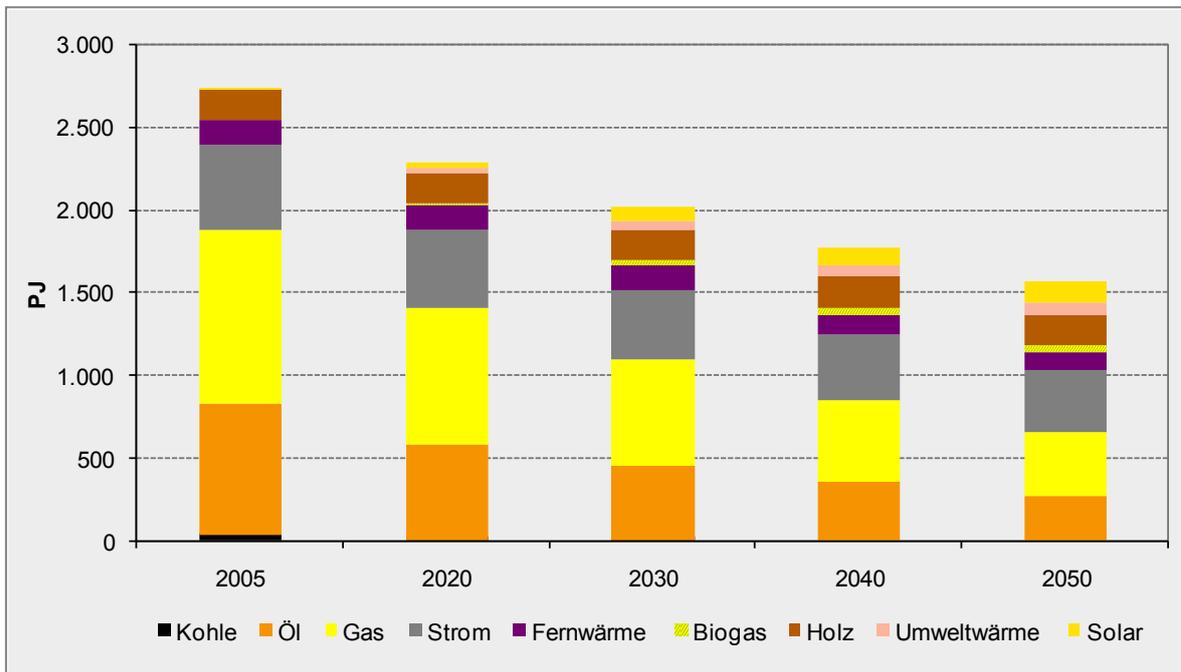
Auch die Verbräuche von Fernwärme (-76 %), Elektrizität (-44 %) und Holz (-62 %) gehen deutlich zurück.

Tabelle 5.3-14: Szenario „Innovation“: Endenergieverbrauch der privaten Haushalte 2005 – 2050 nach Energieträgern, in PJ und in %

	2005	Innovationsszenario			
		2020	2030	2040	2050
Energieträger, in PJ					
Fernwärme	158	140	111	74	38
Öl	795	390	168	54	1
Gas	1.043	633	316	144	51
Kohle	40	18	8	3	0
Holz	178	189	171	122	66
Strom	508	471	406	338	283
Umweltwärme	6	42	65	62	44
Solar	7	113	205	211	173
Biogas	0	7	16	11	5
Gesamt Endenergieverbrauch	2.735	2.003	1.465	1.017	662
Struktur in %					
Fernwärme	5,8%	7,0%	7,5%	7,2%	5,8%
Öl	29,1%	19,5%	11,5%	5,3%	0,2%
Gas	38,1%	31,6%	21,6%	14,1%	7,7%
Kohle	1,5%	0,9%	0,6%	0,3%	0,0%
Holz	6,5%	9,4%	11,6%	11,9%	10,0%
Strom	18,6%	23,5%	27,7%	33,2%	42,8%
Umweltwärme	0,2%	2,1%	4,4%	6,1%	6,7%
Solar	0,3%	5,7%	14,0%	20,7%	26,1%
Biogas	0,0%	0,3%	1,1%	1,1%	0,8%

Quelle: Prognos 2009

Abbildung 5.3-6: Szenario „Innovation“: Endenergieverbrauch der privaten Haushalte nach Energieträgern 2005 – 2050, in PJ



Quelle: Prognos 2009

Die Bedeutung von Biogas bleibt im Bereich private Haushalte gering, der Verbrauch steigt im Betrachtungszeitraum auf 5 PJ. Der Einsatz von Umweltwärme steigt bis ins Jahr 2040 auf über 75 PJ an, jener von Solarwärme auf rund 210 PJ. Als Folge der nachlassenden Nachfrage nach Wärme beginnen ab 2040 auch diese Energieverbräuche leicht zu sinken.

Mit einem Verbrauchsanteil von rund 40 % wird Strom im Jahr 2050 zum wichtigsten Energieträger. Knapp 25 % des Verbrauchs entfallen auf die Solarwärme, der Anteil der erneuerbaren Energien steigt auf 45 %.

5.3.2 Energieverbrauch des Dienstleistungssektors

5.3.2.1 Rahmendaten

Das Innovationsszenario geht von deutlich höherwertigen Neubauten sowie verstärkten und höherwertigen Sanierungen aus, von einer Veränderung des Materialeinsatzes, Entwicklung und Produktion neuer weniger energieintensiver Materialien und insgesamt verstärkten Mess- und Regelungsanstrengungen. Auch im Fahrzeug- und Transportsektor verändern sich die Produkte (vgl. Kap.5.1.1, 5.2.4). Diese Bedingungen korrespondieren mit einer veränderten Branchenstruktur. Verschiedene Branchen im Dienstleistungssektor (z. B. Baugewerbe, Verkehr/Nachrichtenübermittlung) wachsen schneller, ebenso gewinnen wissensintensive Vorleistungen an Bedeutung gegenüber dem Referenzszenario. Dies äußert sich beispielsweise in einer höheren Dynamik der sonstigen privaten Dienstleistungen. Insgesamt liegt die Bruttowertschöpfung des Dienstleistungssektors im Jahr 2050 um gut 4,6 % höher als im Referenzszenario.

Tabelle 5.3-15: Szenario „Innovation“: Rahmendaten für den Dienstleistungssektor 2005 – 2050

	2005	Innovationsszenario			
		2020	2030	2040	2050
Erwerbstätige (in 1.000)					
Landwirtschaft, Gärtnerei	853	728	649	580	516
Industrielle Kleinbetriebe/Handwerk	1.673	1.347	1.210	1.087	980
Baugewerbe	2.185	2.115	2.063	1.979	1.940
Handel	5.903	5.646	5.373	5.116	4.852
Kreditinst./ Versicherungen	1.239	1.181	1.164	1.141	1.120
Verkehr, Nachrichtenübermittlung	2.118	2.187	2.179	2.175	2.132
Sonstige priv. Dienstleistungen	9.675	11.097	10.490	9.848	9.590
Gesundheitswesen	4.036	4.930	4.806	4.693	4.849
Unterrichtswesen	2.281	2.522	2.404	2.300	2.284
Öff.Verwaltung, Sozialversicherung	2.298	2.060	1.858	1.677	1.535
Verteidigung	373	350	351	351	351
Gesamt Branchen	32.634	34.163	32.546	30.947	30.150
Bruttowertschöpfung (in Mrd. €)					
Landwirtschaft, Gärtnerei	23	25	25	26	27
Industrielle Kleinbetriebe/Handwerk	68	79	82	85	89
Baugewerbe	76	82	89	94	102
Handel	215	236	254	271	297
Kreditinst./ Versicherungen	69	91	101	111	128
Verkehr, Nachrichtenübermittlung	114	145	159	173	196
Sonstige priv. Dienstleistungen	598	704	778	855	966
Gesundheitswesen	141	184	204	225	253
Unterrichtswesen	84	91	92	93	97
Öff.Verwaltung, Sozialversicherung	99	111	108	107	108
Verteidigung	16	19	20	22	25
Gesamt Branchen	1.503	1.766	1.912	2.062	2.288

Quelle: Prognos 2009

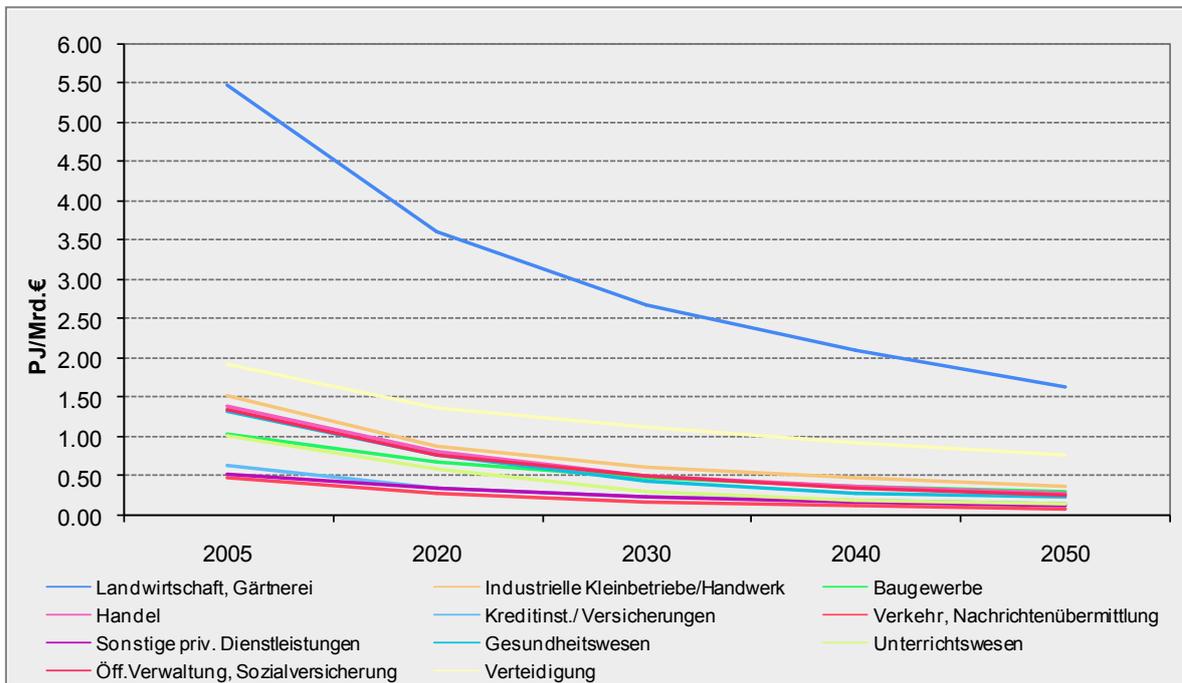
Die für das Referenzszenario angenommenen Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz finden auch im Innovationsszenario Anwendung (Tabelle 5.3-16, Abbildung 5.3-7, Abbildung 5.3-8). Es wird jedoch unterstellt, dass die Effizienzpotenziale schneller umgesetzt und vollständig genutzt werden. Die Entwicklung des spezifischen Verbrauchs folgt tendenziell der Entwicklung des Referenzszenarios, d. h. der spezifische Verbrauch sinkt in Branchen mit hohen Raumwärmeanteilen stärker als in Branchen mit hohen Anteilen an Prozesswärme und mechanischer Energie. Die verschiedenen technologischen Entwicklungen im Material- und Prozessbereich kommen im Dienstleistungssektor weniger stark zum Tragen als im Industriesektor. Hier wurden bereits in der Referenz starke Einsparungen realisiert, im Innovationsszenario erhöhen sich diese nur noch graduell. Dennoch werden technologische Neuerungen umgesetzt, z.B. bei der Sterilisation im Gesundheitswesen (UV-Licht statt Dampf, Miniaturisierung). Die Gebäude folgen in ihren technischen Anforderungen und in der Reduktion des Raumwärmebedarfs wiederum dem Sektor der privaten Haushalte.

Tabelle 5.3-16: Szenario „Innovation“: Spezifischer Verbrauch (Energieverbrauch/Bruttowertschöpfung) im Dienstleistungssektor absolut (in PJ/Mrd. €) und indiziert, 2005 – 2050, Modellergebnisse, temperaturreinigt

	Innovationsszenario				
	2005	2020	2030	2040	2050
spezifischer Verbrauch					
Landwirtschaft, Gärtnerei	5,48	3,62	2,69	2,10	1,63
Industrielle Kleinbetriebe/Handwerk	1,54	0,88	0,62	0,49	0,38
Baugewerbe	1,04	0,68	0,49	0,38	0,30
Handel	1,39	0,82	0,51	0,38	0,28
Kreditinst./ Versicherungen	0,65	0,36	0,24	0,19	0,15
Verkehr, Nachrichtenübermittlung	0,49	0,28	0,17	0,12	0,09
Sonstige priv. Dienstleistungen	0,53	0,35	0,23	0,18	0,14
Gesundheitswesen	1,34	0,76	0,44	0,29	0,23
Unterrichtswesen	1,02	0,60	0,31	0,20	0,15
Öff. Verwaltung, Sozialversicherung	1,34	0,78	0,50	0,35	0,27
Verteidigung	1,93	1,38	1,13	0,94	0,78
normalisierter spez. Verbrauch					
Landwirtschaft, Gärtnerei	100	66	49	38	30
Industrielle Kleinbetriebe/Handwerk	100	57	41	32	25
Baugewerbe	100	65	47	36	29
Handel	100	59	37	28	20
Kreditinst./ Versicherungen	100	55	37	29	23
Verkehr, Nachrichtenübermittlung	100	58	35	25	19
Sonstige priv. Dienstleistungen	100	66	44	34	27
Gesundheitswesen	100	57	33	22	17
Unterrichtswesen	100	59	31	19	14
Öff. Verwaltung, Sozialversicherung	100	58	37	26	20
Verteidigung	100	71	58	49	40

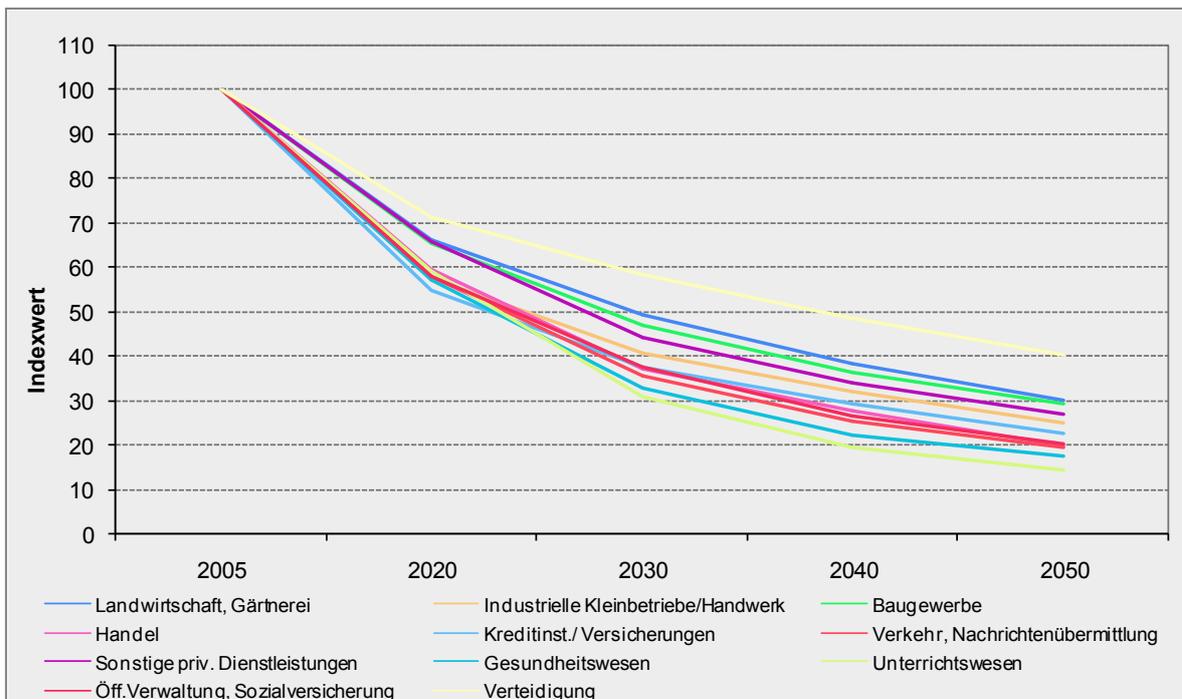
Quelle: Prognos 2009

Abbildung 5.3-7: Szenario „Innovation“: spezifischer Endenergieverbrauch im Dienstleistungssektor nach Branchen 2005 – 2050, in PJ/Mrd. €



Quelle: Prognos 2009

Abbildung 5.3-8: Szenario „Innovation“: spezifischer Endenergieverbrauch im Dienstleistungssektor nach Branchen 2005 – 2050, indexiert auf 2005



Quelle: Prognos 2009

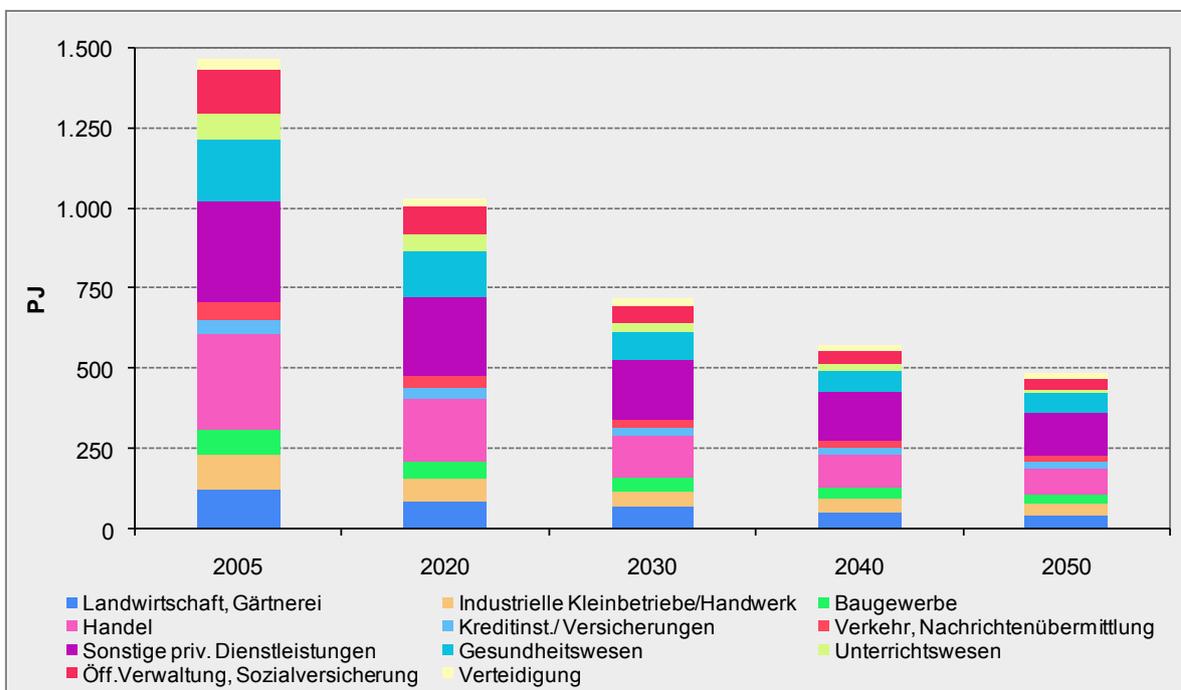
In den „energieintensiven“ (weil mobilitätsintensiven) Branchen Landwirtschaft und Verteidigung werden die weiteren Effizienzsteigerungen der Motoren und Fahrzeuge, die im Verkehrssektor unterstellt werden, abgeschwächt auf die Spezialfahrzeuge übertragen.

In den IKT-intensiven Branchen wird davon ausgegangen, dass Technologishifts (Optoelektronik, weiter miniaturisierte Hochleistungstechnologie für Datenspeicherung und -verarbeitung, neue Kühltechnologien etc.) zum Tragen kommen. Damit können die spezifischen Energieverbräuche im Innovationsszenario von 2005 bis 2050 innerhalb eines Fächers von 60 % bis 86 % abgesenkt werden.

5.3.2.2 Endenergieverbrauch im Sektor Dienstleistungen

Im Innovationsszenario nimmt der Endenergieverbrauch im Dienstleistungssektor zwischen 2005 und 2050 um 67 % auf 486 PJ ab und liegt damit um mehr als 30 % unter dem Energieverbrauch des Referenzszenarios. Bei der Betrachtung nach Branchen (Tabelle 5.3-17, Abbildung 5.3-9) zeigt sich, dass die Effizienzeffekte in allen Branchen das Wertschöpfungswachstum weitaus überkompensieren. Insbesondere in der gewichtigen und in der Wertschöpfung um 61 % wachsenden Branche „sonstige private Dienstleistungen“ nimmt der Energieverbrauch um 60 % ab, im Gesundheitswesen, das um 80 % wächst, verringert er sich um 69 %.

Abbildung 5.3-9: Szenario „Innovation“: Endenergieverbrauch im Dienstleistungssektor nach Branchen 2005 – 2050, in PJ



Quelle: Prognos 2009

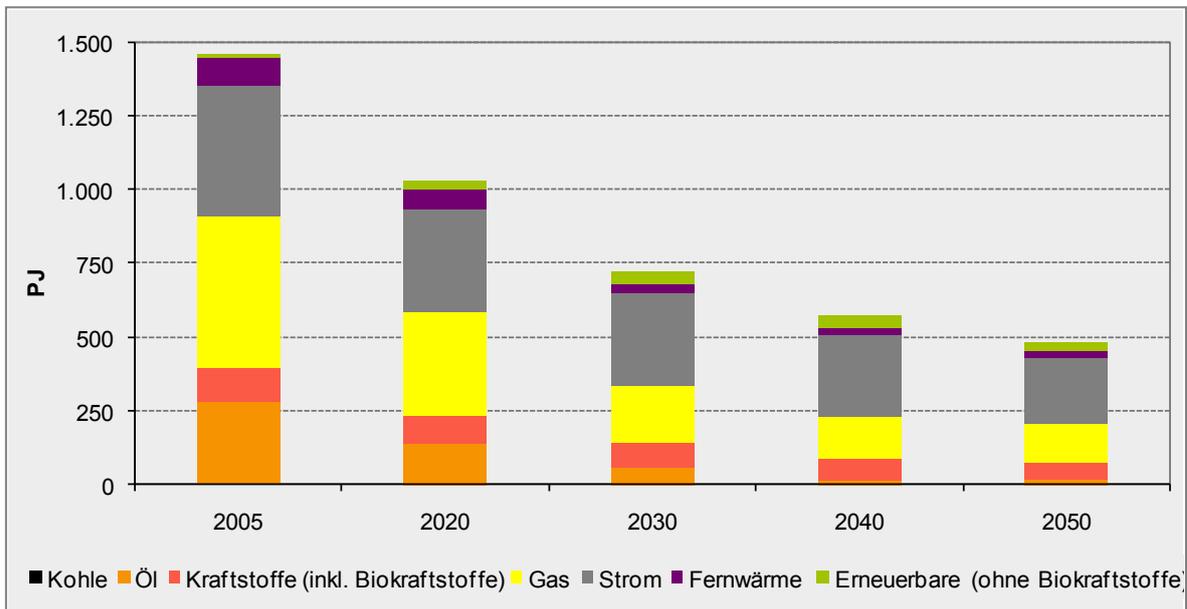
Zwischen den einzelnen Energieträgern gibt es zum Teil erhebliche strukturelle Verschiebungen. Strom weitet seinen Anteil aus und steht im Jahr 2050 für ca. 50 % des Energieverbrauchs, 17 %-Punkte mehr als 2005. Gas trägt im Jahr 2050 mit 27 % zur Bedarfsdeckung bei, 2005 waren es noch 30 %. Die Anteile für Fernwärme und Mineralöle (Heizöl und Kraftstoffe) werden mehr als halbiert. Kohle verschwindet fast vollständig.

Tabelle 5.3-17: Szenario „Innovation“: Endenergieverbrauch im Sektor GHD 1990 – 2050 nach Branchen, Verwendungszwecken und Energieträgern, in PJ

	2005	Innovationsszenario			
		2020	2030	2040	2050
Branchen					
Landwirtschaft, Gärtnerei	127	89	68	55	45
Industrielle Kleinbetriebe/Handwerk	104	69	51	41	34
Baugewerbe	79	56	43	35	31
Handel	298	194	130	104	82
Kreditinst./ Versicherungen	45	32	25	21	19
Verkehr, Nachrichtenübermittlung	55	41	27	21	18
Sonstige priv. Dienstleistungen	315	243	181	153	136
Gesundheitswesen	189	141	89	66	59
Unterrichtswesen	85	54	29	18	14
Öff. Verwaltung, Sozialversicherung	133	86	54	38	29
Verteidigung	32	26	23	21	19
Gesamt Branchen	1.462	1.031	720	574	486
Verwendungszwecke					
Raumwärme	664	347	108	18	2
Prozesswärme	310	300	283	265	256
Kühlen und Lüften	65	63	79	96	75
Beleuchtung	148	95	64	43	30
Bürogeräte	56	46	36	26	18
Kraft	220	180	151	126	106
Gesamt Verwendungszwecke	1.462	1.031	720	574	486
Energieträger					
Kohle	5	0	0	0	0
Öl	279	140	57	19	15
Gas	515	350	201	141	130
Strom	443	354	310	282	229
Fernwärme	96	61	34	22	19
Erneuerbare (ohne Biokraftstoffe)	10	32	37	39	32
Kraftstoffe (inkl. Biokraftstoffe)	114	94	82	70	60
Gesamt Energieträger	1.462	1.031	720	574	486

Quelle: Prognos 2009

Abbildung 5.3-10: Szenario „Innovation“: Endenergieverbrauch im Dienstleistungssektor nach Energieträgern 2005 – 2050, in PJ



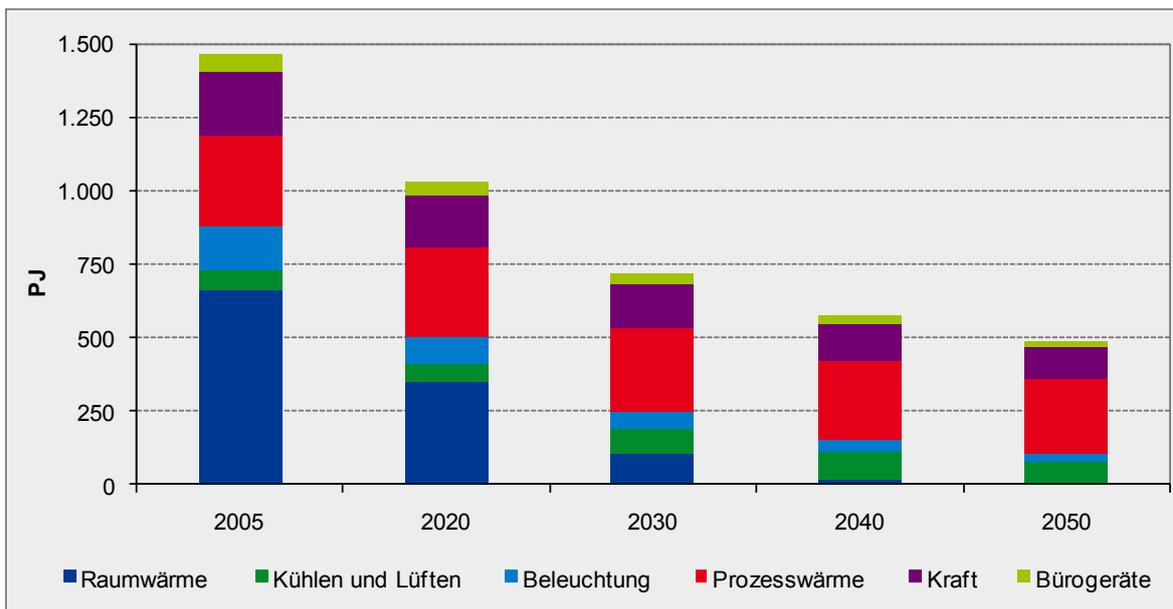
Quelle: Prognos 2009

5.3.2.3 Endenergieverbrauch nach Verwendungszwecken

Im Jahr 2050 verringert sich der Energieverbrauch für die Bereitstellung von Raumwärme gegenüber der Referenz nochmals graduell und geht auf fast Null zurück (Abbildung 5.3-11).

Der spezifische Energiebedarf der zur Erzeugung von Prozesswärme eingesetzten Anlagen vermindert sich im Betrachtungszeitraum im Durchschnitt um 40 % (Strom) bis 45 % (Brennstoffe). Die zugrunde gelegten Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz entsprechen den Maßnahmen des Referenzszenarios. Es wird aber eine schnellere Umsetzung und eine vollständige Ausschöpfung der Potenziale unterstellt. Darüber hinaus gibt es einige geringfügige Prozessverschiebungen, wie z. B. Sterilisation mit UV-Licht statt mit Dampf im Gesundheitssektor, analoge Prozesse für Wäschereien (wasserloses Waschen, dadurch entfallen Trockenprozesse), veränderte Prozesse bei Oberflächenbehandlungen, z. B. Trocknungsprozesse mit Lösungsmitteln im Kreislaufprozess statt mit Lufttrocknung, und Härtingsprozesse mit Infrarotlasern im Material statt im Hitzebad etc..

Abbildung 5.3-11: Szenario „Innovation“: Endenergieverbrauch im Dienstleistungssektor nach Verwendungszwecken 2005 – 2050, in PJ



Quelle: Prognos 2009

Der Energieverbrauch für den Verwendungszweck Kühlen und Lüften steigt zwischen 2005 und 2050 um mehr als 16 % an. Im Gegensatz zum Referenzszenario wird eine verstärkte Nutzung energieeffizienter Klima- und Lüftungsanlagen und der Austausch sowie die Bedarfsanpassungen bestehender Anlagen unterstellt. Der geringere Kühlungsbedarf neuer IT-Technologie trägt ebenfalls zu den Einsparungen bei. Steigende Ausstattungs- und Nutzungsgrade führen zu einem höheren Energiebedarf, der durch die oben genannten Effizienzmaßnahmen zum Teil wieder kompensiert wird. Dies begrenzt den Anstieg auf ca. 75 PJ.

Der Energieverbrauch für Beleuchtung reduziert sich im Innovationsszenario zwischen 2005 und 2050 um 80 % und macht 2050 nur noch 6 % des gesamten Endenergieverbrauchs aus. Gegenüber dem Referenzszenario bedeutet dies eine Halbierung des Bedarfs.

Erhebliche Möglichkeiten zur Absenkung der spezifischen Verbräuche bestehen auch bei Bürogeräten. Bereits im Referenzszenario wurde eine Reduktion des spezifischen Verbrauchs um bis zu 60 % realisiert. Im Innovationsszenario wird der Verbrauch durch vollständige Durchdringung und vor allem Alternativen zu Bildschirmen um 77 % verringert. Bis zum Jahr 2050 geht der Endenergiebedarf für diesen Verwendungszweck auf ein Drittel zurück.

Der spezifische Verbrauch für die Bereitstellung von Kraft verringert sich energieträgerabhängig zwischen 40 % (Brennstoffe) und 50 % (Strom). Der Energiebedarf für diesen Verwendungszweck halbiert sich bis 2050. Gegenüber dem Referenzszenario bedeutet dies einen weiteren Rückgang um 10 %.

5.3.3 Energieverbrauch des Industriesektors

5.3.3.1 Rahmendaten

Im Innovationsszenario erfolgen zusätzlich zu dem im Referenzszenario angenommenen Strukturwandel durch Effizienzinnovationen getriebene Veränderungen: So wirken sich die Veränderungen bei der Bau- und Sanierungstätigkeit, der Produktion neuer Materialien sowie der Veränderung von Prozessen auf die Branchenstruktur aus. Gegenüber der Struktur des Referenzszenarios kommt es dadurch zu leichten Verschiebungen:

Die Branchen Sonstige chemische Industrie sowie Glas- und Keramik steigern ihre Produktion gegenüber der Referenz aufgrund der erhöhten Nachfrage nach Dämmstoffen, Hochleistungsgläsern, Kunststoffen und neuen Werkstoffen, die hier z. T. der chemischen Industrie, z. T. der Kunststoff- und der Keramikindustrie zugeordnet werden. Dabei ist allerdings zu bedenken, dass die Produktpaletten dieser Industriezweige i.a. sehr breit sind, so dass die Veränderungen in dieser Palette (z. B. die erhöhte Dämmstoffproduktion) zu einem relativen Wachstum der Branchen zwischen zehn und zwanzig Prozent gegenüber der Referenz führt (Tabelle 5.3-18).

Im Gegenzug sinkt die Nachfrage nach Metallen als Baustoffen und Ausgangsstoffen für Konstruktionen sowie für Anwendungen in der Infrastruktur (teilweise Ablösung von Kupfer in Stromleitungen durch Spezialwerkstoffe, vor allem zunächst in Bauteilen und in der Feinverteilung). Dies führt insbesondere in der Metallerzeugung zu einer verringerten Produktion. Fahrzeugbau und Maschinenbau verändern ihre Ausgangsstoffe und stellen z. T. andere Produkte (z. B. Elektroautos) her. Es wird davon ausgegangen, dass die Produktionswerte ähnlich bleiben wie im Referenzszenario.

Im Ergebnis geht die Produktion in den energieintensiven Branchen zurück. Insgesamt sinkt die Produktion der Branchen Gewinnung von Steinen, sonst. Bergbau, NE-Metalle/Gießereien, Grundstoffchemie, Glas, Keramik, Papiergewerbe, Verarbeitung von Steinen und Erden, Metallerzeugung zwischen 2005 und 2050 um 24 % (Abbildung 5.3-12, Abbildung 5.3-13).

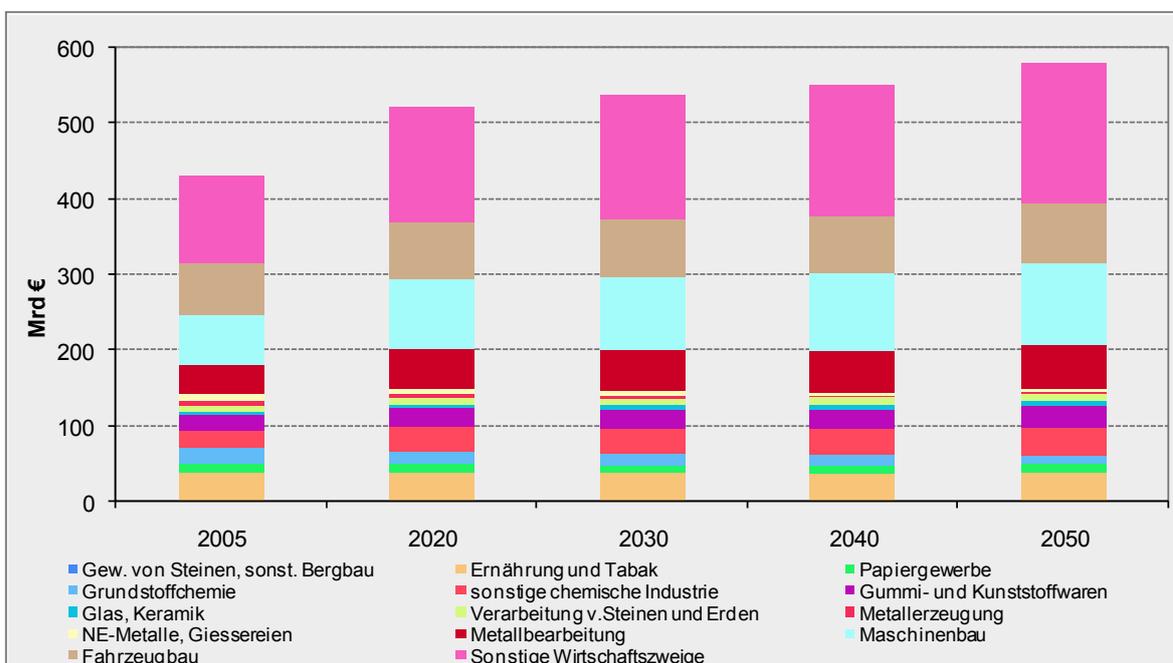
Nicht energieintensive Branchen wachsen dagegen deutlich stärker, von 2005 bis 2050 44 %. Insgesamt legt die Industrieproduktion bis 2050 um 34 % zu. Gegenüber dem Referenzszenario liegt sie 2050 um 0,7 % niedriger.

Tabelle 5.3-18: Szenario „Innovation“: Industrieproduktion, 2005 – 2050 (Abgrenzung der Energiebilanz), in Mrd. €, in Preisen von 2000

	Innovationsszenario				
	2005	2020	2030	2040	2050
Gew. von Steinen, sonst. Bergbau	1,9	1,2	1,0	0,9	0,8
Ernährung und Tabak	37,3	37,0	36,4	35,9	37,2
Papiergewerbe	10,4	11,1	10,7	10,6	10,9
Grundstoffchemie	20,7	17,6	14,9	13,0	12,0
sonstige chemische Industrie	23,0	30,7	32,7	34,6	37,4
Gummi- und Kunststoffwaren	20,6	25,0	26,0	27,1	28,9
Glas, Keramik	5,2	6,6	6,4	6,4	6,7
Verarbeitung v. Steinen und Erden	8,0	8,2	8,2	8,4	8,9
Metallerzeugung	6,0	5,2	3,8	2,8	2,2
NE-Metalle, Giessereien	8,3	7,5	6,4	5,4	4,5
Metallbearbeitung	41,3	51,6	53,4	55,1	57,9
Maschinenbau	64,0	91,9	98,0	102,4	108,8
Fahrzeugbau	68,0	74,4	75,0	76,3	78,8
Sonstige Wirtschaftszweige	115,5	152,9	163,7	172,4	183,5
Gesamt Industrieproduktion	430,3	521,1	536,6	551,2	578,4

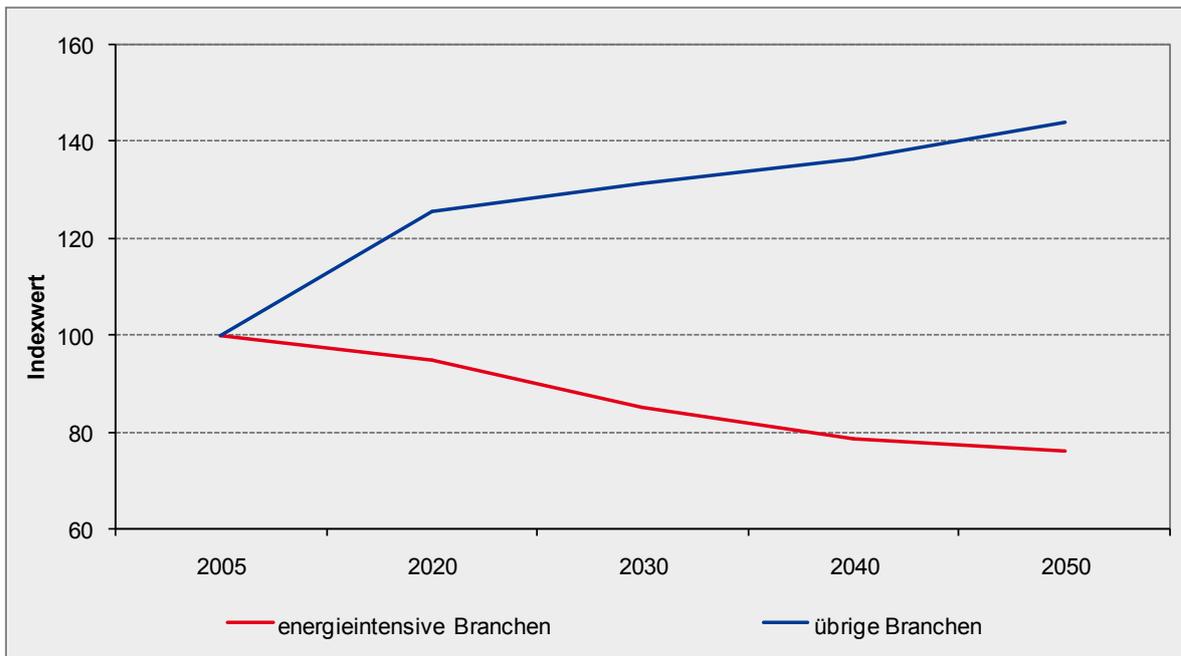
Quelle: Prognos 2009

Abbildung 5.3-12: Szenario „Innovation“: Industrieproduktion 2005 – 2050 (Abgrenzung der Energiebilanz), in Mrd. €, in Preisen von 2000



Quelle: Prognos 2009

Abbildung 5.3-13: Szenario „Innovation“: Entwicklung der Industrieproduktion nach energieintensiven und nicht energieintensiven Branchen (Abgrenzung der Energiebilanz), 2005 – 2050, indexiert (in Mrd. €, in Preisen von 2000)



Quelle: Prognos 2009

Die grundsätzliche Struktur des Sektors verändert sich aufgrund der hohen Differenzierung jedoch nur wenig. Wie im Referenzszenario werden die größten Beiträge auch im Innovationsszenario vom Maschinenbau, dem Fahrzeugbau, der Metallbearbeitung, der sonstigen chemischen Industrie sowie der Ernährungs- und Tabakindustrie erbracht.

Im Betrachtungszeitraum ist mit einer weiteren Verringerung der Energieintensität in den einzelnen Industriebranchen zu rechnen. Diese führt - wie auch im Dienstleistungssektor - zu einer stärkeren Absenkung der spezifischen Energieverbräuche als im Referenzszenario. Effizienzpotenziale werden schneller und vollständig umgesetzt. Die angenommenen grundsätzlichen Verschiebungen und z. T. Substitutionen bei Prozessen und Produkten führen im Innovationsszenario gegenüber der Referenz zu einer weiteren Absenkung der Energieintensität. Beispiele hierfür sind katalytische und biologische Prozesse in der Chemie, die den Prozesswärmebedarf verringern, Trocknungsprozesse mit geschlossenen Lösungsmittelkreisläufen, Härtingsprozesse mit Infrarotlasern, Reinigungsprozesse mit UV-Licht etc.

Gegenüber dem Referenzszenario sinkt der spezifische Energieverbrauch branchenabhängig zusätzlich um 30 % bis 40 %. In den Branchen Metallerzeugung sowie NE-Metalle und Gießereien bleibt der zusätzliche Effizienzgewinn begrenzt. Im Vergleich zum Referenzszenario sinkt der spezifische Verbrauch zwischen 10 % (Metallerzeugung) und 18 % (NE-Metalle, Gießereien). Dies hat zwei Ursachen: Einerseits steigt die Wertigkeit der Produkte und Werkstoffe aufgrund ihrer spezifischen und maßgeschneiderten Eigenschaften, andererseits werden durch Prozessveränderungen (hier vor allem Miniaturisierung, Integration und hohe räumliche Konzentration des Energieeinsatzes am Werkstück) weitere Verringerungen der spezifischen Verbräuche möglich, die bei konventionellen Prozessen aus physikalischen Gründen nicht erreichbar wären.

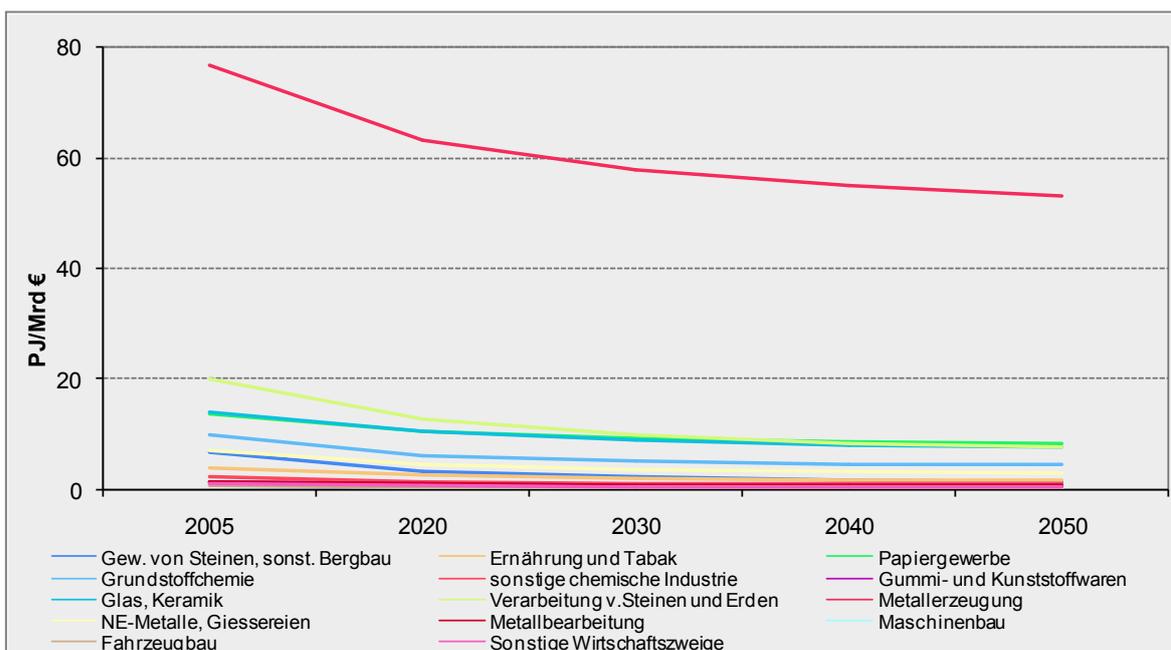
Die spezifischen Brennstoffverbräuche verlaufen im Innovationsszenario grundsätzlich ähnlich wie im Referenzszenario, sinken jedoch mit den oben genannten Spezifikationen durchwegs stärker ab (Tabelle 5.3-19, Abbildung 5.3-14, Abbildung 5.3-15, Abbildung 5.3-16).

Tabelle 5.3-19: Szenario „Innovation“: Spezifischer Brennstoffverbrauch der Industrie nach Branchen (Abgrenzung der Energiebilanz) 2005 – 2050, in PJ/Mrd. EUR

	Innovationsszenario				
	2005	2020	2030	2040	2050
Gew. von Steinen, sonst. Bergbau	6,6	3,2	2,3	1,7	1,4
Ernährung und Tabak	3,8	2,5	2,0	1,7	1,6
Papiergewerbe	13,6	10,6	9,2	8,5	8,3
Grundstoffchemie	9,7	6,0	5,0	4,5	4,4
sonstige chemische Industrie	2,2	1,5	1,2	1,0	1,0
Gummi- und Kunststoffwaren	1,5	0,9	0,7	0,6	0,6
Glas, Keramik	14,1	10,4	8,8	8,0	7,7
Verarbeitung v. Steinen und Erden	19,9	12,6	9,8	8,3	7,6
Metallerzeugung	76,7	63,1	57,7	55,0	52,9
NE-Metalle, Giessereien	7,0	4,6	3,7	3,2	2,8
Metallbearbeitung	1,4	1,0	0,8	0,7	0,7
Maschinenbau	0,7	0,4	0,3	0,3	0,3
Fahrzeugbau	0,8	0,5	0,4	0,4	0,3
Sonstige Wirtschaftszweige	1,0	0,6	0,5	0,5	0,5
Gesamt Brennstoffverbrauch	3,7	2,2	1,6	1,3	1,2

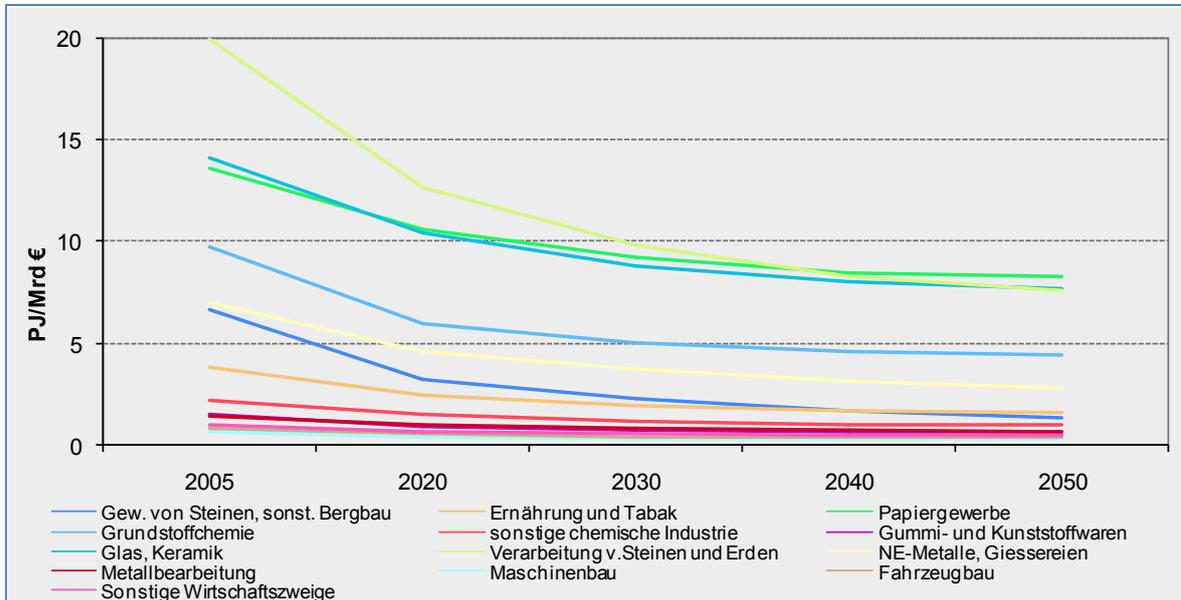
Quelle: Prognos 2009

Abbildung 5.3-14: Szenario „Innovation“: Spezifischer Brennstoffverbrauch der Industrie 2005 – 2050 (Abgrenzung der Energiebilanz), in PJ/Mrd. EUR



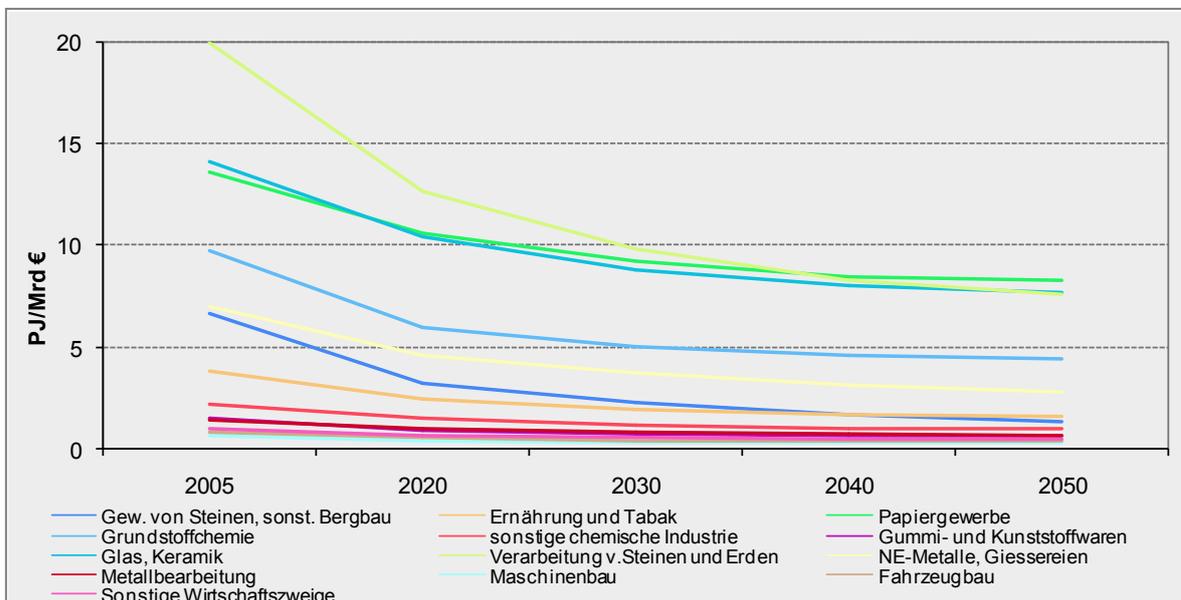
Quelle: Prognos 2009

Abbildung 5.3-15: Szenario „Innovation“: Spezifischer Brennstoffverbrauch der Industrie 2005 – 2050 (Abgrenzung der Energiebilanz), in PJ/Mrd. EUR, ohne Metallerzeugung



Quelle: Prognos 2009

Abbildung 5.3-16: Szenario „Innovation“: Spezifischer Brennstoffverbrauch der Industrie (Abgrenzung der Energiebilanz), 2005 – 2050, in PJ/Mrd. EUR, nicht energieintensive Branchen



Quelle: Prognos 2009

Beim spezifischen Stromverbrauch sind die zusätzlichen Einsparpotenziale zu den bereits im Referenzszenario konsequent umgesetzten Querschnittstechnologien begrenzt. Miniatürisierung sowie die nächste und übernächste Generation der Lichterzeuger, IT-Technologien, Kältetechnologien etc. tragen dazu bei. Grundsätzlich ergeben sich durch die Prozessinnovationen zusätzliche Substitutionen von vorher brennstoffgefeuerten Prozessen zu strombasierten Techniken (z. B. Härtungsprozesse mit Infrarotlasern). Zusätzlich zu

den Entwicklungen im Referenzszenario wird branchenabhängig eine Verringerung des spezifischen Stromverbrauchs im Bereich von 24 % bis 33 % erreicht.

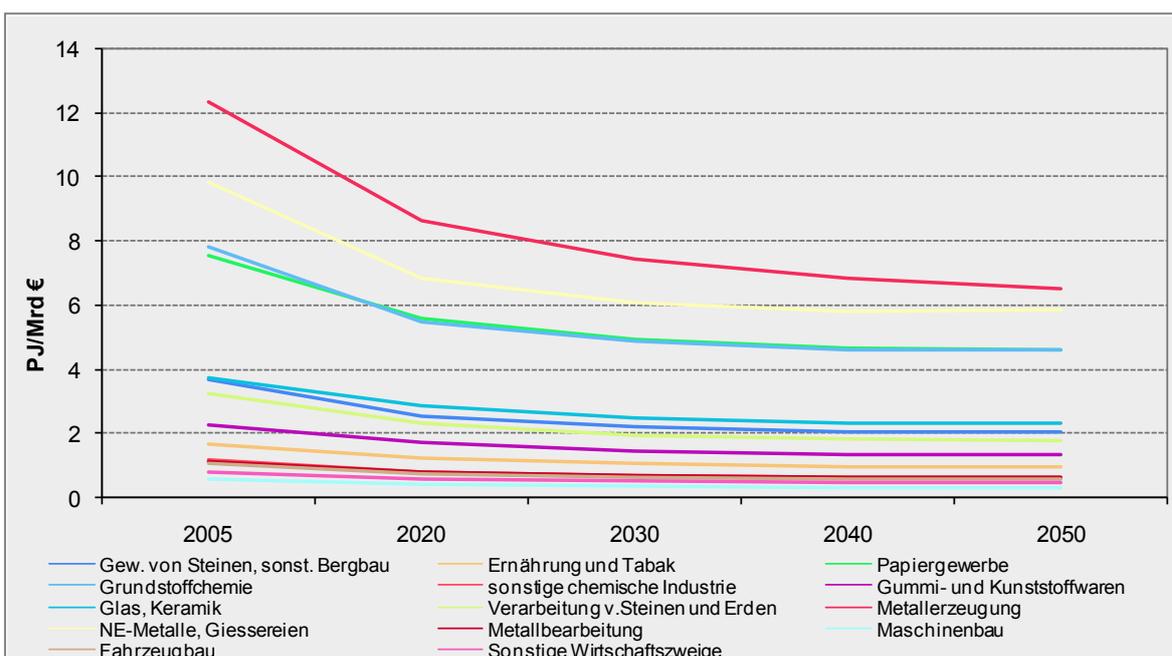
Die Branchen mit den höchsten spezifischen Stromverbräuchen sind die Metallerzeugung (Elektrostahl), NE-Metalle/Gießereien und das Papiergewerbe, einen mittleren spezifischen Stromverbrauch weist die Gewinnung von Steinen und Erden auf. Alle weiteren Branchen (incl. Metallbearbeitung, Maschinenbau und Fahrzeugbau) liegen im Vergleich dazu deutlich niedriger (Tabelle 5.3-20, Abbildung 4.3-16).

Tabelle 5.3-20: Szenario „Innovation“: Spezifischer Stromverbrauch der Industrie 2005 – 2050 (Abgrenzung der Energiebilanz), in PJ/Mrd. EUR

	Innovationsszenario				
	2005	2020	2030	2040	2050
Gew. von Steinen, sonst. Bergbau	3,7	2,5	2,2	2,0	2,0
Ernährung und Tabak	1,6	1,2	1,0	0,9	0,9
Papiergewerbe	7,5	5,6	4,9	4,6	4,6
Grundstoffchemie	7,8	5,4	4,8	4,6	4,6
sonstige chemische Industrie	1,2	0,8	0,7	0,6	0,6
Gummi- und Kunststoffwaren	2,2	1,7	1,4	1,3	1,3
Glas, Keramik	3,7	2,8	2,5	2,3	2,3
Verarbeitung v. Steinen und Erden	3,2	2,3	1,9	1,8	1,8
Metallerzeugung	12,4	8,7	7,4	6,8	6,5
NE-Metalle, Giessereien	9,8	6,9	6,1	5,8	5,9
Metallbearbeitung	1,1	0,8	0,7	0,6	0,6
Maschinenbau	0,6	0,4	0,3	0,3	0,3
Fahrzeugbau	1,0	0,7	0,6	0,6	0,5
Sonstige Wirtschaftszweige	0,8	0,6	0,5	0,4	0,4
Gesamt spez. Stromverbrauch	1,9	1,2	1,0	0,8	0,8

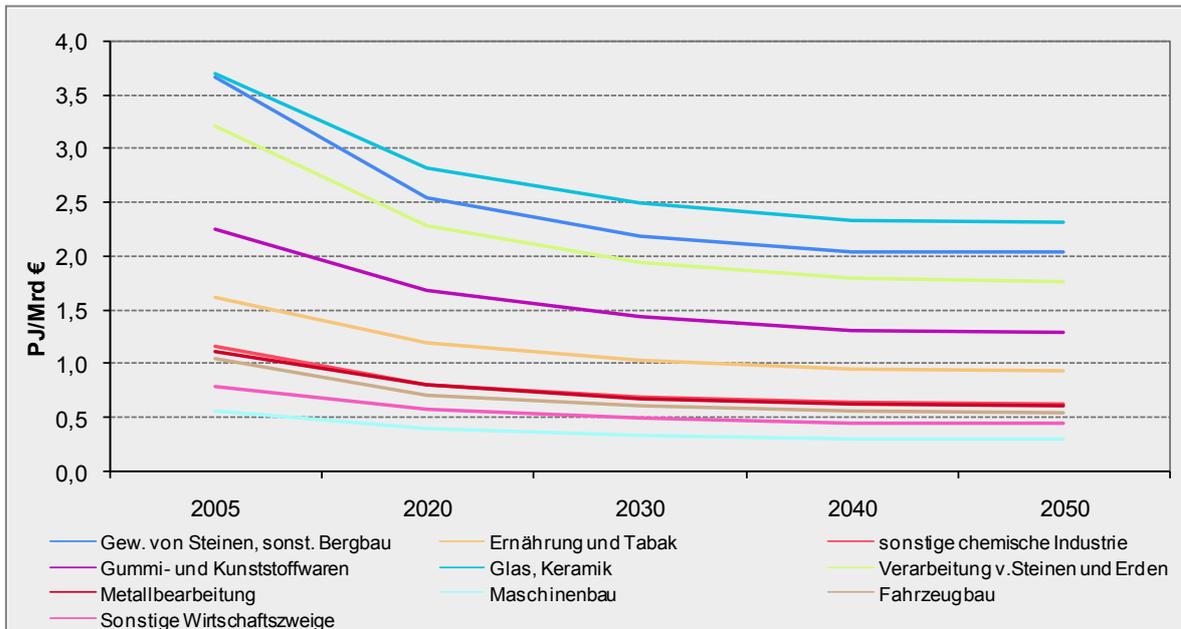
Quelle: Prognos 2009

Abbildung 5.3-17: Szenario „Innovation“: Spezifischer Stromverbrauch der Industrie 2005 – 2050 (Abgrenzung der Energiebilanz), in PJ/Mrd. EUR



Quelle: Prognos 2009

Abbildung 5.3-18: Szenario „Innovation“: Spezifischer Stromverbrauch der Industrie 2005 – 2050 (Abgrenzung der Energiebilanz), in PJ/Mrd. EUR, ohne stromintensive Branchen



Quelle: Prognos 2009

Insgesamt sinkt der spezifische Energieverbrauch der Industrie im Referenzszenario bis 2050 um 65 % (Tabelle 5.3-21).

Tabelle 5.3-21: Szenario „Innovation“: Spezifischer Energieverbrauch der Industrie 2005 – 2050 (Abgrenzung der Energiebilanz), in PJ/Mrd. EUR

	Innovationsszenario				
	2005	2020	2030	2040	2050
Gew. von Steinen, sonst. Bergbau	10,3	5,7	4,5	3,7	3,4
Ernährung und Tabak	5,4	3,7	3,0	2,6	2,5
Papiergewerbe	21,1	16,2	14,1	13,1	12,9
Grundstoffchemie	17,5	11,4	9,9	9,1	9,0
sonstige chemische Industrie	3,4	2,3	1,9	1,7	1,6
Gummi- und Kunststoffwaren	3,7	2,6	2,2	2,0	1,9
Glas, Keramik	17,8	13,3	11,3	10,3	10,0
Verarbeitung v. Steinen und Erden	23,1	14,9	11,8	10,0	9,4
Metallerzeugung	89,0	71,7	65,2	61,8	59,4
NE-Metalle, Giessereien	16,8	11,4	9,8	8,9	8,7
Metallbearbeitung	2,5	1,8	1,5	1,3	1,3
Maschinenbau	1,2	0,8	0,7	0,6	0,6
Fahrzeugbau	1,9	1,2	1,0	0,9	0,9
Sonstige Wirtschaftszweige	1,8	1,2	1,0	0,9	0,9
Gesamt Energieverbrauch	5,6	3,4	2,6	2,2	2,0

Quelle: Prognos 2009

5.3.3.2 Endenergieverbrauch im Industriesektor

Der Endenergieverbrauch im Industriesektor nimmt im Innovationsszenario zwischen 2005 und 2050 um 53 % auf 1.149 PJ ab. Gegenüber dem Referenzszenario bedeutet dies im Endjahr eine Reduktion um 40 %. In den Branchen Gewinnung von Steinen und Erden, sonstiger Bergbau, Metallerzeugung sowie NE-Metalle und Gießereien wirkt sich die Verringerung der Produktion deutlich auf den Energieverbrauch aus. Gegenüber dem Ausgangsjahr 2005 sinkt dieser um bis zu 83 %. Im Referenzszenario sind es bis zu 74 %.

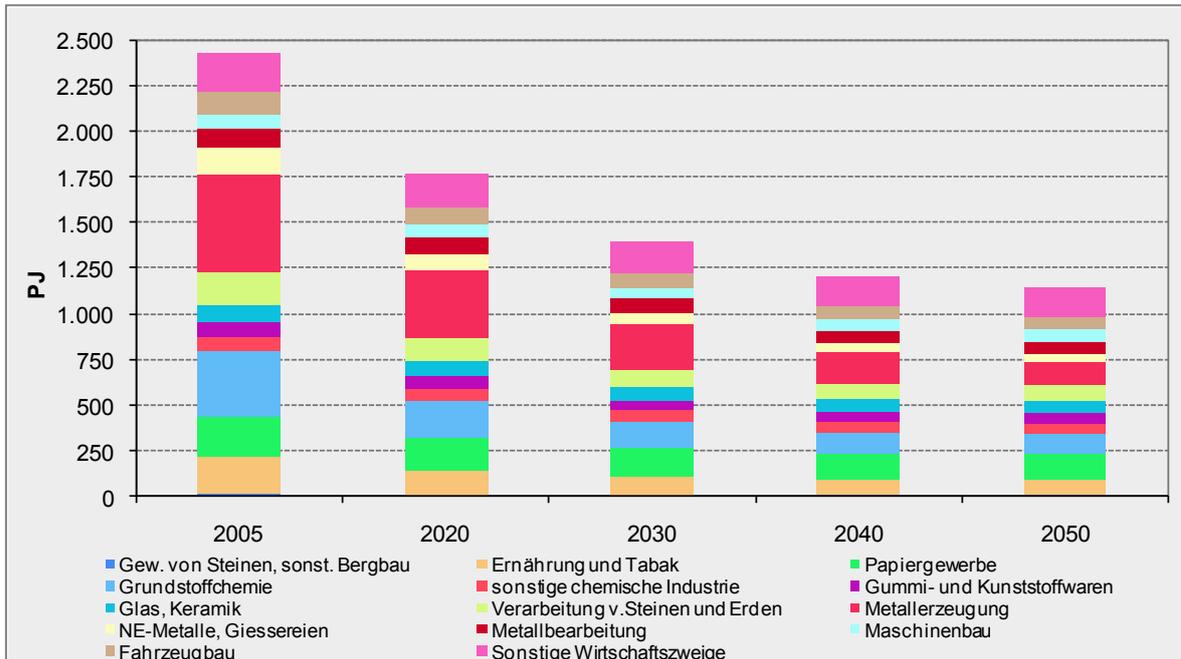
Anders als im Referenzszenario geht der Energieverbrauch in den meisten Branchen zurück, weil die Reduktion des spezifischen Verbrauchs jeweils die Produktionsausweitung übertrifft (Tabelle 5.3-22, Abbildung 5.3-19).

Tabelle 5.3-22: Szenario „Innovation“: Energieverbrauch der Industrie 2005 – 2050 in Branchen (Abgrenzung der Energiebilanz), in PJ

	2005	Innovationsszenario			
		2020	2030	2040	2050
Gew. von Steinen, sonst. Bergbau	19	7	4	3	3
Ernährung und Tabak	201	136	109	95	94
Papiergewerbe	220	181	151	140	141
Grundstoffchemie	362	201	147	119	108
sonstige chemische Industrie	77	71	61	57	59
Gummi- und Kunststoffwaren	77	65	56	53	55
Glas, Keramik	92	87	73	66	67
Verarbeitung v. Steinen und Erden	185	122	97	84	83
Metallerzeugung	537	373	245	173	130
NE-Metalle, Giessereien	140	86	63	48	39
Metallbearbeitung	104	93	79	73	75
Maschinenbau	79	74	64	59	61
Fahrzeugbau	127	93	77	70	71
Sonstige Wirtschaftszweige	203	182	164	158	165
Gesamt Energieverbrauch	2.424	1.769	1.391	1.199	1.149

Quelle: Prognos 2009

Abbildung 5.3-19: Szenario „Innovation“: Endenergieverbrauch der Industrie nach Branchen 2005 – 2050, in PJ



Quelle: Prognos 2009

Zwischen den einzelnen Energieträgern gibt es strukturelle Verschiebungen (Tabelle 5.3-23, Abbildung 5.3-20). Die Reduktion von Kohlen und Mineralöl zur Prozesswärmeerzeugung durch Effizienzmaßnahmen und Prozess- sowie Energieträgersubstitution ist als Strategie unterstellt und führt zu einem deutlichen Rückgang beim Einsatz dieser Energieträger: zwischen 2005 und 2050 wird Steinkohle um 84 % reduziert, Braunkohle um 61 %, Mineralöle um 79 %.

Tabelle 5.3-23: Szenario „Innovation“: Energieverbrauch der Industrie 2005 – 2050 nach Energieträgern, in PJ

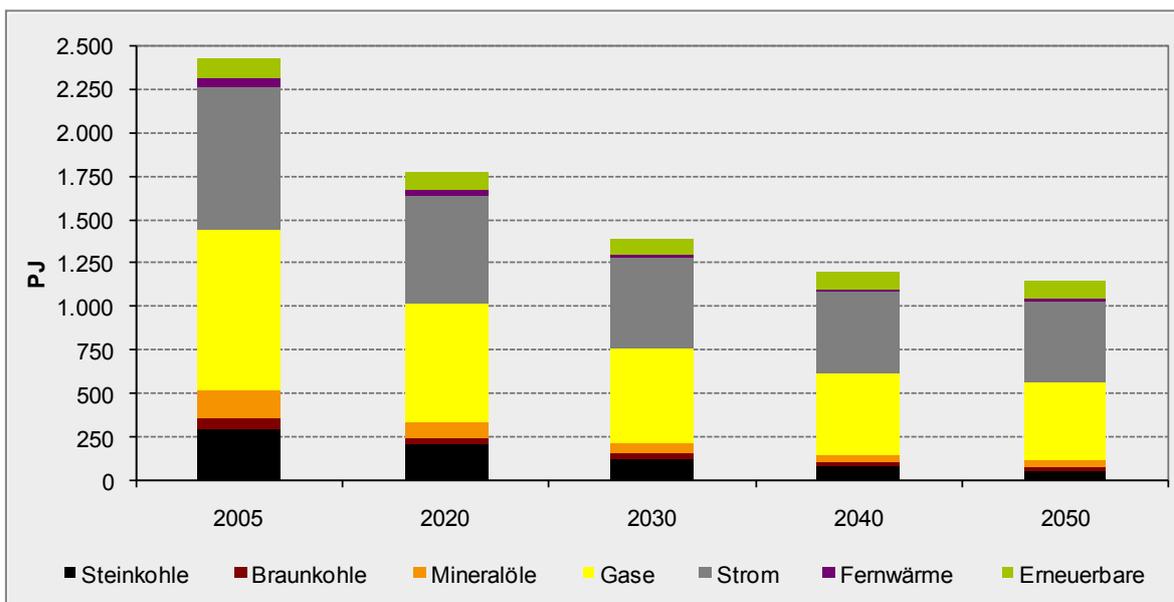
	Innovationsszenario				
	2005	2020	2030	2040	2050
Steinkohle	296	206	130	83	55
Braunkohle	59	38	29	24	22
Mineralöle	162	93	61	43	35
darunter: Heizöl leicht	77	44	31	23	20
Heizöl schwer	67	39	24	16	11
übrige Mineralölprodukte	19	10	7	5	4
Gase	921	677	536	467	451
darunter: Naturgase	800	597	484	429	422
Flüssiggas, Raffineriegas	11	9	6	4	3
Kokereigas	33	21	14	10	8
Gichtgas	77	49	33	24	18
Erneuerbare	118	103	96	97	104
Strom	823	623	517	467	466
Fernwärme	45	28	21	17	16
Gesamt Endenergieverbrauch	2.424	1.769	1.391	1.199	1.149

Quelle: Prognos 2009

„Substitutionsgewinner“ sind Gase, sie verlieren „nur“ ca. 50 %, erhöhen aber ihren Anteil im Mix.

Strom weitet seinen Anteil ebenfalls aus und deckt im Jahr 2050 über 40 % des Energiebedarfs bei einer Reduktion des absoluten Verbrauchs um 46 %. Damit werden Strom und Gase für die Industrie zu den wichtigsten Energieträgern. Zusammen decken diese ca. 80 % des Energiebedarfs. Die Bedeutung der erneuerbaren Energien nimmt weiter zu. Im Jahr 2050 decken sie 9 % des Energiebedarfs. Hierbei handelt es sich vor allem um Umgebungs- und Solarwärme, die für Vorwärmung, Warmwassererzeugung, Klimatisierung und in Kaskadenprozessen eingesetzt werden. Aufgrund des nahezu verschwundenen Raumwärmebedarfs und der geringen Energiedichte der erneuerbaren Energien können diese im Industriesektor in unseren Breiten nur begrenzte Beiträge leisten. Die Biomasse wird strategisch zur Kraftstoffproduktion für den Güterverkehr eingesetzt, daher steht sie im Industriesektor nicht zur Verfügung (was unter anderen strategischen Rahmenentscheidungen sonst technisch grundsätzlich möglich wäre).

Abbildung 5.3-20: Szenario „Innovation“: Endenergieverbrauch der Industrie nach Energieträgern 2005 – 2050, in PJ



Quelle: Prognos 2009

5.3.3.3 Endenergieverbrauch nach Verwendungszwecken

Im Betrachtungszeitraum verändern sich die Anteile der Verwendungszwecke am Gesamtverbrauch kaum (Tabelle 5.3-24, Abbildung 5.3-21). Dominierend bleibt die Prozesswärme, deren Anteil leicht von 66 % auf 70 % im Jahr 2050 steigt. Der Anteil der mechanischen Energie am Gesamtverbrauch erhöht sich ebenfalls um 4 %-Punkte auf 25 %. Prozesswärme und mechanische Energie zusammen beanspruchen 2050 rund 95 % des Gesamtverbrauchs.

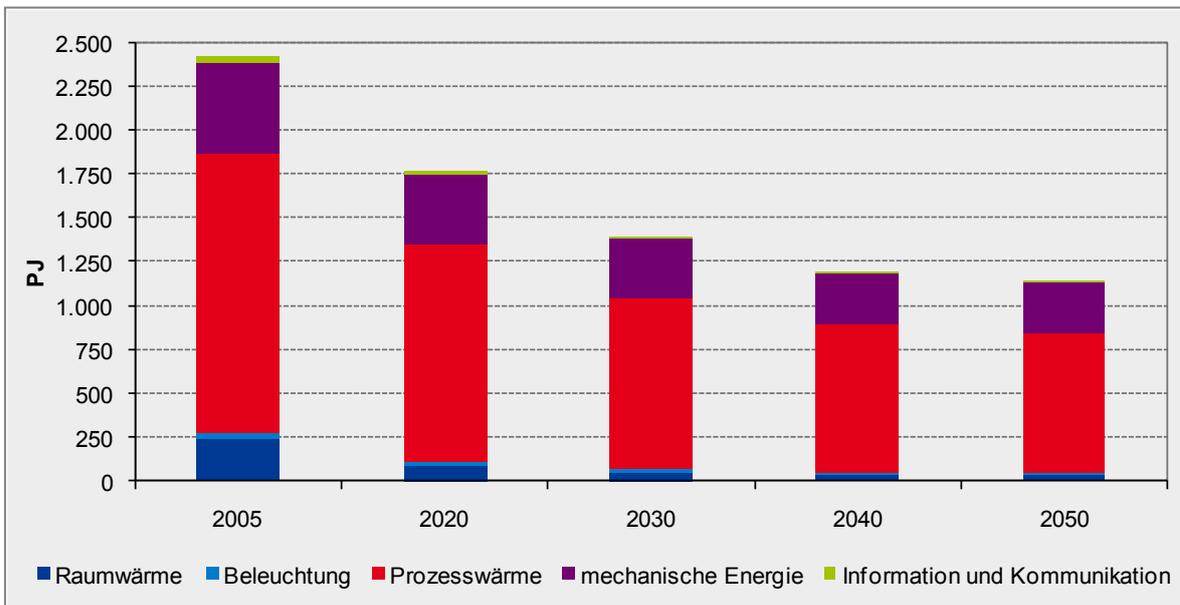
Tabelle 5.3-24: Szenario „Innovation“: Endenergieverbrauch der Industrie 2005 – 2050 nach Verwendungszwecken, in PJ

	Innovationsszenario				
	2005	2020	2030	2040	2050
Raumwärme	240	89	53	38	35
Prozesswärme	1.597	1.239	983	844	801
mechanische Energie	516	403	329	295	293
Information und Kommunikation	33	18	12	10	10
Beleuchtung	39	20	14	11	11
Gesamt Endenergieverbrauch	2.424	1.769	1.391	1.199	1.149

Quelle: Prognos 2009

Die Veränderung des spezifischen Verbrauchs für die Erzeugung von Raumwärme orientiert sich an der Entwicklung im Dienstleistungssektor. Der spezifische Verbrauch sinkt bis 2050 um ca. 80 %. Dies führt dazu, dass der Energieverbrauch auf bis dahin 35 PJ zurück geht. Im Referenzszenario liegt dieser noch bei 138 PJ. Eine stärkere Reduktion des Raumwärmebedarfs durch weitere Gebäudedämmung wäre grundsätzlich möglich, ökonomisch aber wenig sinnvoll, da in der Industrie i.a. niedertemperaturige Abwärme anfällt, mit der die Raumwärme bereit gestellt werden kann.

Abbildung 5.3-21: Szenario „Innovation“: Endenergieverbrauch der Industrie nach Verwendungszwecken 2005 – 2050, in PJ



Quelle: Prognos 2009

Der spezifische Energiebedarf der zur Erzeugung von Prozesswärme eingesetzten Anlagen vermindert sich im Betrachtungszeitraum im Durchschnitt um ca. 45 %. Eine Ausnahme bildet die Branche Metallerzeugung. Hier sinkt der spezifische Verbrauch für die Erzeugung von Stahl bis 2050 nur um 20 %.

Für die Bereitstellung von Kraft sinkt der spezifische Energiebedarf um bis zu 50 %. Dabei kommen im Wesentlichen die im Referenzszenario beschriebenen Maßnahmen zur Anwendung und werden vor allem durch Miniaturisierung und Prozessintegration unterstützt. Der Energieverbrauch verringert sich bis 2050 um 43 %.

Die verstärkte Nutzung energieeffizienter Beleuchtungssysteme führt zu einer deutlichen Reduktion des Stromverbrauchs. Im Jahr 2050 wird weniger als 1 % des Gesamtenergieverbrauchs für diesen Verwendungszweck benötigt. Im Referenzszenario sind es 1,6 %. Eine vergleichbare Entwicklung zeigt sich beim Verwendungszweck Information und Kommunikation.

5.3.4 Energieverbrauch des Verkehrssektors

5.3.4.1 Die zugrunde liegenden Annahmen zur Verkehrsentwicklung

Im Innovationsszenario werden im Wesentlichen drei strategische Forderungen abgeprüft und umgesetzt:

Die Verkehrsmengen werden daraufhin überprüft, ob und wie sie bei gleicher oder ähnlicher Bedarfsdeckung effektiviert bzw. reduziert werden können. Dies betrifft vor allem Rahmenbedingungen der Organisation von Warenströmen und der Raumplanung. Grundsätzliche Strukturänderungen beispielsweise bezüglich des „Konsums von Freizeitverkehren“ werden nicht angenommen.

Der Modal Split wird nach allen verkehrswissenschaftlich abgesicherten Möglichkeiten zugunsten der Schiene verändert. Das Szenario zeigt, wie viel eine solche Option an Einsparungen ermöglicht.

Auf der Ebene der Technik und der Energieträger wird unterstellt, dass für den Personenverkehr die Elektromobilität – mit den Zwischenstufen Hybrid- und Plug-In-Hybridfahrzeuge – systematisch und gerichtet entwickelt wird und die reinen Verbrennungsmotoren perspektivisch ablöst. Auf diesem Weg wird die Effizienz der Antriebstechniken systematisch optimiert. Ebenfalls wird die Entwicklung der Gasantriebe voran getrieben und die gasbetriebenen Fahrzeuge werden mit Intensität in den Markt eingeführt. Auch Brennstoffzellenantriebe werden weiter entwickelt, aufgrund der strategischen Orientierung zu den Elektroantrieben bleibt diese Antriebsform weiterhin wie im Referenzszenario eine Nische, da wir keinen Aufbau einer Wasserstoffinfrastruktur unterstellen.

Die verwendeten flüssigen Kraftstoffe werden systematisch bis 2050 durch Biokraftstoffe ersetzt; dies betrifft vor allem den Güterverkehr, in dem flüssige Kraftstoffe aufgrund ihrer Energiedichte derzeit als alternativlos eingeschätzt werden. Dies erfordert die in Kapitel 2.5.2 dargestellte strategische Prioritätensetzung, Biomasse für Kraftstoffe einzusetzen. Dies ist nur in dem im Szenario dargestellten Umfang möglich, wenn die im Kapitel 2.5.2 dargestellten Nachhaltigkeitsanforderungen erfüllt sind.

5.3.4.1.1 Personenverkehr

Die Mobilität, gemessen in Kilometer je Person und Jahr hat in den vergangenen Jahren stetig zugenommen. Es gibt keine Hinweise, dass sich dieser Trend signifikant umkehren würde. Hintergrund ist die Tatsache, dass die zur Ortsveränderung eingesetzte Zeit zwar konstant bleibt, aber die technologisch verfügbaren Geschwindigkeiten weiter ansteigen, so dass mit gleichem Zeiteinsatz größere Entfernungen zurückgelegt werden.

Im Referenzszenario steigt die Personenmobilität von 2005 bis 2030 um 1.270 km, bis 2050 dann nochmals um fast 900 km. Im Innovationsszenario steigt die Mobilität im gleichen Zeitraum bis 2030 um nur 400 km, bis 2050 sinkt sie dann leicht um 65 km ab. Das bedeutet einen Trendbruch. Ein stärkeres Absinken der Personenmobilität scheint aus heutiger Sicht nicht vorstellbar. Erreicht wird der Trendbruch durch die Substitution längerer Wege durch kürzere sowie ein vermehrtes Wegeaufkommen im Langsamverkehr.

Beim Modal-Split zeigt sich auch im Innovationsszenario eine hohe Abhängigkeit vom Motorisierten Individualverkehr. Trotz gegenüber dem Referenzszenario verstärkter raumstruktureller Anpassungen an die Preisentwicklung (sowie z. T. energiepolitisch bedingt) und einer stärkeren Substitution längerer durch kürzere Wege, verringert sich der Anteil des MIV nur unwesentlich. Dies verdeutlicht die enorme Abhängigkeit des Modal-Splits von den demografisch bedingten Fahrtzweckverschiebungen (Freizeit- und Einkaufsverkehr) und Motorisierungsgraden.

5.3.4.1.2 Güterverkehr

Die Ausrichtung der bestimmenden Faktoren für den Güterverkehr im Innovationsszenario (Modal-Split und Transportweiten) stellt eine Variation der Ausprägungen im Referenzszenario in Richtung einer ambitionierten CO₂-Reduktion dar. Zwei Treiber sind maßgebend: Einerseits eine güter- und relationsabhängige Verschiebung von der Straße auf die Schiene (und teilweise auf die Binnenwasserstraße) und andererseits eine Verringerung der mittleren Transportweiten gegenüber dem Referenzszenario. Auslöser für die Verringerung der Transportweiten können z. B. energiepreisinduzierte Effizienzsteigerungen und tendenziell höhere Anteile bei der Verlagerung von Transporten mit niedrigeren Durchschnittsdistanzen sein.

Dem entgegen wirken systembedingte Umwegfahrten auf den weniger dichten Schienen- und Wassernetzen und vermehrte Vor- und Nachläufe auf der Straße. Der Shift auf die transportweiten-intensiven Verkehrsträger Bahn und Binnenschiff bedeutet insgesamt längere Wege, so dass im Innovationsszenario die Güterverkehrsleistung ansteigt. Die Verschiebung des Modal-Splits wird durch verkehrsträgerspezifische Transportweiten überkompensiert.

Der LKW hat seine Vorteile im Nahbereich und zur Feinverteilung, respektive zur feinräumigen Versorgung des Verarbeitenden Gewerbes. Im Innovationsszenario wird der aufkommensbezogenen Anteil der LKW reduziert durch:

- eine geringere Nachfrage nach fossilen Energieträgern, die dann auch nicht mehr feinverteilt werden müssen (Tankstellen, Heizöl);
- eine verstärkte Verlagerung von Stückgütern in den kombinierten Verkehr, so dass der LKW dort keine reinen Quelle-Ziel-Fahrten mehr übernimmt, sondern vorwiegend Vor- und Nachlauf zu den Umschlagterminals;
- eine Anpassung von Logistik- und Transportprozessen in der Feinverteilung zur Ver- und Entsorgung des Handels mit Nahrungsmitteln und Konsumgütern;
- eine teilweise Verlagerung von Durchgangsverkehren auf die Schiene durch Optimierung der Transitrelationen (dies ist aber nicht immer zielführend, da Schienenkapazitäten fehlen können und darüber hinaus viele Transitverkehre durch logistische Dienstleistungen Wertschöpfung und Arbeitsplätze mit sich bringen).

5.3.4.2 Die Entwicklung der Rahmendaten für den Verkehrssektor

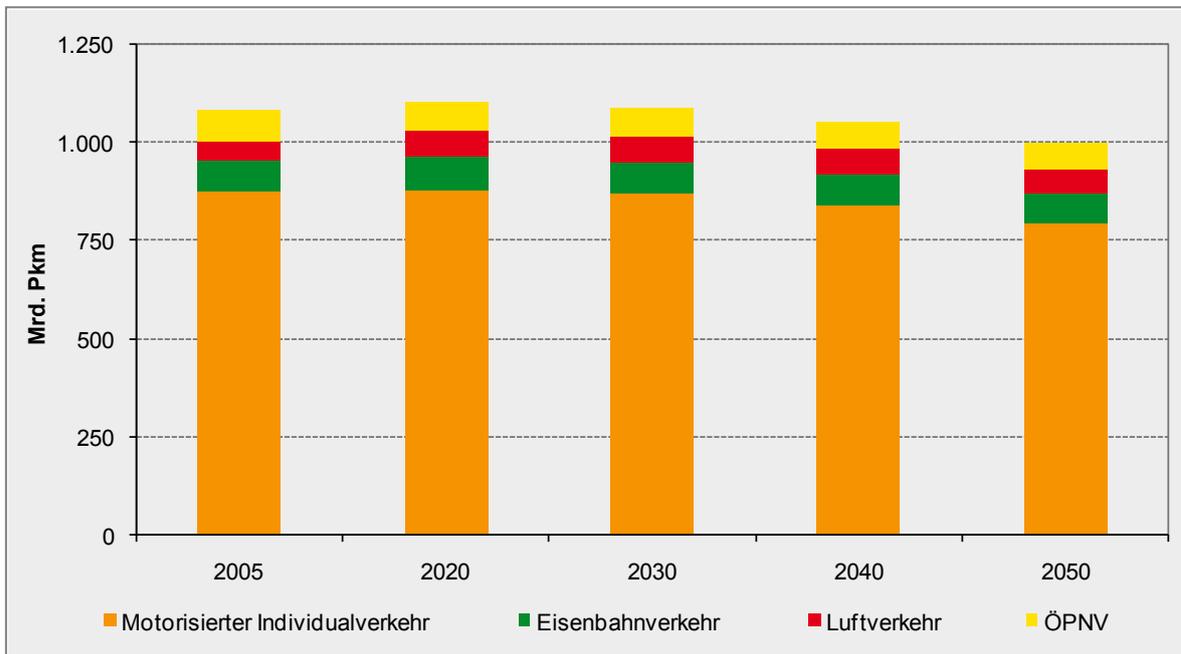
Basierend auf den zugrunde gelegten sozio-ökonomischen Veränderungen und den dargelegten Annahmen ergeben sich im Innovationsszenario folgende Entwicklungen beim **Personenverkehr**: Die Verkehrsleistung, gemessen an Personenkilometern, stagniert bis ins Jahr 2020 und geht anschließend leicht, ab 2030 stärker zurück. Im Betrachtungszeitraum verringert sich die Personenverkehrsleistung um 8 % (Tabelle 5.3-25). Die verschiedenen Verkehrsträger entwickeln sich unterschiedlich. Der MIV (-9 %), Schienenverkehr (-1 %) und der Öffentliche Personennahverkehr (-16 %) weisen eine abnehmende Verkehrsleistung auf. Hingegen zeigt sich beim Luftverkehr eine Zunahme um 19 %. Die Anteile der Verkehrsmoden an der Personenverkehrsleistung verschieben sich nur geringfügig. Die Anteile des Luft- und Schienenverkehrs nehmen leicht zu, während sich die Anteile des MIV und des ÖPNV etwas verringern. Der MIV bleibt mit einem Anteil knapp unter 80 % die dominante Größe.

Tabelle 5.3-25: Szenario „Innovation“: Personenverkehrsleistungen 2005 – 2050, in Mrd. Personenkilometer

	2005	Innovationsszenario			
		2020	2030	2040	2050
Motorisierter Individualverkehr	876	880	867	839	793
PKW	857	862	851	824	781
Zweiräder	19	18	16	14	13
Eisenbahnverkehr	77	81	81	79	76
Schienennahverkehr	43	44	44	43	41
Schienenfernverkehr	34	36	37	36	35
ÖPNV	79	74	70	68	66
Strassen-, Stadt-, U-Bahnen	15	16	15	15	14
Busse	63	58	55	53	51
Luftverkehr	53	67	68	66	63
Insgesamt Personenverkehrsleistungen	1.084	1.101	1.087	1.052	998
Anteile in %					
Motorisierter Individualverkehr	80,8	79,9	79,8	79,7	79,5
Eisenbahnverkehr	7,1	7,3	7,5	7,5	7,6
ÖPNV	7,2	6,7	6,5	6,5	6,6
Luftverkehr	4,9	6,1	6,2	6,3	6,3

Quelle: ProgTrans / Prognos

Abbildung 5.3-22: Szenario „Innovation“: Personenverkehrsleistungen nach Verkehrsträgern 2005 – 2050, in Mrd. Personenkilometern



Quelle: ProgTrans / Prognos 2009

Im Innovationsszenario nimmt die **Güterverkehrsleistung**, gemessen in Tonnenkilometern, im Betrachtungszeitraum um 86 % zu (Tabelle 5.3-26). Damit liegt die Zunahme der Güterverkehrsleistung im Innovationsszenario leicht über der Zunahme im Referenzszenario, was auf die systembedingten Umwegfahrten (Schiene, Binnenschifffahrt) zurückzuführen ist.

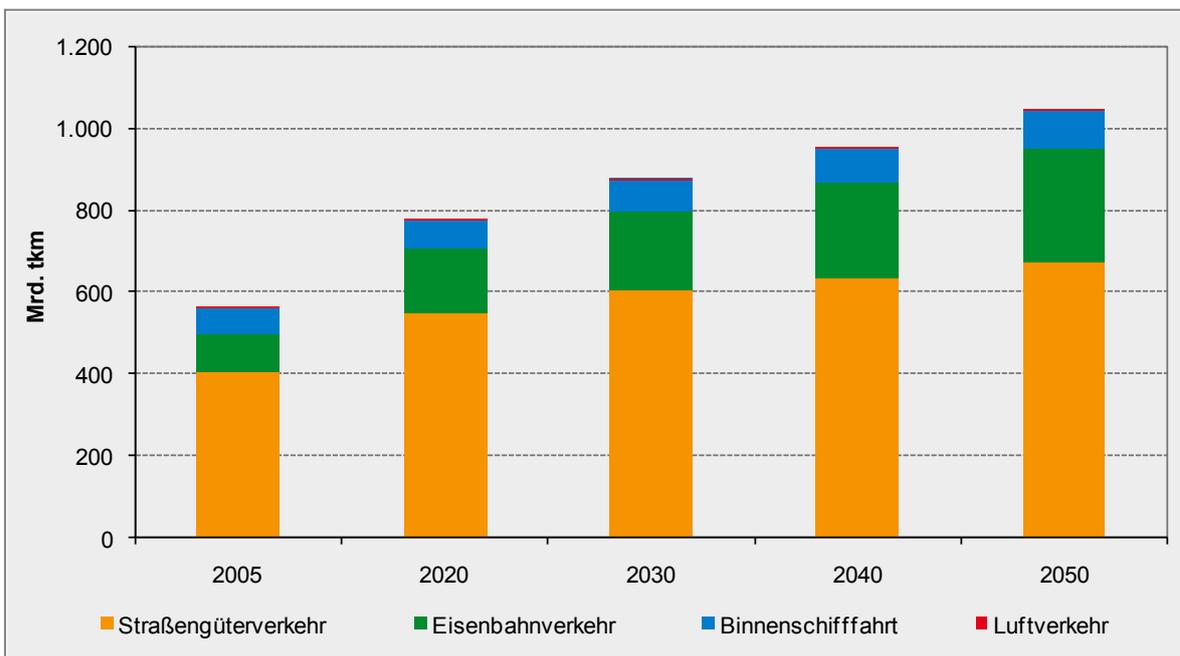
Die Güterverkehrsleistungen auf der Schiene verdreifachen sich nahezu; die Bedeutung der Schiene im Mix erhöht sich um nahezu 10 %-Punkte. Der Binnenschifffahrt wächst mit einer Zunahme um 48 % deutlich gegenüber dem Referenzszenario. Dennoch bleibt die Dominanz des Transportverkehrs durch den Straßengüterverkehr (Wachstum um 67 %) während der Betrachtungszeit erhalten. Trotz starken Wachstums (Verdreifachung) bleibt die Bedeutung des Luftverkehrs für den Gütertransport insgesamt gering.

Tabelle 5.3-26: Szenario „Innovation“: Güterverkehrsleistungen 2005 – 2050, in Mrd. Tonnenkilometern

	Innovationsszenario				
	2005	2020	2030	2040	2050
Straßengüterverkehr	403	550	604	635	671
deutsche Lkw/Sattelzugmaschinen	272	355	387	409	434
Fernverkehr	196	275	307	328	353
Nah-/Regionalverkehr	75	80	80	80	81
ausländische Lkw/Sattelzugmaschinen	131	195	217	226	237
Eisenbahnverkehr	95	156	192	232	278
Binnenschifffahrt	64	71	78	85	95
Luftverkehr	1	2	2	3	3
Insgesamt Güterverkehrsleistungen	563	779	876	953	1.047
Anteile in %					
Straßenverkehr	71,5	70,6	69,0	66,6	64,1
Eisenbahnverkehr	16,9	20,1	21,9	24,3	26,5
Binnenschifffahrt	11,4	9,1	8,9	8,9	9,1
Luftverkehr	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3

Quelle: ProgTrans / Prognos 2009

Abbildung 5.3-23: Szenario „Innovation“: Güterverkehrsleistungen nach Verkehrsträgern 2005 – 2050, in Mrd. Tonnenkilometern



Quelle: ProgTrans / Prognos 2009

5.3.4.3 Der Endenergieverbrauch im Straßenverkehr

Beim **Personenverkehr** führen im Innovationsszenario die rückgängigen Verkehrsleistungen, die signifikante Veränderung des Fahrzeugparks sowie die deutliche Verringerung der spezifischen Energieverbräuche bei den einzelnen Antriebsarten noch stärker als in der Referenz zu einem Rückgang des Energieverbrauchs um insgesamt 67 %.

Fahrzeuge mit reinem ottomotorischem Antrieb werden zunehmend durch Hybridfahrzeuge und Dieselfahrzeuge substituiert und etwa ab 2030, spätestens 2035, nicht mehr neu zugelassen. Im Jahr 2050 sind sie aus dem Fahrzeugpark verschwunden (Tabelle 5.3-27). Hybridfahrzeuge werden systematisch entwickelt und in den Fahrzeugpark eingeführt. Beträgt ihre Zahl in 2010 noch 47.000, sind es 2015 bereits fast 500.000 und in 2020 4,1 Millionen Fahrzeuge. Im Jahr 2028 erreicht der Bestand mit knapp 20 Millionen das Maximum, um danach langsam zurück zugehen, denn dann wirkt sich allmählich die nächste Welle der Fahrzeugevolution auf den Markt aus: Plug-in-Hybride erreichen 2026 einen Bestand von gut einer Million, 2035 knapp zwei Millionen und 2050 schließlich 12,6 Millionen. Reine Elektrofahrzeuge kommen leicht zeitversetzt in den Park, sie erreichen 2028 die Millionengrenze, 2039 die fünf Millionen und bis 2050 gut 8,1 Millionen. Dieselfahrzeuge setzen bis 2018 mit 16,2 Mio. Fahrzeugen zunächst den seit einigen Jahren zu beobachtenden „Dieseltrend“ fort; danach beginnt die Fahrzeuganzahl zu sinken und Dieselantriebe verlieren massiv Marktanteile an alle anderen Antriebsarten. Brennstoffzellenfahrzeuge werden in die Großversuchsphase entwickelt und erreichen 2050 die Marke von ca. 1 Million Fahrzeugen.

Im Jahr 2050 sind beinahe zwei Drittel der Fahrzeuge Hybridfahrzeuge, ein Fünftel der Fahrzeuge verfügt über einen reinen Elektroantrieb. Die Hybrid- und Elektrofahrzeuge haben auf der Ebene der spezifischen Endenergieverbräuche gegenüber den allein kraftstoffbetriebenen PKW erhebliche Effizienzvorteile. 15 % der Fahrzeuge sind gasbetrieben (Tabelle 5.3-27).

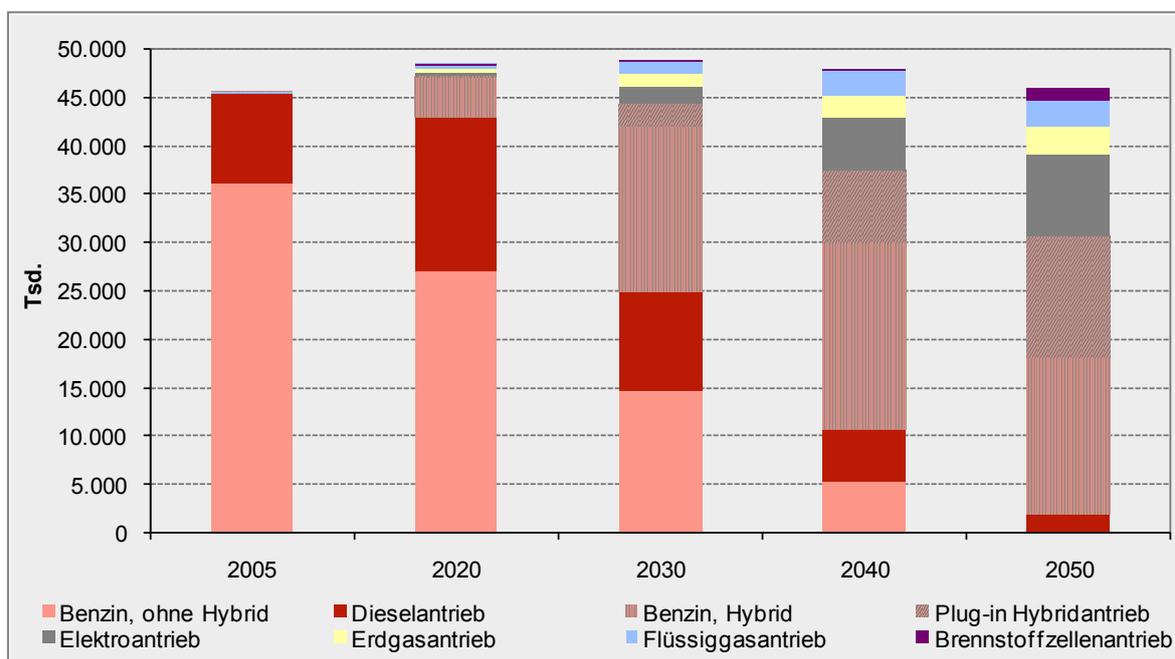
Die spezifischen Verbräuche der Fahrzeuge sinken gegenüber der Referenzentwicklung nochmals deutlich: Bei den Benzin- und gasbetriebenen Fahrzeugen reduziert sich der spezifische Verbrauch der Gesamtflotte im Durchschnitt um knapp 50 % (bei Neuwagen bis 2050 um bis zu 60 %). Bei Tabelle 5.3-27 ist zu beachten, dass es sich jeweils um Durchschnittswerte der gesamten Flotte, nicht allein der Neufahrzeuge handelt. Bezogen auf die gesamte Fahrzeugflotte verbessert sich die Energieeffizienz um 64 %. Dies hängt vor allem mit dem Vordringen der Elektrofahrzeuge zusammen, da deren Endenergieeffizienz um mindestens einen Faktor 2 - 2,5 höher ist als bei verbrennungsmotorisch angetriebenen PKW.

Tabelle 5.3-27: Szenario „Innovation: Bestimmungsgrößen für den Energieverbrauch von PKW und Kombi, jeweils gemittelt über den gesamten Fahrzeugbestand, 2005 – 2050

	Innovationsszenario				
	2005	2020	2030	2040	2050
Fahrzeugbestand (Tsd.)	45.521	48.491	48.739	47.835	45.828
Benzin, ohne Hybrid	36.050	26.999	14.624	5.253	0
Benzin, Hybrid	25	4.134	17.033	19.223	16.288
Dieselantrieb	9.392	15.840	10.255	5.401	1.739
Erdgasantrieb	20	507	1.330	2.429	2.805
Flüssiggasantrieb	32	510	1.312	2.423	2.800
Elektroantrieb	2	212	1.824	5.456	8.401
Plug-in Hybridantrieb	0	287	2.358	7.519	12.640
Brennstoffzellenantrieb	0	2	3	132	1.154
Jahresfahrleistung (Tsd. Fzkm/Fz)	12,8	12,3	12,2	12,0	11,9
Benzin, ohne Hybrid	10,9	9,7	11,1	11,5	11,8
Benzin, Hybrid	8,1	8,6	11,0	11,5	11,8
Dieselantrieb	19,9	17,5	16,3	14,7	13,2
Erdgasantrieb	15,7	16,5	16,3	14,7	13,2
Flüssiggasantrieb	15,7	16,5	16,3	14,7	13,2
Elektroantrieb	3,2	4,7	8,2	10,9	11,7
Plug-in Hybridantrieb	0,0	4,7	8,2	10,9	11,7
Brennstoffzellenantrieb	1,5	2,8	4,3	5,6	7,0
Gesamtfahrleistung (Mrd. Fzkm)	581,7	595,0	592,5	573,8	543,4
Benzin, ohne Hybrid	393,9	262,4	161,9	60,3	0,0
Benzin, Hybrid	0,2	35,8	186,7	220,7	191,9
Dieselantrieb	186,7	277,8	166,8	79,7	22,9
Erdgasantrieb	0,3	8,4	21,6	35,8	37,0
Flüssiggasantrieb	0,5	8,4	21,3	35,7	37,0
Elektroantrieb	0,0	1,0	14,9	59,2	98,5
Plug-in Hybridantrieb	0,0	1,4	19,2	81,6	148,1
Brennstoffzellenantrieb	0,0	0,0	0,0	0,7	8,0
Spezifischer Verbrauch					
PKW (Benzin, Diesel, Hybrid; l/100 km)	7,8	5,8	4,6	4,1	3,9
Benzin, ohne Hybrid (l/100 km)	8,3	6,4	5,2	4,7	4,2
Benzin, Hybrid (l/100 km)	6,2	4,8	3,9	3,5	3,2
Dieselantrieb (l/100 km)	6,8	5,4	4,8	4,4	4,3
Erdgasantrieb (kg/100km)	5,6	4,3	3,5	3,2	2,9
Flüssiggasantrieb (kg/100km)	6,1	4,7	3,8	3,4	3,1
Elektroantrieb (kWh / 100 km)	20,6	16,5	14,5	14,0	13,9
Plug-in Hybridantrieb (kWh / 100 km)		23,5	20,0	18,6	17,7
Brennstoffzelle (kg H ₂ / 100 km)	1,8	1,4	1,2	1,2	1,1
Besetzungsgrad (Pkm/Fzkm)	1,5	1,4	1,4	1,4	1,4

Quelle: ProgTrans / Prognos 2009

Abbildung 5.3-24: Szenario „Innovation“: Fahrzeugbestände PKW und Kombi nach Antriebstypen, 2005 – 2050, in Tsd.



Quelle: ProgTrans / Prognos 2009

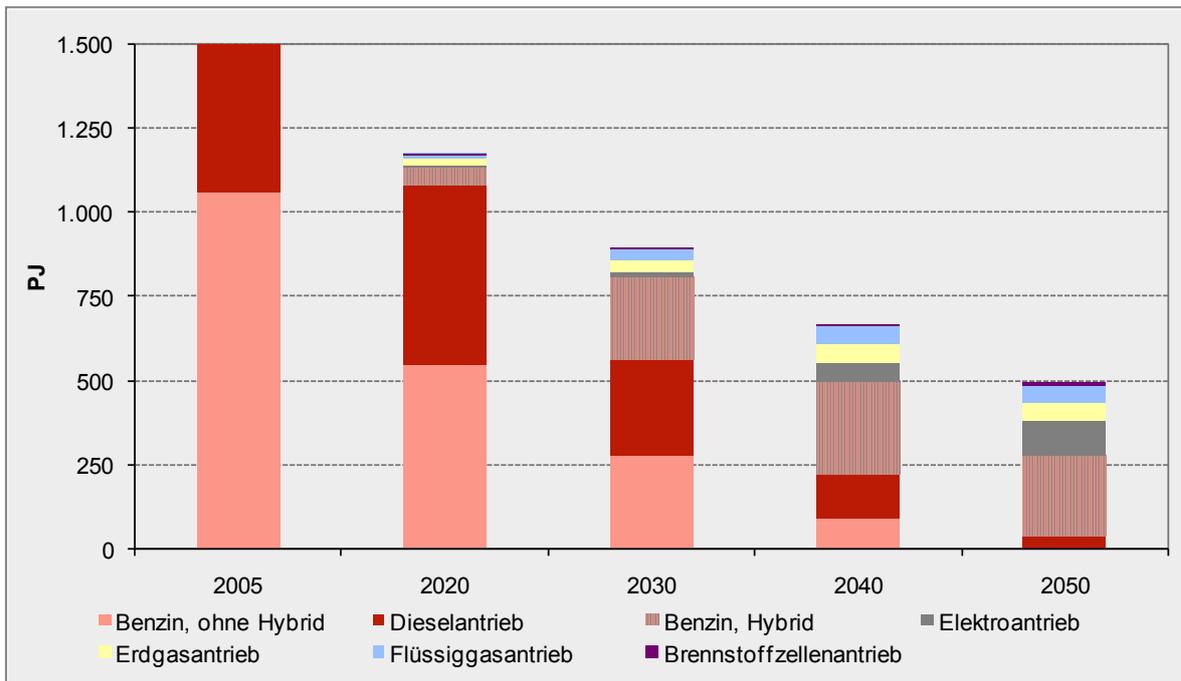
Insgesamt verringert sich der Energieverbrauch von PKW und Kombi zwischen 2005 und 2050 um 67 %.

Tabelle 5.3-28: Szenario „Innovation“: Energieverbrauch von PKW und Kombi 2005 – 2050 nach Antriebsarten, in PJ

	Innovationsszenario				
	2005	2020	2030	2040	2050
Benzin, ohne Hybrid	1.062	546	276	92	0
Benzin, Hybrid	0	56	245	278	242
Dieselantrieb	457	538	286	126	35
Erdgasantrieb	1	18	38	57	53
Flüssiggasantrieb	1	18	38	56	53
Elektroantrieb	0	1	15	59	101
Brennstoffzellenantrieb	0	0	0	1	10
Gesamt Energieverbrauch	1.521	1.177	898	669	495
Veränderung in % p.a.		2020	2030	2040	2050
Benzin, ohne Hybrid		-4,5	-7,7	-10,4	-100,0
Benzin, Hybrid		52,6	9,7	1,3	-1,4
Dieselantrieb		-2,1	-6,8	-7,9	-11,9
Erdgasantrieb		9,8	7,2	4,0	-0,6
Flüssiggasantrieb		5,9	7,1	4,1	-0,6
Elektroantrieb		-	26,4	14,8	5,6
Brennstoffzellenantrieb		-	5,0	48,9	25,9
Gesamt Energieverbrauch		-2,2	-2,7	-2,9	-3,0

Quelle: ProgTrans / Prognos 2009

Abbildung 5.3-25: Szenario „Innovation“: Energieverbrauch von PKW und Kombi nach Antriebsarten, 2005 – 2050, in PJ



Quelle: ProgTrans / Prognos 2009

Der Benzinverbrauch geht um 77 % zurück, der Dieserverbrauch um 92 %. Die fossilen Anteile von Benzin und Diesel werden bis ins Jahr 2050 vollständig durch Biotreibstoffe der zweiten und dritten Generation ersetzt. Auf die Biokraftstoffe entfällt im Jahr 2050 etwas mehr als die Hälfte des Energieverbrauchs von PKW und Kombi. Weitere rund 20 % entfallen je auf Elektrizität und Gas (Erd- und Flüssiggas; Tabelle 5.3-28, Abbildung 5.3-25).

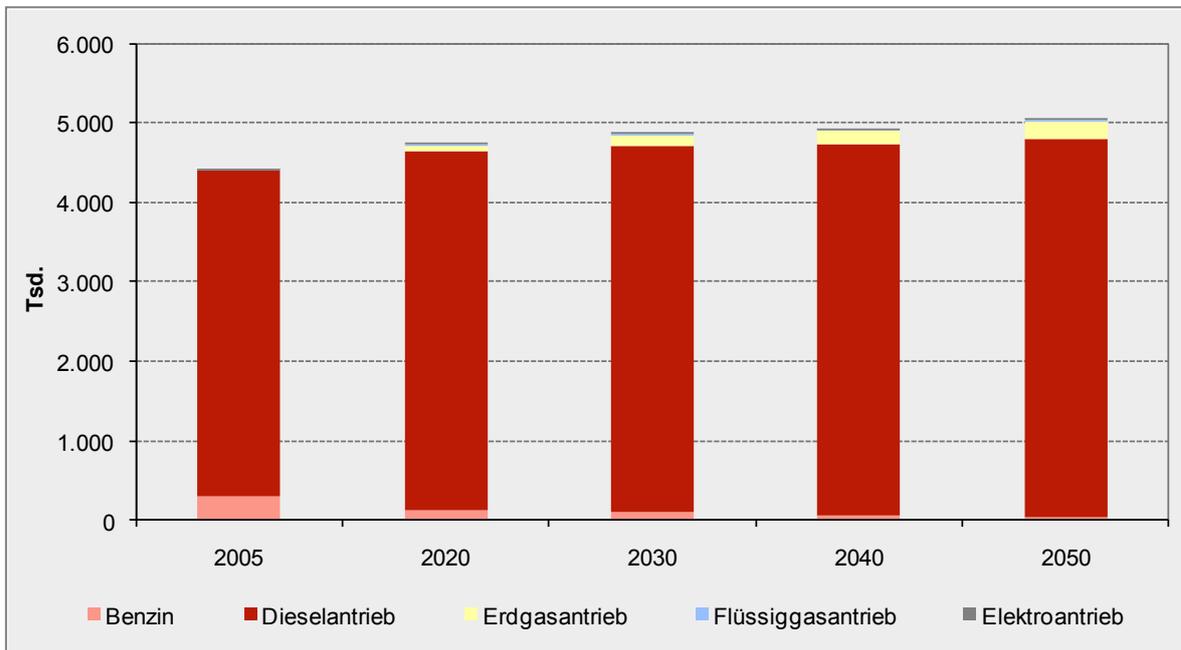
Im motorisierten **Güterverkehr** sind die steigenden Verkehrsleistungen auch im Innovationsszenario die dominierende Größe. Diese werden mit steigenden Fahrzeugzahlen (+ 14 %) erbracht. Die Fahrzeugauslastung wird bis 2050 gegenüber 2005 um 41 % erhöht (Tabelle 5.3-29). Diese Verbesserung ist geringer als in der Referenz, da aufgrund der erhöhten Schienentransporte mehr kleinteilige Verteilverkehre in der Fläche erfolgen. Bezüglich der Fahrzeugtechnik gehen wir für die Entwicklung im Innovationsszenario davon aus, dass alle eingesetzten Antriebsarten gegenüber dem Referenzszenario nochmals deutliche Effizienzerhöhungen erfahren. Die spezifischen Verbräuche der Dieselfahrzeuge sinken bis 2050 um 28 %, diejenigen der Benzinler um 30 %. Grundsätzlich gehen wir auch hier davon aus, dass sich zu den Antrieben mit flüssigen Kraftstoffen nur wenig Alternativen bis zur Marktreife entwickeln lassen. Gas- und Elektrofahrzeuge finden wie in der Referenz im Bereich der Lieferwagen und im Stadt- und Verteilverkehr eine Nische.

Tabelle 5.3-29: Szenario „Innovation: Bestimmungsgrößen für den Energieverbrauch des Straßengüterverkehrs, jeweils gemittelt über den gesamten Fahrzeugbestand, 2005 – 2050

	2005	Innovationsszenario			
		2020	2030	2040	2050
Fahrzeugbestand (Tsd.)	4.424	4.742	4.873	4.936	5.053
Benzin	308	139	100	74	50
Dieselantrieb	4.107	4.499	4.603	4.652	4.753
Erdgasantrieb	6	86	141	171	201
Flüssiggasantrieb	2	11	17	24	30
Elektroantrieb	2	7	11	15	20
Jahresfahrleistung (Tsd. Fzkm/Fz)	19,3	20,4	20,5	20,5	20,5
Benzin	10,4	10,6	10,4	9,4	7,3
Dieselantrieb	20,0	20,9	21,0	21,1	21,1
Erdgasantrieb	10,9	12,0	12,1	12,1	12,2
Flüssiggasantrieb	9,5	11,4	11,7	11,9	12,0
Elektroantrieb	8,6	9,0	9,2	9,2	9,2
Gesamtfahrleistung (Mrd. Fzkm)	85,5	96,8	99,9	101,4	103,7
Benzin	3,2	1,5	1,0	0,7	0,4
Dieselantrieb	82,2	94,1	96,9	98,2	100,4
Erdgasantrieb	0,1	1,0	1,7	2,1	2,5
Flüssiggasantrieb	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4
Elektroantrieb	0,0	0,1	0,1	0,1	0,2
Spezifischer Verbrauch (PJ/ Mrd. km)	8,3	7,1	6,6	6,2	6,0
Benzinantrieb (l/100 km)	13,7	11,4	10,0	9,4	9,5
Dieselantrieb (l/100 km)	23,5	20,1	18,6	17,5	16,8
Erdgasantrieb (kg/100 km)	15,8	13,8	12,4	11,5	11,1
Flüssiggasantrieb (kg/100 km)	16,6	14,9	13,5	12,5	12,2
Elektroantrieb (kWh/100 km)	56,0	49,6	46,1	43,0	41,2
mittlerer Ladefaktor (tkm/Fzkm)	4,3	5,0	5,4	5,7	6,0

Quelle: ProgTrans / Prognos 2009

Abbildung 5.3-26: Szenario „Innovation“: Fahrzeugbestände im Straßengüterverkehr nach Antriebstypen, 2005 – 2050, in Tsd.



Quelle: ProgTrans / Prognos 2009

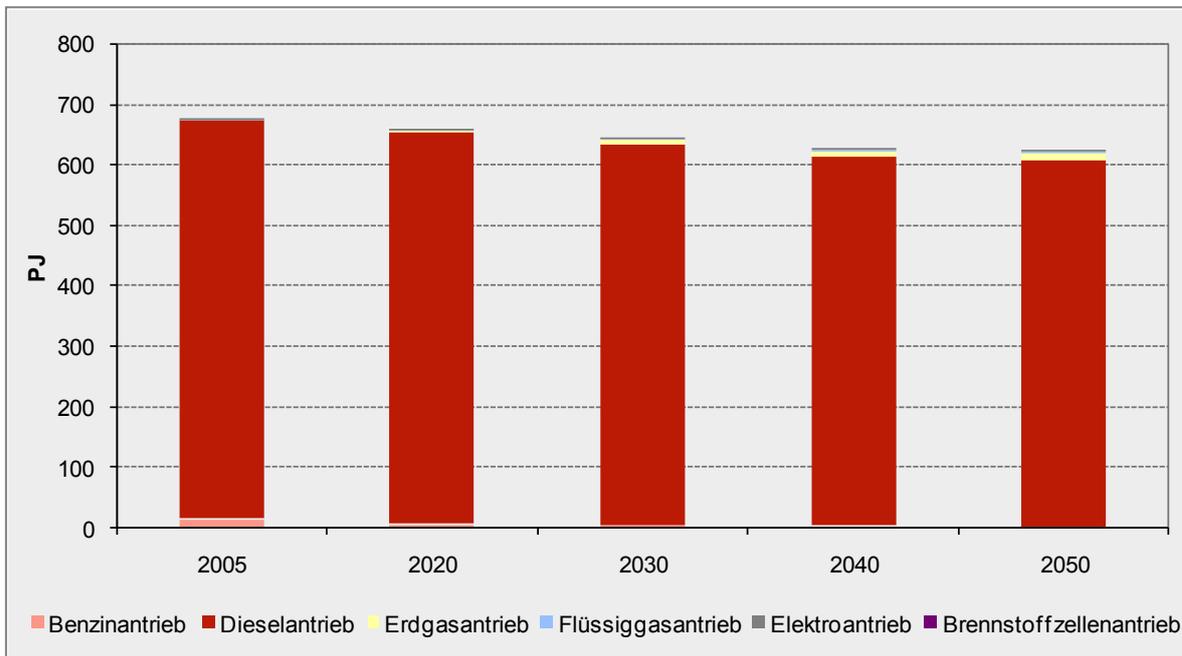
Der gesamte Verbrauch des Straßengüterverkehrs verringert sich als Ergebnis der kumulierten Effekte in der Betrachtungsperiode um 8 %. Diese Reduktion folgt praktisch vollständig aus der Effizienzsteigerung der Dieselantriebe. Wie in der Referenz kompensieren die Energieverbräuche der aus dem Fahrzeugpark verschwindenden Benzin- und der hineinwachsenden Gas- und Elektrofahrzeuge einander in etwa.

Tabelle 5.3-30: Szenario „Innovation“: Energieverbrauch des Straßengüterverkehrs 2005 – 2050 nach Energieträgern, in PJ

	Innovationsszenario				
	2005	2020	2030	2040	2050
Benzinantrieb	13,8	5,2	3,3	2,1	1,1
Dieselantrieb	660,6	646,2	629,0	610,5	606,4
Erdgasantrieb	0,5	6,5	9,7	10,9	12,5
Flüssiggasantrieb	0,1	1,0	1,4	1,8	2,2
Elektroantrieb	0,0	0,1	0,2	0,2	0,3
Brennstoffzellenantrieb	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Gesamt Energieverbrauch	675,0	659,0	643,6	625,5	622,5
Veränderung in % p.a.		2020	2030	2040	2050
Benzinantrieb		-6,3	-3,6	-4,3	-6,1
Dieselantrieb		0,0	-0,5	-0,3	-0,1
Erdgasantrieb		7,9	3,1	1,1	1,4
Flüssiggasantrieb		6,4	3,2	2,4	2,2
Elektroantrieb		-	3,3	2,5	2,2
Brennstoffzellenantrieb		-	-	-	-
Gesamt Energieverbrauch		0,0	-0,5	-0,3	0,0

Quelle: ProgTrans / Prognos 2009

Abbildung 5.3-27: Szenario „Innovation“: Energieverbrauch im Straßengüterverkehr nach Antriebsarten, 2005 – 2050, in PJ



Quelle: ProgTrans / Prognos 2009

Aus Platz- und Signifikanzgründen werden hier die Entwicklungen bei den motorisierten Zweirädern sowie im öffentlichen Straßenpersonenverkehr nicht gesondert abgebildet. Diese sind im folgenden Gesamtenergieverbrauch des Straßenverkehrs enthalten. Der öffentliche Straßenpersonenverkehr (aktuell hauptsächlich Busse, perspektivisch Sammeltaxen und Kleinbusse) trug 2005 zum Dieselverbrauch bei, perspektivisch verteilen sich die dort benötigten Verbräuche auch auf die anderen Energieträger.

Um den Energieverbrauch auf die Systematik der Energiebilanz abzustimmen, müssen die ermittelten Werte um den „Tanktourismus“ bereinigt werden. Damit wird der „Import“ von Kraftstoffen sowohl durch ausländische Fahrzeuge als auch durch Tanken im Ausland in Grenzregionen bezeichnet. Dieser Kraftstoffimport betrug im Jahr 2005 ca. 74,5 PJ Benzin, das aufgrund des Preisgefälles zu den Nachbarländern jenseits der Grenze getankt wurde, und reduziert sich allmählich auf ca. 20 PJ. Bei Diesel ist die Situation umgekehrt, hier wird z. T. geringfügig „exportiert“.

Tabelle 5.3-31: Szenario „Innovation“: Endenergieverbrauch des Straßenverkehrs 2005 – 2050, in PJ

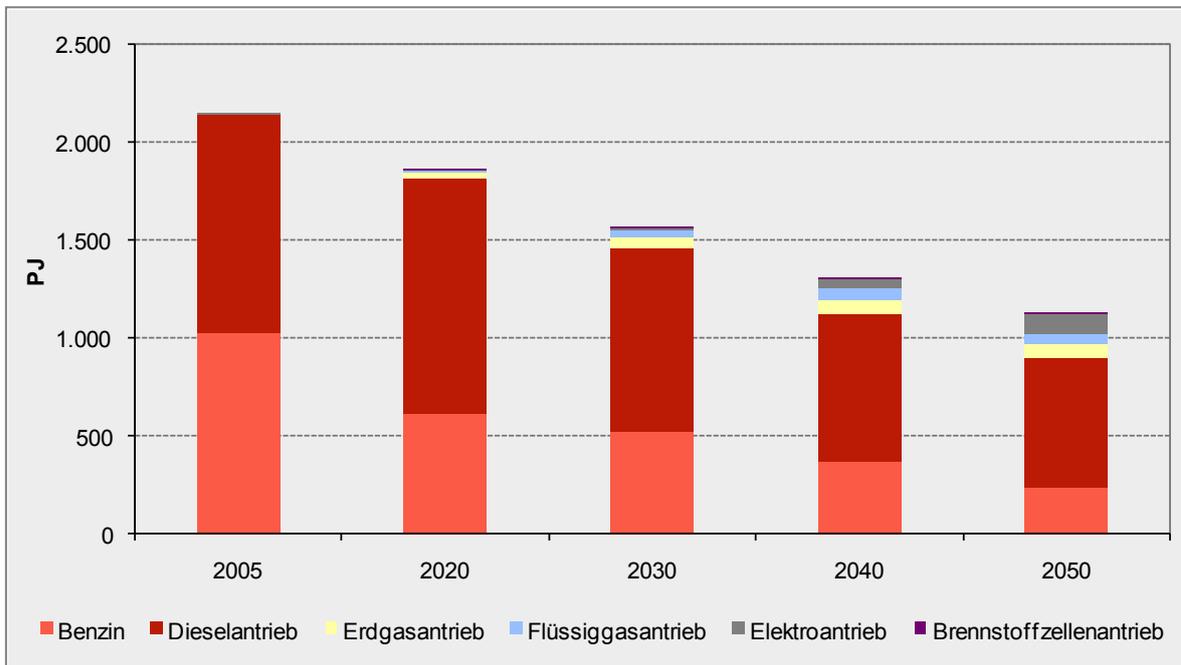
	2005	Innovationsszenario			
		2020	2030	2040	2050
Benzin	1.025	609	524	368	236
Dieselantrieb	1.124	1.207	937	757	661
Erdgasantrieb	2	26	50	69	68
Flüssiggasantrieb	2	19	39	59	56
Elektroantrieb	0	1	15	59	101
Brennstoffzellenantrieb	0	0	0	1	10
Gesamt Straßenverkehr	2.152	1.862	1.565	1.313	1.133
nachrichtlich: Biokraftstoff	9	255	494	617	732
Veränderung in % p.a.		2020	2030	2040	2050
Benzin		-2,8	-1,7	-3,5	-4,3
Dieselantrieb		-1,0	-2,7	-2,1	-1,3
Erdgasantrieb		9,0	6,1	3,4	-0,2
Flüssiggasantrieb		-	6,7	2,1	-1,4
Elektroantrieb		-	25,2	10,5	4,0
Brennstoffzellenantrieb		-	5,6	62,0	15,8
Insgesamt Straßenverkehr		-1,5	-1,8	-1,7	-1,4
nachrichtlich: Biokraftstoff		6,6	4,6	1,3	3,3
Personenverkehr	1.477	1.203	921	688	511
Güterverkehr	675	659	644	625	622

Quelle: ProgTrans / Prognos 2009

Der gesamte Endenergieverbrauch im Straßenverkehr verringert sich im Betrachtungszeitraum um 47 % von 2.152 PJ auf 1.133 PJ (Tabelle 5.3-31). Der Rückgang ist hauptsächlich auf den Verbrauchsrückgang beim Personenverkehr zurückzuführen, der sich im Betrachtungszeitraum von 1.477 PJ auf 511 PJ verringert (-65 %, inkl. Busse und Zweiräder). Der hohe Anteil an Dieselantrieben ist auch hier vor allem auf den Güterverkehr zurückzuführen.

Die flüssigen Kraftstoffe werden im Lauf der Zeit allmählich durch Biokraftstoffe ersetzt, bis 2050 auf der Straße nur noch Biokraftstoffe der zweiten und dritten Generation eingesetzt werden. Dies wird in der zusammenfassenden Energieträgerdarstellung (Abbildung 5.3-31) abgebildet.

Abbildung 5.3-28: Szenario „Innovation“: Endenergieverbrauch des Straßenverkehrs nach Antriebsarten 2005 – 2050, in PJ



Quelle: ProgTrans / Prognos 2009

5.3.4.4 Der Endenergieverbrauch des Schienenverkehrs

Im Gegensatz zum Referenzszenario wird im Innovationsszenario beim ÖPNV nicht von einem abnehmenden, sondern einem geringfügig steigenden Auslastungsgrad ausgegangen. Als Folge der abnehmenden Fahrleistung verringert sich die Personenverkehrsleistung des ÖPNV im Betrachtungszeitraum dennoch um 7 %. Der spezifische Verbrauch sinkt bis 2050 um 16 %, der Verbrauch insgesamt um 22 % gegenüber dem Ausgangsniveau (Tabelle 5.3-32).

Tabelle 5.3-32: Szenario „Innovation“: Bestimmungsgründe und Energieverbrauch des schienengebundenen Öffentlichen Personennahverkehrs (Straßenbahn, S-Bahn, U-Bahn), in PJ

	2005	Innovationsszenario			
		2020	2030	2040	2050
Verkehrsleistung (Mrd. Pkm)	15,3	15,7	15,4	15,0	14,4
Auslastungsgrad (Pkm/Wkm)	24,3	24,7	24,7	24,7	24,7
Fahrleistung (Mio. Wkm)	629,1	633,6	623,7	606,7	583,5
Spez. Verbrauch (kWh/Wkm)	2,9	2,6	2,5	2,5	2,4
Verbrauch (Strom, PJ)	6,6	6,0	5,7	5,4	5,1

Quelle: ProgTrans / Prognos 2009

Beim Eisenbahnpersonenverkehr zeigt sich im Betrachtungszeitraum ein Rückgang der Verkehrsleistung um rund 1,3 %. Der Rückgang ist hauptsächlich auf die Entwicklung im Nahverkehr zurückzuführen, bei dem die Verkehrsleistung um 5 % abnimmt. Beim Fern-

verkehr steigt die Verkehrsleistung bis 2030 noch an, sinkt danach leicht und liegt im Jahr 2050 um 4 % über dem Ausgangswert.

Aufgrund des gegenüber der Referenz nochmal stärker sinkenden spezifischen Verbrauchs sowohl beim Nahverkehr (-15 %) als auch beim Fernverkehr (-25 %) nimmt der Energieverbrauch in beiden Kategorien ab. Insgesamt reduziert sich der Energieverbrauch des Eisenbahnpersonenverkehrs im Betrachtungszeitraum um 20 % auf rund 29 PJ. Davon entfallen rund 70 % auf Strom, der Rest auf Biokraftstoff (Tabelle 5.3-33).

Tabelle 5.3-33: Szenario „Innovation“: Bestimmungsgründe und Energieverbrauch für den Eisenbahnpersonenverkehr

		Innovationsszenario				
	2005	2020	2030	2040	2050	
Nahverkehr						
Verkehrsleistung (Mrd. Pkm)						
Elektrotraktion	31,5	34,9	34,8	33,6	32,1	
Dieseltraktion	11,6	9,6	9,5	9,2	8,8	
Gesamt Verkehrsleistung	43,1	44,4	44,4	42,9	40,9	
Spezifischer Verbrauch (kJ/Pkm)						
Elektrotraktion	486	442	433	426	422	
Dieseltraktion	1.038	1.009	992	984	982	
Gesamt spez. Verbrauch	636	564	553	546	542	
Energieverbrauch (PJ)						
Strom	15,3	15,4	15,1	14,3	13,5	
Diesel (inkl. Biodiesel)	12,1	9,6	9,5	9,1	8,6	
Gesamt Energieverbrauch	27,4	25,1	24,6	23,4	22,2	
Fernverkehr						
Verkehrsleistung (Mrd. Pkm)						
Elektrotraktion	32,9	35,6	35,9	35,2	34,2	
Dieseltraktion	0,8	0,7	0,7	0,7	0,7	
Gesamt Verkehrsleistung	33,7	36,3	36,6	35,9	34,9	
Spezifischer Verbrauch (kJ/Pkm)						
Elektrotraktion	261	217	205	198	196	
Dieseltraktion	715	669	652	643	639	
Gesamt spez. Verbrauch	272	226	213	207	205	
Energieverbrauch (PJ)						
Strom	8,6	7,7	7,3	7,0	6,7	
Diesel (inkl. Biodiesel)	0,6	0,5	0,5	0,4	0,4	
Gesamt Energieverbrauch	9,2	8,2	7,8	7,4	7,1	
Personenverkehr insgesamt						
Energieverbrauch (PJ)						
Strom	23,9	23,1	22,4	21,3	20,2	
Diesel (inkl. Biodiesel)	12,7	10,1	9,9	9,5	9,1	
Gesamt Energieverbrauch	36,5	33,2	32,3	30,8	29,3	

Quelle: ProgTrans / Prognos 2009

Beim Schienengüterverkehr steigt die Transportleistung massiv an sie verdreifacht sich fast. Gemessen in Tonnenkilometern weitet sie sich bis 2050 auf knapp 280 Mrd. tkm aus (Tabelle 5.3-34). Als Folge der forcierten Verlagerung von der Straße auf die Schiene liegt

die schienengebundene Transportleistung im Innovationsszenario um rund 35 % höher als im Referenzszenario. Gegenüber dem Referenzszenario wird im Innovationsszenario von einer stärkeren technischen Effizienzsteigerung ausgegangen. Der spezifische Verbrauch verringert sich gegenüber dem Ausgangsniveau um 34 %.

Insgesamt steigt der Energieverbrauch für den Schienengüterverkehr auf knapp 32 PJ (+91 %). Die Bedeutung von Diesel nimmt ab, der Verbrauchsanteil sinkt von 22 % auf 6,5 %. Der fossile Diesel wird bis 2050 vollständig durch Biokraftstoff ersetzt.

Der Energieverbrauch für die Örtlichen Leistungen (Rangierleistungen, stationäre Anlagen) erhöht sich in der Folge von rund 17 PJ im Jahr 2007 auf 30 PJ im Jahr 2050. Für diese Verkehrsleistungen wird am Ende der Betrachtungsperiode ausschließlich Strom eingesetzt.

Tabelle 5.3-34: Szenario „Innovation“: Bestimmungsgründe und Energieverbrauch für den Schienengüterverkehr

	2005	Innovationsszenario			
		2020	2030	2040	2050
Verkehrsleistung (Mrd. tkm)					
Elektrotraktion	83	147	183	224	271
Dieseltraktion	13	10	9	8	7
Gesamt Verkehrsleistung	95	156	192	232	278
Spezifischer Verbrauch (kJ/tkm)					
Elektrotraktion	143	121	116	113	109
Dieseltraktion	368	319	309	303	297
Gesamt spez. Verbrauch	173	133	125	119	114
Energieverbrauch (PJ)					
Strom	11,8	17,7	21,2	25,2	29,6
Diesel (inkl. Biodiesel)	4,7	3,2	2,8	2,4	2,0
Gesamt Energieverbrauch	16,5	20,9	24,0	27,6	31,7
Örtliche Leistungen					
Energieverbrauch (PJ)					
Strom	16,1	20,3	22,5	25,8	30,7
Diesel (inkl. Biodiesel)	1,5	0,7	0,5	0,3	0,0
Gesamt Energieverbrauch	17,5	20,9	23,0	26,1	30,7

Quelle: ProgTrans / Prognos 2009

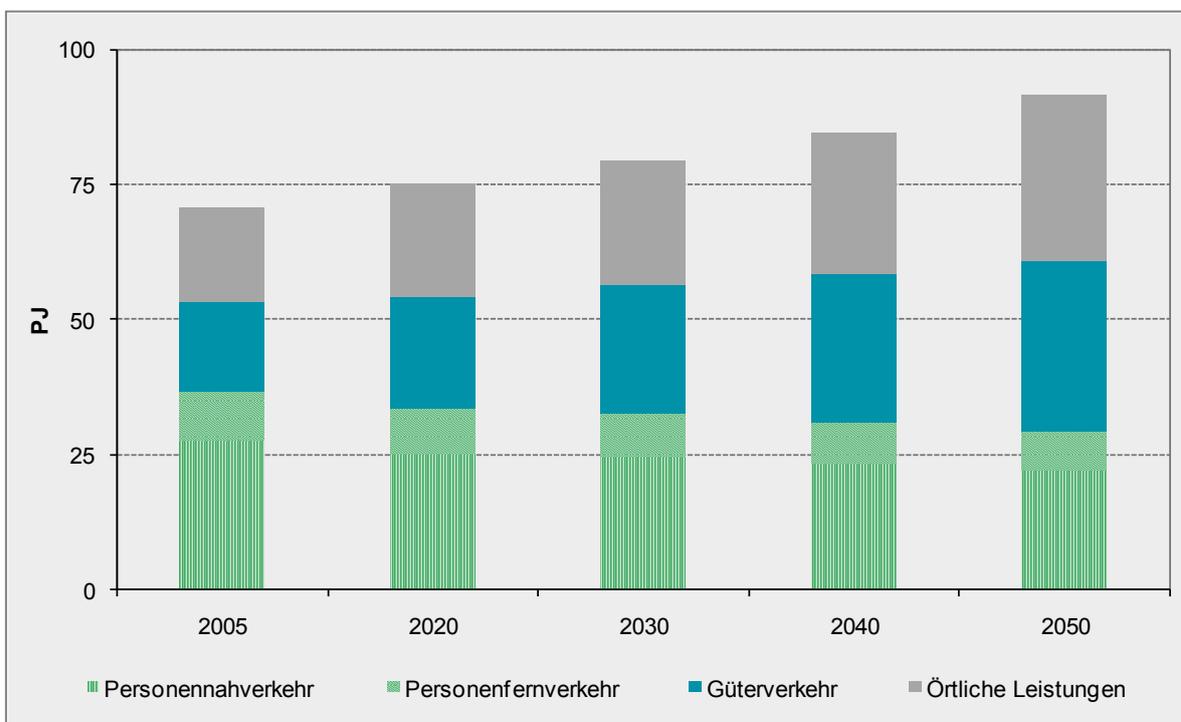
Für den gesamten Schienenverkehr (Personen und Güter) ergibt sich bis 2050 ein Zuwachs des Endenergieverbrauchs um rund 30 % auf 92 PJ (Tabelle 5.3-35). Der Stromanteil steigt von 73 % auf 89 %. Der Zuwachs ist Folge der Verbrauchszunahmen beim Güterverkehr und bei den Örtlichen Leistungen. Damit verbunden ist eine ausgeprägte Verschiebung der Anteile der Verkehrskategorien am Gesamtverbrauch: Der Anteil des Personenverkehrs (Nah und Fern) sinkt zwischen 2005 und 2050 von über 50 % auf 32 %, der Anteil des Güterverkehrs steigt von 24 % auf 35 % und der Anteil der Örtlichen Leistungen erhöht sich von 25 % auf 33 % (Abbildung 5.3-29).

Tabelle 5.3-35: Szenario „Innovation“: Energieverbrauch im Schienenverkehr insgesamt 2005 – 2050, in PJ

	Innovationsszenario				
	2005	2020	2030	2040	2050
Strom	51,7	61,1	66,2	72,3	80,5
Diesel (inkl. Biodiesel)	18,9	13,9	13,2	12,2	11,1
Gesamt Schienenverkehr	70,6	75,0	79,3	84,5	91,7
Veränderung in % p.a.		2020	2030	2040	2050
Strom		1,0	0,8	0,8	0,7
Diesel (inkl. Biodiesel)		-0,6	-0,1	-0,4	-0,9
Gesamt Energieverbrauch		0,7	0,6	0,6	0,5
Personennahverkehr	27,4	25,1	24,6	23,4	22,2
Personenfernverkehr	9,2	8,2	7,8	7,4	7,1
Güterverkehr	16,5	20,9	24,0	27,6	31,7
Örtliche Leistungen	17,5	20,9	23,0	26,1	30,7
Gesamt Energieverbrauch	70,6	75,0	79,3	84,5	91,7
nachrichtlich ÖSPNV	6,6	6,0	5,7	5,4	5,1

Quelle: ProgTrans / Prognos

Abbildung 5.3-29: Szenario „Innovation“: Energieverbrauch im Schienenverkehr nach Verwendungszweck 2005 – 2050, in PJ



Quelle: ProgTrans / Prognos 2009

5.3.4.5 Der Energieverbrauch der Binnenschifffahrt und des Luftverkehrs

Aufgrund der forcierten Substitution des Straßengüterverkehrs erhöht sich im Innovationsszenario die Transportleistung der Binnenschifffahrt stärker als im Referenzszenario. Die Verkehrsleistung der Binnenschifffahrt steigt bis ins Jahr 2050 um 48 % auf 95 Mrd. tkm. Mit einem Anteil von 9 % an der Gütertransportleistung bleibt die Bedeutung der Binnenschifffahrt beschränkt.

Bei einem Rückgang des spezifischen Verbrauchs um 31 % und einer längerfristig wieder ansteigenden inländischen Betankungsquote erhöht sich der Energieverbrauch der Binnenschifffahrt bis 2050 um 43 % auf rund 18 PJ (Tabelle 5.3-36).

Tabelle 5.3-36: Szenario „Innovation“: Bestimmungsgründe für den Energieverbrauch der Binnenschifffahrt, 2005 - 2050

	2005	Innovationsszenario			
		2020	2030	2040	2050
Verkehrsleistung (Mrd. tkm)	64	71	78	85	95
Spezifischer Verbrauch (kJ/tkm)	172	145	132	123	119
Verbrauch (Diesel inkl. Biokraftstoff, PJ)	13	15	15	16	18

Quelle: ProgTrans / Prognos 2009

Beim Luftverkehr nimmt die Personenverkehrsleistung innerhalb der Betrachtungszeit um 19 % zu. Gleichzeitig verdreifacht sich die Frachtleistung des Luftverkehrs. Diese bleibt jedoch gemessen an der gesamten Güterverkehrsleistung von geringer Bedeutung. Die technische Effizienz verbessert sich um 40 %. Das Zusammenspiel dieser Faktoren bewirkt bis 2050 eine Abnahme des Energieverbrauchs des Luftverkehrs um 10 %.

Tabelle 5.3-37: Szenario „Innovation“: Bestimmungsgründe für den Energieverbrauch des Luftverkehrs, 2005 – 2050

	2005	Innovationsszenario			
		2020	2030	2040	2050
Verkehrsleistung Personen (Mrd. Pkm)	53	67	68	66	63
Verkehrsleistung Fracht (Mrd. tkm)	1	2	2	3	3
Spezifischer Verbrauch (PJ/Mrd. Pkm-Äquivalente¹⁾)	5	5	4	4	3
Verbrauch (Flugtreibstoff, PJ)	345	383	354	336	312

¹⁾ 1tkm=10 Pkm

Quelle: ProgTrans / Prognos 2009

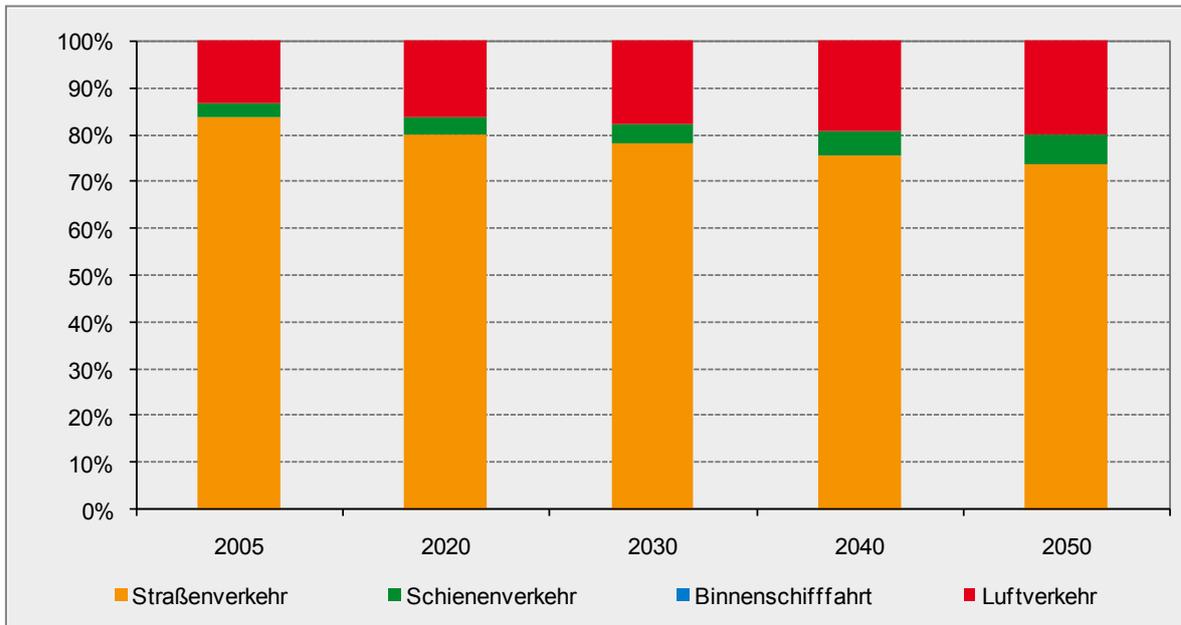
5.3.4.6 Der Endenergieverbrauch des Verkehrssektors insgesamt und nach Energieträgern

Der Energieverbrauch im Verkehrssektor verringert sich im Innovationsszenario während des Betrachtungszeitraums um rund 40 %.

Die Anteile der unterschiedenen Verkehrsträger am Energieverbrauch verschieben sich teilweise deutlich. Der Verbrauchsanteil des Straßenverkehrs sinkt um 11 %-Punkte auf 73 %, der Anteil des Luftverkehrs vergrößert sich um 7 %-Punkte auf 20 %, der Anteil des Schienenverkehrs steigt um 3,2 %-Punkte auf 6,2 %. Obwohl sich der Energieverbrauch

der Binnenschifffahrt verdoppelt, bleibt die Bedeutung dieses Verkehrsträgers gering (Abbildung 5.3-30).

Abbildung 5.3-30: Szenario „Innovation“: Anteile der Verkehrsträger am Energieverbrauch des Verkehrssektors 2005 – 2050



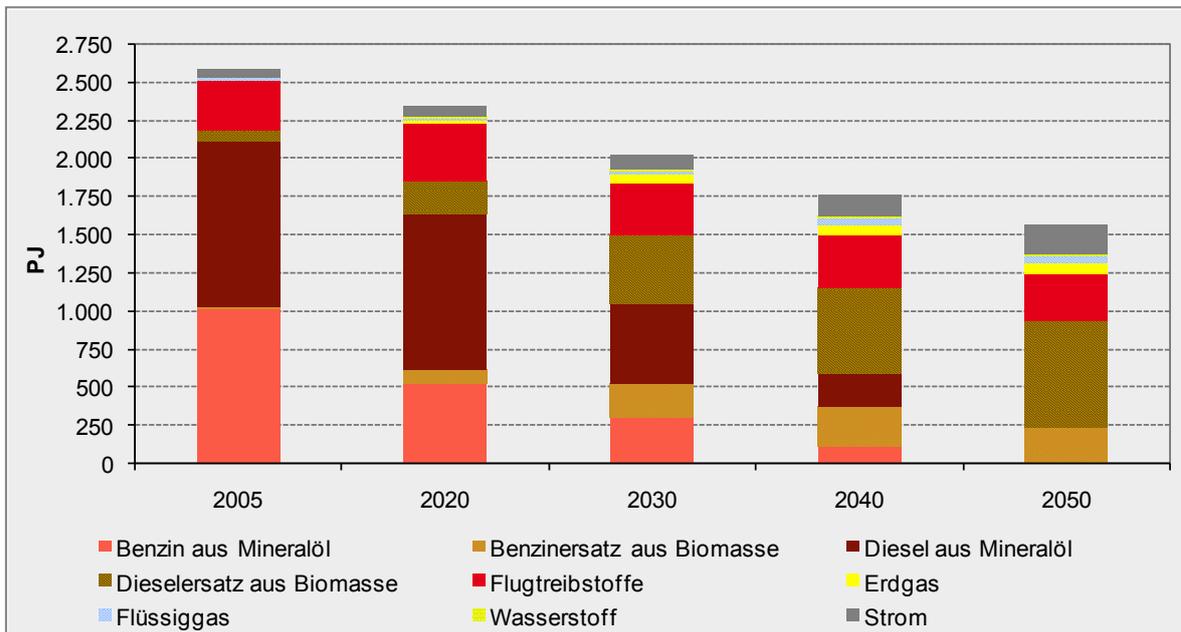
Quelle: ProgTrans / Prognos 2009

Die einzelnen Energieträger weisen unterschiedliche Entwicklungen auf (Abbildung 5.3-31 und Tabelle 5.3-38). Als Folge von effizienteren Fahrzeugen und Substitution durch andere Energieträger geht der Verbrauch an flüssigen Kraftstoffen deutlich zurück. Der Benzinverbrauch verringert sich im Betrachtungszeitraum um 77 % von 1.025 PJ auf 236 PJ. Benzin aus Mineralöl wird bis 2050 vollständig vom Markt verdrängt, anfänglich durch die Beimischung von Bioethanol, gegen Ende der Beobachtungsperiode wird ausschließlich Biokraftstoff der zweiten oder bereits der dritten Generation eingesetzt.

Der Verbrauch an Dieselmotorkraftstoff steigt bis ins Jahr 2015 noch an, zwischen 2015 und 2050 verringert sich der Dieselmotorkraftstoffverbrauch auf 661 PJ (-41 % gegenüber 2005). Analog zur Entwicklung beim Benzin wird der fossile Diesel anfänglich durch die Beimischung von Biokraftstoff und gegen Ende des Betrachtungszeitraums durch reinen Biokraftstoff verdrängt.

Die Nachfrage nach Erd- und Flüssiggas nimmt zu. Mit einem Verbrauch von 124 PJ erreichen diese Gase einen Anteil am sektoralen Gesamtverbrauch von 11 %. Der Energieträger Wasserstoff nimmt im Innovationsszenario keine bedeutende Rolle ein, sein Anteil bleibt unter 1 %.

Abbildung 5.3-31: Szenario „Innovation“: Endenergieverbrauch im Verkehr insgesamt nach Energieträgern 2005 – 2050, in PJ



Quelle: ProgTrans / Prognos 2009

Die Stromnachfrage erhöht sich im Betrachtungszeitraum um rund 221 % und liegt im Jahr 2050 bei 187 PJ. Bestimmt wird die Stromnachfrage vor allem durch den Straßenpersonenverkehr, dicht gefolgt vom Schienenverkehr. Der Verbrauch an Flugtreibstoff (Kerosin) stagniert bis ins Jahr 2025 und verringert sich danach bis 2050 auf 312 PJ (-10 %).

Tabelle 5.3-38: Szenario „Innovation“: Endenergieverbrauch im Verkehr insgesamt 2005 – 2050, in PJ

	2005	Innovationsszenario			
		2020	2030	2040	2050
Straßenverkehr					
Benzin	1.025	609	524	368	236
Benzinersatz aus Biomasse	0	87	228	257	236
Benzin aus Mineralöl	1.025	521	296	112	0
Diesel	1.124	1.207	937	757	661
Dieselersatz aus Biomasse	0	209	430	540	661
Diesel aus Mineralöl	1.124	998	507	217	0
Erdgas	2	26	50	69	68
Flüssiggas	2	19	39	59	56
Wasserstoff	0	0	0	1	10
Strom	0	1	15	59	101
Motorenöl	1	0	0	0	0
Gesamt Straßenverkehr	2.152	1.862	1.565	1.314	1.133
Schienerverkehr					
Strom	58	67	72	78	86
Diesel (inkl. Biokraftstoff)	19	14	13	12	11
Kohle	0	0	0	0	0
Gesamt Schienenverkehr	77	81	85	90	97
Binnenschifffahrt					
Diesel (inkl. Biokraftstoff)	13	15	15	16	18
Luftverkehr					
Flugtreibstoffe	345	383	354	336	312
Insgesamt Verkehr	2.587	2.341	2.019	1.756	1.560
Benzin (inkl. Bio)	1.025	609	524	368	236
Benzinersatz aus Biomasse	9	87	228	257	236
Benzin aus Mineralöl	1.015	521	296	112	0
Diesel (inkl. Bio)	1.155	1.236	965	786	691
Dieselersatz aus Biomasse	62	214	443	561	691
Diesel aus Mineralöl	1.093	1.021	522	225	0
Flugtreibstoffe	345	383	354	336	312
Erdgas	2	26	50	69	68
Flüssiggas	2	19	39	59	56
Wasserstoff	0	0	0	1	10
Strom	58	68	87	137	187
Motorenöl	1	0	0	0	0

Quelle: ProgTrans / Prognos 2009

5.3.5 Endenergieverbrauch insgesamt

Der Endenergieverbrauch nach Energieträgern entwickelt sich gemäß Tabelle 5.3-39, Tabelle 5.3-40 sowie Abbildung 5.3-32 und Abbildung 5.3-33.

Bis zum Jahr 2050 sinkt der Endenergieverbrauch stetig auf 3.857 PJ (Abnahme um 58 % gegenüber 2005) und damit um jährlich durchschnittlich 2,0 %. Nach den krisenbedingten Schwankungen steigt die jährliche Abnahme bis 2020 auf 2,3 % an, danach verringert sie sich bis 2050 auf durchschnittlich 1,6 %.

Neben dem deutlichen Rückgang des Gesamtenergieverbrauchs erfolgt eine starke Umstrukturierung des Energiemix.

Um die Ziele der CO₂-Reduzierung zu erreichen, wird der Verbrauch an Mineralölprodukten drastisch verringert. Deckten sie mit 41 % im Ausgangsjahr den größten Teil der Endenergienachfrage, reduziert sich ihr Anteil bis 2050 auf 9,4 %. Im Jahr 2050 wird Mineralöl primär als Flugtreibstoff eingesetzt, ohne den die Mineralölprodukte nur 1,6 % des Energieverbrauchs ausmachen. Während der Anteil des konventionellen Benzins und von Heizöl von Anfang an und zunehmend reduziert wird, weitet sich der Anteil von Diesel aus Mineralöl bis 2020 noch um zwei Prozentpunkte aus, bevor er mit zunehmender Geschwindigkeit sinkt.

Der Anteil der **Gas**e ändert sich nur leicht und nimmt um 7 Prozentpunkte ab (von 27 % auf 20 %).

Im Gegensatz zu Gas und Mineralölprodukten steigt der Anteil von **Strom** um 10 Prozentpunkte (von 20 % auf 30 %). Dabei verringert sich die Stromnachfrage zwischen 2005 und 2050 um knapp 38 % von 1.832 PJ auf 1.165 PJ.

Die **erneuerbaren Energien** tragen mit zunehmender Bedeutung zur Bedarfsdeckung bei. Von 2005 auf 2050 erhöht sich ihr Anteil um den Faktor 8,5 auf 36,6 %, was einem Zuwachs von 257 % gegenüber 2005 entspricht. Die größte Bedeutung innerhalb der Erneuerbaren haben 2050 die Biokraftstoffe. Sie allein decken 2050 rund ein Viertel des gesamten Endenergiebedarfs.

Beträgt im Jahr 2005 das Verhältnis der Marktanteile von Mineralölprodukten zu Gasen zu Strom zu erneuerbaren Energien in etwa 4:3:2:1/8, verschiebt sich diese Struktur bis 2050 vollständig zu 1:2:3:3,5.

Die durch **Kohle** bereitgestellte Endenergie sinkt überdurchschnittlich stark um 82 %, so dass sie 2050 nur noch 2,0 % Marktanteil besitzt.

Durch die sinkende Wärmenachfrage reduziert sich der Anteil der **Fernwärme** auf 1,9 %.

Tabelle 5.3-39: Szenario „Innovation“: Endenergieverbrauch nach Energieträgern und Sektoren 2005 - 2050, in PJ

	Innovationsszenario				
	2005	2020	2030	2040	2050
nach Energieträgern					
Kohle	400	262	168	110	77
Steinkohle	341	224	138	86	55
Braunkohle	59	38	29	24	22
Mineralölprodukte	3.798	2.627	1.504	809	363
Heizöl leicht	1.151	574	256	96	36
Heizöl schwer	67	39	24	16	11
Benzin aus Mineralöl	1.033	534	303	115	0
Diesel aus Mineralöl	1.202	1.097	566	246	4
Flugtreibstoff	345	383	354	336	312
übrige Mineralölprodukte	1	0	0	0	0
Gase	2.482	1.705	1.142	880	766
Erdgas, andere Naturgase	2.359	1.606	1.050	783	671
Sonstige Gase	123	99	92	97	95
darunter Gichtgas	77	49	33	24	18
Erneuerbare Energien	396	804	1.297	1.409	1.412
Biomasse	178	189	171	122	66
Umweltwärme	68	104	124	122	106
Solarenergie	73	187	279	287	247
Biokraftstoff	77	318	708	867	987
Biogas	0	7	16	11	5
Strom	1.832	1.517	1.320	1.224	1.165
Fernwärme	300	229	165	113	74
Insgesamt Endenergieverbrauch	9.208	7.144	5.596	4.546	3.857
nach Verbrauchssektoren					
Private Haushalte	2.735	2.003	1.465	1.017	662
Dienstleistungen	1.462	1.031	720	574	486
Industrie	2.424	1.769	1.391	1.199	1.149
Verkehr	2.587	2.341	2.019	1.756	1.560

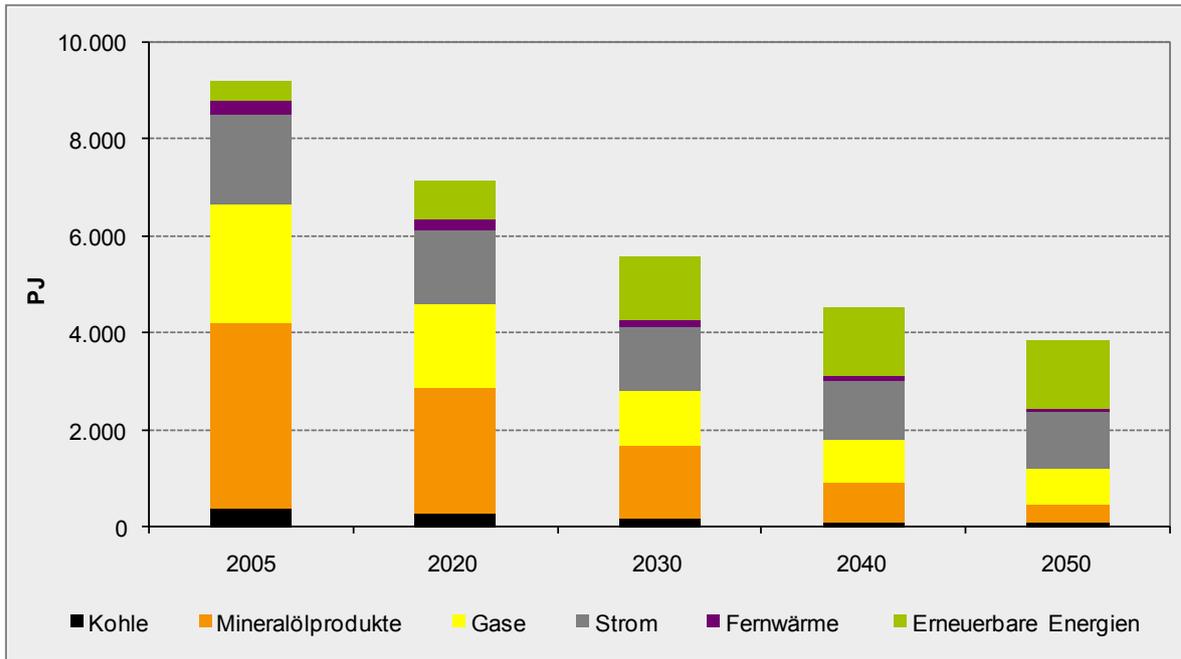
Quelle: ProgTrans / Prognos 2009

Tabelle 5.3-40: Szenario „Innovation“: Struktur des Endenergieverbrauchs nach Energieträgern und Sektoren 2005 - 2050, in %

Struktur in %	2005	2020	2030	2040	2050
nach Energieträgern					
Kohle	4,3	3,7	3,0	2,4	2,0
Steinkohle	3,7	3,1	2,5	1,9	1,4
Braunkohle	0,6	0,5	0,5	0,5	0,6
Mineralölprodukte	41,2	36,8	26,9	17,8	9,4
Heizöl leicht	12,5	8,0	4,6	2,1	0,9
Heizöl schwer	0,7	0,5	0,4	0,3	0,3
Benzin aus Mineralöl	11,2	7,5	5,4	2,5	0,0
Diesel aus Mineralöl	13,1	15,4	10,1	5,4	0,1
Flugtreibstoff	3,7	5,4	6,3	7,4	8,1
andere Mineralölprodukte	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Gase	27,0	23,9	20,4	19,4	19,9
Erdgas, andere Naturgase	25,6	22,5	18,8	17,2	17,4
Sonstige Gase	1,3	1,4	1,6	2,1	2,5
darunter Gichtgas	0,8	0,7	0,6	0,5	0,5
Erneuerbare Energien	4,3	11,3	23,2	31,0	36,6
Biomasse	1,9	2,6	3,0	2,7	1,7
Umweltwärme	0,7	1,4	2,2	2,7	2,7
Solarenergie	0,8	2,6	5,0	6,3	6,4
Biokraftstoff	0,8	4,4	12,7	19,1	25,6
Biogas	0,0	0,1	0,3	0,2	0,1
Strom	19,9	21,2	23,6	26,9	30,2
Fernwärme	3,3	3,2	2,9	2,5	1,9
Insgesamt Endenergieverbrauch	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
nach Verbrauchssektoren					
Private Haushalte	29,7	28,0	26,2	22,4	17,2
Dienstleistungen	15,9	14,4	12,9	12,6	12,6
Industrie	26,3	24,8	24,9	26,4	29,8
Verkehr	28,1	32,8	36,1	38,6	40,4

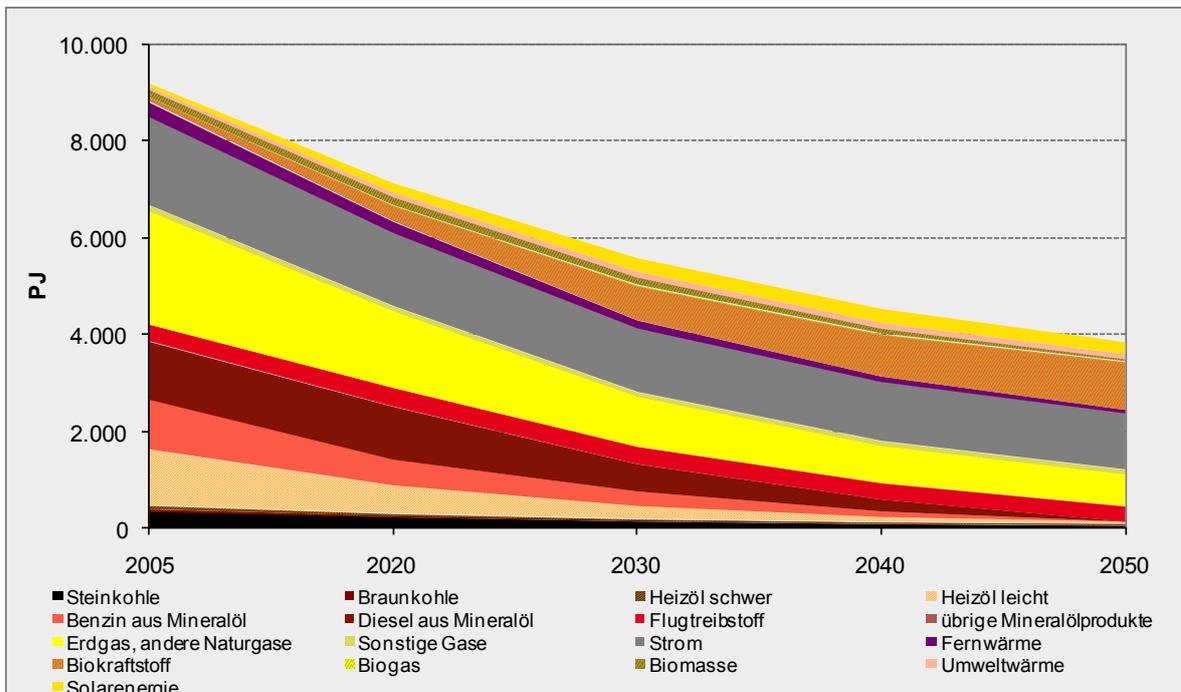
Quelle: ProgTrans / Prognos 2009

Abbildung 5.3-32: Szenario „Innovation“: Endenergieverbrauch nach Energieträgergruppen 2005 – 2050, in PJ



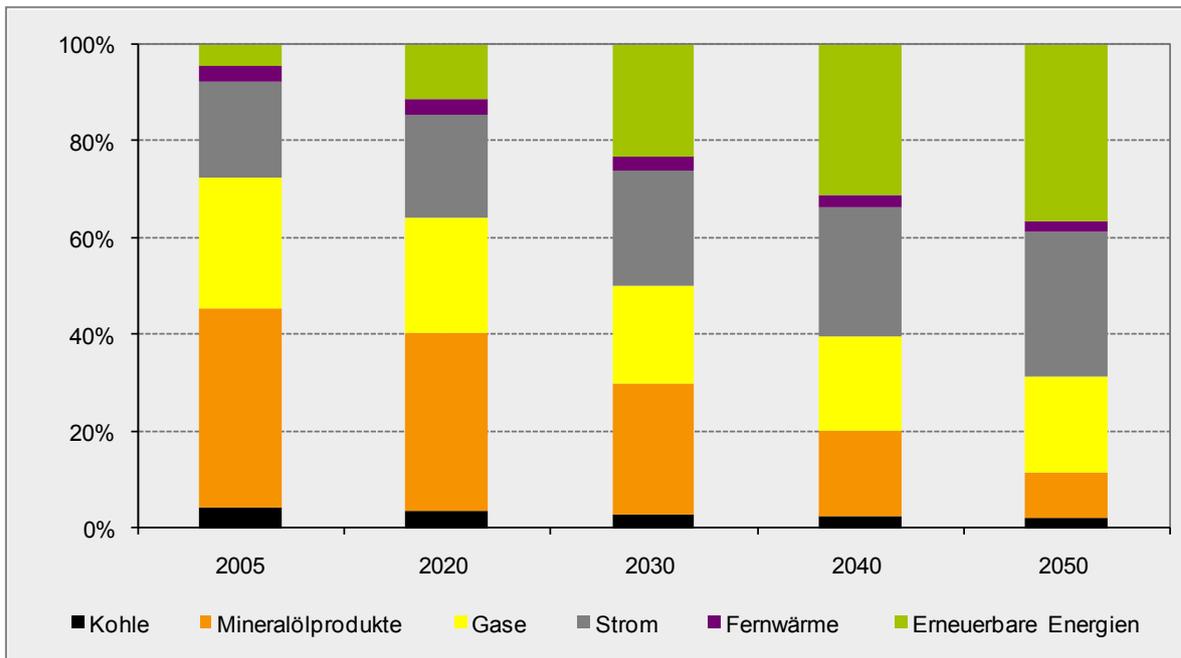
Quelle: ProgTrans / Prognos 2009

Abbildung 5.3-33: Szenario „Innovation“: Endenergieverbrauch nach Energieträgern 2005 – 2050, in PJ



Quelle: ProgTrans / Prognos 2009

Abbildung 5.3-34: Szenario „Innovation“: Struktur des Endenergieverbrauchs nach Energieträgergruppen 2005 – 2050, in %

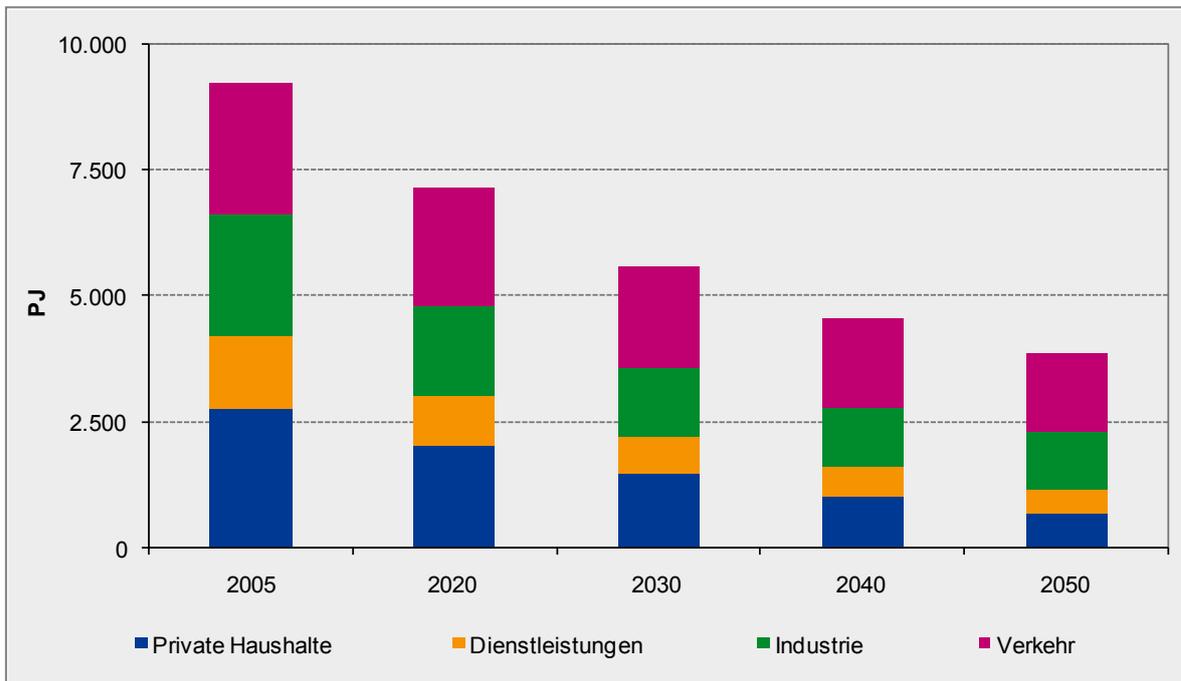


Quelle: ProgTrans / Prognos 2009

Die Entwicklung des Endenergieverbrauchs verläuft in den einzelnen Sektoren unterschiedlich: Absolut (-2.073 PJ) und relativ (76 %) erfolgt die größte Endenergieeinsparung zwischen 2005 und 2050 im Sektor private Haushalte. Dies liegt vor allem an der systematischen Reduktion des Raumwärmebedarfs in nahezu allen neuen und bestehenden Gebäuden. Der Dienstleistungssektor reduziert seinen Verbrauch um 67 %, im Wesentlichen aus demselben Grund. Darüber hinaus gibt es dort Prozessverschiebungen, vor allem im Wärmebereich. Im der Industrie beträgt die Verbrauchsreduktion 53 %, im Verkehrssektor 47 %.

Durch diese Veränderungen verschieben sich die relativen Gewichte am Endenergieverbrauch deutlich: Ausgehend von einer relativ gleichmäßigen Verteilung (Dienstleistungssektor mit 15 % mit geringstem Anteil) im Jahr 2005 gewinnen die Industrie (30 %) und der Verkehrssektor (40 %) Anteile, die Bedeutung von Privathaushalten (17 %) und Dienstleistungen (13 %) geht zurück.

Abbildung 5.3-35: Szenario „Innovation“: Endenergieverbrauch nach Nachfragesektoren 2005 – 2050, in PJ



Quelle: ProgTrans / Prognos 2009

5.3.6 Stromerzeugung

5.3.6.1 Entwicklung des Kraftwerksparks

Primäres Ziel ist in den Varianten „Innovation ohne CCS“ und „Innovation mit CCS“ die Reduktion der CO₂-Emissionen. Die Erneuerbaren werden in Deutschland weiter dynamisch ausgebaut, und der Stromimport von erneuerbar erzeugtem Strom, vor allem aus solarthermischen Kraftwerken, nimmt deutlich stärker zu als in den Referenzszenarien.

Auch die Innovations-Varianten unterscheiden zwischen zwei Entwicklungspfaden hinsichtlich der Einführung der CCS-Technologie zur CO₂-Abscheidung. In der Variante „Innovation ohne CCS“ wird davon ausgegangen, dass die CCS-Technologie in Deutschland nicht in die konventionelle Stromerzeugung eingeführt wird.

In der Variante „Innovation mit CCS“ hingegen steht diese Technologie ab 2025 technisch ausgereift zur Verfügung und ist – bei der unterstellten Entwicklung der CO₂-Preise – wirtschaftlich.

Hinsichtlich der Ausbaupfade für die zentrale und dezentrale KWK sowie für die Erneuerbaren gehen beide Varianten wiederum von den gleichen Annahmen aus. Deutliche Unterschiede ergeben sich in der langfristigen Struktur des konventionellen Kraftwerksparks, im Ausbaupfad für die erneuerbaren Energien und beim Stromimport aus erneuerbaren Quellen.

Der Stromimport ergibt sich als Residualgröße aus der Nachfrage, der Entwicklung der Erneuerbaren, der Entwicklung der für die Regelenergie notwendigen Gas- und Speicherkraftwerke sowie im Fall „mit CCS“ der Entwicklung der konventionellen Kraftwerke mit CCS. Es wird davon ausgegangen, dass es sich bei den Importen um Strom aus erneuerbaren Quellen handelt.

5.3.6.1.1 KWK

Die Stromerzeugung in zentralen und dezentralen KWK-Anlagen erfolgt wärmegeführt. Aufgrund des deutlich sinkenden Wärme- und Strombedarfs in den Endenergiesektoren nimmt die Erzeugung von KWK-Strom in den Varianten „Innovation ohne CCS“ und „Innovation mit CCS“ zwischen 2005 und 2050 um mehr als die Hälfte ab. Sie sinkt von 68 TWh im Jahr 2005 bis 2050 auf 28 TWh. Die installierte Kapazität ist im Kraftwerksmo- dell den entsprechenden Energieträgern, vor allem Erdgas und Biomasse, zugeordnet.

5.3.6.1.2 Ausbau der erneuerbaren Energien

Grundlage des Ausbaupfads für die erneuerbaren Energien in der Stromerzeugung ist in den Varianten „Innovation ohne CCS“ und „Innovation mit CCS“ jeweils das Leitszenario (Nitsch/DLR 2008). Allerdings ergaben die Analysen in den Verbrauchssektoren, dass für die Biomassenutzung ein Zielkonflikt hinsichtlich der am besten geeigneten Verwendung besteht.

Wegen der begrenzten Möglichkeiten, fossile Flüssigkraftstoffe im Verkehrssektor, und hier insbesondere im Gütertransport und im Luftverkehr, durch Strom zu substituieren, wird bei der Stromerzeugung aus Biomasse vom Ausbaupfad des Leitszenarios abgewichen. Obwohl Biomasse energetisch am sinnvollsten in der gekoppelten Strom- und Wärmeerzeugung einsetzbar ist, wird ein größerer Anteil dem Verkehrssektor für Biokraftstoffe zugeschlagen, um die Gesamtbilanz der CO₂-Emissionen zu verbessern. Die Varianten „Innovation ohne CCS“ und „Innovation mit CCS“ weichen aus diesem Grund für das Jahr 2050 von dem ambitionierten Leitszenario für die Stromerzeugung aus Biomasse um etwa 12,5 TWh (23 %) nach unten ab.

Wegen des geringen Nettostromverbrauchs in den Endenergiebedarfssektoren werden auch die Potenziale für den Import erneuerbar erzeugten Stroms, vor allem aus solarthermischen Kraftwerken, im Vergleich zum Leitszenario nicht komplett ausgeschöpft. Stattdessen werden zunächst die einheimischen Potenziale genutzt. Die Variante „Innovation ohne CCS“ bleibt im Jahr 2050 um rund 41 TWh (ein Drittel) hinter den im Leitszenario genannten Werten zurück, die Variante „Innovation mit CCS“ sogar um rund 70 TWh (58 %).

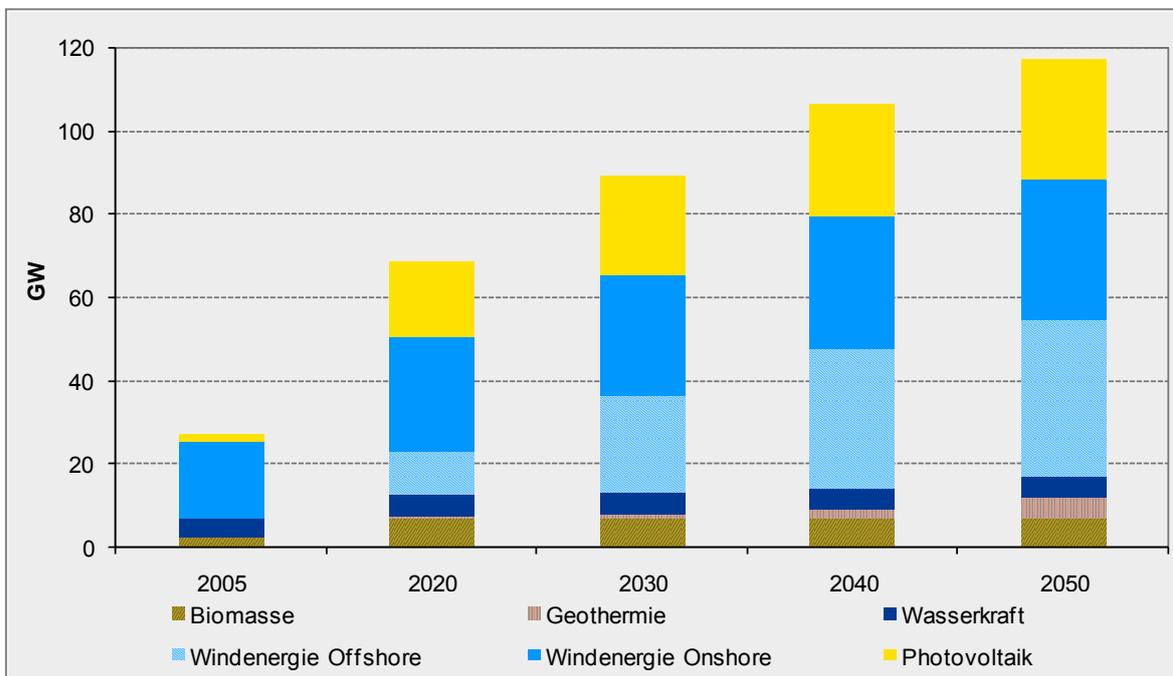
In der Variante „Innovation ohne CCS“ steigt die in Deutschland installierte Leistung für die Stromerzeugung aus Erneuerbaren zwischen 2005 und 2050 um den Faktor 4,3, von 27,1 GW auf 117,0 GW (vgl. Tabelle 5.3-41, Abbildung 5.3-36). Die Entwicklung im Einzelnen:

- Wasserkraft legt um 13 % von 4,6 GW auf 5,2 GW zu,
- Windkraft steigt um fast einen Faktor vier von 18,4 GW auf 71,0 GW, hiervon allein 37,6 GW in Offshore-Anlagen,
- Photovoltaik steigt um den Faktor 15 von 1,9 GW auf 29,0 GW,
- Biomasse wird um einen Faktor 3 von 2,2 GW auf 6,7 GW ausgebaut und unterschreitet damit den Ausbaupfad des Szenarios „Referenz“,
- Geothermie erreicht eine installierte Leistung von 5,1 GW.

Die gesicherte Leistung der erneuerbaren Energien nimmt im Prognosezeitraum ebenfalls zu. Da der Schwerpunkt des Zubaus bei den Erneuerbaren auf Windkraft und Photovoltaik entfällt, deren fluktuierende Erzeugung nur wenig zur gesicherten Leistung beiträgt, ist die Zunahme jedoch begrenzt. Von etwa 6,0 GW im Jahr 2005 steigt sie in der Variante „Innovation ohne CCS“ bis 2050 in Deutschland um den Faktor 3,5 auf etwa 20 GW. Durch den Import erneuerbar erzeugten Stroms in Höhe von 48,1 TWh im Jahr 2050 erhöht sich die gesicherte Leistung dann bis auf 26,8 GW.

Der starke Ausbau der Stromerzeugung aus fluktuierenden Erneuerbaren (Wind, Photovoltaik) stellt mit seinem steigenden Regelenenergiebedarf besondere Ansprüche an den Ausbau der Speicherkapazität.

Abbildung 5.3-36: Variante „Innovation ohne CCS“: Installierte Leistung erneuerbarer Energien 2005 - 2050, in GW



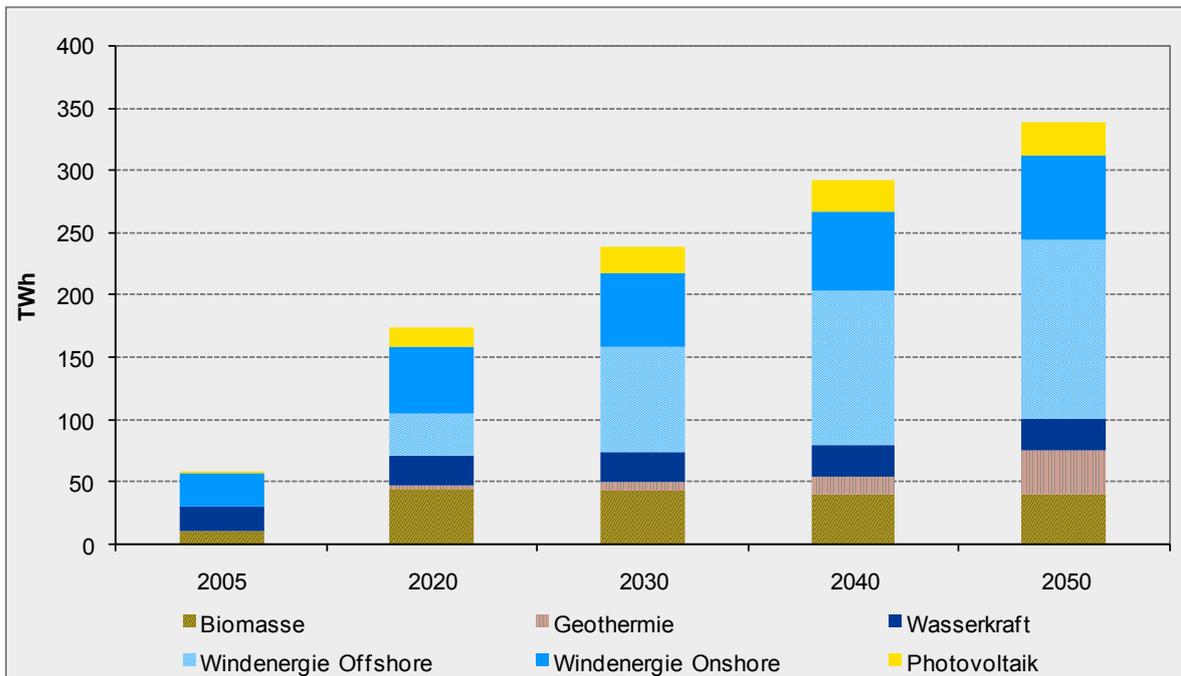
Quelle: Prognos 2009

Zusätzlich zu den heute vorhandenen Pumpspeichern müssen weitere Kapazitäten zum Ausgleich der Ungleichzeitigkeit von Erzeugung und Bedarf geschaffen werden. Da die Potenziale für Pumpspeicherkraftwerke in Deutschland nahezu erschöpft sind, wird zunehmend auf andere Stromspeichertechniken wie beispielsweise Druckluftspeicher zurückgegriffen. Diese haben jedoch in der Regel niedrigere Wirkungsgrade, also ein schlechteres Verhältnis zwischen eingespeistem und ausgespeistem Strom, als die Pumpspeicher. Deshalb sinkt langfristig der mittlere Jahresnutzungsgrad der Speicherkraftwerke. Insgesamt steigt der Bedarf an Speicherkapazität in Deutschland im Szenario „Innovation ohne CCS“ zwischen 2005 und 2050 um den Faktor 3,8 von 5,4 GW auf 20,4 GW. Die Abgabemenge (Nettostromerzeugung) der Speicher steigt von 7,1 TWh im Jahr 2005 bis 2050 auf 54,7 TWh.

In der Variante „Innovation ohne CCS“ nimmt die Stromerzeugung aus Erneuerbaren zwischen 2005 und 2050 von 60 TWh um den Faktor 5,6 bis auf 339 TWh zu (vgl. Tabelle 5.3-41, Abbildung 5.3-37). Die Entwicklung im Einzelnen:

- Strom aus Wasserkraft legt um 27 % von 19,6 TWh auf 24,8 TWh zu,
- die Erzeugung aus Windkraft steigt um den Faktor 6,7 von 27,2 TWh auf 209,3 TWh,
- Photovoltaikstrom erhöht sich um den Faktor 22 von 1,2 TWh auf 27,7 TWh,
- die Biomasseverstromung wächst um einen Faktor 2,4 von 12 TWh auf 41,3 TWh und
- Geothermie steuert 35,7 TWh zur Stromerzeugung des Jahres 2050 bei.

Abbildung 5.3-37: Variante „Innovation ohne CCS“: Nettostromerzeugung erneuerbarer Energien 2005 - 2050, in TWh



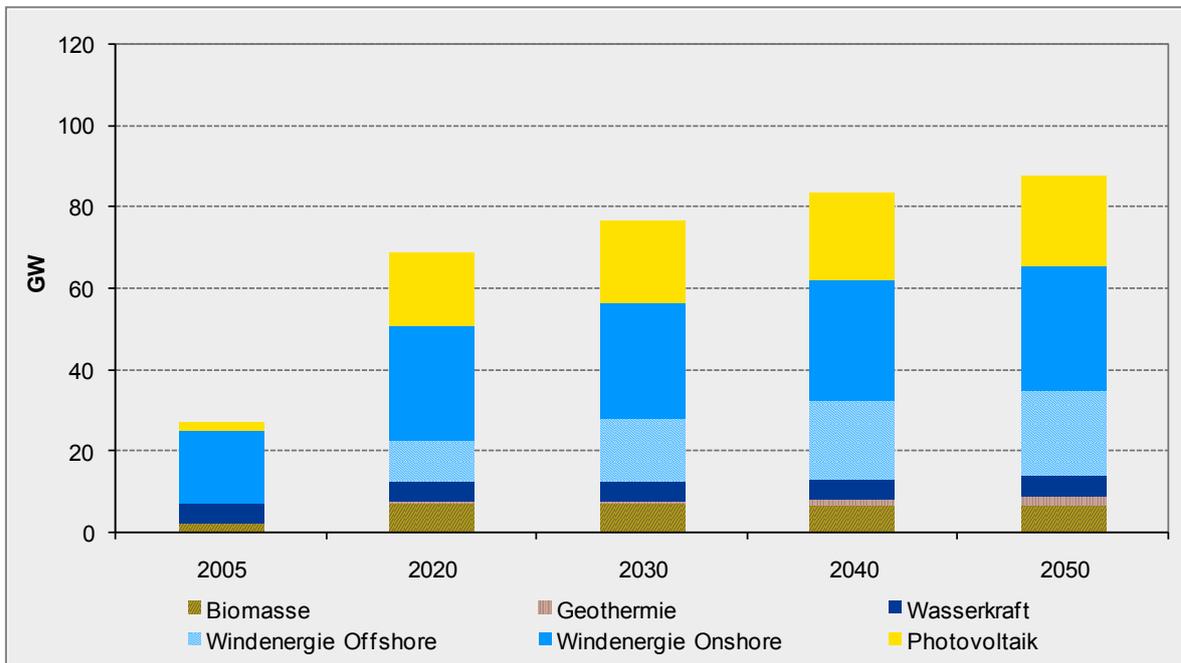
Quelle: Prognos 2009

Dass die in der Variante „Innovation ohne CCS“ weitgehend übernommenen, ambitionierten Ziele des Ausbauszenarios [Nitsch/DLR 2008] erreicht werden, ist aufgrund der bereits bei der Variante „Referenz ohne CCS“ dargestellten Umsetzungshemmnisse nicht sicher.

In der Variante „Innovation mit CCS“ steht deshalb neben dem Einsatz erneuerbarer Energien mit der CCS-Technologie eine zusätzliche Möglichkeit zur Verfügung, emissionsarm Strom zu produzieren. Insgesamt steigt in der Variante „Innovation mit CCS“ die installierte Leistung zur Stromerzeugung aus Erneuerbaren in Deutschland von 21,7 GW im Jahr 2005 auf rund 87,6 GW im Jahr 2050 (Faktor 4). Im Vergleich zur Variante „Innovation ohne CCS“ liegen die Ausbaupfade der Windkraft (Offshore), der Photovoltaik und der Geothermie deutlich niedriger. Insgesamt werden die Erneuerbaren aber deutlich stärker ausgebaut als in den Szenarien „Referenz ohne CCS“ und „Referenz mit CCS“. Die Entwicklung im Einzelnen:

- Wasserkraft legt um 12 % von 4,6 GW auf knapp 5,2 GW zu,
- Windkraft steigt um den Faktor 2,8 von 22,2 GW auf 51,2 GW, hiervon 21,0 GW in Offshore-Anlagen,
- die Photovoltaikkapazität wird um den Faktor 10 von 1,9 GW auf 22,3 GW aufgestockt,
- Biomasse wird wie in der Variante „Innovation ohne CCS“ um einen Faktor 3 von 2,2 GW auf 6,7 GW ausgebaut,
- Geothermie erreicht eine installierte Leistung von 2,2 GW.

Abbildung 5.3-38: Variante „Innovation mit CCS“: Installierte Leistung erneuerbarer Energien 2005 - 2050, in GW



Quelle: Prognos 2009

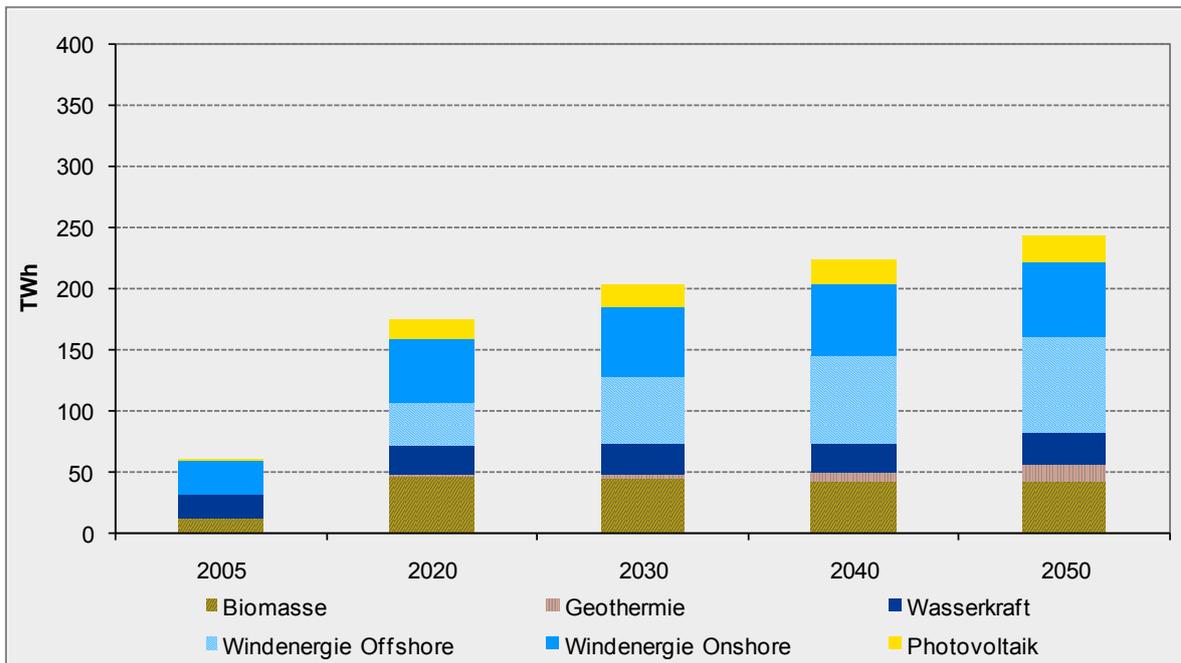
Die gesicherte Leistung aus Erneuerbaren steigt in der Variante „Innovation mit CCS“ durch den verminderten Kapazitätsausbau ebenfalls in geringerem Umfang. Von etwa 6 GW im Jahr 2005 steigt sie bis 2050 auf etwa 15,5 GW. Durch den Import erneuerbar erzeugten Stroms in Höhe von 51 TWh im Jahr 2050 nimmt die gesicherte Leistung dann bis auf 22,6 GW zu.

In der Variante „Innovation mit CCS“ fällt der Ausbau der Erneuerbaren geringer aus als in der Variante „Innovation ohne CCS“. Dementsprechend ist der Regelenergiebedarf niedriger und der Ausbau der Speicherkapazität ist in geringerem Umfang notwendig. Auch in dieser Variante wird zunehmend auf andere Techniken als Pumpspeicher zurückgegriffen, wie beispielsweise Druckluftspeicher. Insgesamt steigt der Bedarf an Speicherkapazität in Deutschland in der Variante „Innovation mit CCS“ zwischen 2005 und 2050 um den Faktor 2,4 von 5,4 GW auf 12,9 GW. Die Abgabemenge (Nettostromerzeugung) der Speicher steigt von 14,8 TWh bis zum Jahr 2050 auf 36,5 TWh.

In der Variante „Innovation mit CCS“ entwickelt sich die Stromerzeugung aus Erneuerbaren zwischen 2005 und 2050 wegen des geringeren Kapazitätszuwachses insgesamt langsamer als in der Variante „Innovation ohne CCS“. Sie steigt von 60 TWh im Jahr 2005 bis 2050 um den Faktor 4 auf 243 TWh (vgl. Abbildung 5.3-39). Die Entwicklung im Einzelnen:

- Strom aus Wasserkraft legt um 25 % von 19,6 TWh auf 24,6 TWh zu,
- die Erzeugung aus Windkraft steigt um den Faktor 5 von 27,2 TWh auf 140,1 TWh,
- Photovoltaikstrom steigt um den Faktor 17 von 1,2 TWh auf 21,3 TWh,

Abbildung 5.3-39: Variante „Innovation mit CCS“: Nettostromerzeugung erneuerbarer Energien 2005 - 2050, in TWh



Quelle: Prognos 2009

- die Biomasseverstromung wächst um einen Faktor 3,5 von 12 TWh auf 41,3 TWh,
- Geothermie steuert im Jahr 2050 mit 15,5 TWh deutlich weniger zur Stromerzeugung bei als in der Variante „Innovation ohne CCS“.

5.3.6.1.3 Neubau konventioneller Kraftwerke

Der Neubau von konventionellen Kraftwerken orientiert sich in den Varianten „Innovation ohne CCS“ und „Innovation mit CCS“ einerseits an der Sicherung der jährlichen Spitzenlast und andererseits am Ziel der CO₂-Vermeidung. Der Zubau und Abgang erfolgt nach der Grenzkostenlogik der jetzigen Marktmechanismen. Die Volllaststunden der einzusetzenden konventionellen Kraftwerke entwickeln sich entsprechend dem Leistungsbedarf bei dem vorgegebenen Ausbaupfad der erneuerbaren Energien. Davon hängt die Wirtschaftlichkeit des Kraftwerkseinsatzes entscheidend ab. In den im Folgenden zu beiden Varianten aufgeführten neu errichteten Kraftwerkskapazitäten sind die heute bereits im Bau befindlichen Kraftwerke (vgl. Kapitel 2) enthalten.

In der Variante „Innovation ohne CCS“ wird zwischen den Jahren 2008 und 2050 insgesamt 24,2 GW neue konventionelle Kraftwerkskapazität errichtet. Erdgaskraftwerke stellen mit 12,4 GW mehr als die Hälfte der neu installierten Leistung. Auf konventionelle Steinkohlekraftwerke entfallen weitere 6,6 GW, auf Braunkohlekraftwerke 5,3 GW. Hier von sind neun Kraftwerksblöcke bereits geplant oder im Bau mit einer Leistung von insgesamt knapp 9,4 GW. Darüber hinaus errechnet das Modell aufgrund der Logik der Merit Order einen Zubau von Kraftwerken auf Braunkohlebasis um insgesamt knapp 4 GW im Zeitraum von 2013 bis 2029 erstellt werden. Diese zusätzlichen Kraftwerke emittieren während ihrer Laufzeit bis zur wirtschaftlichkeitsbedingten Abschaltung bis zu 22,5 Mio. t

CO₂ pro Jahr, kumuliert emittieren sie während ihrer Lebensdauer knapp 600 Mio. t CO₂ und belasten so das von Deutschland in Anspruch genommene Carbon Budget. Wenn diese Leistung und Arbeit aus Gaskraftwerken bereit gestellt würde, würden sich die während der Lebensdauer ausgestoßenen CO₂-Emissionen um 350 Mio. t auf 250 Mio. t reduzieren.

In der Variante „Innovation mit CCS“ werden mit insgesamt 34,8 GW deutlich mehr konventionelle Kraftwerke errichtet. Dabei handelt es sich vor allem um zusätzliche Braunkohle-CCS-Anlagen (10 GW) und Steinkohle-CCS-Anlagen (3 GW), die in diesem Szenario zur CO₂-Reduktion beitragen. Im Gegenzug werden mit 9,7 GW weniger Gaskraftwerke errichtet, auch weil der Bedarf an Regelernergie geringer ausfällt.

5.3.6.2 Ergebnisse Variante „Innovation ohne CCS“

5.3.6.2.1 Arbeit

Der Nettostromverbrauch geht in der Variante „Innovation ohne CCS“ zwischen 2005 und 2050 um 20 % auf 453 TWh zurück. Ausschlaggebend hierfür ist der sinkende Endenergieverbrauch von Strom in den Sektoren private Haushalte, Dienstleistungen, Industrie und Verkehr auf 330 TWh (vgl. Kapitel 5.3.5). Rückläufig ist auch der Verbrauch des Umwandlungssektors (Raffinerien, Fernwärmeerzeugung, Braunkohletagebaue etc.). Die Transportverluste im Stromnetz (Leistungsverluste) sinken wegen der abnehmenden Transportmenge ebenfalls leicht. Stark steigt der Stromverbrauch der Speicher.

Der Import erneuerbar erzeugten Stroms, nimmt spürbar zu. Ab dem Jahr 2021 übersteigen die Stromimporte den im Ausgangsjahr 2005 noch vorherrschenden Stromexport. Im Jahr 2050 erreicht der Importsaldo 48 TWh.

Vor diesem Hintergrund sinkt die erforderliche Nettostromerzeugung in Deutschland zwischen 2005 und 2050 von 583 TWh um ein Drittel auf 405 TWh.

Tabelle 5.3-41: Variante „Innovation ohne CCS“: Nettostromverbrauch und -erzeugung 2005 – 2050, in TWh

	Innovationsszenario ohne CCS				
	2005	2020	2030	2040	2050
Endenergieverbrauch Strom	517	423	370	345	330
Verbrauch im Umwandlungsbereich	16	14	13	10	8
Leistungsverluste	29	26	25	25	25
Speicherstromverbrauch (Pump. etc.)	11	21	35	56	90
Nettostromverbrauch	573	485	443	436	453
Importsaldo*	-9	0	15	33	48
Nettostromerzeugung	583	485	428	403	405

*ab 2021 Import von erneuerbar erzeugtem Strom

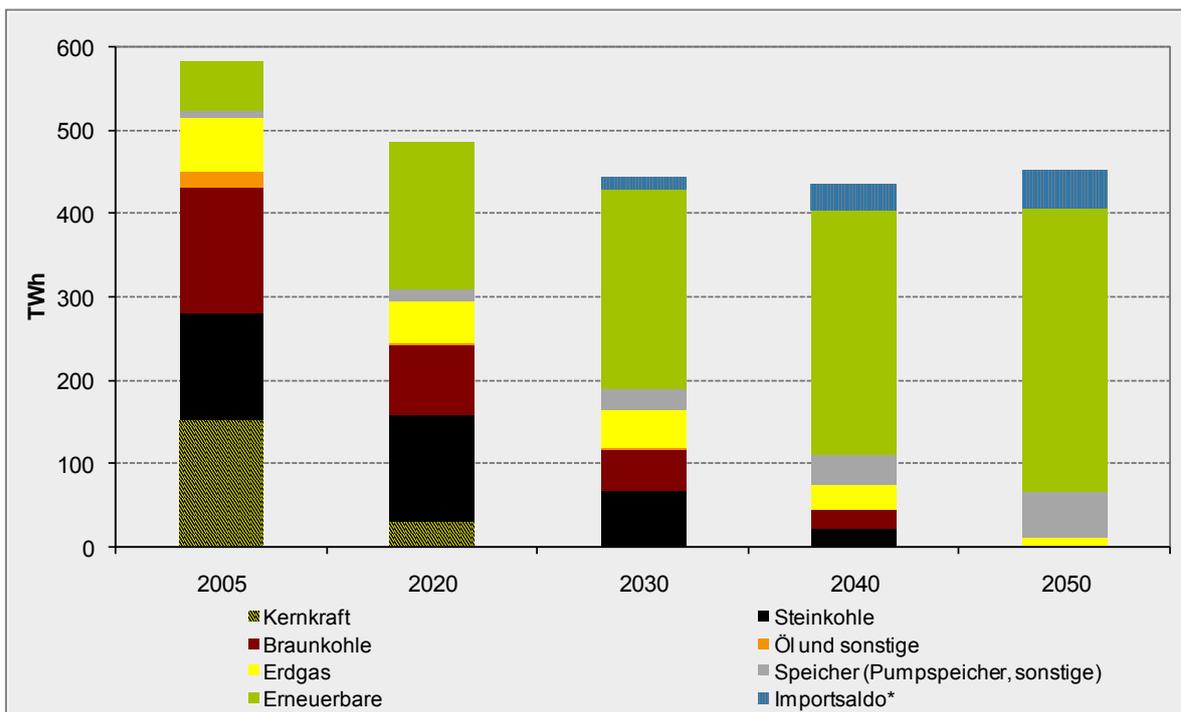
Quelle: Prognos 2009

Die Nettostromerzeugung des gesamten Kraftwerksparks incl. Speicher geht in der Variante „Innovation ohne CCS“ in Deutschland bis zum Jahr 2050 insgesamt um ein Drittel zurück. Die Erneuerbaren können ihren Anteil an der Nettostromerzeugung in Deutschland verachtfachen. Insbesondere die Offshore-Windkraft trägt stark zu diesem Wachstum bei (vgl. zu Einzelergebnissen auch Tabelle 5.2-3).

- Es wird 2050 kein Strom mehr aus Stein- und Braunkohlekraftwerken erzeugt. Wie oben ausgeführt, geht das letzte Braunkohlekraftwerk 2047 nach einer Betriebsdauer von 18 Jahren vom Netz.
- Die Stromerzeugung aus Erdgas geht bis 2050 um 83 % gegenüber 2005 zurück. Ihr Anteil, der vor allem noch als Regelenergie und in geringem Umfang in der Kraft-Wärme-Kopplung genutzt wird, schrumpft von 11,5 % bis auf 2,8 %.
- Die Speicher übernehmen die führende Rolle bei der Absicherung der fluktuierenden Einspeisung aus Erneuerbaren. Ihr Anteil an der Nettostromerzeugung wächst von 1,2 % auf 13,5 %.
- Die Stromerzeugung erfolgt im Jahr 2050 in Deutschland zu 83,7 % auf Basis erneuerbarer Energien. Gegenüber ihrem Anteil von 14,5 % im Jahr 2005 bedeutet dies eine Steigerung um den Faktor 8.

Betrachtet man bei der dargestellten Nettostromerzeugung allein die primäre Stromerzeugung und lässt die Zwischenspeicher für Strom als sekundäre Erzeugungsanlagen außer Acht, erhöht sich der Anteil der Erneuerbaren nochmals deutlich.

Abbildung 5.3-40: Variante „Innovation ohne CCS“: Nettostromerzeugung des deutschen Kraftwerksparks 2005 - 2050, in TWh



*ab 2021 Import von erneuerbar erzeugtem Strom

Quelle: Prognos 2009

Bei der Primärerzeugung basieren im Jahr 2050 insgesamt 96,7 % der gesamten Stromerzeugung in Deutschland auf Erneuerbaren.

5.3.6.2.2 Leistung

Der rückläufige Nettostromverbrauch vermindert langfristig auch die jährlich auftretende Spitzenlast im deutschen Stromnetz, die durch gesicherte Erzeugungskapazität aus Er-

neuerbaren (mit Import), Speichern und konventionellen Kraftwerken gedeckt werden muss (vgl. Tabelle 5.3-48). Die bei den Erneuerbaren im Vergleich zur jährlichen Stromerzeugung niedrige gesicherte Leistung wirkt sich negativ auf die Spitzenlastdeckung aus. Der Ausbau der Erneuerbaren Wind und Photovoltaik hat zur Folge, dass vermehrt Regenergiekapazitäten, vor allem Speicher, zugebaut werden müssen. Bei der Modellierung des Kraftwerksparks wurde dieser Effekt berücksichtigt.

Tabelle 5.3-43: Variante „Innovation ohne CCS“: Spitzenlast und gesicherte Leistung 2005 – 2050, in GW

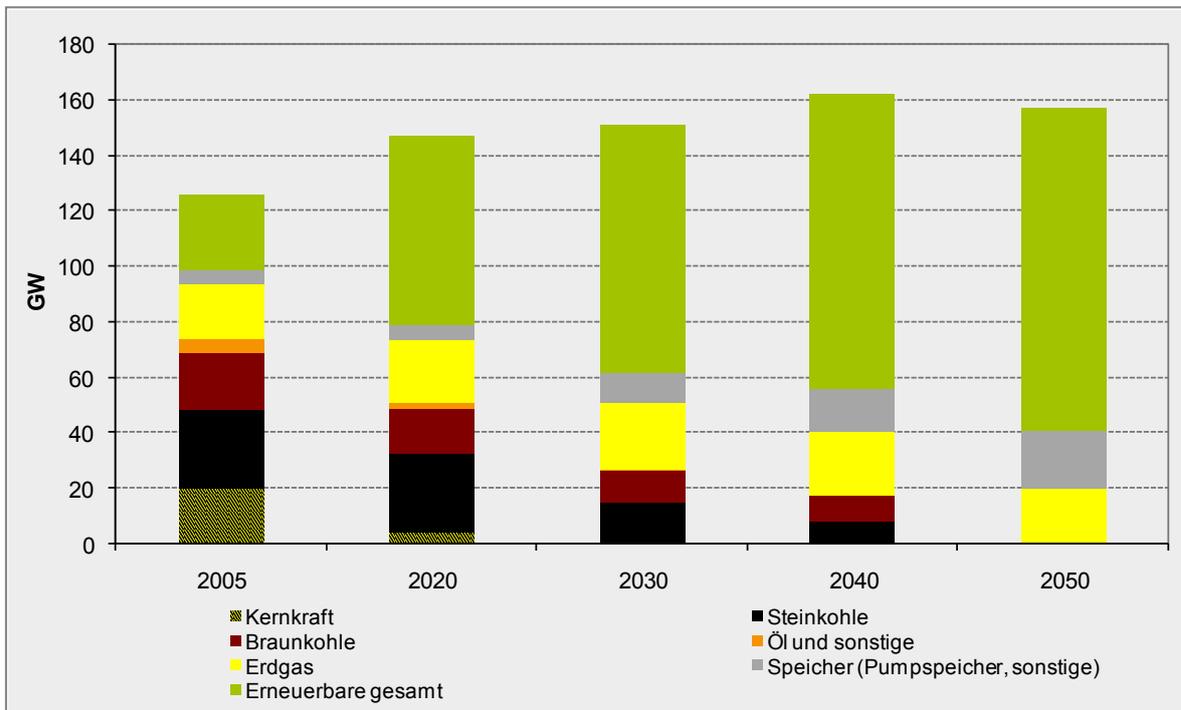
	Innovation ohne CSS				
	2005	2020	2030	2040	2050
Spitzenlast	84	68	60	56	54
Gesicherte Leistung	96	80	69	69	61
Erneuerbare (inkl. Import)	6	13	17	22	27
Konventionell und Speicher	89	67	52	47	34

Quelle: Prognos 2009

In der Variante „Innovation ohne CCS“ steigt die installierte Nettogleistung des deutschen Kraftwerksparks trotz deutlich sinkenden Nettostrombedarfs bis 2050 insgesamt von 139,4 GW um 12,8 % auf 157,3 GW. Da hier CCS-Technologie nicht verfügbar ist, umfasst der Kraftwerkspark im Jahr 2050 nur noch wenige konventionelle Kraftwerke für Erdgas. Erzeugungsanlagen zur Nutzung Erneuerbarer und Speicher prägen den Kraftwerkspark des Jahres 2050. Zu den Einzelentwicklungen zwischen den Jahren 2005 und 2050 vgl. auch Tabelle 5.3-50.

- Die Laufzeiten von Stein- und Braunkohlekraftwerke werden aufgrund des Zubaus der erneuerbaren Energien allmählich verringert, bis der Betrieb der Kraftwerke ab 2045 bis 2047 nicht mehr wirtschaftlich ist. Alle konventionellen Kraftwerke sind dann betriebswirtschaftlich abgeschrieben, allerdings noch z. T. deutlich unterhalb ihrer technischen Lebensdauer. Das „jüngste“ Braunkohlekraftwerk wird 18 Jahre alt (Laufzeit 2029 bis 2037, 1.250 MW), die anderen Braunkohlekraftwerke werden 29 – 30 Jahre alt (Bauzeit 2013 bis 2018, gehen sukzessive 2043 bis 2046 vom Netz.) Falls diese gegenüber den derzeit in Planung und im Bau befindlichen zusätzlichen Kraftwerke durch Gaskraftwerke ersetzt würden, würde sich der gesamte Kraftwerkseinsatz gegenüber heute bis 2030 geringfügig (von 571 PJ auf 629 PJ) erhöhen und danach deutlich bis auf knapp 150 PJ in 2050 absinken.
- Die installierte Leistung der Erdgaskraftwerke bleibt nahezu konstant. Ihr Anteil am Kraftwerkspark geht von 15,6 % im Jahr 2005 bis 2050 auf 12,6 % zurück.
- Die Speicherkapazität wird deutlich ausgebaut. Speicher weiten ihren Anteil an der installierten Leistung von 4,3 % in 2005 auf 13,0 % im Jahr 2050 aus.
- Die Erneuerbaren bauen ihren Anteil an der Gesamtkapazität kontinuierlich von 25 % auf knapp drei Viertel der gesamten installierten Leistung aus.

Abbildung 5.3-41: Variante „Innovation ohne CCS“: Installierte Leistung des deutschen Kraftwerksparks 2005 - 2050, in GW



Quelle: Prognos 2009

Die Auslastung des Kraftwerksparks geht im Vergleich zu den Varianten „Referenz ohne CCS“ und „Referenz mit CCS“ deutlich zurück, obwohl die Verfügbarkeit der Erneuerbaren steigt. Der Hauptgrund für die sinkenden mittleren Jahresvolllaststunden des deutschen Kraftwerksparks ist das Ausscheiden des Großteils der heute noch in der Grundlast eingesetzten konventionellen Kraftwerke zur Verstromung von Kernenergie, Braun- und Steinkohle.

Tabelle 5.3-44: Variante „Innovation ohne CCS“: Nettoleistung, Nettostromerzeugung und Jahresvolllaststunden nach Einsatzenergieträgern 2005 – 2050

	Innovation ohne CSS				
	2005	2020	2030	2040	2050
Nettoleistung, in GW					
Kernkraft	19,9	4,1	0,0	0,0	0,0
Steinkohle	27,9	28,1	14,7	7,5	0,0
Steinkohle mit CCS		0,0	0,0	0,0	0,0
Braunkohle	20,8	16,8	11,4	9,7	0,0
Braunkohle mit CCS		0,0	0,0	0,0	0,0
Erdgas	19,6	22,6	23,9	23,0	19,8
Öl und sonstige	5,2	1,7	0,7	0,0	0,0
Speicher (Pumpspeicher, sonstige)	5,4	5,4	10,4	15,4	20,4
Wasserkraft	4,6	5,1	5,2	5,2	5,2
Windenergie insgesamt	18,4	38,1	52,8	65,3	71,0
Windenergie Onshore	18,4	28,1	28,9	31,9	33,5
Windenergie Offshore		10,0	23,2	33,5	37,6
Photovoltaik	1,9	17,9	24,0	27,1	29,0
Biomasse	2,2	7,1	6,9	6,7	6,7
Geothermie		0,3	0,9	2,1	5,1
Gesamt Nettoleistung	125,9	147,2	150,3	162,1	157,3
Nettostromerzeugung, in TWh					
Kernkraft	151,0	30,2	0,0	0,0	0,0
Steinkohle	128,0	128,6	68,1	22,0	0,0
Steinkohle mit CCS		0,0	0,0	0,0	0,0
Braunkohle	152,0	85,9	49,6	23,0	0,0
Braunkohle mit CCS		0,0	0,0	0,0	0,0
Erdgas	67,0	49,3	46,9	28,2	11,5
Öl und sonstige	18,1	0,0	0,0	0,0	0,0
Speicher (Pumpspeicher, sonstige)	7,1	15,8	24,4	36,9	54,7
Wasserkraft	19,6	24,3	24,6	24,8	24,8
Windenergie insgesamt	27,2	87,2	142,2	186,7	209,3
Windenergie Onshore	27,2	53,5	58,1	63,7	66,9
Windenergie Offshore		33,7	84,1	123,0	142,4
Photovoltaik	1,2	15,5	21,9	25,3	27,7
Biomasse	12,0	46,2	44,7	41,3	41,3
Geothermie		1,8	6,0	14,7	35,7
Gesamt Nettostromerzeugung	583,2	484,9	428,4	402,9	405,1
Jahresvolllaststunden, in h/a					
Kernkraft	7.588	7.428	-	-	-
Steinkohle	4.588	4.572	4.626	2.923	-
Steinkohle mit CCS	-	-	-	-	-
Braunkohle	7.308	5.116	4.370	2.373	-
Braunkohle mit CCS	-	-	-	-	-
Erdgas	3.418	2.183	1.962	1.222	581
Öl und sonstige	3.481	3	3	-	-
Speicher (Pumpspeicher, sonstige)	1.315	2.912	2.338	2.392	2.679
Wasserkraft	4.261	4.758	4.737	4.769	4.769
Windenergie insgesamt	1.478	2.293	2.694	2.859	2.948
Onshore	1.478	1.909	2.009	2.000	2.000
Offshore	-	3.370	3.620	3.677	3.792
Photovoltaik	632	867	913	934	955
Biomasse	5.455	6.465	6.470	6.184	6.184
Geothermie	-	6.575	6.687	7.000	7.000
Durchschnitt	4.632	3.294	2.851	2.486	2.576

Quelle: Prognos 2009

5.3.6.2.3 Brennstoffeinsatz und CO₂-Emissionen

Ausgangspunkt der Berechnung der CO₂-Emissionen ist der Brennstoffeinsatz nach Energieträgern. Dieser ergibt sich aus der jeweiligen Nettostromerzeugung und aus den zugehörigen mittleren jährlichen Brennstoffnutzungsgraden der Erzeugungsanlagen (Jahresnutzungsgrade). Die langfristig sinkenden Jahresnutzungsgrade der konventionellen Kraftwerke in diesem Szenario sind vor allem das Resultat der sinkenden Jahresvollaststundenzahl und der damit verbundenen häufigeren An- und Abfahrvorgänge.

Die Ergebnisse für die Variante „Innovation ohne CCS“ sind der Tabelle 5.3-45 zu entnehmen.

Tabelle 5.3-45: Variante „Innovation ohne CCS“: Brennstoffeinsatz in PJ und Jahresnutzungsgrade in %, 2005 – 2050

	2005	Innovation ohne CSS			
		2020	2030	2040	2050
Brennstoff- / Primärenergieeinsatz					
Kernkraft	1.658	331	0	0	0
Steinkohle	1.182	1.128	615	219	0
Steinkohle mit CCS	0	0	0	0	0
Braunkohle	1.537	776	409	205	0
Braunkohle mit CCS	0	0	0	0	0
Erdgas	571	380	356	221	95
Öl und sonstige	314	0	0	0	0
Speicher (Pumpspeicher, sonstige)	35	77	127	203	324
Wasserkraft	82	93	94	94	94
Windenergie insgesamt	98	314	512	672	753
Onshore	98	193	209	229	241
Offshore	0	121	303	443	513
Photovoltaik	4	56	79	91	100
Biomasse	136	486	444	394	379
Geothermie	0	71	215	490	1.118
Gesamt Brennstoffeinsatz	5.617	3.711	2.850	2.591	2.863
Jahresnutzungsgrad in %					
Kernkraft	32,8	32,8	0,0	-	-
Steinkohle	39,0	41,0	39,9	36,2	-
Steinkohle mit CCS	-	-	-	-	-
Braunkohle	35,6	39,8	43,7	40,5	-
Braunkohle mit CCS	-	-	-	-	-
Erdgas	42,2	46,8	47,4	45,8	43,5
Öl und sonstige	20,8	20,8	22,2	-	-
Speicher (Pumpspeicher, sonstige)	74,0	74,0	74,0	74,0	74,0
Wasserkraft	94,0	94,3	94,5	94,8	95,0
Windenergie insgesamt	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Onshore	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Offshore	-	100,0	100,0	100,0	100,0
Photovoltaik	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Biomasse	31,8	34,2	36,2	37,7	39,2
Geothermie	-	9,4	10,1	10,8	11,5
Durchschnitt	36,9	47,0	54,1	56,0	50,9

Quelle: Prognos 2009

Insgesamt geht der Brennstoffeinsatz bzw. die Nutzung der erneuerbaren Energiequellen zwischen den Jahren 2005 und 2050 um 49 % zurück. Grund hierfür ist neben der rückläufigen Nettostromerzeugung auch der steigende Anteil der Erneuerbaren, für die mit Ausnahme der Stromerzeugung aus Geothermie und Biomasse ein „Brennstoff“-nutzungsgrad von 100 % definitorisch festgelegt wurde.

Die Nutzung erneuerbarer Energien zur Stromerzeugung wird entsprechend der allgemein gültigen Definition als CO₂-emissions-neutral bewertet. Zur Berechnung der CO₂-Emissionen der Stromerzeugung sind deshalb ausschließlich die fossilen Energieträger Steinkohle, Braunkohle, Erdgas sowie Öl und sonstige Brennstoffe relevant. Die verstromten Biomasseanteile enthalten etwa zur Hälfte Abfälle und Reststoffe, die zum Teil als nicht erneuerbar bilanziert und daher mit einem geringen CO₂-Faktor belegt werden. Grundlage der Kalkulation sind der Brennstoffeinsatz nach Energieträgern und die brennstoffspezifischen Emissionsfaktoren gem. Treibhausgasinventar.

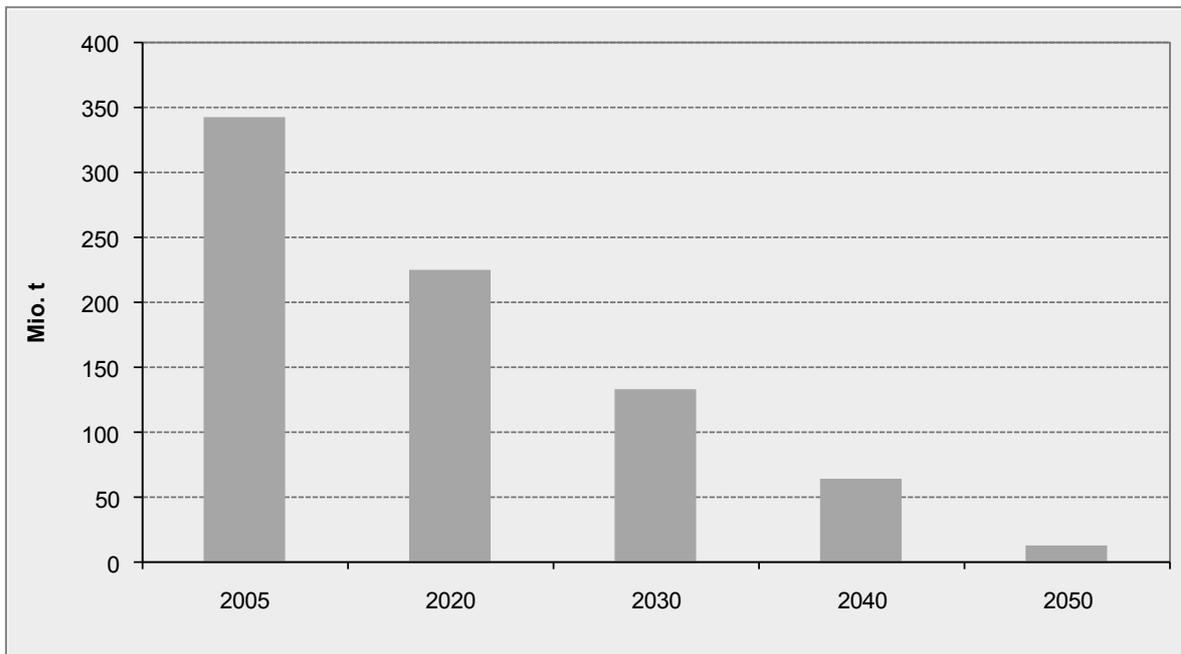
Die CO₂-Emissionen der Stromerzeugung in Deutschland gehen in der Variante „Innovation ohne CCS“ zwischen 2005 und 2050 um 96 % auf 14 Mio. t zurück. Die verbleibenden Emissionen stammen aus den verbliebenen Erdgasanlagen und Abfallanteilen in der Biomasse.

Tabelle 5.3-46: Variante „Innovation ohne CCS“: Brennstoffeinsatz in PJ und CO₂-Emissionen in Mio. t, 2005 – 2050

	Innovationsszenario				
	2005	2020	2030	2040	2050
Brennstoffeinsatz, in PJ					
Steinkohle	1.182	1.128	615	219	-
Steinkohle mit CCS	0	0	0	0	0
Braunkohle	1.537	776	409	205	-
Braunkohle mit CCS	0	0	0	0	0
Erdgas	571	380	356	221	95
Öl und sonstige	314	0	0	0	0
Biomasse/Abfall	136	486	444	394	379
CO₂-Emissionsfaktoren, in kg/GJ					
Steinkohle	94	94	94	94	94
Steinkohle mit CCS	9	9	9	9	9
Braunkohle	112	112	112	112	112
Braunkohle mit CCS	11	11	11	11	11
Erdgas	56	56	56	56	56
Öl und sonstige	80	80	80	80	80
Biomasse/Abfall	23	23	23	23	23
CO₂-Emissionen, in Mio. t					
Steinkohle	111	106	58	21	-
Steinkohle mit CCS	0	0	0	0	0
Braunkohle	172	87	46	23	-
Braunkohle mit CCS	0	0	0	0	0
Erdgas	32	21	20	12	5
Öl und sonstige	25	0	0	0	0
Biomasse/Abfall	3	11	10	9	9
Gesamt CO₂-Emissionen	344	225	134	65	14

Quelle: Prognos 2009

Abbildung 5.3-42: Variante „Innovation mit CCS“: CO₂-Emissionen des deutschen Kraftwerksparks in Mio. t, 2005 - 2050



Quelle: Prognos 2009

Falls aus betriebswirtschaftlichen Gründen die Fahrweise insbesondere der „jüngsten“, von 2016 an gebauten fossilen Braunkohlekraftwerke über 2037 hinaus mit reduzierter Leistung (bei dann ebenfalls reduzierter Netzeinspeisung der Erneuerbaren) eingesetzt würden, ergäbe sich – je nach Fahrweise – in 2050 noch ein Emissionssockel von ca. 8 - 11 Mio. t CO₂ (Direktemissionen, noch ohne Emissionen der Rauchgasreinigung) pro Jahr, kumuliert somit als Zusatzemissionen bis 2050 ca. 24 – 33 Mio. t.

5.3.6.2.4 Kosten

Die Kosten der Szenarien und Varianten werden anhand der Vollkosten der Stromerzeugung in Deutschland verglichen.

Die Vollkosten der Stromerzeugung umfassen für die inländische Stromerzeugung sämtliche Kosten, die für den Bau und den Betrieb der Kraftwerke anfallen. Hierzu gehören Investitionskosten, Brennstoffkosten (inkl. CO₂-Kosten) sowie sämtliche Kosten für Betriebsmittel, Reparatur und Wartung, Personal, Finanzierung und Versicherung der Anlagen. Die Kosten für die konventionelle Stromerzeugung basieren auf den Berechnungen des Kraftwerksmodells der Prognos AG. Für die erneuerbaren Energien und den Stromimport werden eigene Gestehungskosten, basierend auf der Leitstudie [Nitsch/DLR 2008], verwendet (Tabelle 5.3-47). Die Gestehungskosten je kWh steigen von 2005 bis 2050 um 61 %. Dies ist weniger als in der Referenz und hängt vor allem mit der von [Nitsch/DLR 2008] unterstellten starken Kostendegression der erneuerbaren Energieträger zusammen. Im Vergleich zur Referenz müssen nur wenige Gaskapazitäten zugebaut werden, welche allerdings teuer sind, außerdem sind nur noch wenige mit CO₂-Preisen belegte Kohlekraftwerke am Netz. Die Vollkosten steigen aufgrund der stark verringerten der Nachfrage nur um 25 % gegenüber 2005.

Tabelle 5.3-47: Variante „Innovation ohne CCS“: spezifische Gestehungskosten und Vollkosten der Stromerzeugung 2005 – 2050

	Innovation ohne CSS				
	2005	2020	2030	2040	2050
Spezifische Gestehungskosten der Nettostromerz. in €-Cent/kWh (real, 2007)					
Durchschnitt Konventionelle Erzeugung	4,3	8,1	10,3	14,8	29,8
Kernkraft	4,0	4,1	-	-	-
Steinkohle	4,6	8,0	9,3	12,9	-
Steinkohle mit CCS	-	-	-	-	-
Braunkohle	3,3	6,8	7,2	10,2	-
Braunkohle mit CCS	-	-	-	-	-
Erdgas	8,0	13,1	15,1	20,0	29,8
Öl und sonstige	-	-	-	-	-
Speicher (Pumpspeicher, sonstige)	10,3	11,5	11,9	11,1	9,4
Stromimport	0,0	9,5	8,4	7,5	7,0
Durchschnitt Erneuerbare Erzeugung	12,0	10,3	8,7	8,0	7,7
Wasserkraft	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0
Windenergie insgesamt	11,1	8,6	7,3	6,9	6,7
Onshore	11,1	8,0	7,4	7,3	7,3
Offshore	0,0	9,5	7,3	6,8	6,5
Photovoltaik	54,8	14,6	10,9	9,9	9,4
Biomasse	13,2	12,2	11,4	10,5	10,5
Geothermie	45,8	9,8	8,5	7,5	7,1
Durchschnitt insgesamt	5,2	9,0	9,5	9,4	8,4
Vollkosten der Stromerzeugung, in Mrd. € (real, 2007)					
Konventionelle Erzeugung insgesamt	22,3	23,8	17,0	10,8	3,4
Kernkraft	6,0	1,2	0,0	0,0	0,0
Steinkohle	5,9	10,3	6,3	2,8	-
Steinkohle mit CCS	-	-	-	-	-
Braunkohle	5,0	5,9	3,6	2,4	-
Braunkohle mit CCS	-	-	-	-	-
Erdgas	5,3	6,5	7,1	5,6	3,4
Öl und sonstige	-	-	-	-	-
Speicher (Pumpspeicher, sonstige)	0,7	1,8	2,9	4,1	5,1
Stromimport	-	0,0	1,3	2,5	3,4
Erneuerbare Erzeugung insgesamt	7,5	18,0	20,8	23,4	26,1
Wasserkraft	2,2	2,4	2,5	2,5	2,5
Windenergie insgesamt	3,0	7,5	10,4	13,0	14,1
Onshore	3,0	4,3	4,3	4,7	4,9
Offshore	-	3,2	6,1	8,3	9,3
Photovoltaik	0,7	2,3	2,4	2,5	2,6
Biomasse	1,6	5,6	5,1	4,3	4,3
Geothermie	0,0	0,2	0,5	1,1	2,5
Gesamt Vollkosten der Stromerzeugung	30,5	43,7	42,0	40,8	38,0

Quelle: Prognos 2009

5.3.6.3 Ergebnisse Variante „Innovation mit CCS“

5.3.6.3.1 Arbeit

Hinsichtlich des Nettostromverbrauchs in Deutschland unterscheidet sich die Variante „Innovation mit CCS“ nicht von der Variante „Innovation ohne CCS“. Deutliche Unterschiede bestehen jedoch im Speicherstromverbrauch, der hier um 33 TWh (2050) niedriger ist sowie in den geringfügig höheren Stromimportmengen. Diese Effekte senken die erforderliche Nettostromerzeugung in Deutschland gegenüber der Variante „Innovation ohne CCS“ im Jahr 2050 um insgesamt 36 TWh auf 369 TWh.

Tabelle 5.3-48: Variante „Innovation mit CCS“: Nettostromverbrauch und -erzeugung 2005 – 2050, in TWh

	Innovationsszenario mit CCS				
	2005	2020	2030	2040	2050
Endenergieverbrauch Strom	517	423	370	345	330
Verbrauch im Umwandlungsbereich	16	14	13	10	8
Leitungsverluste	29	26	25	25	25
Speicherstromverbrauch (Pump. etc.)	11	21	29	40	57
Nettostromverbrauch	573	485	436	420	420
Importsaldo*	-9	0	14	35	51
Nettostromerzeugung	583	485	423	384	369

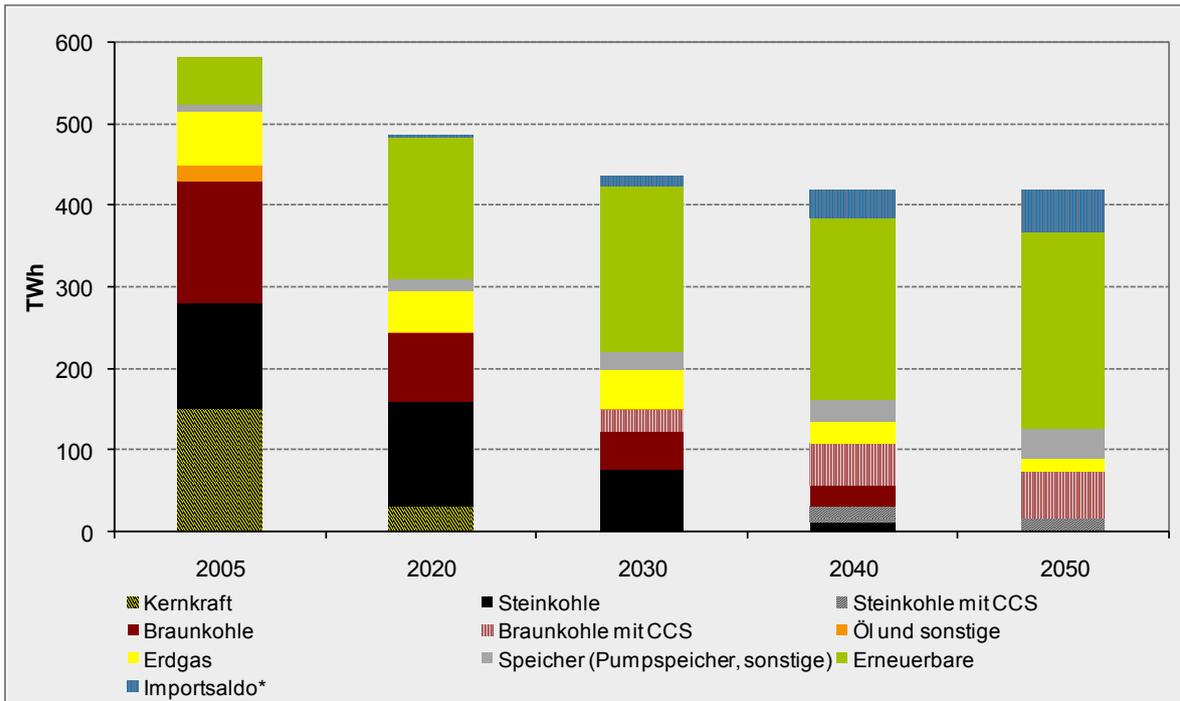
*ab 2020 Import von erneuerbar erzeugtem Strom

Quelle: Prognos 2009

Die Nettostromerzeugung des Kraftwerksparks incl. Speicher sinkt bis zum Jahr 2050 um 36 %. Vor allem die Erneuerbaren tragen dann stark zur Stromerzeugung bei, allerdings gewinnen mit CO₂-Abscheidung ausgestattete Kohlekraftwerke an Bedeutung. (vgl. zu Einzelergebnissen auch Tabelle 5.3-50).

- Ab 2045 wird Strom nicht mehr in Braunkohle- und Steinkohlekraftwerken ohne CCS erzeugt.
- Mit CCS-Technologie wird im Jahr 2050 aus Steinkohle ein Anteil von 4,4 % erzeugt. Braunkohle-CCS-Kraftwerke tragen dann mit 15,5 % bereits deutlich zur Deckung des Strombedarfs bei.
- Die Stromerzeugung aus Erdgas geht mit 76 % gegenüber 2005 zwar weniger stark als in der Variante „Innovation ohne CCS“, aber dennoch überdurchschnittlich zurück. Der Erdgasanteil, der auch in dieser Variante vor allem als Regelenergie und in der Kraft-Wärme-Kopplung genutzt wird, schrumpft von 11,5 % auf 4,4 %.
- Die Speicher übernehmen auch in dieser Variante die führende Rolle bei der Absicherung der fluktuierenden Einspeisung aus Erneuerbaren. Ihr Anteil an der Nettostromerzeugung erhöht sich wegen der niedrigeren Einspeisung der Erneuerbaren allerdings nur von 1,2 % auf 9,9 %.
- Erneuerbare tragen im Jahr 2050 in Deutschland mit 65,8 % zur Stromerzeugung bei. Gegenüber ihrem Anteil von 10 % im Jahr 2005 bedeutet dies eine Zunahme um den Faktor 6,5.

Abbildung 5.3-43: Variante „Innovation mit CCS“: Nettostromerzeugung des deutschen Kraftwerksparks 2005 - 2050, in TWh



*ab 2021 Import von erneuerbar erzeugtem Strom

Quelle: Prognos 2009

Betrachtet man, analog zur Vorgehensweise in der Variante „Innovation ohne CCS“ allein die primäre Stromerzeugung ohne die Zwischenspeicher, erhöht sich der Anteil der Erneuerbaren in der Variante „Innovation mit CCS“ nochmals deutlich. Die Primärstromerzeugung in Deutschland basiert dann im Jahr 2050 zu 73,1 % auf Erneuerbaren.

5.3.6.3.2 Leistung

Den Varianten „Innovation ohne CCS“ und „Innovation mit CCS“ liegen unterschiedliche Annahmen zum Entwicklungspfad der Erneuerbaren in Deutschland und auch zum langfristigen Stromimport zu Grunde. Weitere Unterschiede zwischen den Szenarien entstehen durch die Verfügbarkeit der CCS-Technologie für die Brennstoffe Braun- und Steinkohle. In der Variante „Innovation mit CCS“ durchdringt CCS den deutschen Kraftwerkspark ab 2025 allmählich. Durch Unterschiede im Zubau an konventioneller Kraftwerkskapazität und in der Nutzung der Erneuerbaren ergeben sich auch leichte Abweichungen hinsichtlich der gesicherten Leistung. Insgesamt ist der Anteil der gesicherten Leistung aus Erneuerbaren hier niedriger.

Tabelle 5.3-48: Variante „Innovation mit CCS“: Spitzenlast und gesicherte Leistung 2005 – 2050, in GW

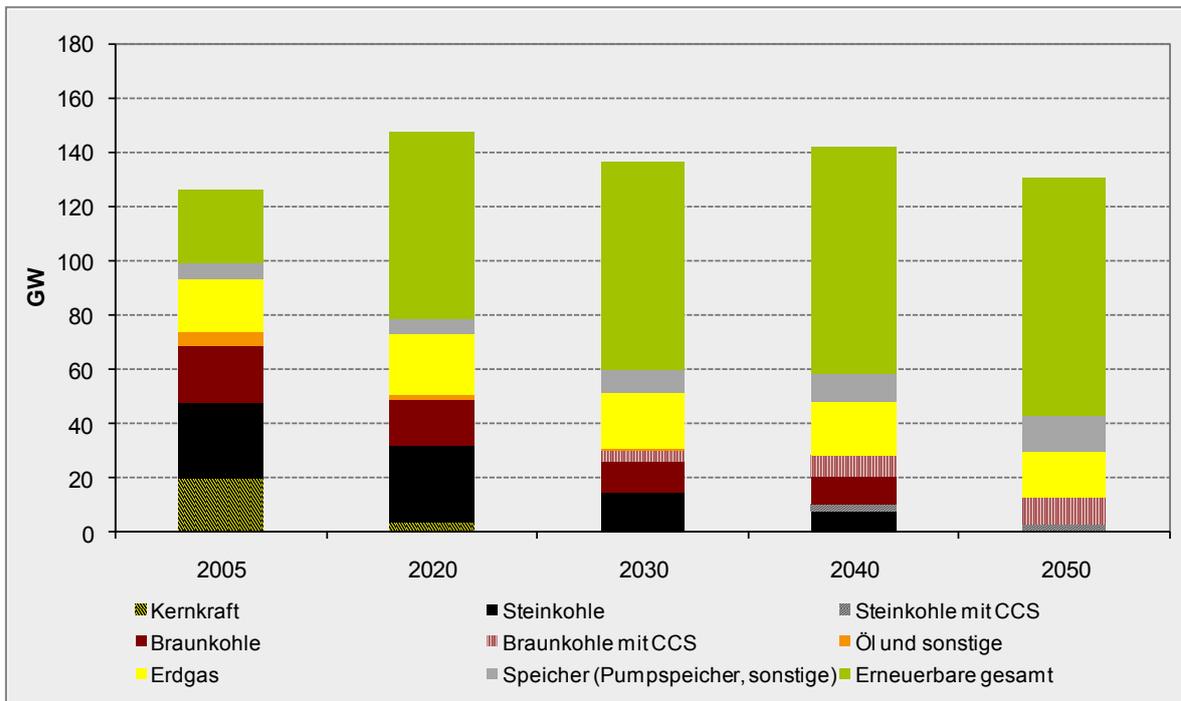
	Innovationsszenario mit CCS				
	2005	2020	2030	2040	2050
Spitzenlast	84	68	60	56	54
Gesicherte Leistung	96	80	67	69	59
Erneuerbare (inkl. Import)	6	13	16	19	23
Konventionell und Speicher	89	67	51	50	36

Quelle: Prognos 2009

Im Gegensatz zu den anderen beschriebenen Varianten steigt die installierte Nettoleistung des deutschen Kraftwerksparks bis 2050 in der Variante „Innovation mit CCS“ nur geringfügig an, von 125,9 GW im Jahr 2005 um 3,6 % auf 130,4 GW im Jahr 2050. Im Gegensatz zur Variante „Innovation ohne CCS“ beinhaltet der Kraftwerkspark neben Erdgaskraftwerken langfristig auch Kraftwerke für die Verstromung von Steinkohle (mit CCS) und Braunkohle (mit CCS). Ab 2025 werden Kohlekraftwerke nur noch mit CCS-Technologie zugebaut. Hinzu kommen die Anlagen zur Stromerzeugung aus erneuerbaren Energiequellen. Alle Kernkraftwerke verlassen nach der Erzeugung ihrer jeweiligen Reststrommengen den Park. Ölkraftwerke werden aus Kostengründen nicht neu errichtet (vgl. zu Einzelergebnissen auch Tabelle 5.3-50). Zu den Einzelentwicklungen zwischen den Jahren 2005 und 2050:

- Vor 2025 errichtete Stein- und Braunkohlekraftwerke **ohne** CO₂-Abscheidung sind ab ca. 2045 nicht mehr wirtschaftlich und gehen vom Netz. Es werden keine alten Kohlekraftwerke mit CCS-Technologie nachgerüstet. Mit einem Alter von mindestens 32 Jahren sind sie betriebswirtschaftlich abgeschrieben.
- **CCS-Kraftwerke** werden nach 2025 für Braunkohle und nach 2030 auch für Steinkohle errichtet. Die installierte Leistung dieser Anlagen erreicht für den Brennstoff Steinkohle im Jahr 2050 einen Anteil von 2,3 % und für Braunkohle 7,7 %
- Die installierte Leistung der Erdgaskraftwerke sinkt um ein knappes Viertel. Ihr Anteil am Kraftwerkspark geht von 15,6 % auf 12,9 % zurück.
- Die Speicherkapazität wird deutlich ausgebaut, allerdings weniger als in der Variante „Innovation ohne CCS“. Speicher weiten ihren Anteil an der installierten Leistung von 3,9 % im Jahr 2005 auf 9,9 % im Jahr 2050 aus.
- Die Erneuerbaren bauen ihren Anteil an der Gesamtkapazität kontinuierlich von 25 % auf rund zwei Drittel aus.

Abbildung 5.3-44: Variante „Innovation mit CCS“: Installierte Leistung des deutschen Kraftwerksparks 2005 - 2050, in GW



Quelle: Prognos 2009

Die mittlere Auslastung des Kraftwerksparks (Jahresvollaststunden) sinkt in der Variante „Innovation mit CCS“ wegen des geringeren Anteils der Erneuerbaren und der Errichtung der in der Grundlast betriebenen CCS-Kraftwerke weniger stark als in der Variante „Innovation ohne CCS“. Die Erneuerbaren und vor allem die Speicherkraftwerke zeigen einen Anstieg ihrer mittleren jährlichen Auslastung, Erdgaskraftwerke werden hingegen im Mittel deutlich seltener eingesetzt.

Tabelle 5.3-50: Variante „Innovation mit CCS“: Nettoleistung, Nettostromerzeugung und Jahresvolllaststunden nach Einsatzenergieträgern 2005 – 2050

	Innovationsszenario mit CCS				
	2005	2020	2030	2040	2050
Nettoleistung, in GW					
Kernkraft	19,9	4,1	0,0	0,0	0,0
Steinkohle	27,9	28,1	14,7	7,5	0,0
Steinkohle mit CCS		0,0	0,0	3,0	3,0
Braunkohle	20,8	16,8	11,4	9,7	0,0
Braunkohle mit CCS		0,0	4,0	8,0	10,0
Erdgas	19,6	22,6	20,9	20,0	16,8
Öl und sonstige	5,2	1,7	0,7	0,0	0,0
Speicher (Pumpspeicher, sonstige)	5,4	5,4	7,9	10,4	12,9
Wasserkraft	4,6	5,1	5,2	5,2	5,2
Windenergie insgesamt	18,4	38,1	43,7	49,0	51,2
Windenergie Onshore	18,4	28,1	28,4	29,6	30,2
Windenergie Offshore		10,0	15,3	19,4	21,0
Photovoltaik	1,9	17,9	20,3	21,6	22,3
Biomasse	2,2	7,1	6,9	6,7	6,7
Geothermie		0,3	0,5	1,0	2,2
Gesamt Nettoleistung	125,9	147,2	136,2	142,1	130,4
Nettostromerzeugung, in TWh					
Kernkraft	151,0	30,2	0,0	0,0	0,0
Steinkohle	128,0	128,6	75,7	12,8	0,0
Steinkohle mit CCS		0,0	0,0	17,5	16,3
Braunkohle	152,0	85,9	46,9	26,9	0,0
Braunkohle mit CCS		0,0	27,8	52,2	57,1
Erdgas	67,0	49,3	48,0	24,4	16,1
Öl und sonstige	18,1	0,0	0,0	0,0	0,0
Speicher (Pumpspeicher, sonstige)	7,1	15,8	20,5	27,2	36,5
Wasserkraft	19,6	24,3	24,4	24,6	24,6
Windenergie insgesamt	27,2	87,2	112,4	130,4	140,1
Windenergie Onshore	27,2	53,5	57,0	59,1	60,4
Windenergie Offshore		33,7	55,4	71,3	79,7
Photovoltaik	1,2	15,5	18,6	20,1	21,3
Biomasse	12,0	46,2	44,7	41,3	41,3
Geothermie		1,8	3,5	7,1	15,5
Gesamt Nettostromerzeugung	583,2	484,9	422,5	384,5	368,8
Jahresvolllaststunden, in h/a					
Kernkraft	7.588	7.428	-	-	-
Steinkohle	4.588	4.572	5.145	1.704	-
Steinkohle mit CCS	-	-	-	5.843	5.418
Braunkohle	7.308	5.116	4.134	2.770	-
Braunkohle mit CCS	-	-	6.959	6.521	5.710
Erdgas	3.418	2.183	2.295	1.216	956
Öl und sonstige	3.481	3	18	-	-
Speicher (Pumpspeicher, sonstige)	1.315	2.912	2.585	2.607	2.827
Wasserkraft	4.261	4.758	4.737	4.769	4.769
Windenergie insgesamt	1.478	2.293	2.573	2.664	2.735
Onshore	1.478	1.909	2.009	2.000	2.000
Offshore	-	3.370	3.620	3.677	3.792
Photovoltaik	632	867	913	934	955
Biomasse	5.455	6.465	6.470	6.184	6.184
Geothermie	-	6.575	6.687	7.000	7.000
Durchschnitt	4.632	3.294	3.102	2.706	2.829

Quelle: Prognos 2009

5.3.6.3.3 Brennstoffeinsatz und CO₂-Emissionen

Die Berechnung der CO₂-Emissionen erfolgt wie in den anderen Varianten über den Brennstoffeinsatz nach Energieträgern. Dieser ergibt sich aus der jeweiligen Nettostromerzeugung und aus den zugehörigen mittleren jährlichen Brennstoffnutzungsgraden der Erzeugungsanlagen (Jahresnutzungsgrade). Die langfristig sinkenden Jahresnutzungsgrade der konventionellen Kraftwerke in dieser Variante sind vor allem das Resultat der sinkenden Jahresvollaststundenzahl und der damit verbundenen häufigeren An- und Abfahrvorgänge.

Durch die Einführung der CCS-Technologie werden im Jahr 2050 deutlich mehr fossile Brennstoffe (vor allem Stein- und Braunkohle) eingesetzt als in der Variante „Innovation ohne CCS“.

Tabelle 5.3-51: Variante „Innovation mit CCS“: Brennstoffeinsatz in PJ und Jahresnutzungsgrade in %, 2005 – 2050

	2005	Innovationsszenario mit CCS			
		2020	2030	2040	2050
Brennstoff- / Primärenergieeinsatz					
Kernkraft	1.658	331	0	0	0
Steinkohle	1.182	1.128	642	137	0
Steinkohle mit CCS	0	0	0	150	142
Braunkohle	1.537	776	390	249	0
Braunkohle mit CCS	0	0	238	443	507
Erdgas	571	380	365	192	129
Öl und sonstige	314	0	0	0	0
Speicher (Pumpspeicher, sonstige)	35	77	104	144	207
Wasserkraft	82	93	93	93	93
Windenergie insgesamt	98	314	405	469	504
Onshore	98	193	205	213	218
Offshore	0	121	199	257	287
Photovoltaik	4	56	67	73	77
Biomasse	136	486	444	394	379
Geothermie	0	71	126	235	484
Gesamt Brennstoffeinsatz	5.617	3.711	2.874	2.581	2.522
Jahresnutzungsgrad in %					
Kernkraft	32,8	32,8	-	-	-
Steinkohle	39,0	41,0	42,5	33,6	-
Steinkohle mit CCS	-	-	-	42,1	41,2
Braunkohle	35,6	39,8	43,3	38,9	-
Braunkohle mit CCS	-	-	42,1	42,4	40,5
Erdgas	42,2	46,8	47,3	45,7	45,1
Öl und sonstige	20,8	20,8	26,0	-	-
Speicher (Pumpspeicher, sonstige)	74,0	74,0	74,0	74,0	74,0
Wasserkraft	94,0	94,3	94,5	94,8	95,0
Windenergie insgesamt	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Onshore	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Offshore	-	100,0	100,0	100,0	100,0
Photovoltaik	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Biomasse	31,8	34,2	36,2	37,7	39,2
Geothermie	-	9,4	10,1	10,8	11,5
Durchschnitt	36,9	47,0	52,9	53,6	52,6

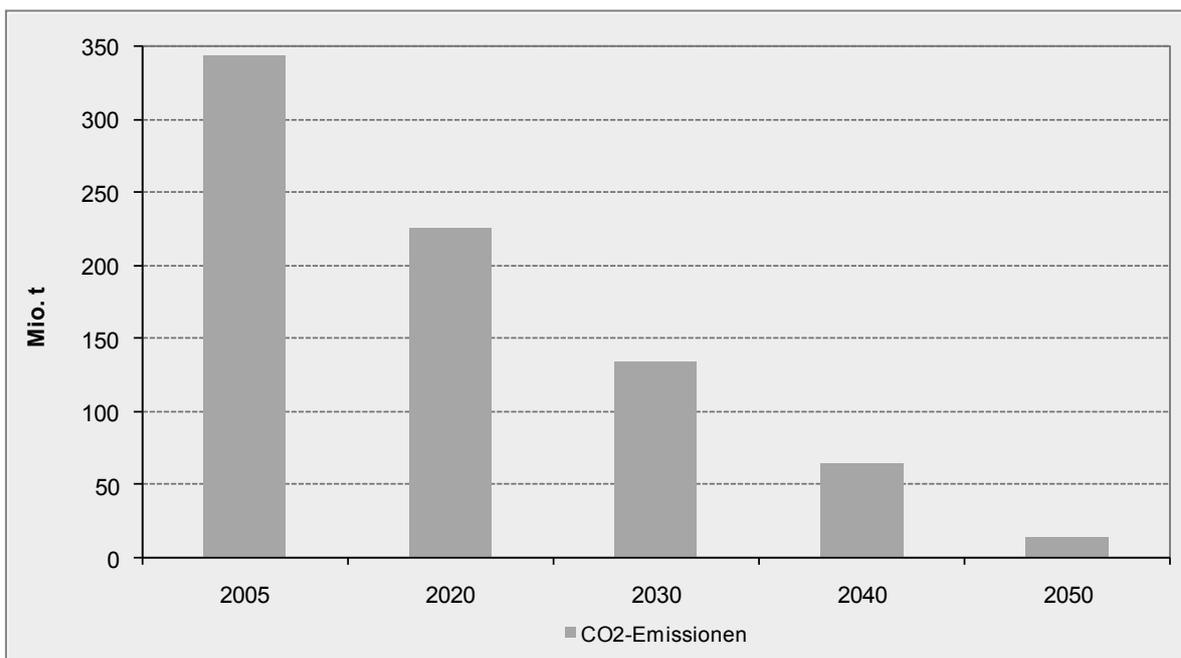
Quelle: Prognos 2009

Insgesamt geht der Brennstoffeinsatz bzw. die Nutzung der erneuerbaren Energiequellen in der Variante „Innovation mit CCS“ zwischen 2005 und 2050 um 55,1 % zurück. Dieser Rückgang ist stärker als in der Variante „Innovation ohne CCS“. Grund hierfür ist die deutlich niedrigere Nettostromerzeugung durch die Reduzierung des Speicherstrombedarfs.

Die Nutzung erneuerbarer Energien zur Stromerzeugung wird entsprechend der allgemein gültigen Definition als CO₂-emissionsneutral bewertet. Zur Berechnung der CO₂-Emissionen der Stromerzeugung werden deshalb nur die fossilen Energieträger Steinkohle, Braunkohle, Erdgas sowie Öl und sonstige Brennstoffe betrachtet. Grundlage der Kalkulation sind der Brennstoffeinsatz nach Energieträgern und die brennstoffspezifischen Emissionsfaktoren. Für die CCS-Technologie wurde von einer 90%igen Abscheiderate ausgegangen. Die spezifischen Emissionsfaktoren für den Brennstoffeinsatz in diesen Anlagen wurden dementsprechend mit einem Zehntel ihres Werts für konventionelle Kraftwerke gleichen Brennstoffs angesetzt.

Die CO₂-Emissionen der Stromerzeugung in Deutschland gehen in der Variante „Innovation mit CCS“ zwischen 2005 und 2050 um 93 % auf 23 Mio. t zurück.

Abbildung 5.3-45: Variante „Innovation ohne CCS“: CO₂-Emissionen des deutschen Kraftwerksparks 2005 - 2050, in Mio. t



*Emissionen ohne Anteile der Rauchgasentschwefelung

Quelle: Prognos 2009

Tabelle 5.3-52: Variante „Innovation ohne CCS“: fossiler Brennstoffeinsatz, CO₂-Emissionsfaktoren und CO₂-Emissionen 2005 – 2050

	Innovationsszenario ohne CCS				
	2005	2020	2030	2040	2050
Brennstoffeinsatz, in PJ					
Steinkohle	1.182	1.128	615	219	-
Steinkohle mit CCS	0	0	0	0	0
Braunkohle	1.537	776	409	205	-
Braunkohle mit CCS	0	0	0	0	0
Erdgas	571	380	356	221	95
Öl und sonstige	314	0	0	0	0
Biomasse/Abfall	136	486	444	394	379
CO₂-Emissionsfaktoren, in kg/GJ					
Steinkohle	94	94	94	94	94
Steinkohle mit CCS	9	9	9	9	9
Braunkohle	112	112	112	112	112
Braunkohle mit CCS	11	11	11	11	11
Erdgas	56	56	56	56	56
Öl und sonstige	80	80	80	80	80
Biomasse/Abfall	23	23	23	23	23
CO₂-Emissionen, in Mio. t					
Steinkohle	111	106	58	21	-
Steinkohle mit CCS	0	0	0	0	0
Braunkohle	172	87	46	23	-
Braunkohle mit CCS	0	0	0	0	0
Erdgas	32	21	20	12	5
Öl und sonstige	25	0	0	0	0
Biomasse/Abfall	3	11	10	9	9
Gesamt CO₂-Emissionen	344	225	134	65	14

*Emissionen ohne Anteile der Rauchgasentschwefelung

Quelle: Prognos 2009

Falls aus wirtschaftlichen Gründen die Fahrweise insbesondere der „jüngsten“, von 2016 an gebauten Kraftwerke ohne CCS noch mit reduzierter Leistung (bei dann ebenfalls reduzierter Netzeinspeisung der Erneuerbaren) eingesetzt würden, ergäbe sich – je nach Fahrweise – in 2050 noch ein Emissionssockel von ca. 13 Mio. t CO₂ (Direktemissionen, noch ohne Emissionen der Rauchgasreinigung).

5.3.6.3.4 Kosten

Die Gestehungskosten und die Vollkosten der Stromerzeugung und des Stromimports werden nach den gleichen Prinzipien berechnet wie in den Kapiteln 4.3.6.2.4, 4.3.6.3.4, und 5.3.6.2.4.

Die Gestehungskosten entwickeln sich sehr ähnlich zu denjenigen in der Variante „Innovation ohne CCS“, während die Gesamtkosten vor allem aufgrund der deutlich geringeren Speicherinvestitionen erheblich darunter liegen. In realen Preisen liegen die Gesamtkosten der Stromerzeugung in 2050 nur um 18 % höher als 2005 (Tabelle 5.3-53).

Tabelle 5.3-53: Variante „Innovation mit CCS“: Gestehungskosten und Vollkosten der Stromerzeugung 2005 – 2050

	Innovationsszenario mit CCS				
	2005	2020	2030	2040	2050
Spezifische Gestehungskosten der Nettostromerz. in €-Cent/kWh (real, 2007)					
Durchschnitt Konventionelle Erzeugung	4,3	8,1	9,4	10,5	10,5
Kernkraft	4,0	4,1	-	-	-
Steinkohle	4,6	8,0	8,7	15,8	-
Steinkohle mit CCS	-	-	-	9,1	10,9
Braunkohle	3,3	6,8	7,4	9,8	-
Braunkohle mit CCS	-	-	5,3	5,5	6,2
Erdgas	8,0	13,1	14,7	20,1	25,3
Öl und sonstige	-	-	-	-	-
Speicher (Pumpspeicher, sonstige)	10,3	11,5	11,5	10,8	9,7
Stromimport	0,0	9,5	8,4	7,5	7,0
Durchschnitt Erneuerbare Erzeugung	12,0	10,3	8,9	8,3	8,0
Wasserkraft	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0
Windenergie insgesamt	11,1	8,6	7,3	7,0	6,8
Onshore	11,1	8,0	7,4	7,3	7,3
Offshore	0,0	9,5	7,3	6,8	6,5
Photovoltaik	54,8	14,6	10,9	9,9	9,4
Biomasse	13,2	12,2	11,4	10,5	10,5
Geothermie	45,8	9,8	8,5	7,5	7,1
Durchschnitt insgesamt	5,2	9,0	9,2	9,1	8,6
Vollkosten der Stromerzeugung, in Mrd. € (real, 2007)					
Konventionelle Erzeugung insgesamt	22,3	23,8	18,6	14,0	9,4
Kernkraft	6,0	1,2	0,0	0,0	0,0
Steinkohle	5,9	10,3	6,6	2,0	0,0
Steinkohle mit CCS	-	-	-	1,6	1,8
Braunkohle	5,0	5,9	3,5	2,6	0,0
Braunkohle mit CCS	-	-	1,5	2,9	3,5
Erdgas	5,3	6,5	7,1	4,9	4,1
Öl und sonstige	-	-	-	-	-
Speicher (Pumpspeicher, sonstige)	0,7	1,8	2,4	2,9	3,5
Stromimport	-	0,0	1,2	2,6	3,6
Erneuerbare Erzeugung insgesamt	7,5	18,0	18,1	18,5	19,5
Wasserkraft	2,2	2,4	2,4	2,5	2,5
Windenergie insgesamt	3,0	7,5	8,2	9,1	9,6
Onshore	3,0	4,3	4,2	4,3	4,4
Offshore	-	3,2	4,0	4,8	5,2
Photovoltaik	0,7	2,3	2,0	2,0	2,0
Biomasse	1,6	5,6	5,1	4,3	4,3
Geothermie	0,0	0,2	0,3	0,5	1,1
Gesamt Vollkosten der Stromerzeugung	30,5	43,7	40,2	38,1	36,0

Quelle: Prognos 2009

5.3.7 Fernwärmeerzeugung

Die Fernwärmenachfrage nimmt im Innovationsszenario aufgrund der Reduktion des Raumwärmebedarfs von 300 PJ in 2005 auf 70 PJ im Jahr 2050 ab. Entsprechend sinkt der Energieeinsatz für die Fernwärmeerzeugung von 306 PJ auf 74 PJ. Der Energieträgermix verschiebt sich von Erdgas (knapp 50 % in 2005) zu den erneuerbaren Energien: Abwärmenutzung ist 2050 mit 38 PJ der Energieträger mit dem höchsten Anteil (50 %), gefolgt von Solarwärme mit 24 PJ (31 %). Biomasse spielt übergangsweise eine Rolle, wird ab 2030 jedoch strategisch reduziert, um die im Verkehrssektor benötigten Potenziale freizustellen.

5.3.8 Übrige Umwandlung

Die starke Verbrauchsreduktion aller konventionellen Energieträger verringert im Umwandlungssektor den Energieeinsatz für deren Bereitstellung. Die Erzeugung der Biokraftstoffe der zweiten und dritten Generation (987 PJ) erfordert allerdings einen erheblichen Einsatz an primärer Biomasse. Selbst bei einer optimistischen Effizienzsteigerung der Umwandlungsprozesse bis auf 62 % im Jahr 2050 ist noch mit einem Einsatz von 470 PJ hierfür zu rechnen. Damit sind – mit den restlichen Umwandlungseinsätzen für Kohle, Gas und Biogas - insgesamt in der sonstigen Umwandlung 530 PJ Primärenergie zu verbuchen.

5.3.9 Primärenergie

Wie in Kap. 2.1 erläutert, wird der Primärenergieverbrauch abweichend zur Konvention der Energiebilanz hier ohne den nichtenergetischen Verbrauch ausgewiesen.

5.3.9.1 Variante „ohne CCS“

Der Primärenergieeinsatz wird im Innovationsszenario in der Variante „ohne CCS“ zwischen 2005 und 2050 um 57 % reduziert. Zusätzlich zu den Effizienzgewinnen wirken sich hier die Technologishifts in den Sektoren Industrie und Verkehr sowie der Umbau der Stromerzeugung auf erneuerbare Energien und das Ausphasen der Kohle aus.

Bezüglich der Energieträger (Tabelle 5.3-54, Abbildung 5.3-46) ergibt sich grob das folgende Bild: Von den fossilen Energieträgern bleiben nur noch Restbestände an Gas für Bereitstellung von Prozesswärme und für die Erzeugung von Spitzen- bzw. Regelenergie sowie Flugtreibstoffe und Diesel (Binnenschifffahrt) im Mix. Die durch konsequente Effizienzmaßnahmen und Prozessinnovationen verringerte Nachfrage wird systematisch durch erneuerbare Energien gedeckt. Kohlen werden zu 98 % reduziert, ein Restbestand von 77 PJ wird in der Metallerzeugung eingesetzt, dieser erfordert einen Umwandlungseinsatz von 82 PJ, die 2050 noch im Mix sind. Der Einsatz von Mineralölprodukten wird um 91 % reduziert. Hier sind 2050 im Wesentlichen die Flugtreibstoffe sowie 73 PJ (leichtes und schweres) Heizöl in der Prozesswärmeproduktion in den Sektoren Industrie und Dienstleistungen im Primärenergieverbrauch enthalten. Benzin wird 2050 nicht mehr eingesetzt,

an Diesel nur noch 4 PJ (Binnenschifffahrt, Restbestände im Güter- und Schienenverkehr). Gas erfährt die relativ geringste Reduktion um 73 %. Von der verbleibenden Menge werden 766 PJ vor allem in der Industrie und im Dienstleistungssektor für die Erzeugung von Prozesswärme eingesetzt, 95 PJ in der Stromerzeugung (z. T. mit industriellen Kraftwerken im KWK-Betrieb). Durch die zunehmende energetische Nutzung von Abfall (in der gekoppelten Stromerzeugung) erhöht sich der Einsatz dieses Brennstoffs um den Faktor 2,5.

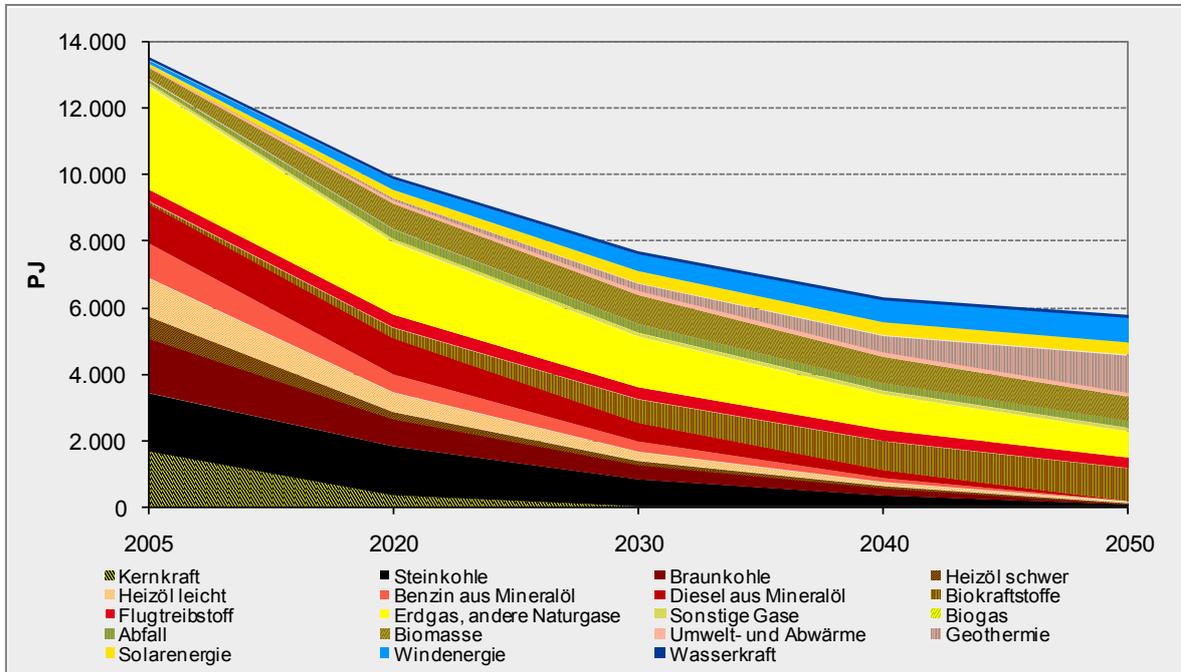
Tabelle 5.3-54: Szenario „Innovation“, Variante „ohne CCS“: Primärenergieverbrauch (ohne nichtenergetischen Verbrauch) nach Energieträgern und Sektoren, 2005 – 2050, in PJ

	Innovationsszenario				
	2005	2020	2030	2040	2050
nach Energieträgern ohne CCS					
Kernkraft	1.658	331	0	0	0
Kohle	3.412	2.308	1.261	564	82
Steinkohle	1.749	1.476	814	330	59
Braunkohle	1.662	832	447	234	23
Mineralölprodukte	4.407	2.813	1.610	866	389
Heizöl leicht	1.151	574	256	96	36
Heizöl schwer	675	225	130	72	37
Benzin aus Mineralöl	1.033	534	303	115	0
Diesel aus Mineralöl	1.202	1.097	566	246	4
Flugtreibstoff	345	383	354	336	312
übrige Mineralölprodukte	1	0	0	0	0
Gase	3.228	2.269	1.611	1.150	875
Erdgas, andere Naturgase	3.105	2.170	1.519	1.053	780
Sonstige Gase	123	99	92	97	95
Abfall	87	283	258	229	221
Erneuerbare Energien	741	1.932	2.939	3.484	4.200
Biomasse	337	765	874	791	726
Umwelt- und Abwärme	69	112	149	164	144
Solarenergie	77	246	362	388	371
Wasserkraft	82	93	94	94	94
Windenergie	98	314	512	672	753
Biokraftstoffe	77	318	708	867	987
Biogas	0	14	26	17	7
Geothermie	0	71	215	490	1.118
Gesamt Primärenergiebedarfverbrauch	13.532	9.936	7.680	6.294	5.766
nach Sektoren ohne CCS					
Private Haushalte	2.069	1.391	949	605	341
Dienstleistungen	923	617	376	269	237
Industrie	1.556	1.118	853	714	667
Verkehr	2.529	2.272	1.933	1.620	1.373
Fernwärmeerzeugung	306	253	188	123	79
Stromerzeugung	5.583	3.634	2.723	2.387	2.539
Sonstige Umwandlung	567	651	658	575	530
Gesamt Primärenergieverbrauch	13.532	9.936	7.680	6.294	5.766

Quelle: Prognos 2009

Der Beitrag der erneuerbaren Energien zur Deckung des Primärenergiebedarfs versechsfacht sich annähernd, wobei die Entwicklung der einzelnen Energieträger sehr unterschiedlich ist: Das absolut und relativ stärkste Wachstum weist die Geothermie auf, die von Null auf 1.118 PJ ansteigt und vollständig zur Stromerzeugung genutzt wird.

Abbildung 5.3-46: Szenario „Innovation“, Variante „ohne CCS“: Primärenergieverbrauch (ohne nichtenergetischen Verbrauch) nach Energieträgern 2005-2050, in PJ



Quelle: Prognos 2009

Die Biokraftstoffe weisen mit einem absoluten Wachstum von 910 PJ eine Verdreizehnfachung auf. Sie stellen nahezu alle flüssigen Kraftstoffe im Straßenverkehr. Damit verbunden sind Umwandlungsverluste von 470 PJ, die bei der Biomasse verbucht sind und dort einen Teil des Wachstums (115 %) ausmachen. Windenergie erfährt eine knappe Verachtfachung, die Nutzung von Solarenergie (Photovoltaik und Solarthermie) verfünffacht sich knapp.

5.3.9.2 Variante „mit CCS“

Die Variante „mit CCS“ unterscheidet sich von der Variante „ohne CCS“ deutlich hinsichtlich der Stromerzeugung und in der Folge geringfügig bei der sonstigen Umwandlung (Tabelle 5.3-55, Abbildung 5.3-47). In der Summe reduziert sich der Primärenergieeinsatz von 2005 bis 2050 um 59 %.

Bei den Energieträgern betrifft dies die Kohlen sowie die erneuerbaren Energieträger in der Stromerzeugung. Durch den Einsatz von Kraftwerken mit CO₂-Abscheidung wird bis 2050 noch Stein- und Braunkohle in CCS-Kraftwerken in der Grund- und Mittellast eingesetzt, so dass die Steinkohlen einen Verbrauchsrückgang zwischen 2005 und 2050 um 88% und die Braunkohlen um 68 % aufweisen, und 2050 zusammen noch mit 753 PJ in der Bilanz stehen.

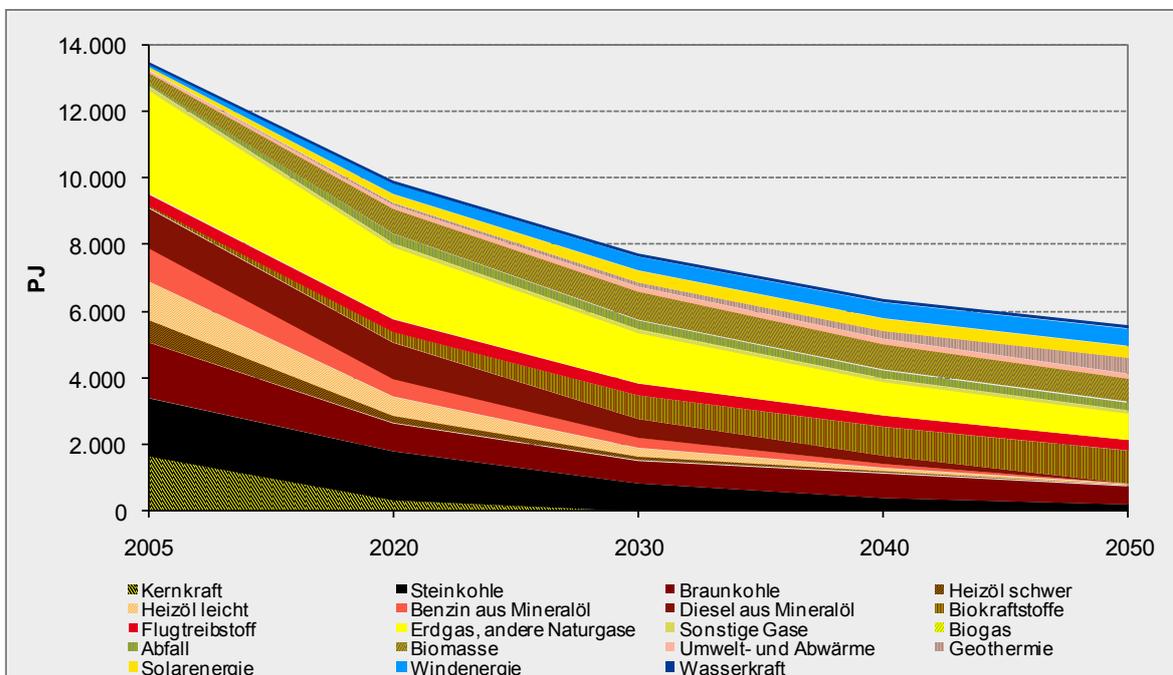
Tabelle 5.3-55: Szenario „Innovation“, Variante „mit CCS“: Primärenergieverbrauch (ohne nichtenergetischen Verbrauch) nach Energieträgern und Sektoren, 2005 – 2050, in PJ

	Innovationsszenario				
	2005	2020	2030	2040	2050
nach Energieträgern mit CCS					
Kernkraft	1.658	331	0	0	0
Kohle	3.412	2.308	1.514	1.135	753
Steinkohle	1.749	1.476	843	404	212
Braunkohle	1.662	832	671	731	540
Mineralölprodukte	4.407	2.813	1.611	866	389
Heizöl leicht	1.151	574	256	96	36
Heizöl schwer	675	225	131	72	37
Benzin aus Mineralöl	1.033	534	303	115	0
Diesel aus Mineralöl	1.202	1.097	566	246	4
Flugtreibstoff	345	383	354	336	312
übrige Mineralölprodukte	1	0	0	0	0
Gase	3.228	2.269	1.620	1.121	908
Erdgas, andere Naturgase	3.105	2.170	1.528	1.024	813
Sonstige Gase	123	99	92	97	95
Abfall	87	283	258	229	221
Erneuerbare Energien	741	1.932	2.730	3.007	3.294
Biomasse	337	765	874	791	726
Umwelt- und Abwärme	69	112	149	164	144
Solarenergie	77	246	350	369	348
Wasserkraft	82	93	93	93	93
Windenergie	98	314	405	469	504
Biokraftstoffe	77	318	708	867	987
Biogas	0	14	26	17	7
Geothermie	0	71	126	235	484
Gesamt Primärenergieverbrauch	13.532	9.936	7.733	6.358	5.564
nach Sektoren mit CCS					
Private Haushalte	2.069	1.391	949	605	341
Dienstleistungen	923	617	376	269	237
Industrie	1.556	1.118	853	714	667
Verkehr	2.529	2.272	1.933	1.620	1.373
Fernwärme	306	253	188	123	79
Stromerzeugung	5.583	3.634	2.769	2.437	2.315
Sonstige Umwandlung	567	651	664	590	552
Gesamt Primärenergieverbrauch	13.532	9.936	7.733	6.358	5.564

Quelle: Prognos 2009

Bei den Erneuerbaren erhöht sich der Beitrag der Geothermie auf 484 PJ (im Vergleich zu 1.118 PJ in der Variante „ohne CCS“), die Windenergienutzung verfünffacht sich (Veracht-fachung in der Variante „ohne CCS“) und die Solarenergie zeigt einen Zuwachs um 350 % (379 % in der Variante „ohne CCS“).

Abbildung 5.3-47: Szenario „Innovation“, Variante „mit CCS“: Primärenergieverbrauch (ohne nichtenergetischen Verbrauch) nach Energieträgern 2005 - 2050, in PJ



Quelle: Prognos 2009

Insgesamt reduziert sich der Primärenergieeinsatz zur Stromerzeugung in der Variante „mit CCS“ im Zeitraum von 2005 bis 2050 um 59 % (55 % in der Variante „ohne CCS“). Dieses angesichts der höheren Umwandlungsverluste von CCS-Kohlekraftwerken scheinbar kontraintuitive Ergebnis begründet sich durch die Lastcharakteristik der Stromerzeugung und die Importbilanz: Durch die von den Kohlekraftwerken bereitgestellte Grund- und Mittellast ist die Last- und Leistungscharakteristik der zuzubauenden Erneuerbaren günstiger und es müssen geringere Mengen zum Lastmanagement „umgespeichert“ werden. Damit entstehen auch keine Speicherverluste (mit 30 % angesetzt), der entsprechende Strom muss nicht erzeugt werden. Darüber hinaus ist die Importbilanz in der Variante „mit CCS“ um 3 TWh höher als in der Variante „ohne CCS“.

5.3.10 Energiebedingte Treibhausgasemissionen

Die energiebedingten Treibhausgase werden im Innovationsszenario zwischen dem Bezugsjahr 1990 und 2050 in der Variante „ohne CCS“ um 91 %, zwischen 2005 und 2050 um 89 % reduziert, in der Variante „mit CCS“ um rund 90 % bzw. 88 %.

Hierzu tragen alle Sektoren erheblich, aber unterschiedlich stark bei. Die anfangs „raumwärmelastigen“ Sektoren private Haushalte und Dienstleistungen verringern ihre energiebedingten CO₂-Emissionen von 2005 bis 2050 (witterungsbereinigt) um 98 % bzw. 85 %. Im Sektor Industrie wird eine Reduktion um 64 % erreicht. In diesem Sektor ist zusätzlich zu Effizienz- und Strukturveränderungen nur wenig Substitutionen von konventionellen Brennstoffen durch Erneuerbare möglich, daher bleiben die Reduktionspotenziale hier „begrenzt“. Im Verkehrssektor können insbesondere durch Elektrifizierung im Personenverkehr und durch die Substitution der fossilen Kraftstoffe durch Biokraftstoffe im

Straßenverkehr von 2005 bis 2050 83 % der Emissionen eingespart werden. Die absolut größte Emissionsminderung erbringt die Stromerzeugung.

Tabelle 5.3-56: Szenario „Innovation“, energiebedingte Treibhausgasemissionen nach Sektoren, 1990 – 2050, in Mio. t CO₂-Äquivalenten

Mio. t CO ₂ -Äqu.	Innovationsszenario					
	1990	2005	2020	2030	2040	2050
Private Haushalte		121,1	66,0	31,0	12,3	3,0
GHD		58,0	35,7	18,7	10,8	8,4
Industrie		100,7	70,2	51,2	40,6	36,0
Verkehr		179,5	143,9	91,3	57,0	30,3
Umwandlungssektor gesamt						
Fernwärmerzeugung		22,3	10,9	5,6	2,2	0,7
Stromerzeugung ohne CCS		323,4	226,3	134,1	65,0	14,0
Stromerzeugung mit CCS		323,4	226,3	137,7	67,0	22,9
Sonst. Umwandlung ohne CCS		39,5	28,3	16,0	7,9	2,4
Sonst. Umwandlung mit CCS		39,5	28,3	16,0	7,9	2,4
Gesamt ohne CCS	1.005,4	844,5	581,3	347,9	195,8	94,8
Gesamt mit CCS	1.005,4	844,5	581,3	351,5	197,8	103,7
CH ₄ ohne CCS	4,5	1,3	1,0	0,7	0,5	0,3
CH ₄ mit CCS	4,5	1,3	1,0	0,8	0,5	0,3
N ₂ O ohne CCS	7,7	7,9	6,3	4,2	2,6	1,5
N ₂ O mit CCS	7,7	7,9	6,3	4,2	2,6	1,6
Insgesamt ohne CCS	1.017,6	853,7	588,6	352,8	199,0	96,6
Insgesamt mit CCS	1.017,6	853,7	588,6	356,5	200,9	105,5
Insgesamt ohne CCS						
Veränderung ggü. 1990	-	-16,1%	-42,2%	-65,3%	-80,4%	-90,5%
Veränderung ggü. 2005	20,7%	1,3%	-30,2%	-58,1%	-76,4%	-88,5%
Insgesamt mit CCS						
Veränderung ggü. 1990	-	-16,1%	-42,2%	-65,0%	-80,3%	-89,6%
Veränderung ggü. 2005	20,7%	1,3%	-30,2%	-57,7%	-76,2%	-87,5%

Anmerkung: Emissionsdaten für 2005 sind bereinigte Daten, die Veränderung ggü. 2005 ist bezogen auf das Emissionsniveau der deutschen Treibhausgasinventare (842,9 Mio. t CO₂-Äqu.) angegeben; Emissionen der Stromerzeugung inklusive CO₂ aus Rauchgasreinigungsanlagen

Quelle: Prognos 2009

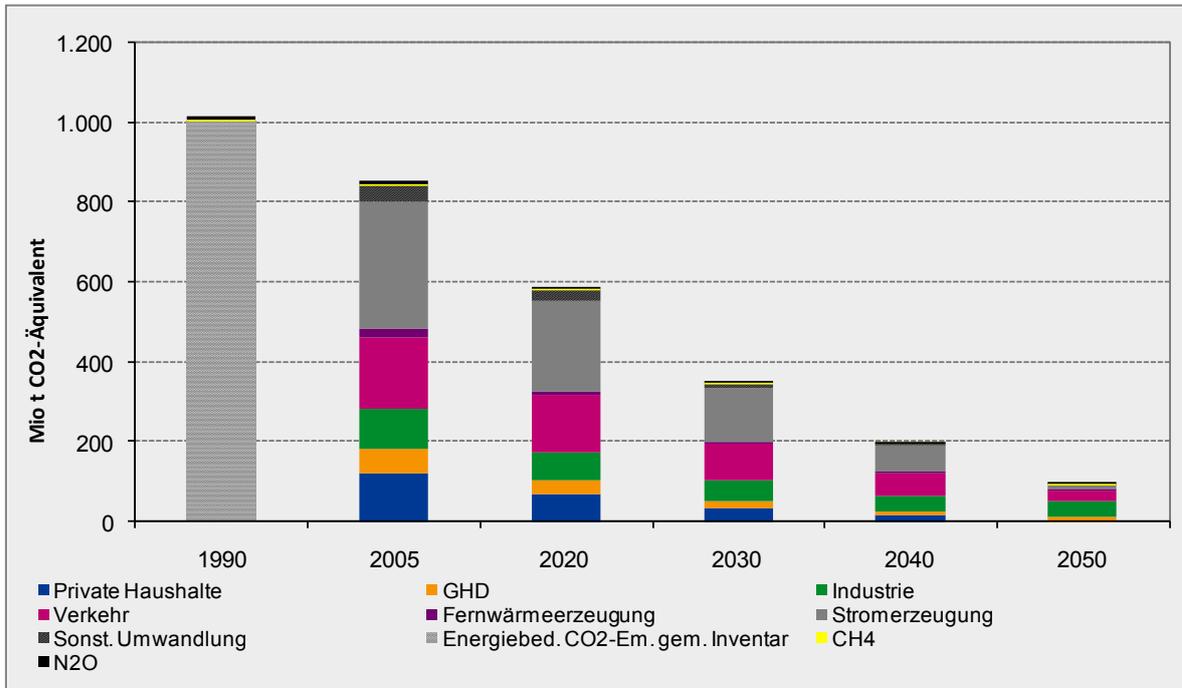
In der Variante „ohne CCS“ beträgt die Reduktion der Stromerzeugung von 2005 bis 2050 rund 96 %, in der Variante „mit CCS“ 93 %. Die Emissionsminderung im Bereich der Fernwärmerzeugung beläuft sich im gleichen Zeitraum auf 97 %, die der anderen Umwandlungssektoren auf 94 %.

Die CH₄-Emissionen aus den Verbrennungsprozessen entwickeln sich trotz unterschiedlicher Technologien und Brennstoffe in den beiden Varianten sehr ähnlich, sie weisen eine Reduktion von 94 % gegenüber 1990 auf. Bereits in den Jahren 1990 bis 2005 wurden diese Emissionen erheblich reduziert, so dass die Absenkung gegenüber 2005 nur mehr 79 % beträgt. Die Lachgas-Emissionen unterschieden sich in den beiden Varianten geringfügig, sie verringern sich bezogen auf die Vergleichsjahre 1990 und 2005 um etwa 80%.

Die relative Reduktion der gesamten energiebedingten Treibhausgase insgesamt folgt derjenigen der energiebedingten CO₂-Emissionen mit 90,5 % in der Variante „ohne CCS“ und knapp 90 % in der Variante „mit CCS“. Dieser kleine Unterschied ist auf den höheren Einsatz der Kohlen in der Stromerzeugung zurückzuführen, deren Emissionen nicht vollständig durch die CCS-Technologien neutralisiert werden können. Im Vergleich zum Emissionsniveau des Jahres 2005 ergeben sich Minderungen um 88,5 % (Variante „ohne CCS“) bzw. 87,5 % (Variante „mit CCS“).

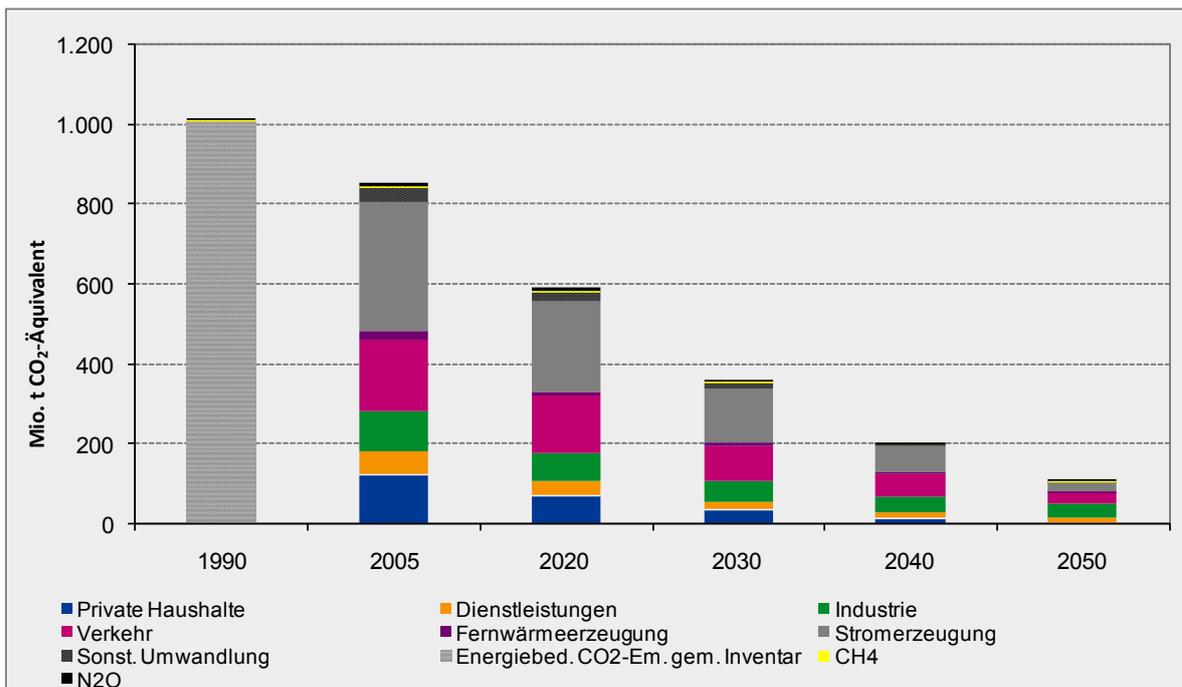
Quelle: Prognos und Öko-Institut 2009

Abbildung 5.3-48: Szenario „Innovation“, Variante „ohne CCS“: energiebedingte Treibhausgasemissionen nach Sektoren 1990 - 2050, in Mio. t CO₂-Äquivalenten



Quelle: Prognos und Öko-Institut 2009

Abbildung 5.3-49: Szenario „Innovation“, Variante „mit CCS“: energiebedingte Treibhausgasemissionen nach Sektoren 1990 - 2050, in Mio. t CO₂-Äquivalenten



Quelle: Prognos und Öko-Institut 2009

5.3.11 Flüchtige Emissionen des Energiesektors und nicht-energiebedingte Emissionen aus dem Industriesektor

5.3.11.1 Flüchtige Emissionen des Energiesektors

Obwohl die Energienachfrage im Innovationsszenario deutlich absinkt, bleiben die Auswirkungen auf die flüchtigen CH₄-Emissionen des Energiesektors eher gering (Tabelle 5.3-57). Dies begründet sich vor allem aus der dominierenden Rolle der Steinkohlenförderung für diesen Quellbereich. Angesichts der wie im Referenzszenario auslaufenden Steinkohleförderung ergeben sich im Innovationsszenario keine Änderungen. Die deutlichste Änderung der Emissionen folgt aus der Freisetzung von CH₄-Emissionen im Erdgas-Verteilungssystem, die sich als Folge des deutlich abnehmenden Erdgaseinsatzes erheblich verringern. Im Jahr 2050 liegen die CH₄-Emissionen aus Erdgasförderung, Erdgastransport und -verteilung sowie anderen Leckagen bei etwa 1,4 Mio. t CO₂-Äquivalenten.

Tabelle 5.3-57: Szenario „Innovation“, Entwicklung der flüchtigen CH₄- Emissionen des Energiesektors 2005-2050, in kt

kt CH ₄	2005	Innovationsszenario			
		2020	2030	2040	2050
CH₄-Emissionen					
Aktiver Kohlenbergbau					
Steinkohlen-Tiefbau	254,5	0,0	0,0	0,0	0,0
Steinkohlen-Aufbereitung	14,3	0,0	0,0	0,0	0,0
Braunkohlen-Tagebau	2,0	0,9	0,5	0,2	0,0
Umwandlung von Kohle	0,4	0,2	0,1	0,0	0,0
Stillgelegte Zechen	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9
Ölförderung und -bereitstellung					
Förderung	3,9	1,9	0,6	0,0	0,0
Lagerung	2,3	1,4	0,8	0,4	0,2
Erdgas					
Produktion	53,1	50,6	41,8	34,1	25,9
Transport	40,1	28,5	20,4	14,6	11,0
Verteilung	165,9	106,8	56,2	30,9	19,7
Andere Leckagen	67,0	43,1	22,7	12,5	7,9
Summe	606,3	236,4	146,0	95,7	67,6
Veränderung ggü. 1990	-54,1%	-82,1%	-88,9%	-92,8%	-94,9%
Veränderung ggü. 2005		-61,0%	-75,9%	-84,2%	-88,8%

Quelle: Öko-Institut 2009

Insgesamt gehen die flüchtigen CH₄-Emissionen des Energiesektors im Zeitraum 2005 bis 2050 im Innovationsszenario um 90 % zurück.

5.3.11.2 Prozessbedingte CO₂-Emissionen

Die Projektionen für die prozessbedingten CO₂-Emissionen im Innovationsszenario erfolgen in drei Schritten:

1. Für die emissionsintensivsten Prozesse wird angenommen, dass anspruchsvolle Minderungsoptionen durchgeführt werden.
2. Für andere, weniger emissionsintensive, aber relevante Prozesse können aus den energiewirtschaftlichen Entwicklungen (z. B. hinsichtlich der stark abnehmenden Braunkohleförderung und des stark sinkenden Mineralöleinsatzes) die CO₂-Emissionstrends abgeleitet werden.
3. Für einige (weniger relevante) Quellbereiche wurden die Determinanten der Emissionen nicht weiter analysiert und die Emissionen in den Szenarien auf dem Niveau von 2005 konstant gehalten.

Mit Blick auf die besonders relevanten prozessbedingten CO₂-Emissionen, die auf der Basis von Projektionen für die zukünftigen Produktionsvolumina beruhen, ist zunächst auf die Zementklinker- und Kalkproduktion hinzuweisen. Es wird davon ausgegangen, dass die verbleibenden Emissionen komplett durch CCS vermieden werden können. Dies ist deshalb der Fall, weil durch die prozessbedingten Emissionen die Konzentration von CO₂ im Rauchgas eines Zement- oder Kalkofens viel höher ist als in einem Kohlekraftwerk. Deshalb ist der spezifische Energiebedarf für die Abscheidung und Verdichtung des CO₂ in diesen Prozessen relativ niedrig. Bis 2050 werden die CO₂ Emissionen aus der Zement- und Kalkherstellung auf Null zurückgeführt.

Für die Herstellung von Ammoniak wird als Zwischenprodukt reiner Wasserstoff benötigt. Die Herstellung des Wasserstoffs ist der emissionsintensivste Produktionsschritt in der Ammoniakherstellung. Der Einsatz von regenerativ erzeugtem Wasserstoff für die Ammoniakherstellung ist besonders sinnvoll, weil keine weiteren Umwandlungsschritte notwendig sind, bei denen Energieverluste auftreten. Eine ähnliche Situation besteht bei der Produktion von Methanol. Bisher wird Methanol wie Ammoniak aus Erdgas hergestellt. Für die Zukunft wäre es denkbar, diesen Grundstoff aus Wasserstoff und CO₂ herzustellen. Der dafür benötigte Wasserstoff kann entweder aus überschüssigem Windstrom produziert werden, der sonst abgeregelt werden müsste, oder er kann importiert werden. Insgesamt werden die prozessbedingten Emissionen aus der Herstellung von Ammoniak und Methanol bis 2050 auf Null gesenkt.

Für die prozessbedingten CO₂-Emissionen aus der Glasherstellung wird davon ausgegangen, dass durch höhere Mehrwegquoten und einen höheren Scherbeneinsatz die Emissionen um 50 % gegenüber ihrem Ausgangsniveau zurückgehen.

Die übrigen prozessbedingten CO₂-Emissionen aus der Herstellung von Stahl, Ziegel, Primäraluminium, Karbid, Ferrolegierungen und Ruß werden auch im Innovationsszenario konstant gehalten.

Die prozessbedingten CO₂-Emissionen aus dem Katalysatorabbrand und den Umwandlungsverlusten in Raffinerien sinken durch den stark verringerten Einsatz von Mineralöl erheblich ab. Zusätzlich wird davon ausgegangen, dass die für die Entschwefelung notwendige Produktion von Wasserstoff in den Raffinerien ebenfalls auf regenerativen Was-

serstoff umgestellt wird. Damit gehen die Emissionen aus den Umwandlungsverlusten auf Null zurück.

Tabelle 5.3-58: Szenario „Innovation“, Entwicklung der prozessbedingten CO₂-Emissionen für ausgewählte Industrieprozesse 2005-2050, in kt

kt CO ₂	Innovationsszenario				
	2005	2020	2030	2040	2050
Prozessemissionen					
Zementproduktion	12.921	10.796	7.054	3.456	0
Kalksteinproduktion	5.415	4.525	2.956	1.448	0
Glasproduktion	894	759	655	551	447
Keramikproduktion	359	359	359	359	359
Ammoniakproduktion	5.253	4.503	3.002	1.501	0
Karbidproduktion	16	16	16	16	16
Katalysatorenabbrand	2.883	1.969	1.127	606	272
Umwandlungsverluste	3.776	2.211	844	227	0
Methanolherstellung	2.351	2.016	1.344	672	0
Rußproduktion	589	589	589	589	589
Eisen- und Stahl-Produktion (nur Kalksteineinsatz)	2.225	1.828	1.523	1.217	912
Herstellung von Ferrolegierungen	3	3	3	3	3
(Primär-) Aluminium-Produktion	883	871	862	853	844
Summe	37.569	30.444	20.334	11.498	3.442
Veränderung ggü. 1990	-1,8%	-20,4%	-46,8%	-69,9%	-91,0%
Veränderung ggü. 2005		-19,0%	-45,9%	-69,4%	-90,8%
Nachr.:					
Eisen- und Stahlproduktion (Reduktion)	40.330	33.132	27.594	22.057	16.520
Rauchgasreinigungsanlagen	1.382	609	271	0	0

Quelle: Öko-Institut 2009

Im Ergebnis verringern sich die prozessbedingten CO₂-Emissionen im Innovationsszenario von 37,6 Mio. t CO₂ im Jahr 2005 auf 3,4 Mio. t CO₂ im Jahr 2050.

Die CO₂-Emissionen aus den Rauchgasentschwefelungsanlagen sinken durch den stark sinkenden Kohleneinsatz bis 2050 auf Null.

5.3.11.3 Prozessbedingte CH₄- und N₂O-Emissionen

Der Beitrag der prozessbedingten CH₄-Emissionen zu den gesamten Emissionen ist sehr gering, sie wurden im Projektionszeitraum bis 2050 konstant gehalten.

Für die Adipin- und Salpetersäureproduktion wurden der Projektion die folgenden Annahmen zu Grunde gelegt:

- Durch das verstärkte Preissignal des Emissionshandels wird die verfügbare Minderungstechnologie weiter verbessert.
- Für die N₂O-Emissionen aus der Produktion von Salpetersäure und Adipinsäure wird für das Innovationsszenario unterstellt, dass ab dem Jahr 2025 von allen Anlagen eine katalytische Zersetzung von 99,5 % erreicht wird.
- Unter anderem kann es bei hohen CO₂ Preisen wirtschaftlich sein, Anlagen zur katalytischen Zersetzung des N₂O redundant auszuführen, so dass bei Ausfall ei-

nes Katalysators weiterhin die N₂O Emissionen mit einem zweiten Katalysator vermieden werden können.

Tabelle 5.3-59: Szenario "Innovation", Entwicklung der CH₄- und N₂O-Emissionen aus Industrieprozessen 2005-2050, in kt CO₂-Äquivalenten

kt CO ₂ -Äquivalente	2005	Innovationsszenario			
		2020	2030	2040	2050
CH₄-Emissionen					
Industrieprozesse	2	2	2	2	2
Chemische Industrie	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Metallherstellung	2,0	1,9	1,9	1,9	1,9
N₂O-Emissionen					
Chemische Industrie	14.194	1.751	244	244	244
Summe	14.197	1.753	246	246	246
Veränderung ggü. 1990	-40,3%	-92,6%	-99,0%	-99,0%	-99,0%
Veränderung ggü. 2005		-87,7%	-98,3%	-98,3%	-98,3%

Quelle: Öko-Institut 2009

Da das Gesamtniveau der prozessbedingten CH₄- und N₂O-Emissionen aus Industrieprozessen vor allem durch den N₂O-Ausstoß bei der Adipin- und Salpetersäureproduktion bestimmt wird, zeigen die in diesem Bereichen ergriffenen Maßnahmen eine erhebliche Wirkung. Im Zeitraum 2005 bis 2050 gehen die gesamten prozessbedingten CH₄- und N₂O-Emissionen im Innovationsszenario um 99 % zurück (Tabelle 5.3-59).

5.3.11.4 Emissionen von FKW, HFKW und SF₆

Im Innovationsszenario wird davon ausgegangen, dass das Ordnungsrecht zur Vermeidung des Einsatzes von FKW, HFKW und SF₆ verschärft wird. Außerdem werden anahmegemäß durch eine konsequente Bepreisung weitere Anreize zur Reduktion der verbleibenden Emissionen gesetzt.

Hinsichtlich einer weiteren Reduktion der Emissionen von fluorierten Treibhausgasen sind die folgenden (ordnungsrechtlichen) Maßnahmen berücksichtigt.

Zunächst wird unterstellt, dass der Einsatz von HFKW in mobilen Kälteanlagen für alle Fahrzeugtypen und für die private und gewerbliche Kältebereitstellung ordnungsrechtlich ausgeschlossen wird. Hier ist eine Substitution von HFKW durch natürliche Kältemittel möglich. Außerdem werden ein Verbot für den Einsatz von HFKW bei der Herstellung PU-Schaumprodukten, bei XPS-Hartschäumen und bei Aerosolen (Dosier- und technische Aerosole) sowie eine Bepreisung des F-Gas-Einsatzes in den verbleibenden Bereichen unterstellt (Steuer bzw. Einbeziehung in das EU-Emissionshandelssystem). Durch das hohe Treibhausgaspotenzial wirkt ein Preissignal besonders stark und bewirkt technische Innovationen. Dadurch wird es wirtschaftlich, Substitute für diese F-Gase zu finden und einzusetzen. Außerdem werden so verstärkte Anreize für eine Kreislaufführung der F-Gase gesetzt. Insgesamt wird davon ausgegangen, dass eine Absenkung der Emissionen von 90% gegenüber 1990 möglich ist.

Tabelle 5.3-60: Szenario „Innovation“, Entwicklung der Emissionen FKW, HFKW und SF₆ 2005-2050, in kt CO₂-Äquivalenten

kt CO ₂ -Äquivalente	Innovationsszenario				
	2005	2020	2030	2040	2050
Fluorierte THG					
<i>HFKW-Emissionen</i>					
Kühl- und Klimaanlage	7.491	8.399	5.849	3.299	749
Schaumherstellung	1.250	471	355	240	125
Weitere Quellen	1.155	1.210	845	480	116
Zwischensumme HFKW	9.896	10.080	7.050	4.020	990
<i>FKW-Emissionen</i>					
Aluminiumproduktion	338	167	123	78	34
Kühl- und Klimaanlage	132	78	57	35	13
Halbleiterproduktion	249	125	92	58	25
Weitere Quellen	0	13	9	4	0
Zwischensumme FKW	718	383	280	176	72
<i>SF₆-Emissionen</i>					
Magnesium-Gießereien	668	524	371	219	67
Elektrische Anlagen	762	595	422	249	76
Reifenbefüllung	65	0	0	0	0
Schallschutzfenster	1.348	1.904	1.314	724	135
Weitere Quellen	537	442	317	191	66
Zwischensumme SF₆	3.380	3.464	2.422	1.380	338
Summe	13.994	13.927	9.751	5.575	1.399
Veränderung ggü. 1990	18,0%	17,4%	-17,8%	-53,0%	-88,2%
Veränderung ggü. 2005		-0,5%	-30,3%	-60,2%	-90,0%

Quelle: Öko-Institut 2009

5.3.11.5 Zusammenfassung

Im Innovationsszenario gehen die flüchtigen Emissionen aus dem Energiesektor, die Emissionen aus Industrieprozessen und aus F-Gasen bis 2050 um 92 % im Vergleich zu 2005 zurück. Im Jahr 2050 betragen die Emissionen noch 6,5 Mio. t CO₂-Äqu. Im Vergleich zum Referenzszenario beträgt die zusätzliche Emissionsminderung im Jahr 2050 rund 43 Mio. t CO₂-Äqu.. Dies verdeutlicht, dass in diesen Sektoren durch ambitionierte Maßnahmen noch erhebliche Emissionsminderungen erschlossen werden können.

Tabelle 5.3-61: Szenario „Innovation“, Entwicklung der Emissionen aus Industrieprozessen, F-Gasen und den flüchtigen Emissionen des Energiesektors 2005-2050, in kt CO₂-Äquivalenten

kt CO ₂ -Äquivalente	Innovationsszenario				
	2005	2020	2030	2040	2050
Prozessemissionen CO ₂	37.569	30.444	20.334	11.498	3.442
Fluorierte THG	13.994	13.927	9.751	5.575	1.399
Flüchtige CH ₄ -Emissionen des Energiesektors	12.732	4.964	3.067	2.009	1.420
CH ₄ und N ₂ O aus Industrieprozessen	15.371	1.753	246	246	246
Summe	79.665	51.088	33.398	19.328	6.507
Veränderung ggü. 1990	-21,6%	-49,7%	-67,1%	-81,0%	-93,6%
Veränderung ggü. 2005		-35,9%	-58,1%	-75,7%	-91,8%
Nachr.:					
Eisen- und Stahlproduktion (Reduktion)	40.330	33.132	27.594	22.057	16.520
Rauchgasreinigungsanlagen	1.382	609	271	0	0

Quelle: Öko-Institut 2009

5.3.12 Emissionen aus der Abfallwirtschaft

Die im Innovationsszenario unterstellten Maßnahmen und Entwicklungen betreffen ausschließlich die Emissionsbereiche jenseits der Abfalldeponien. Bei diesen sind die ergriffenen Maßnahmen bereits so wirksam, dass keine Emissionsminderungen erzielt werden können, die über die im Referenzszenario beschriebene Entwicklung hinausgehen.

Für den Bereich der kommunalen Abwasserbehandlung wurde im Innovationsszenario untersucht, welchen Effekt eine spezifische (Ab-) Wassereinsparung in der Größenordnung von einem Viertel bis 2050 hat. Grundlage dieser Annahme ist eine aktive Förderung von Wasser sparenden Armaturen, Geräten und Anlagen. Entsprechend gehen von 2005 bis 2050 die N₂O-Emissionen von 2,3 Mio. t CO₂-Äqu. auf etwa 1,6 Mio. t CO₂-Äqu. zurück.

Tabelle 5.3-62: Szenario „Innovation“, CH₄- und N₂O-Emissionen aus der Abfallwirtschaft 2005 bis 2050, in kt

kt	2005	Innovationsszenario			
		2020	2030	2040	2050
Einsatzmengen					
Deponien (organisches Material)	2.154	0	0	0	0
Kompostierungsanlagen	9.658	6.673	5.293	4.010	2.854
Vergärungsanlagen	2.842	3.593	4.330	4.901	5.300
Mechanisch-biologische Abfallbehandlung	2.520	3.287	3.081	2.853	2.610
CH₄-Emissionen					
Deponien	464	149	84	50	30
Kommunale Abwasserbehandlung	6	5	4	4	4
Kompostierung und Vergärung	28	19	15	11	8
Mechanisch-biologische Abfallbehandlung	0,38	0,18	0,17	0,16	0,14
Summe	498	173	103	65	42
N₂O-Emissionen					
Kommunale Abwasserbehandlung	7,57	6,69	6,27	5,81	5,31
Kompostierung und Vergärung	0,71	0,49	0,39	0,29	0,21
Mechanisch-biologische Abfallbehandlung	0,35	0,33	0,31	0,29	0,26
Summe	8,63	7,51	6,97	6,39	5,78
Summe CH₄ + N₂O (kt CO₂-Äqu.)	13.129	5.956	4.326	3.348	2.680
Veränderung ggü. 1990	-67,5%	-85,3%	-89,3%	-91,7%	-93,4%
Veränderung ggü. 2005	-	-54,6%	-67,0%	-74,5%	-79,6%

Quelle: Öko-Institut 2009

Auch für Kompostierungs- und Vergärung sowie die Abfallbehandlung in Mechanisch-Biologischen Abfallbehandlungsanlagen (MBA) wurde eine Verminderung des entsprechend verbrachten Abfallvolumens um spezifisch 25 % untersucht, bedingt durch verstärkte Maßnahmen zur Müllvermeidung und zur Wiederverwertung. Im Bereich der Müllkompostierung wurde unterstellt, dass im Zuge einer gezielten Biogasstrategie das Verhältnis der Behandlung organischer Abfälle in Kompostierungs- und Vergärungsanlagen deutlich in Richtung der Gasgewinnungsanlagen verschoben wird. Statt 2,5 Mio. t organischer Abfälle im Referenzszenario werden im Innovationsszenario im Jahr 2050 rund 5,3 Mio. t Abfälle zur Biogasgewinnung eingesetzt. In der Kombination beider Entwicklungen ergibt sich eine Minderung der CH₄-Emissionen um etwa 70 %, die Emissionen sinken um rund 0,4 Mio. t CO₂-Äqu. Insgesamt resultiert für die Kompostierungs- und MBA-Anlagen über den Szenarienzeitraum 2005 bis 2050 ein Rückgang um rund zwei Drittel, dies entspricht einer Emissionsminderung von 0,9 Mio. t CO₂-Äqu. auf 0,3 Mio. t CO₂-Äqu.

Die Entwicklung der Treibhausgasemissionen in der Abfallwirtschaft zeigt im Zeitraum 2005 bis 2050 sowohl hinsichtlich des Niveaus als auch der Struktur nach Quellsektoren bzw. Treibhausgasen erhebliche Veränderungen.

Die gesamten Treibhausgasemissionen in der Abfallwirtschaft sinken von 2005 bis 2050 um knapp 80 %. Bezogen auf das Ausgangsniveau von 1990 entspricht dies einem Rückgang von rund 93 %.

Der Anteil der Treibhausgasemissionen aus Kompostierungs- und Vergärungsanlagen im Jahr 2050 liegt im Innovationsszenario bei 8 %, im Referenzszenario sind es 19 %, . Als größte Emissionsquelle in der Abfallwirtschaft verbleiben auch im Innovationsszenario mit rund einem Drittel die kommunalen Abwasserbehandlungsanlagen.

Die CH₄-Emissionen repräsentieren im Jahr 2050 auch im Innovationsszenario ein Drittel der gesamten abfallwirtschaftlichen Treibhausgasemissionen. Entsprechend liegt der Beitrag der N₂O-Emissionen in diesem Sektor bei etwa zwei Dritteln.

5.3.13 Emissionen aus der Landwirtschaft

Im Innovationsszenario wird eine Minderung der CH₄- und N₂O-Emissionen aus der **Tierhaltung** durch zwei zentrale Maßnahmen herbeigeführt:

- deutlicher Abbau des Viehbestandes sowie
- gasdichte Lagerung von Gülle und verstärkte Fermentation der Gülle in Biogasanlagen.

Die deutsche Bevölkerung ist mit Energie- und Proteinzufuhr aus tierischen Lebensmitteln übertversorgt und dadurch hohen gesundheitlichen Risiken ausgesetzt. Der Fleischverzehr liegt gegenwärtig bei ca. 60 kg pro Person und Jahr; die aus gesundheitlicher Sicht optimale Menge beträgt dagegen etwa 20 kg pro Person und Jahr. Im Innovationsszenario wird mit entsprechenden politischen Instrumenten (Kapitel 9.12) erreicht, dass der Konsum tierischer Produkte bis zum Jahr 2050 sukzessive sinkt. Im Jahr 2050 verzehrt jede Person im Durchschnitt 20 kg (statt 60 kg) Fleisch, 260 kg (statt 330 kg) Milch (einschließlich Milchprodukte) und 130 (statt 220) Hühnereier [Woitowitz 2007]. Die geringeren Verzehrsmengen führen zu einer deutlichen Reduktion der Tierbestände in Deutschland, wobei der volle Selbstversorgungsgrad der einheimischen Bevölkerung gewährleistet bleibt. Betrachtet wird ausschließlich der Milchvieh-, Rind- und Schweinebestand.

Tabelle 5.3-63: Szenario „Innovation“, Viehbestand in Deutschland 2005 bis 2050, in Tsd.

Viehbestand (1.000)	2005	Innovationsszenario			
		2020	2030	2040	2050
Milchvieh	4.236	4.102	3.968	3.834	3.700
Rind	8.799	7.553	6.307	5.061	3.815
Schwein	26.858	22.693	18.529	14.364	10.200

Quelle: Öko-Institut 2009

Durch den Konsum der aus gesundheitlichen Aspekten optimalen Menge tierischer Produkte sinkt von 2005 bis 2050 der Bestand an Milchkühen um 13 %, an Rindern zur Rindfleischproduktion um 57 % und an Schweinen um 62 %, was entsprechend zu Minderungen der THG-Emissionen aus der enterischen Fermentation und aus dem Wirtschaftsdüngermanagement führt.

Die Treibhausgasemissionen aus durch den Viehbestandsabbau bereits verringerten Mengen an tierischen Exkrementen können durch veränderte Tierhaltungs- und Wirtschaftsdüngermanagementverfahren weiter reduziert werden. Die effektivste Maßnahme ist die gasdichte Lagerung der Gülle, um eine Ausgasung von CH_4 und N_2O während der Lagerungsdauer zu verhindern. Zugleich findet eine verstärkte Fermentation von Gülle in Biogasanlagen statt. In Biogasanlagen werden – vergleichbar mit der enterischen Fermentation im Magen der Wiederkäuer – die in der Gülle enthaltenen Nährstoffe durch Mikroorganismen verstoffwechselt und u.a. in Methan umgewandelt. Dieses Methan steht zur energetischen Nutzung in Blockheizkraftwerken zur Strom- und Wärmeproduktion zur Verfügung und kann fossile Energieträger ersetzen.

Eine weitere Möglichkeit zur Senkung der THG-Emissionen aus der Tierhaltung ist die weitere Produktivitätssteigerung der Tiere, die jedoch aus Gründen der damit einhergehenden gesundheitlichen Risiken und der artgerechten Haltung nicht weiter verfolgt wird.

Die N_2O -Emissionsentwicklung aus **landwirtschaftlichen Böden** basiert im Innovationszenario auf denselben Stellgrößen wie im Referenzzenario: Wiederum stellt der Einsatz von mineralischen Düngemitteln die bedeutendste Emissionsquelle von N_2O dar. Im Gegensatz zum Referenzzenario werden im Innovationsszenario spezifische Maßnahmen und Instrumente zugrunde gelegt, die Einfluss auf die N_2O -Emissionsentwicklung haben. Hierbei handelt es sich Maßnahmen, die in verschiedenen Kontexten (z.B. Biodiversitätsstrategie, Nachhaltigkeitsstrategie) bereits diskutiert wurden. Ihre Umsetzung in den kommenden Dekaden wird als realistisch eingeschätzt. Die einzelnen Maßnahmen greifen zu verschiedenen Zeitpunkten (z.B. Ausweitung des Ökolandbaus bis 2030) und laufen z. T. parallel (verbessertes Düngemanagement zwischen 2005 und 2050). Eine detaillierte Beschreibung der Maßnahmen erfolgt im Kapitel 9.12.

Im Vergleich zum Referenzzenario werden die N_2O -Emissionen aus landwirtschaftlichen Böden zwischen 2005 und 2050 um 35 % gemindert. Die größte Emissionsreduktion wird durch ordnungsrechtliche Maßnahmen bei der Kultivierung von Mooren erreicht (-58 % zwischen 2005 und 2050). Mittels Ausweitung des Ökolandbaus, Einführung einer Abgabe auf Stickstoffüberschüsse und verbessertem Düngermanagement wird die Einsatzmenge von synthetischen Düngemitteln bis 2050 um 38 % reduziert. Mit Rückgang des Viehbestandes, v.a. bei Rindern und Milchvieh wird die Rate der Exkrementausscheidung beim Weidegang um 36 % verringert.

Das geringste Minderungspotenzial besteht beim Einsatz von Wirtschaftsdünger und Ernterückständen. Prognosen über die Einsatzrate bis 2050 sind vor dem Hintergrund einer möglichen verstärkten Nutzung der Eingangssubstrate Gülle und Ernterückstände in Biogasanlagen einerseits und deren notwendigen Verwendung für den Erhalt der Bodenfruchtbarkeit und des -kohlenstoffs nur schwer zu präzisieren. Daher wird im Innovationszenario von einer eher konservativen Minderungsrate ausgegangen.

Die gesamten Treibhausgasemissionen der Landwirtschaft sinken von 2005 bis 2050 um 43 %. Im Vergleich zu den Emissionsniveaus von 1990 entspricht dies einer Reduktion von rund 51 % (Tabelle 5.3-64).

Tabelle 5.3-64: Szenario „Innovation“, CH₄- und N₂O-Emissionen aus der Landwirtschaft 2005 bis 2050, in Mio. t CO₂-Äquivalenten

Mio. t CO ₂ -Äquivalente	2005	Innovationsszenario			
		2020	2030	2040	2050
Quellbereich					
CH₄-Emissionen					
Fermentation	17,2	12,3	10,8	9,2	7,7
Wirtschaftsdünger	5,5	4,8	4,4	4,0	3,7
Böden	-0,6	-0,6	-0,6	-0,6	-0,6
Summe CH ₄	22,0	16,5	14,6	12,7	10,8
N₂O-Emissionen					
Wirtschaftsdünger	2,4	2,1	1,8	1,5	1,3
Böden	28,4	20,7	19,4	18,7	18,0
Summe N ₂ O	30,8	22,8	21,2	20,2	19,3
Summe CH₄ + N₂O	52,8	39,3	35,8	32,9	30,1
Veränderung ggü. 1990	-14,3%	-36,3%	-41,9%	-46,6%	-51,2%
Veränderung ggü. 2005		-25,6%	-32,1%	-37,7%	-43,0%

Quelle: Öko-Institut 2009

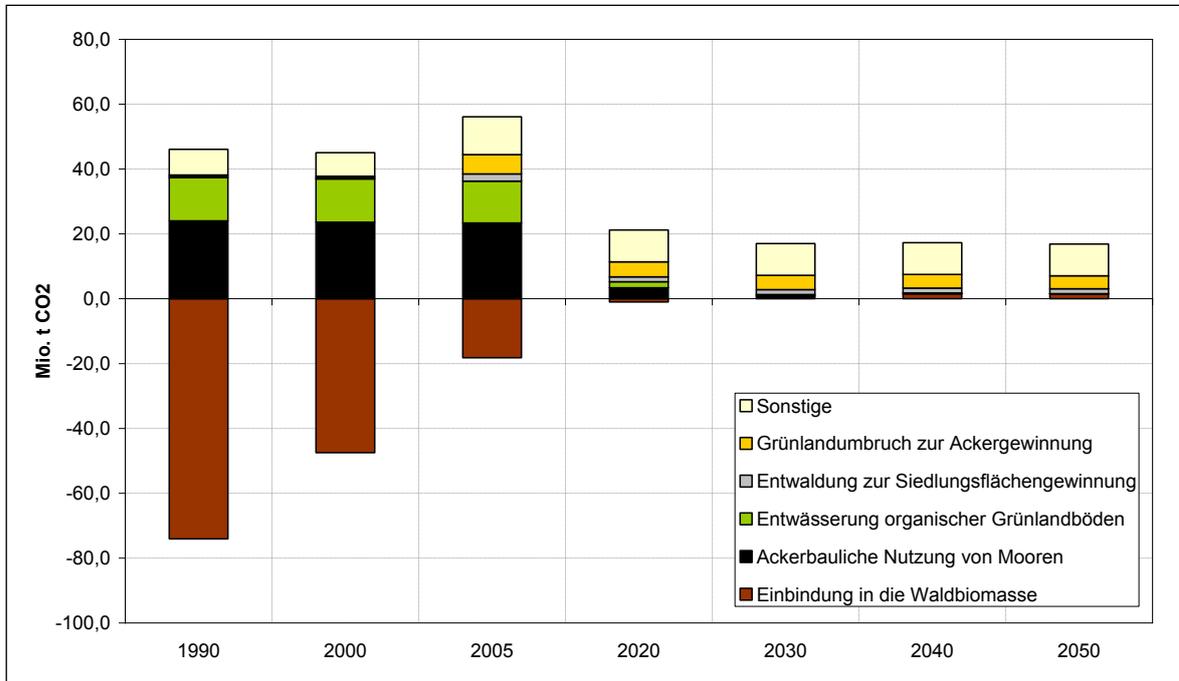
5.3.14 Emissionen aus Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft

Die im Innovationsszenario unterstellten Maßnahmen zielen vor allem auf die CO₂-Emissionen aus den emittierenden Landnutzungskategorien ab. Für die Forstwirtschaft wird angenommen, dass die Waldbewirtschaftung in Zukunft naturnah und nachhaltig vorgenommen wird. Ziel ist, die Senkenwirkung des Waldes, bzw. den Kohlenstoffvorrat in der Waldbiomasse zu erhalten und zu erhöhen. Dies soll über die Stabilisierung der Waldbestände durch Waldumbau (unter anderem vermehrt Laub- statt Nadelbäume, diverse waldbauliche Maßnahmen), Anpassung an sich verändernde Klimaänderungen und die Förderung natürlicher Waldgesellschaften erreicht werden. Vorratserhalt steht im Klimanutzen vor Aufforstung, da Aufforstungsmaßnahmen für die bestehende Waldsenke erst in ca. 20 Jahren einen Vorratszuwachs im Bestand bewirken.

Dem Ziel des Vorratserhalts steht in Zukunft der Nutzungsdruck, v.a. durch eine erhöhte Biomassenutzung entgegen. Das Innovationsszenario nimmt an, dass trotz nachhaltiger Forstwirtschaft die Fläche erntefähiger Waldbestände aufgrund der Altersklassenstruktur des Waldes und der damit verbundenen Bewirtschaftung abnimmt. Dies betrifft insbesondere den Vorrat bei Laubbäumen, da der gegenwärtige Stammdurchmesser bei Buche und Eiche in den dominierenden Altersklassenstrukturen in den nächsten Dekaden über den Richtwerten für die Ernte liegen wird.

Daher greifen im Innovationsszenario die Maßnahmen für die CO₂-Reduktion im LULUCF-Sektor an den vier identifizierten Hauptquellen an, die nicht mehr durch eine starke Senkenleistung des Waldes kompensiert werden können und daher in ihrer Emissionshöhe reduziert werden müssen. Durch den Rückgang der emissionsverursachenden Flächennutzung und -veränderung gehen von 2005 bis 2050 die CO₂-Emissionen um 73 % zurück. Bei Einbeziehung der CO₂-Einbindung in die Waldbiomasse nimmt dieser Rückgang auf 56 % ab, da die Waldsenke im Jahr 2005 noch 32 % der Emissionen aus der Landnutzung und Landnutzungsänderung kompensieren konnte (Abbildung 5.3-50).

Abbildung 5.3-50: Szenario „Innovation“, Kohlendioxid-Emissionen und –Einbindung aus Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft 1990 – 2050, in Mio. t CO₂



Quelle: Öko-Institut 2009

Die zugrunde liegenden Maßnahmen wurden bereits in verschiedenen Kontexten (z.B. Biodiversitätsstrategie, Cross Compliance) diskutiert. Ihre Umsetzung in den kommenden Dekaden wird als realistisch eingeschätzt. Eine detaillierte Beschreibung der Maßnahmen erfolgt in Kapitel 9.13.

Durch den Schutz von Grünland im Rahmen der Cross Compliance sowie durch die Umsetzung von Zielen der Biodiversitätsstrategie der Bundesregierung wird der Flächenanteil mit Grünlandumbruch um 33 % reduziert. In der gleichen Größenordnung kann über ordnungsrechtliche Maßnahmen die Flächenversiegelung verringert werden.

Den größten Minderungseffekt hat die Reduzierung der Landnutzungsänderungen mit bedeutender Kohlenstofffreisetzung (Flächen mit organischen Böden, die unter ackerbaulicher Nutzung stehen oder als Grünland genutzt und hierfür entwässert werden). Untersuchungen bescheinigen der Moorumnutzung ein hohes Einsparungspotenzial [Mc Kinsey 2009; Freibauer/Drösler 2009], welches durch Anreize (Förderung von Moorrenaturierung, Anrechnung von Paludikultur als Nutzungsalternative für EU-Zahlungsansprüchen) bis 2050 nahezu vollständig ausgeschöpft werden kann (Tabelle 5.3-65).

Tabelle 5.3-65: Szenario „Innovation“, CO₂-Emissionen und –Einbindung aus Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft 1990 – 2050, in Mio. t CO₂

kha	1990	2005	Innovationsszenario			
			2020	2030	2040	2050
Flächennutzung						
Fläche der Moornutzung	596	579	83	19	4	1
Gründlandfläche unter Entwässerung	726	704	101	23	5	1
Entwaldungsfläche für Siedlungsfläche	1	7	4	4	4	4
Fläche unter Gründlandumbruch	6	79	61	58	55	53
Mio. t CO₂						
CO₂-Emissionen und Einbindung						
Einbindung in die Waldbiomasse	-74,1	-18,2	-1,0	0,1	1,5	1,5
Ackerbauliche Nutzung von Mooren	24,0	23,4	3,4	0,8	0,2	0,0
Entwässerung organischer Grünlandböden	13,3	12,9	1,9	0,4	0,1	0,0
Entwaldung zur Siedlungsflächengewinnung	0,3	2,2	1,5	1,5	1,5	1,5
Grünlandumbruch zur Ackergewinnung	0,5	6,0	4,6	4,4	4,2	4,0
Sonstige	7,9	11,7	9,8	9,8	9,8	9,8
Summe CO₂ ohne CO₂-Einbindung	46,1	56,1	21,2	16,9	15,8	15,4
Summe CO₂-Emissionen und Einbindung	-28,0	37,9	20,2	17,0	17,3	16,9
Veränderung CO ₂ -Emissionen ggü. 1990		21,8%	-54,0%	-63,3%	-65,7%	-66,6%
Veränderung CO ₂ -Emissionen und -Einbindung ggü. 1990		235,6%	172,2%	160,9%	161,8%	160,3%
Veränderung CO ₂ -Emissionen ggü. 2005			-62,2%	-69,9%	-71,9%	-72,6%
Veränderung CO ₂ -Emissionen und -Einbindung ggü. 2005			-46,8%	-55,1%	-54,4%	-55,5%

Quelle: Öko-Institut 2009

Die hohe Emissionsreduktion bei der ackerbaulichen Nutzung von Böden und der Entwässerung von Grünlandböden bewirkt, dass trotz abnehmender CO₂-Einbindung durch die Forstwirtschaft die CO₂-Emissionen aus dem LULUCF-Sektor im Innovationsszenario von 2005 bis 2050 um 56 % und zwischen 1990 und 2050 um 67 % abnehmen.

5.3.15 Gesamte Treibhausgasemissionen

Die gesamten Treibhausgasemissionen im Innovationsszenario reduzieren sich zwischen 1990 und 2050 um 87 % (Variante „ohne CCS“) bzw. 86 % (Variante „mit CCS“). Im Vergleich zum Jahr 2005 – als Basisjahr für die Szenarientwicklung – ergeben sich Emissionsminderungen von rund 85 % bzw. 84 %.

Tabelle 5.3-66: Szenario „Innovation“, Gesamte Treibhausgasemissionen 1990 bis 2050, in Mio. t CO₂-Äquivalenten

Mio. t CO ₂ -Äqu.	Innovationsszenario					
	1990	2005	2020	2030	2040	2050
Energiebedingte Emissionen (ohne CCS)						
CO ₂	1.005	835	581	348	196	95
CH ₄	5	1	1	1	0	0
N ₂ O	8	7	6	4	3	2
Energiebedingte Emissionen (mit CCS)						
CO ₂	1.005	835	581	352	198	104
CH ₄	5	1	1	1	0	0
N ₂ O	8	7	6	4	3	2
Flüchtige und prozessbedingte Emissionen						
CO ₂	38	37	30	20	11	3
CH ₄	28	13	5	3	2	1
N ₂ O	24	14	2	0	0	0
HFKW	4	10	10	7	4	1
FKW	3	1	0	0	0	0
SF ₆	5	5	3	2	1	0
Produktverwendung						
CO ₂	3	2	2	2	2	2
CH ₄	0	0	0	0	0	0
N ₂ O	2	1	1	1	1	1
Landwirtschaft						
CH ₄	27	22	17	15	13	11
N ₂ O	34	31	23	21	20	19
Landnutzung und Forsten						
CO ₂	-28	38	20	17	17	17
N ₂ O	0	1	1	1	1	1
Abfallwirtschaft						
CH ₄	38	10	4	2	1	1
N ₂ O	2	3	2	2	2	2
Insgesamt ohne CCS	1.199	1.031	709	447	276	157
Insgesamt mit CCS	1.199	1.031	709	451	278	166
Insgesamt ohne CCS						
Veränderung ggü. 1990	-	-14,0%	-40,8%	-62,7%	-77,0%	-86,9%
Veränderung ggü. 2005	16,3%	-	-31,2%	-56,6%	-73,3%	-84,8%
Insgesamt mit CCS						
Veränderung ggü. 1990	-	-14,0%	-40,8%	-62,4%	-76,8%	-86,2%
Veränderung ggü. 2005	16,3%	-	-31,2%	-56,3%	-73,1%	-83,9%
Anmerkung: Emissionsdaten für 2005 sind Inventardaten; energiebedingte Emissionen inklusive CO ₂ aus Rauchgasreinigungsanlagen						

Quelle: Prognos und Öko-Institut 2009

Den wesentlichen Treiber hierfür bilden die drastisch sinkenden energiebedingten Emissionen, v.a. in der Stromerzeugung, im Verkehr sowie im GHD-Sektor und bei den privaten Haushalten. Deutlich kleiner ist der Beitrag der Industrie. Auch die prozessbedingten Treibhausgasemissionen verringern sich erheblich. Im Vergleich zum Jahr 1990 (wie auch bezogen auf das Jahr 2005) ergeben sich hier Minderungen von rund 93 %.

Die Struktur der Treibhausgasemissionen ändert sich ebenfalls drastisch. Die energiebedingten Emissionen repräsentieren im Jahr 2050 nur noch einen Anteil von knapp 63 %. Dagegen steigen die Emissionsanteile der Sektoren mit nur begrenzten Emissionsminderungen bzw. Emissionsminderungsmöglichkeiten erheblich, im Jahr 2050 stammen rund

19 % der gesamten Treibhausgasemissionen im Innovationsszenario aus der Landwirtschaft und rund 11 % sind dem Sektor Landnutzung und Forstwirtschaft zuzurechnen.

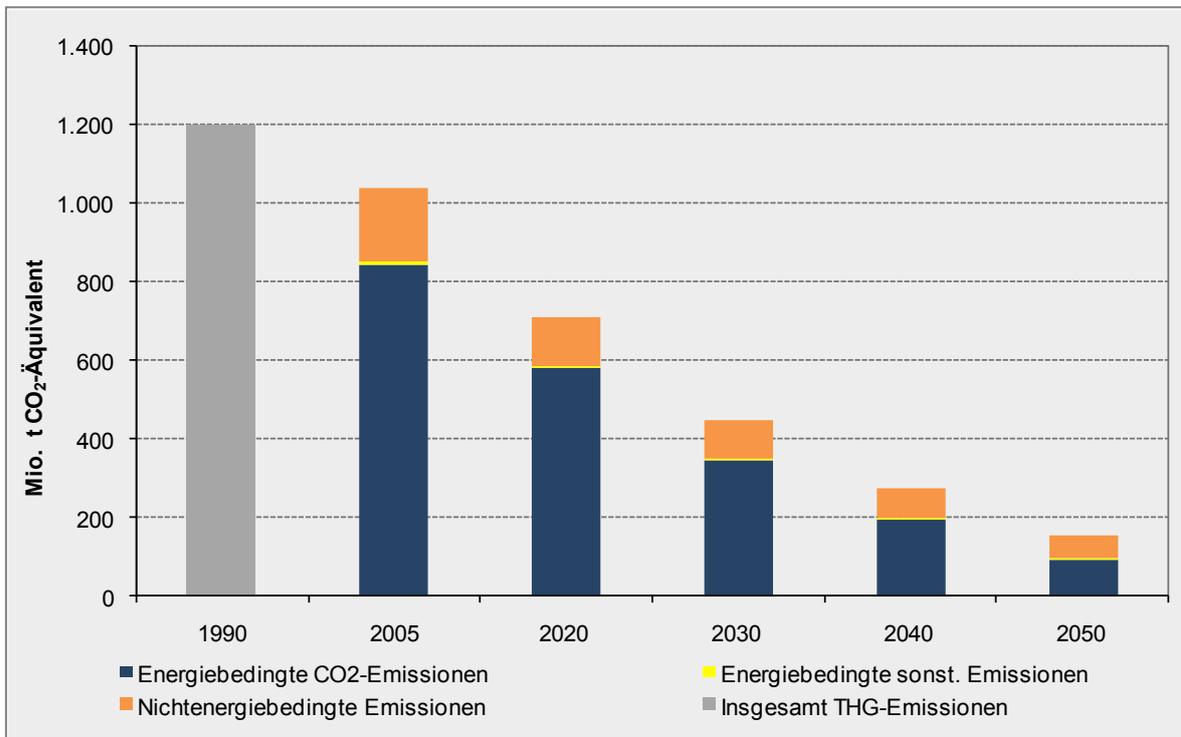
Trotz dieser Rückgänge wird mit den im Innovationsszenario berücksichtigten Maßnahmen das Ziel einer Emissionsminderung um 95 % nicht erreicht. Die zu schließende Lücke beträgt etwa 97 Mio. t CO₂-Äqu.

Eine wesentliche Ursache für die Zielverfehlung bildet die Situation im Bereich Landnutzung und Forstwirtschaft. Hier entwickelt sich eine Netto-CO₂-Senke im Zeitraum 1990 bis 2050 zu einer signifikanten CO₂-Quelle. Wird das Minderungsziel von 95 % auf die Treibhausgasemissionen ohne Berücksichtigung von Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft bezogen, so ergibt sich einerseits nur ein sehr geringfügig höheres Zielniveau für das Jahr 2050 (61 Mio. t CO₂-Äqu. statt 60 Mio. t CO₂-Äqu.). Gleichzeitig entfällt bei Ausklammerung dieses Sektors das dort adressierbare Minderungspotenzial, so dass sich im Zieljahr des Innovationsszenarios zwar ein etwas niedrigeres Emissionsniveau (139 Mio. t CO₂-Äqu. statt 157 Mio. t CO₂-Äqu.) einstellt, die zur Erreichung des 95 %-Ziels verbleibende Lücke sinkt jedoch nur um knapp 19 Mio. t CO₂-Äqu. auf 78 Mio. t CO₂-Äqu.

Die Pro-Kopf-Emissionen im Innovationsszenario (in der Variante „ohne CCS“ – die Werte in der Variante „mit CCS“ unterscheiden sich nur marginal) sinken von 12,5 t CO₂-Äqu. bzw. 11,1 t CO₂ im Jahr 2005 bis 2030 auf Werte von 5,7 t CO₂-Äqu. bzw. 4,9 t CO₂ und erreichen im Jahr 2050 Werte von 2,2 t CO₂-Äqu. (alle Treibhausgase) bzw. 1,6 t CO₂. Unter Berücksichtigung der Entwicklung von 1990 bis 2005 wird damit für die Pro-Kopf-Emissionen eine Reduktion von 86 % erreicht.

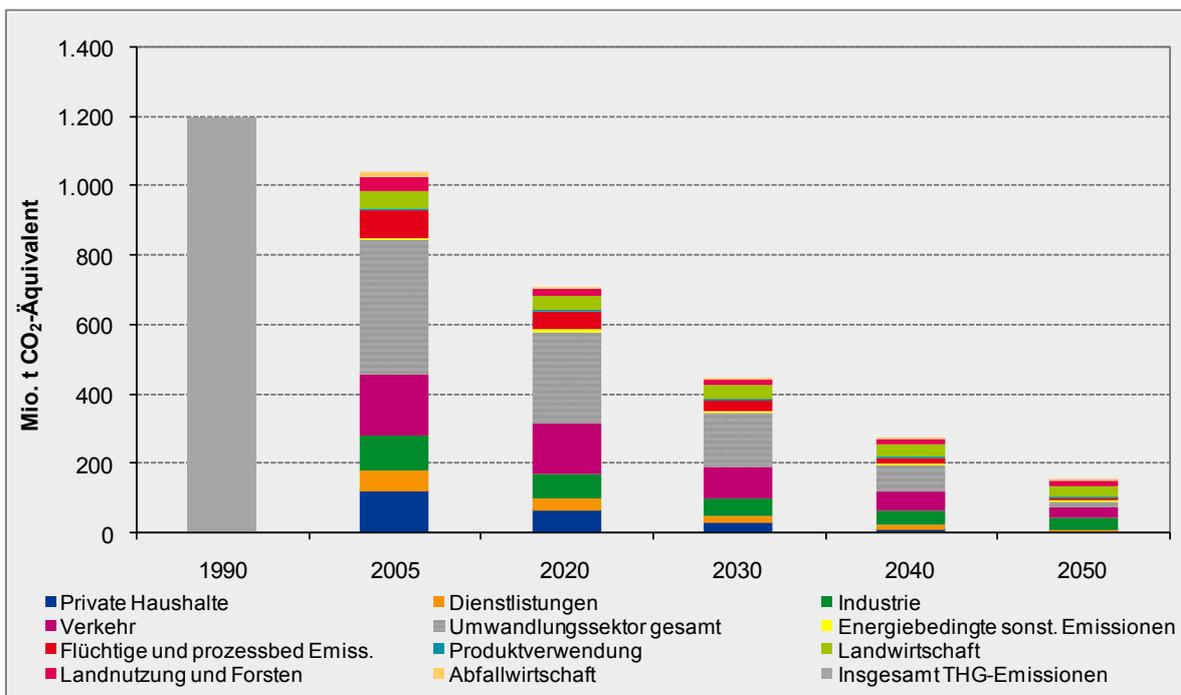
Die Berechnung der kumulierten Emissionen (ab 2005) führt für das Jahr 2030 zu einem Wert von 20 Mrd. t CO₂-Äqu. (alle Treibhausgase) bzw. knapp 18 Mrd. t CO₂. Durch die massiven Emissionsminderungen im Innovationsszenario ergibt sich bis zum Jahr 2050 nur noch ein Zuwachs von 5 Mrd. t CO₂-Äqu. (alle Treibhausgase) bzw. 4 Mrd. t CO₂, so dass die kumulierten Emissionen für den Gesamtzeitraum 2005 bis 2050 etwa 22 Mrd. t CO₂ bzw. 25,5 Mrd. t CO₂-Äqu. (alle Treibhausgase) betragen. Damit ergibt für die bis 2030 emittierten Treibhausgasmengen ein Anteil von etwa 80 % der kumulierten Gesamtemissionen im Zeitraum 2005 bis 2050. Für den Szenarienstützpunkt 2020 liegt der entsprechende Anteil bei deutlich über 50 %.

Abbildung 5.3-51: Szenario „Innovation“, Variante „ohne CCS“, Treibhausgasemissionen gesamt nach Gasen 1990 – 2050, in Mio. t CO₂-Äquivalenten



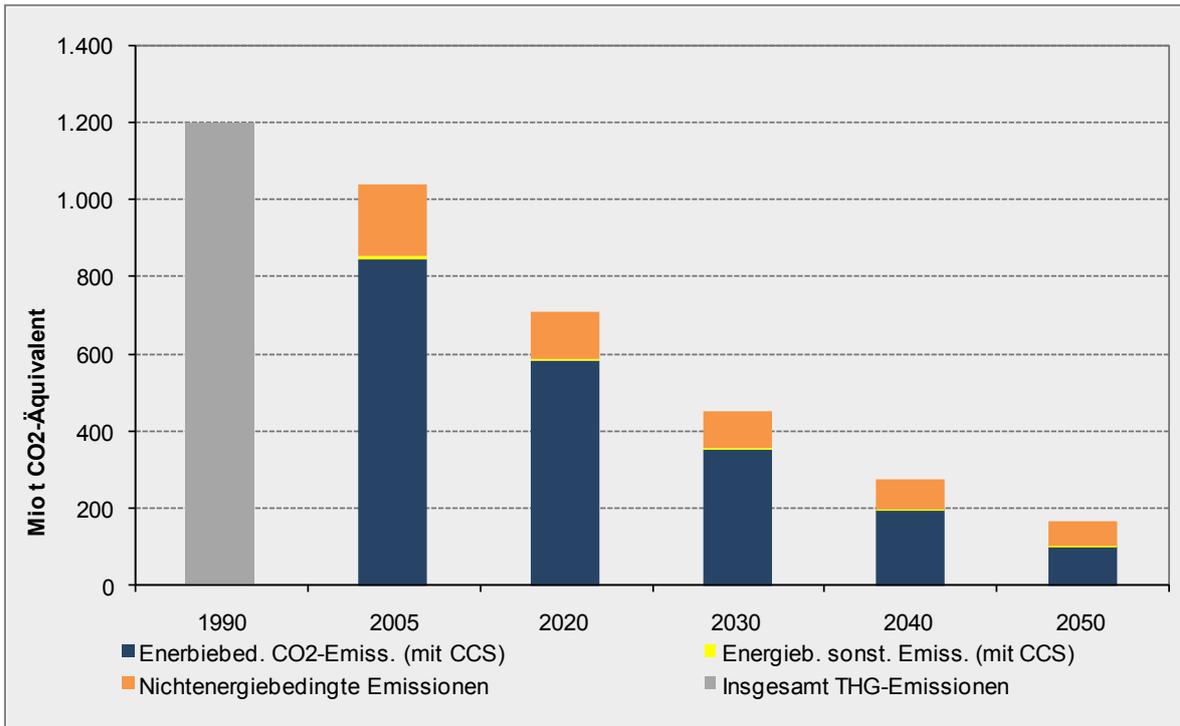
Quelle: Prognos und Öko-Institut 2009

Abbildung 5.3-52: Szenario „Innovation“, Variante „ohne CCS“, Treibhausgasemissionen gesamt nach Sektoren 1990 – 2050, in Mio. t CO₂-Äquivalenten



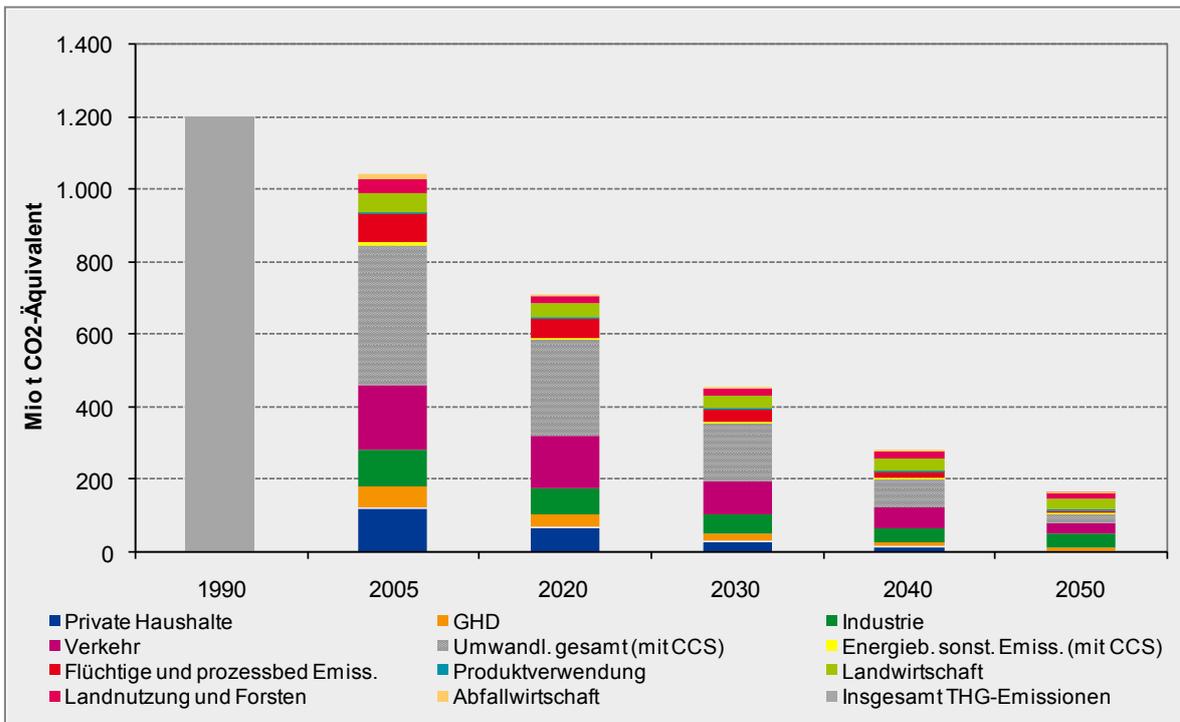
Quelle: Prognos und Öko-Institut 2009

Abbildung 5.3-53: Szenario „Innovation“, Variante „mit CCS“, Treibhausgasemissionen gesamt nach Gasen 1990 – 2050, in Mio. t CO₂-Äquivalenten



Quelle: Prognos und Öko-Institut 2009

Abbildung 5.3-54: Szenario „Innovation“, Variante „ohne CCS“, Treibhausgasemissionen gesamt nach Sektoren 1990 – 2050, in Mio. t CO₂-Äquivalenten



Quelle: Prognos und Öko-Institut 2009