
ENDBERICHT

Vorstudie zum Klimaschutzplan 2025 für Hessen

Auftraggeber:

Hessisches Ministerium für Umwelt, Klimaschutz,
Landwirtschaft und Verbraucherschutz

Leipzig, 29.02.2016



Impressum

Auftraggeber

Hessisches Ministerium für Umwelt, Klimaschutz,
Landwirtschaft und Verbraucherschutz
Mainzer Str. 80
65189 Wiesbaden

Auftragnehmer

Leipziger Institut für Energie GmbH
Lessingstraße 2
04109 Leipzig

Ein Unternehmen der 
Technischen Universität Hamburg-Harburg
und der TuTech Innovation GmbH

Bearbeitung

[Marcel Ebert](#)

Telefon 03 41 / 22 47 62 22

E-Mail Marcel.Ebert@ie-leipzig.com

[Ilka Erfurt](#)

[Johannes Gansler](#)

[Christian Lorenz](#)

[Matthias Reichmuth](#)

[Anne Scheuermann](#)

Laufzeit

Juli 2015 bis Februar 2016

Datum

Leipzig, 29.02.2016

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	1
1 Einleitung	8
2 Treibhausgas-Bilanzierung und Szenarien	10
2.1 Treibhausgase	10
2.2 Bilanzierungsprinzipien	12
2.3 Methodik und Datengrundlagen	14
2.4 Sektoren- und deren IPCC-Quellkategorien	23
2.5 Szenarien	24
2.6 Sozioökonomische Rahmenbedingungen	26
3 Treibhausgas-Emissionen – Historie Trend Ziel	28
3.1 Ergebnisse im Überblick	28
3.2 Energieumwandlung und -verteilung	49
3.3 Industrie	58
3.4 Verkehr	67
3.5 Gewerbe, Handel, Dienstleistung	79
3.6 Haushalte	87
3.7 Landwirtschaft	94
3.8 Forstwirtschaft	99
3.9 Übrige Verbraucher	102
4 Gesamtwirtschaftliche Effekte	112
Verzeichnisse	122
Abkürzungsverzeichnis	123
Abbildungsverzeichnis	125
Tabellenverzeichnis	128
Literaturverzeichnis	130

Zusammenfassung

Der Hessische Koalitionsvertrag 2014 – 2019 zwischen CDU und Bündnis 90/Die Grünen beinhaltet als zentrales Vorhaben die deutliche Verminderung der klimaschädlichen Treibhausgase, insbesondere durch eine aktive Gestaltung der Energiewende.

In Verantwortung für den Klimaschutz sowie zum Erreichen der im Kyoto-Protokoll von 1997 festgelegten Ziele zur Verminderung der Treibhausgasemissionen erfolgt im Rahmen dieser Vorstudie zum Hessischen Klimaschutzplan 2025 die Dokumentation der historischen Treibhausgasbilanz für die Jahre 1990 bis 2014 sowie die Erstellung zweier Treibhausgas-Szenarien (Trend- und Zielszenario) für eine mögliche zukünftige Entwicklung der Jahre 2015 bis 2050.

Historie

Ohne die Anrechnung des Stromimportes und der Treibhausgasenken im Wald verringerten sich die CO₂-Äquivalent-Emissionen der direkten Treibhausgase (CO₂, CH₄, N₂O, HFKW, FKW und SF₆) von 51,5 Mio. t CO_{2äq}/a im Jahr 1990 auf 38,2 Mio. t CO_{2äq}/a im Jahr 2014 (siehe Abbildung A). Dies entspricht einer **Reduktion um ca. 13,3 Mio. t CO_{2äq}** bzw. einem Rückgang von etwa **26 % gegenüber dem Kyoto-Basisjahr 1990**.

Trendszenario

Im Trendszenario wird davon ausgegangen, dass bisherige Entwicklungen sich weitgehend fortsetzen, während aktuelle Hemmnisse für einen zielorientierten Klimaschutz in diesem Szenario bestehen bleiben.

Die **THG-Emissionen im Trendszenario** werden im Vergleich zu 1990 um **32 % bis 2025 (- 16,3 Mio. t**

CO_{2äq}) bzw. 52 % bis 2050 (- 26,9 Mio. t CO_{2äq}) sinken (siehe Abbildung A).

Zielszenario

Im Zielszenario wird ein möglicher Pfad aufgezeigt, der zum Erreichen der vordefinierten energie- und klimapolitischen Ziele bzw. Reduktionsziele des Landes Hessen gänzlich oder zumindest weitgehend beiträgt. Zur Erreichung des vom Kabinett beschlossenen Ziels – *Klimaneutrales Hessen: Treibhausgas-Reduktion um 90 % bis 2050* – müssen die Anstrengungen in allen Bereichen stark intensiviert werden (siehe Abbildung A). Die grundlegenden Annahmen zum Zielszenario 2050 sind folgendermaßen definiert:

- Zusätzliche Aktivitäten und Maßnahmen zum Klimaschutz werden – im Vergleich zum Trend – erst ab 2018 wirksam. Die Jahre zuvor können bzw. müssen für die Implementierung verstärkter Klimaschutzanstrengungen genutzt werden.
- Die zusätzlichen Aktivitäten bzw. Maßnahmen über den Trend hinaus bis zum Jahr 2050 basieren auf bekannten und heute verfügbaren Technologien.
- Neuere Technologien, wie z.B. Elektrofahrzeuge, kommen bis 2025 erst in sehr begrenztem Umfang zum Einsatz.
- Kritische oder noch sehr unwirtschaftliche Technologien (z.B. CCS, Power to Gas) sind im Szenario bis 2025 nicht enthalten.

- Die Realisierung der zusätzlichen Klimaschutzpotenziale bedarf einer intensiven und aktiven Beteiligung aller Akteure im Land.
- Nach 2025 sind die Aktivitäten zur Energieeinsparung und Energieeffizienz in allen Sektoren kontinuierlich weiter fortzusetzen.
- Um das Ziel einer 90-%- THG-Minderung zu erreichen, müssen erneuerbare Energien konsequent ausgebaut und genutzt werden. Hierzu ist u.a. ein Ausbau der Windenergie auf ca. 2 % der Landesfläche erforderlich. Zudem muss Strom aus erneuerbaren Energien zunehmend in neue Anwendungsgebiete vordringen.
- Nach 2025 werden bis dahin noch eher wenig eingesetzte – aber bereits heute bekannte – Technologien eine breitere Anwendung finden müssen, um zur Zielerreichung beizutragen und fossile Energieträger zu verdrängen. Zentrale Annahmen hierzu betreffen den Straßenverkehr und die Erdgasbereitstellung:
 - Bis 2050 wird beim PKW-Verkehr ein Anteil von 80 % mit Strom und 20 % mit Gas betrieben.
 - Bis 2050 werden die Fahrzeuge im Straßengüterverkehr zu 20 % mit Strom, zu 60 % mit Gas und zu 20 % mit Diesel betrieben.
 - Nutzung von Strom aus erneuerbaren Energien zur Gaserzeugung (Power to Gas) langsam beginnend ab 2025 und kontinuierlich steigend bis 2050; Gas besteht im Jahr 2050 zu 80 % aus erneuerbaren Energien, welches 2050 etwa zu 13 % aus dezentralen Anlagen in Hessen resultiert und zu 87 % aus zentralen Anlagen mit Strom aus Offshore-Anlagen importiert wird.
- Als Option und alternativ zur Erdgaserzeugung aus Strom auf Basis von erneuerbaren Energien kann der Strom auch zum Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft oder direkt im Wärmesektor (z.B. mittels

Wärmespeicher) eingesetzt werden. Mit Blick auf die Zeit nach 2025 bestehen zurzeit keine aktuellen Handlungsnotwendigkeiten, aber die Entwicklungen sind zu beobachten.

Die **THG-Emissionen im Zielszenario** werden im Vergleich zu 1990 um **41 % bis 2025 (- 21,1 Mio. t CO_{2äq})** bzw. **90 % bis 2050 (- 46,2 Mio. t CO_{2äq})** sinken (siehe Abbildung B und C).

Im Vergleich zum Trendszenario führt die Realisierung der mit dem Zielszenario verbundenen Maßnahmen zu vielfältigen strukturellen Veränderungen beim Energieverbrauch und der Energiebereitstellung.

Die Zahlungsströme innerhalb der Energieversorgungsstrukturen ändern sich nicht nur regional; vielmehr ist hier die nationale und internationale Verflechtung der Wirtschaft zu berücksichtigen.

Als Gewinner der Energiewende können – unter dem regionalen Blickwinkel – in der Regel das Baugewerbe und das Handwerk identifiziert werden. Die mit Anlageninvestitionen verbundenen Wertschöpfungseffekte sind sehr von den Produktionsstätten der Anlagenhersteller abhängig. Hierbei kommen alle räumlichen Dimensionen – also Hessen, Deutschland und das Ausland – in Betracht. In der Summe lassen sich meist positive Effekte feststellen.

Trotz der tendenziell positiven volkswirtschaftlichen Effekte darf nicht übersehen werden, dass die Entscheidung zu Investitionen von vielen Einzelentscheidungen abhängt. Für Verbraucher und Unternehmen im Land sind volkswirtschaftliche Sichtweisen meist kein Investitionskriterium. Daher ist es notwendig, die bekannten Investitionshemmnisse im weiteren Prozess des Klimaschutzplanes zu berücksichtigen, um

die gesamtwirtschaftlichen Effekte für Hessen nutzbar zu machen.

Empfehlungen und Fazit für den Zeithorizont bis 2025

Eine Minderung der THG-Emissionen in Hessen im Vergleich zu 1990 um

- 30 % bis 2020 und
- 40 % bis 2025

ist eine realistische Option.

Eine Realisierung des Zielszenarios würde aus heutiger Sicht die Chance bieten, den Zielpfad einer lang-

fristigen THG-Minderung von 90 % bis 2050 einzuschlagen.

Sofern die Umsetzung der angenommen Maßnahmen sowie deutliche Intensivierung der Aktivitäten in Hessen stattfindet ist das Zielszenario realistisch. Der Realisierungsprozess für die Umsetzung der Aktivitäten und Maßnahmen zur Zielerreichung ist dabei auf eine breite Basis zu stellen und die Beteiligung der Akteure im Bundesland unerlässlich.

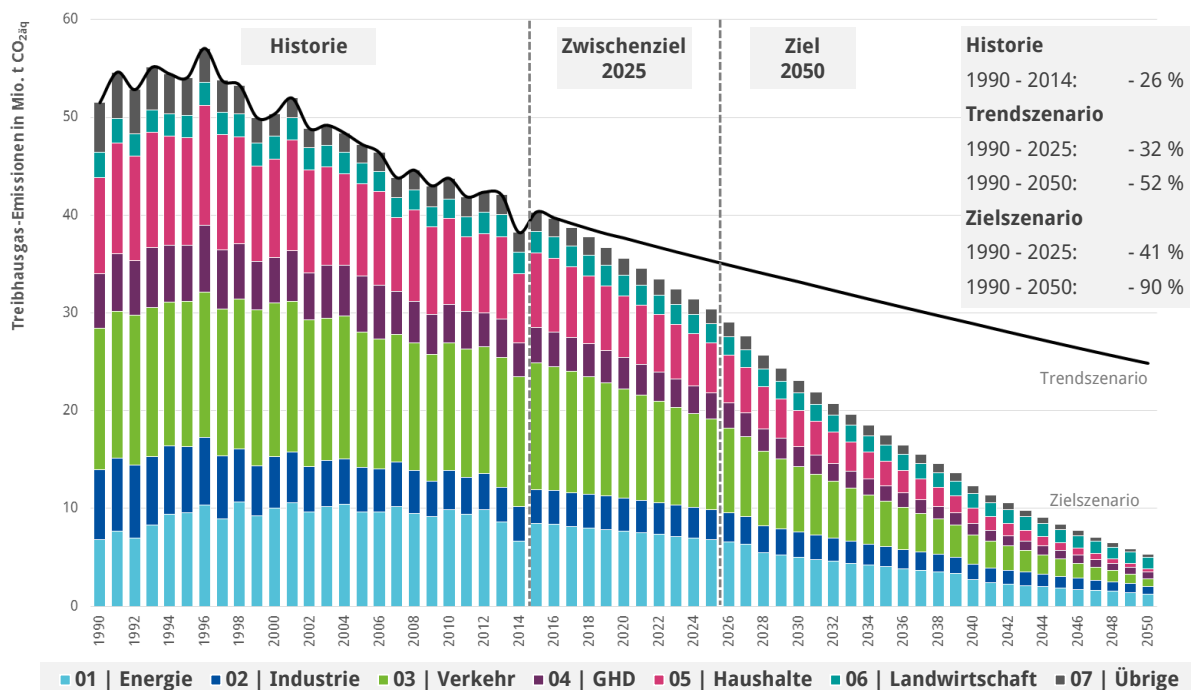


Abbildung A: Treibhausgasemissionen nach Sektoren 1990 bis 2050 – Historie sowie Trend und Ziel (Quellenbilanz)
 Quelle: siehe Angaben zu den jeweiligen Sektoren, Berechnung und Darstellung IE Leipzig, Normierung der Treibhausgase (CO₂, CH₄, N₂O, F-Gase) in CO_{2äq}-Emissionen mittels GWP_{SAR}-Werte

in Prozent (ohne Senken und Strombezug)	Historische THG-Minderung 1990 - 2014	Ziel 2025 THG-Minderung 1990 - 2025	Ziel 2050 THG-Minderung 1990 - 2050
01 Energie	-2%	-1%	-82%
02 Industrie	-52%	-57%	-88%
03 Verkehr	-8%	-36%	-95%
04 GHD	-37%	-51%	-88%
05 Haushalte	-28%	-48%	-96%
06 Landwirtschaft	-13%	-26%	-55%
07 Übrige	-61%	-70%	-94%
Summe Hessen	-26%	-41%	-90%

Abbildung B: Prozentuale Treibhausgas-Minderungen nach Sektoren – Historie und Zielszenario (Quellenbilanz)
Quelle: siehe Angaben zu den jeweiligen Sektoren, Berechnung und Darstellung IE Leipzig

in Mio. t CO₂äq (ohne Senken und Strombezug)	Historische THG-Minderung 1990 - 2014	Ziel 2025 THG-Minderung 1990 - 2025	Ziel 2050 THG-Minderung 1990 - 2050
01 Energie	-0,2	-0,1	-5,6
02 Industrie	-3,7	-4,1	-6,3
03 Verkehr	-1,2	-5,2	-13,7
04 GHD	-2,1	-2,8	-4,9
05 Haushalte	-2,8	-4,7	-9,5
06 Landwirtschaft	-0,3	-0,7	-1,4
07 Übrige	-3,1	-3,6	-4,8
Summe Hessen	-13,3	-21,1	-46,2

Abbildung C: Absolute Treibhausgas-Minderungen nach Sektoren – Historie und Zielszenario (Quellenbilanz)
Quelle: siehe Angaben zu den jeweiligen Sektoren, Berechnung und Darstellung IE Leipzig

Zielszenario: Senken - Forstwirtschaft

Neben den Quellen von Treibhausgasemissionen werden im Folgenden die mit der hessischen Forstwirtschaft verbundenen THG-Senken berücksichtigt und deren Einfluss auf die Gesamtbilanz aufgezeigt. Die THG-Emissionen aus Wäldern werden größtenteils bestimmt durch die Einbindung und Freisetzung von CO₂.

Ebenso wie im Trendszenario wird für eine mögliche Entwicklung der Kohlenstoffbilanz der Wälder in Hessen im Zielszenario davon ausgegangen, dass die Waldfläche zwischen 2014 und 2050 unverändert bleibt und eine nachhaltige Holznutzung bei anhaltender Nachfrage nach Holz stattfindet¹. Die Bindung von CO₂ in Holzprodukten (langfristige Verwendung von Holz in einer langen Wertstoffkaskade) sowie die Verwendung von Holz als Substitution von energieintensiven Materialien, wie u.a. Aluminium, Stahl, Kunststoffen und Beton, und deren Wirkung als CO₂-Senke wurden im Rahmen der Vorstudie nicht berücksichtigt².

Unter den beschriebenen Annahmen werden der jährliche Holzzuwachs und die Holznutzung bis zum Jahr 2050 im Zielszenario ausgeglichen sein.³ Die Bilanz

aus jährlicher Einbindung und Freisetzung von CO₂ geht auf null zurück, d. h. der Wald wird im Jahr 2050 keine CO₂-Senke mehr sein (Abbildung D). Während die Speicherung von Kohlenstoff im Wald zurückgeht, steigt bei einer zunehmenden stofflichen Nutzung die (zeitlich begrenzte) Speicherfunktion in den Holzprodukten.

Im Zielszenario verringern sich die THG-Emissionen Hessens unter Berücksichtigung der Senken von 46,2 Mio. t CO_{2äq} /a auf 5,3 Mio. t CO_{2äq} /a im Jahr 2050. Gegenüber dem Jahr 1990 entspricht dies einer Senkung um 88,5 % bis zum Jahr 2050 (29 Mio. t CO_{2äq}).

¹ Die Nutzungsintensität der Wälder hat sich seit dem Jahr 2002 durch die gestiegene Nachfrage nach Holz und einen hohen Anteil an hiebreifen Bäumen gegenüber 1989-2001 nahezu verdoppelt. Zur weiteren Waldentwicklung und dem Holzbedarf werden die Projektionen des Thünen-Instituts für Deutschland (WEHAM Modell) verwendet [UBA 2014a].

² Für die Emissionsberichterstattung ist die Änderung der Kohlenstoffspeicher bei ober- und unterirdischer Biomasse, Boden, Totholz und Streu erforderlich. Der in Holzprodukten gespeicherte Kohlenstoff wird nicht abgebildet. Es wird die sofortige Emission des im Holz gespeicherten Kohlenstoffs mit der Holzernte angenommen [UBA 2014a].

³ Abgeleitet von den WEHAM Szenarien des Thünen-Instituts und der Forderung nach strikter Einhaltung des

Prinzips der nachhaltigen Waldbewirtschaftung hält das UBA es für plausibel und realistisch, dass die Emissions-/Einbindungsbilanz der deutschen Wälder langfristig nur wenig um die Nulllinie schwankt, wobei Holzprodukte nicht berücksichtigt werden [UBA 2014a].

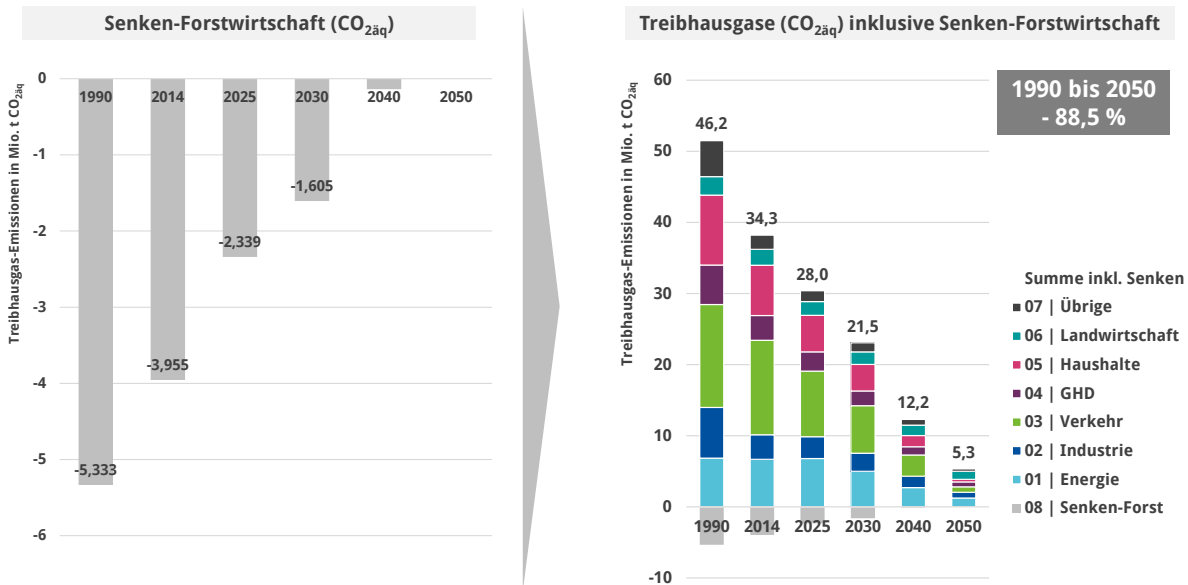


Abbildung D Zielszenario: Treibhausgasemissionen nach Sektoren (Quellenbilanz) inkl. Senken 1990 bis 2050
 Quelle: siehe Angaben zu den jeweiligen Sektoren, Berechnung und Darstellung IE Leipzig

Zielszenario: Stromaustausch

Die existierenden Stromerzeugungskapazitäten Hessens waren in den Jahren 1990 bis 2014 nicht ausreichend, um den Stromverbrauch zu decken. Demzufolge ist ein Strombezug aus anderen Bundesländern bzw. anderen Ländern des europäischen Verbundsystems (UTCE) notwendig. Die damit verbundenen THG-Emissionen außerhalb Hessens werden im Folgenden aufgezeigt, jedoch werden diese in der Quellenbilanz nicht berücksichtigt (siehe dazu Kapitel 2.2).

Im Zielszenario wird davon ausgegangen, dass die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien in Hessen gegenüber dem Basisjahr 2014 bis zum Jahr 2050 deutlich ausgebaut wird; vor allem Windenergieanlagen (von 1,5 TWh im Jahr 2014 auf 28,0 TWh im

Jahr 2050 auf 2 % der Landesfläche) sowie Photovoltaik mit hohem Eigennutzungspotenzial (von 1,5 TWh im Jahr 2014 auf 11,2 TWh im Jahr 2050). Damit wird eine Steigerung des EE-Anteils an der Bruttostromerzeugung auf 93 % bzw. am Nettostromverbrauch auf über 116 % bis 2050 erreicht. Die über den Nettostromverbrauch hinausgehende Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien wird zur EE-Gaserzeugung (Power to Gas) genutzt. Zugleich wird die fossile Erzeugung bis zum Jahr 2050 auf 3,3 TWh zurückgehen. In der Folge werden die THG-Emissionen aus dem Strombezug im Zielszenario deutlich sinken (siehe Abbildung E).

Unter Berücksichtigung des Strombezuges verringern sich die THG-Emissionen Hessens im Zeitraum 1990 bis 2050 um 53,8 Mio. t CO_{2äq}/a auf 5,3 Mio. t/a CO_{2äq} im Jahr 2050 (- 89,7 %).

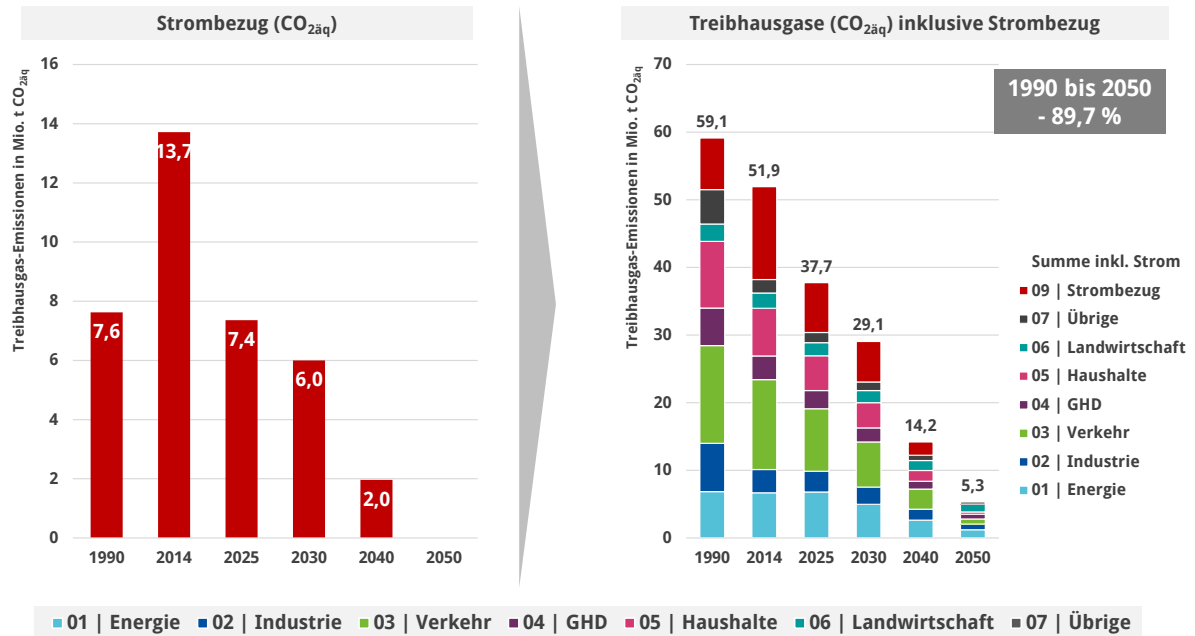


Abbildung E Zielszenario: Treibhausgasemissionen nach Sektoren (Quellenbilanz) inkl. Strombezug 1990 bis 2050
 Quelle: siehe Angaben zu den jeweiligen Sektoren, Berechnung und Darstellung IE Leipzig

1 Einleitung

Die Umsetzung der Energiewende soll nachhaltig und unter Berücksichtigung sozialer und wirtschaftlicher Aspekte sowie im Einklang mit dem Erhalt der biologischen Vielfalt erfolgen. In diesem Rahmen wird das derzeitige „Klimaschutzkonzept Hessen 2012“ vom März 2007 überarbeitet.

Weg zum Klimaschutzplan 2025

Der Erarbeitung des Klimaschutzplans erfolgt in einem mehrstufigen Prozess und wird durch eine interministerielle Arbeitsgruppe und die Beteiligung verschiedenster Akteure unter dem Dach der Nachhaltig-

keitsstrategie begleitet. Zu differenzieren ist hinsichtlich der inhaltlichen Ausgestaltung des Klimaschutzplans vor allem zwischen der Vorstudie und der Hauptstudie. Während die Vorstudie insbesondere die quantitativen Grundlagen für den Erarbeitungsprozess zur Verfügung stellt, werden in der Hauptstudie weitergehende quantitative Feinanalysen und Detaillierungen vorgenommen, die in einen umfassenden Beteiligungsprozess eingebunden sind und konkrete Maßnahmen zur Erreichung der auf Basis der Vorstudie beschlossenen Klimaschutzziele erarbeitet (Abbildung 2).

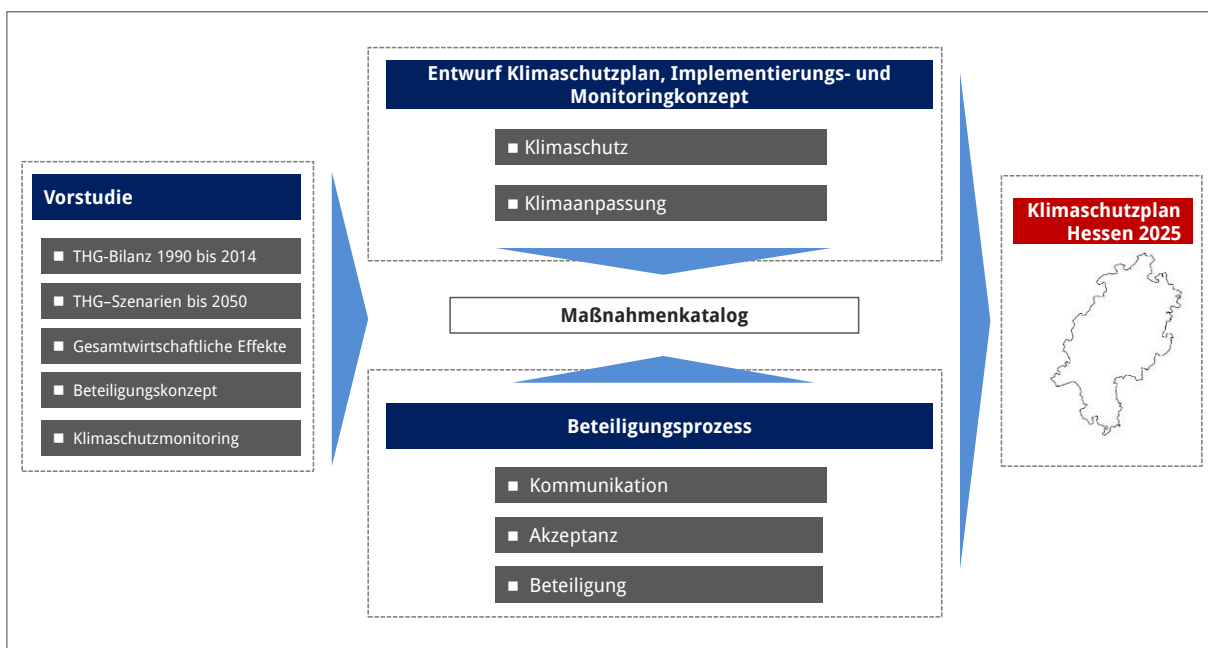


Abbildung 1 Elemente auf dem Weg zum Klimaschutzplan

Vorstudie zum Klimaschutzplan 2025

Im Rahmen der vorliegenden Vorstudie werden die Grundlagen zur Erstellung des Klimaschutzplanes geschaffen. Dies beinhaltet die Erstellung einer

Treibhausgas-Eröffnungsbilanz sowie die Ableitung von Handlungsoptionen auf Basis einer Szenarienbeurteilung zum Trend und zur Zielerreichung.

Darüber hinaus werden gesamtwirtschaftliche Effekte einer konsequenten Klimaschutzpolitik herausgestellt.

Letztendlich werden aus den Analysen Überlegungen zum Beteiligungskonzept für die Bereiche Klimaschutz und Anpassung sowie zu einem Klimaschutzmonitoring abgeleitet (Abbildung 2).

Die **Struktur der nachfolgenden Dokumentation** der durchgeführten Analysen fasst die einzelnen Arbeitsschritte zur THG-Bilanzierung zusammen, um eine durchgängige Chronologie von Historie (1990 -

2014), Trendszenario 2025|2050 und Zielszenario 2025|2050 je Emittentensektor zu ermöglichen. Vorrangestellt werden dieser Betrachtung methodische Grundlagen sowie abschließend die Ergebnisse zu den gesamtwirtschaftlichen Effekten und dem Monitoringkonzept. Das bereits zu Beginn des Projektes erarbeitete und dem Auftraggeber zur Verfügung gestellte Beteiligungskonzept sowie die Konzeption zum Klimaschutzmonitoring wird separat dokumentiert.

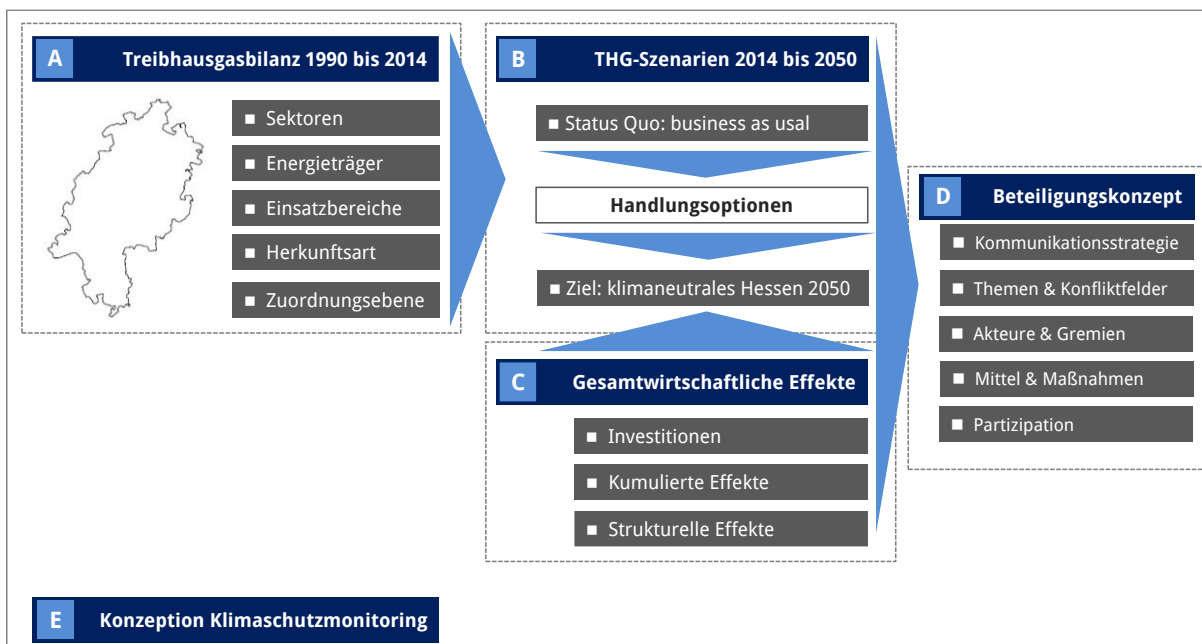


Abbildung 2 Struktur der Vorstudie zum Klimaschutzplan

2 Treibhausgas-Bilanzierung und Szenarien

2.1 Treibhausgase

Treibhausgase werden in direkte Treibhausgase (CO_2 , CH_4 , N_2O , HFKW, FKW, SF_6 und NF_3) und indirekte Treibhausgase (C_mH_n , CO , NO_x) unterschieden. Im Rahmen der internationalen Berichterstattung werden unter den ausgewiesenen CO_2 -Äquivalent-Emissionen nur die direkten Treibhausgase berücksichtigt. Die Treibhausgasemissionen aus Senken und Stromimporten werden nachrichtlich aufgeführt, gehen jedoch nicht in die Zielerfüllung des Kyoto-Protokolls ein.

Zur Beschreibung der Klimawirksamkeit wird das so genannte Global Warming Potential (GWP) verwendet. Die Bewertung des GWP erfolgt auf Basis des Beitrages eines Stoffes zum Treibhauseffekt gemittelt über einen bestimmten Zeitraum. Der GWP-Wert von CO_2 , der bei der Berechnung der GWP-Werte für alle übrigen Gase die Referenzsubstanz darstellt, wird gleich Eins gesetzt. Die Emissionen der Treibhausgase werden somit in CO_2 -Äquivalenten ausgedrückt.

Infolge des sich fortwährend ändernden Erkenntnisstandes zur Klimawirksamkeit der einzelnen Treibhausgase, unterliegen die GWP-Werte kontinuierlichen Veränderungen (siehe Tabelle 1). Beispielsweise wurde das Treibhausgaspotenzial (GWP_{100}) von Distickstoffmonoxid (N_2O /Lachgas) im zweiten Sachstandsbericht des IPCC (SAR) mit 310 und im fünften Sachstandsbericht des IPCC (AR5) mit 265 angegeben [IPCC 2013].

Im Zuge der internationalen Berichterstattung zur Überprüfung der Ziele des Kyoto-Protokolls sind bis zum Jahr 2012 die $\text{GWP}_{100 \text{ SAR}}$ -Werte des zweiten Sachstandsberichts des IPCC (SAR) mit einem hundertjährigen Zeithorizont zu verwenden [KP 1997], [IPCC 1996]. Beginnend mit dem Jahr 2013 sind die

GWP-Werte des Vierten Sachstandsberichtes der IPCC im 100-Jahrehorizont für die Normierung der Treibhausgase zu verwenden [IPCC 2007]. In dieser Studie werden zur Berechnung der $\text{CO}_{2\text{äq}}$ -Emissionen noch die GWP-Werte des zweiten Sachstandsberichts des IPCC (SAR) verwendet.

Kohlenstoffdioxid (CO_2) entsteht hauptsächlich bei der Verbrennung fossiler Brennstoffe, wie Erdöl, Erdgas und Kohle, in den Sektoren Energieumwandlung, Industrie, Verkehr sowie kleinen Feuerungsanlagen. Die Verbrennung von Biomasse wird als CO_2 -frei angesehen, da es sich im Brennstoff um Kohlenstoff handelt, der zuvor von Pflanzen aus der Atmosphäre aufgenommen wurde und bei der Verbrennung wieder in die Atmosphäre zurückgeführt wird (Kreislauf).

Methan (CH_4) entsteht im Wesentlichen bei der Verdauung von Wiederkäuern, bei der Lagerung und Ausbringung von Wirtschaftsdünger (Gülle) sowie bei Abbauprozessen in Deponien. Es ist 21mal ($\text{GWP}_{100 \text{ SAR}} 21$) so treibhauswirksam wie Kohlenstoffdioxid. Neben seiner Wirkung als Treibhausgas stellt es auch eine Ozonvorläufersubstanz dar.

Distickstoffmonoxid (N_2O), auch als Lachgas bekannt, wird beim Abbau von stickstoffhaltigem Dünger, bei der Güllelagerung sowie bei verschiedenen Produktanwendungen frei. Lachgas ist 310mal ($\text{GWP}_{100 \text{ SAR}} 310$) treibhauswirksamer im Vergleich zu Kohlenstoffdioxid. Hauptquelle von Lachgasemissionen ist die Landwirtschaft. Darüber hinaus entsteht Lachgas in der chemischen Industrie und in Abgaskatalysatoren.

Die Gruppe der **Fluorkohlenwasserstoffe (HFKW/ FKW)** können nach teilhalogenierten Fluorkohlenwasserstoffen (HFKW) und vollständig halogenierten Fluorkohlenwasserstoffen (FKW) unterschieden werden. Enthalten FKWs keine Wasserstoff-Atome, nennt man diese auch perfluorierte Fluorkohlenwasserstoffe (FKW). Fluorkohlenwasserstoffe werden als Treibgas sowie als Kälte- oder Feuerlöschmittel eingesetzt. Entweichen FKWs, tragen diese, aufgrund ihres hohen GWP-Wertes, erheblich zum Treibhauseffekt bei (GWP_{100 SAR} für HFKWs von 140 bis 11.700 und FKWs von 6.500 bis 9.200).

Schwefelhexafluorid (SF₆) ist ein farb- und geruchloses, ungiftiges Gas. Es wird u.a. als Isoliergas in der Mittel- und Hochspannungstechnik, zur Dichtheitsprüfung von Leckagen, als Ätzgas in der Halbleiterherstellung und als Schutzgas zur Herstellung von Magnesium verwendet. Schwefelhexafluorid ist das stärkste bekannte Treibhausgas (GWP_{100 SAR} 23.900).

Stickstofftrifluorid (NF₃) ist ein farbloses und brandförderndes Gas mit einem charakteristischen Geruch. Stickstofftrifluorid wird in sehr großer Menge bei der

Produktion von Flüssigkristallbildschirmen und Solarzellen sowie in der Halbleiterindustrie verwendet. Dabei wird es bei der Beseitigung von Siliziumrückständen in den Beschichtungskammern freigesetzt. Stickstofftrifluorid ist eines der stärksten bekannten Treibhausgase (GWP_{100 SAR} 17.200).

Aufgrund des deutlichen Konzentrationsanstiegs in der Atmosphäre ist Stickstofftrifluorid (NF₃) mit dem Beginn der zweiten Verpflichtungsperiode im Jahr 2013 im Zuge der internationalen Berichterstattung zum Kyoto-Protokoll zu erfassen.

Neben den direkten Treibhausgasen existieren mit den flüchtigen organischen Verbindungen ohne Methan (NMVOC), Stickoxide (NO_x) und Kohlenstoffmonoxid (CO) auch indirekte Treibhausgase, die zugleich als versauernde bzw. eutrophierende Stoffe und Ozonvorläufersubstanzen wirken. Diese gehen nicht in die Zielerfüllung des Kyoto-Protokolls ein und werden im Rahmen der internationalen Berichterstattung dazu und somit auch in dieser Vorstudie nicht berücksichtigt.

Treibhausgas	Formel	SAR (IPCC 1996)	AR4 (IPCC 2007)	AR5 (IPCC 2013)		Verweildauer in Jahren
		100 Jahre GWP _{100 SAR} -Wert	100 Jahre GWP _{100 AR4} -Wert	20 Jahre GWP _{20 AR5} -Wert	100 Jahre GWP _{100 AR5} -Wert	
Kohlenstoffdioxid	CO ₂	1	1	1	1	k.A.
Methan	CH ₄	21	25	84	28	12
Distickstoffoxid (Lachgas)	N ₂ O	310	298	264	265	121
Wasserstoffhaltige FKW						
HFC 23	CHF ₃	11.700	14.800	10.800	12.400	222
HFC 32	CH ₂ F ₂	650	675	2.430	677	5
HFC 125	C ₂ H ₅ F	2.800	3.500	6.090	3.170	28
HFC 134a	CH ₂ FCF ₃	1.000	1.430	3.710	1.300	13
HFC-143a	CH ₃ F ₃	3.800	4.470	6.940	4.800	47
HFC-152a	C ₂ H ₄ F ₂	140	124	506	138	2
HFC-227ea	C ₃ H ₇ F	2.900	3.220	5.306	3.350	39
HFC-236fa	C ₃ H ₂ F ₆	6.300	9.810	6.940	8.060	242
HFC-245fa	C ₃ H ₃ F ₅	560	1.030	2.510	716	8
HFC-43-10mee	C ₅ H ₂ F ₁₀	1.300	1.640	4.310	1.650	16
Perfluorierte FKW						
Perfluormethan	CF ₄	6.500	7.390	4.880	6.630	50.000
Perfluorethan	C ₂ F ₆	9.200	12.200	8.210	11.100	10.000
Perfluorpropan	C ₃ F ₈	7.000	8.830	6.640	8.900	2.600
Perfluor-n-butan	C ₄ F ₁₀	7.000	8.860	6.870	9.200	2.600
Perfluorcyclobutan	C ₆ F ₁₂	8.700	9.160			3.200
Perfluorhexan	C ₁₀ F ₁₈	7.400	7.500	5.390	7.190	3.200
Schwefelhexafluorid	SF ₆	23.900	22.800	17.500	23.500	3.200
Stickstofftrifluorid	NF ₃	17.200	12.200	12.800	16.100	500

Tabelle 1 Direkte Treibhausgase und deren Treibhausgaspotential (GWP) sowie Verweildauer in der Atmosphäre
Quelle: [IPCC 1996], [IPCC 2007], [IPCC 2013]

2.2 Bilanzierungsprinzipien

Bei der Treibhausgas-Bilanzierung wird in folgende zwei Methoden unterschieden, welche unterschiedlich hinsichtlich der zu bilanzierenden Region definiert werden:

- Quellenprinzip:**
 Die THG-Emissionen der Sekundärenergieträger Strom und Fernwärme werden der tatsächlichen Emissionsquelle (Umwandlungssektor) zugeordnet.
- Verursacherprinzip:**
 Die THG-Emissionen der Sekundärenergieträger Strom und Fernwärme werden der Nachfrageseite (Verbraucher/Verursacher) zugeordnet.

Quellenprinzip

Nach dem **Quellenprinzip** werden THG-Emissionen immer ihren **direkten Emittenten** zugeordnet. Dies hat zur Folge, dass dem Umwandlungssektor alle tatsächlich entstehenden THG-Emissionen bei der Umwandlung von Primärenergie in Strom und Fernwärme zugerechnet werden. Der **Umwandlungssektor** tritt damit als **gleichwertiger Sektor** neben den anderen Verbrauchssektoren in einer THG-Bilanz auf. Gleichzeitig gelten die **Sekundärenergieträger Strom und Fernwärme** als **emissionsfrei**, da bei

ihrer Umwandlung in Nutzenergie keine direkten THG-Emissionen freigesetzt werden.

Die wesentlichen **Vorteile** der THG-Bilanzierung nach dem Quellenprinzip sind folgendermaßen:

- Die Bilanzierungsmethode entspricht der vom IPCC angewandten Methode, die die wesentliche Grundlage für das Monitoring der Kyoto-Ziele darstellt. Damit ergibt sich eine gute nationale und internationale Vergleichbarkeit. Zudem basieren die THG-Ziele anderer Bundesländer auf dem Quellenprinzip (Baden-Württemberg, Nordrhein-Westfalen, Rheinland-Pfalz).
- Eine Senkung von THG-Emissionen kann durch den einzusetzenden Primärenergiemix zur Stromerzeugung seitens der Energieerzeuger reguliert werden.
- Die Quellenbilanz ermöglicht Aussagen über die Gesamtmenge der in Hessen ausgestoßenen THG-Emissionen.

Nachteilig bei der Bilanzierung nach dem Quellenprinzip ist, dass die mit dem Strombezug⁴ verbundenen THG-Emissionen nicht abgebildet werden können. Die durch hessische Stromverbraucher verursachten THG-Emissionen werden beim Quellenprinzip daher tendenziell unterschätzt. Im Falle eines Stromexports (negatives Stromaustauschsaldo) würden hingegen die THG-Emissionen der Stromlieferung gänzlich dem hessischen Umwandlungssektor zu geordnet werden.

⁴ Der hessische Stromverbrauch überstieg und übersteigt derzeit die hessische Inlandsstromerzeugung. Daher ist es erforderlich Strom aus anderen Bundesländern bzw. dem Ausland zu importieren (positives Stromaustauschsaldo - Stromimport).

Verursacherprinzip

Nach dem **Verursacherprinzip** werden THG-Emissionen, die bei der Bereitstellung von Strom und Fernwärme entstehen, dem **Endverbraucher** der Energie zugerechnet und damit nicht der physikalischen Emissionsquelle. Stattdessen ruft die **Nachfrage** nach Strom und Fernwärme die THG-Emissionen hervor, die durch die Energiebereitstellung entstehen. Bei diesem Prinzip existiert der Umwandlungssektor nicht als eigener Emissionssektor, sondern dient lediglich zur Berechnung der spezifischen THG-Emissionsfaktoren.

Vorteilhaft bei der Bilanzierung nach dem Verursacherprinzip ist, dass Aussagen zu den THG-Emissionen des Stromeinsatzes⁵ auf Ebene der Endverbrauchssektoren (z.B. Haushalte, Industrie) getroffen werden können und damit der Beitrag zu den verursachten THG-Emissionen eines Bundeslandes ersichtlich wird.

Die THG-Emissionen aus dem Stromverbrauch der hessischen Endverbrauchssektoren (z.B. Haushalte, GHD) werden beim Verursacherprinzip auf Basis des deutschen Generalfaktors⁶ für Strom bilanziert.

⁵ Die THG-Emissionen aus dem Stromverbrauch der hessischen Endverbrauchssektoren (z.B. Haushalte, GHD) werden beim Verursacherprinzip auf Basis des deutschen Generalfaktors für Strom bilanziert.

⁶ Der Generalfaktor ergibt sich als Quotient der Summe der Emissionen aller deutschen Stromerzeugungsanlagen, soweit sie für den inländischen Verbrauch produzieren, und der Summe des inländischen Stromendverbrauchs. Strom-einfuhren werden dabei unter Anlehnung an die Substitutionstheorie so bewertet, als wären sie in inländischen Stromerzeugungsanlagen der allgemeinen Versorgung hergestellt worden. Aufgrund dieser teilweise modellhaften Berechnungsmethode ist ein direkter Zusammenhang mit den tatsächlich in einem Land angefallenen Emissionen, die in der Quellenbilanz dargestellt werden, nicht gegeben.

2.3 Methodik und Datengrundlagen

Im Rahmen der vorliegenden Studie steht vor dem Hintergrund der vom IPCC angewandten Methode im Zuge der internationalen Berichterstattung das **Quellenprinzip im Fokus** der Ergebnisdokumentation.

Die Emissionen der einzelnen IPCC-Quellkategorien innerhalb der Sektoren werden auf Grundlage unterschiedlicher Erhebungsmethoden analysiert. Sofern nicht absolute Angaben für die Historie (CO₂-⁷ und THG⁸-Bilanz des Statistischen Landesamtes [HSL 2015b], [HSL 2015h] [UGRdL 2014]) zur Verfügung stehen, erfolgt die Ermittlung von Treibhausgasemissionen im Allgemeinen entsprechend folgender Gleichung:

Emissionen = Aktivitätsrate x Emissionsfaktor

Als Aktivität ist dabei der Prozess zu verstehen, welcher ursächlich für die Treibhausgasemissionen ist. Der spezifische Emissionsfaktor quantifiziert die Menge eines Treibhausgases bezogen auf die Aktivität eines Prozesses (u. a. Erdgaseinsatz im Kraftwerk, Anzahl von Tieren, Waldholzbestand, Waldholzeinschlag).

Zur Ermittlung der THG-Emissionen von Kohlenstoffdioxid (CO₂), Methan (CH₄), Lachgas (N₂O) sowie der F-Gase (HFKW, FKW, SF₆, NF₃) werden die **Emissionsfaktoren** – differenziert nach Energieträgern, Einsatzbereichen und Anwendungen – vom **hessischen statistischen Landesamt** [HSL 2015d]

⁷ Die letzte CO₂-Bilanz stand im Bearbeitungszeitraum dieser Studie für das Jahr 2012 und die letzte THG-Bilanz für das Jahr 2011 zur Verfügung.

⁸ Methan (CH₄)- und Distickstoffmonoxid (N₂O)-Emissionen werden für Hessen vom Arbeitskreis Umweltökonomische Gesamtrechnungen der Länder (AK UGRdL) bereitgestellt. Die Ergebnisse stehen in der Regel im Jahr t+3 zur Verfügung.

und **Umweltbundesamt** genutzt, wie sie auch im Zuge des nationalen Berichtssystems zum Kyoto-Protokoll Verwendung finden [UBA 2015a] [UBA 2015c] [UBA 2015d] [UBA 2015e].

Zu den **energiebedingten THG-Emissionen** steht u.a. mit den Energiebilanzen der Jahre 1990 bis 2012 [HSL 2015a] und der Schätz-Prognose zu den Energiebilanzen 2013 und 2014 für Hessen [IE 2015] eine fundierte Datengrundlage zu den Aktivitätsraten zur Verfügung. Darin wurde bereits die Energiebilanz des Jahres 2013 berücksichtigt und für das Jahr 2014 eine analytisch gesicherte Schätzung erarbeitet, die auf vielfältigen statistischen Einzelinformationen zu den Energiebilanzzeilen bzw. -spalten beruht.

Datengrundlagen bzw. Aktivitätsraten zur Bilanzierung der **nicht-energiebedingten THG-Emissionen** für Hessen stehen nur bis zum Jahr 2013 bzw. teilweise für das Jahr 2014 zur Verfügung [HSL 2015c] [HSL 2015e]. Infolgedessen wurden analytisch gesicherte Schätzungen zu den nicht-energiebedingten THG-Emissionen für die Jahre 2013 und 2014 für eine zeitlich konsistente THG-Eröffnungsbilanz aller Sektoren erforderlich.

Aufbauend auf der systematischen Zusammenstellung der Datengrundlagen wurde der Bedarf zur Ergänzung bzw. Fortschreibung der Datenbasis der jeweiligen Quellenkategorien deutlich. Entsprechend der Datengrundlage wird für jede Quellenkategorie ein spezifischer Ansatz für die Ermittlung fehlender bzw. nicht veröffentlichter THG-Emissionen angewendet. Gegenüber den Publikationen des hessischen statistischen Landesamts, die aktuell bis zum Jahr 2011⁹ und

⁹ CH₄- und N₂O-Emissionen

2012¹⁰ reichen, werden in dieser Studie bereits die THG-Emissionen der Jahre 2013 und 2014 ausgewiesen. Diese beruhen überwiegend auf Abschätzungen und sind damit vorläufiger Natur. Die finale Ermittlung der THG-Emissionen für Hessen erfolgt vom statistischen Landesamt entsprechend des statistisch üblichen Turnus.

Die methodische Vorgehensweise innerhalb der IPCC-Quellenkategorien wird im Folgenden skizziert. Die Bilanzierung orientiert sich dabei am nationalen Inventarbericht (NIR) zum Deutschen Treibhausgasinventar [UBA 2014b], in dem die methodischen Grundlagen ausführlich dargestellt sind.

Sektor Energieumwandlung und -verteilung

Strom- und Wärmeerzeugung (CRF 1.A.1)

Zur Ermittlung der Treibhausgasemissionen der Strom- und Wärmeerzeugung wird vom Umwandlungseinsatz (Aktivitätsraten: Einsatz von Energieträgern im Umwandlungsbereich) ausgegangen. Wichtige Grundlagen hierfür sind die amtlichen Energiebilanzen des Bundeslandes Hessen sowie die Schätzprognose zur Energiebilanz 2014 [HSL 2015a] [IE 2015]. In Verbindung mit den Energiebilanzen werden in der Regel auch die auf der Energiebilanz beruhenden CO₂-Bilanzen veröffentlicht [HSL 2015a]. Zudem stehen mit den Treibhausgasbilanzen für das Land Hessen und den Analysen des Arbeitskreises Umweltökonomische Gesamtrechnungen der Länder (AK UGRdL) Angaben zu den Emissionen von CH₄ und N₂O zur Verfügung für die Jahre 1995 bis 2011 [UGRdL 2014].

¹⁰ CO₂-Emissionen

Sofern Daten¹¹ zu den Emissionen von CO₂, CH₄ und N₂O vorliegen, finden diese Eingang in die Eröffnungsbilanz [UGRdL 2014] [HSL 2015b].

Nicht publizierte bzw. Treibhausgase aktueller Jahre werden auf Basis der im Umwandlungsbereich in den jeweiligen Energiebilanzpositionen eingesetzten Energieträger ermittelt. Dazu werden diese mit den spezifischen Emissionsfaktoren (CO₂, CH₄, N₂O) der Emittentengruppe aus dem Nationalen Inventarbericht (NIR) des Umweltbundesamtes des jeweiligen Jahres, differenziert nach Energieträgern, bewertet [HSL 2015d] [UBA 2015e].

Diffuse Emissionen aus der Förderung und Verteilung von Brennstoffen (CRF 1.B.2)

Erdgas und Erdöl wurden in der Vergangenheit und werden auch derzeit in Hessen nicht gefördert, so dass die Betrachtung der diffusen Treibhausgasemissionen aus der Förderung entfällt.

Die Verteilung von Erdgas (CRF1.B.2.b.iii) verursacht auf sechs Stufen der Gasverteilung (Transport in Ferngasnetzen, Transport in Verteilnetzen, Gasdruckregel(mess)anlagen, Verdichter, Obertagespeicher, Untertagespeicher) Methan-Emissionen, wobei der Transport in Verteilnetzen und die Erdgasverdichtung den höchsten Anteil an den diffusen Gesamtemissionen verursachen. Die CH₄-Emissionen aus der Gasverteilung werden, sofern für einzelne Jahre nicht verfügbar, vereinfacht auf Basis des Gasabsatzes [HSL 2015a] [IE 2015] und der typischen Emissionsfaktoren gemäß NIR [UBA 2014b] ermittelt.

Die Emissionen aus der Verteilung von Mineralölprodukten¹² (CRF 1.B.2a) resultieren aus Transport und

¹¹ Die letzte amtliche Treibhausgasbilanz für Hessen liegt für das Jahr 2011 vor.

Umschlag zwischen den jeweiligen Tanks. Es handelt sich hierbei jedoch um NMVOC-Emissionen, die zu den indirekten Treibhausgasen zählen und nicht in der THG-Bilanz berücksichtigt werden.

Emissionen aus dem Stromaustauschsaldo

Die ermittelten Treibhausgasemissionen der Quellenkategorie CRF 1.A.1 umfassen nicht die Emissionen, die aus dem Strombezug¹³ aus anderen Bundesländern bzw. anderen Ländern des europäischen Verbundsystems (UTCE) resultieren.

Auf Basis des in der Energiebilanz [HSL 2015a] [IE 2015] ausgewiesenen Stromaustauschsaldos erfolgt unter Nutzung des generellen Emissionsfaktors der Stromerzeugung [HSL 2015d] in Deutschland die Bewertung der dem Strombezug zuzurechnenden Emissionen. Diese gehen jedoch nicht in die Gesamtbetrachtung der Quellenbilanz ein und werden daher nur zur Information¹⁴ ausgewiesen werden.

Sektor Industrie (Verarbeitendes Gewerbe)

Im Sektor Industrie bzw. Verarbeitendes Gewerbe werden im Zuge der Bilanzierung energiebedingte (CRF 1.A.2) und prozessbedingte (CRF 2.A bis 2.E) Treibhausgasemissionen berücksichtigt.

¹² In der Vergangenheit wurden in der THG-Bilanz Methanemissionen aus der Verteilung von Mineralölprodukten ausgewiesen. Da die gasförmigen Bestandteile der Mineralölprodukte bereits in der Raffinerie abgetrennt werden [UBA 2014b], werden zukünftig diese nicht mehr bilanziert. Die erforderlichen Rückrechnungen durch die AK UGRdL werden daher in der hessischen Bilanz zu einer Neubewertung der Vorjahreswerte führen, jedoch ist der Einfluss auf die Gesamtbilanz gering.

¹³ Der hessische Strombedarf übersteigt derzeit die Inlandsstromerzeugung.

¹⁴ Quellenbilanzen erfassen nur die Emissionen auf dem Territorium des Landes. Die Emissionen die aus dem Strombezug resultieren sind daher separat ausgewiesen.

Industrie – energiebedingt (CRF 1.A.2)

Die Ermittlung der *energiebedingten* Treibhausgasemissionen der Industrie (CRF 1.A.2) erfolgt auf Basis des Endenergieeinsatzes im Verarbeitenden Gewerbe (inkl. Gewinnung von Steinen und Erden, sonstiger Bergbau) entsprechend der hessischen Energiebilanz [HSL 2015a] [IE 2015]. Sofern Daten¹⁵ zu den Emissionen von CO₂, CH₄ und N₂O vorliegen, finden diese Eingang in die Eröffnungsbilanz [HSL 2015b] [UGRdL 2014]. Nicht verfügbare Daten zu Treibhausgasen werden auf Basis des Endenergieeinsatzes in den jeweiligen Energiebilanzpositionen, in Verbindung mit den spezifischen jährlichen Emissionsfaktoren (CO₂, CH₄, N₂O) der Emittentengruppe, differenziert nach Energieträgern ermittelt [HSL 2015d].

Industrie - prozessbedingt - (CRF 2.A bis 2.E)

Prozessbedingte Treibhausgasemissionen (CRF 2.A bis 2.E) werden bei chemischen Reaktionen bestimmter Produktionsprozesse direkt freigesetzt. Für Hessen stehen dazu landesspezifische Produktionsdaten für den Zeitraum 1995 bis 2011 zur Verfügung. Die Produktionsmengen vor 1995 wurden anhand der deutschlandweiten Entwicklung auf Hessen übertragen.

Im Wesentlichen werden darin CO₂-Prozess-emissionen aus der Herstellung von Zementklinkern, Kalk, Glas, Ammoniak, Mauer- und Dachziegeln sowie Ruß erfasst. Fehlende Angaben zu den prozessbedingten CO₂-, CH₄- und N₂O-Emissionen einzelner Jahre werden in Analogie zu der in der „Treibhaus-

¹⁵ CO₂-Bilanzen auf Basis der hessischen Energiebilanz, hessische Treibhausgasbilanzen und Analysen des Arbeitskreises Umweltökonomische Gesamtrechnungen der Länder (AK UGRdL) zu den Emissionen von CH₄ und N₂O.

gasbilanz für das Land Hessen“ verwendeten Methodik¹⁶ des Umweltbundesamtes ermittelt [UBA 2014b] [UBA 2015b].

Sektor Verkehr

Im Sektor „Verkehr“ werden die Verkehrsbereiche Flugverkehr (national) CRF 1.A.3.a, Straßenverkehr CRF 1.A.3.b, Schienenverkehr CRF 1.A.3.c und Schifffahrt CRF 1.A.3.d erfasst.

Grundlage der CO₂-Bilanzierung für die Verkehrsbereiche bilden die in Hessen abgesetzten Kraftstoffe gemäß Energiebilanzen [HSL 2015a] [IE 2015]. Sofern CO₂-Emissionen für einzelne Jahre nicht zur Verfügung stehen, erfolgt die Ermittlung in Analogie zur allgemeinen Methode der CO₂-Bilanzierung [HSL 2015d].

Die CH₄ und N₂O-Emissionen der Historie basieren auf den Berechnungen des Arbeitskreises Umweltökonomische Gesamtrechnungen der Länder (AK UGRdL). Gegenüber der differenzierten Methodik der UGRdL werden die zukünftigen Emissionen für Lachgas und Methan vereinfachend proportional zum Energieverbrauch abgeschätzt.

Flugverkehr (national) CRF 1.A.3.a

Die Treibhausgasemissionen des Flugverkehrs werden differenziert nach nationalen und internationalen Flügen ermittelt. Dazu wird in Analogie zur UGRdL-Methodik der nationale Anteil des Flugverkehrs anhand der Einsteiger/Starts mit Streckenziel Inland aus der Verkehrsstatistik [destatis 2015] ermittelt und

¹⁶ Das Umweltbundesamt ermittelt im Rahmen der „Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll“ die prozessbedingten Emissionen auf Basis der produzierten Mengen bzw. eingesetzten Rohstoffe in Verbindung mit spezifischen Emissionsfaktoren.

anschließend auf den Treibstoffabsatz aus der Energiebilanz übertragen. Die Treibstoffmengen werden mit den jährlichen spezifischen Emissionsfaktoren (CH₄, N₂O) bewertet [UBA 2014b]. Innerhalb der Quellenbilanz für Hessen werden nur die Treibhausgasemissionen des nationalen Flugverkehrs bilanziert.

Straßenverkehr CRF 1.A.3.b

Für den **Straßenverkehr** wird die Entwicklung der Fahrzeugflotte anhand der Bestandsstatistik des Kraftfahrtbundesamtes ermittelt. Durch Zusammenführung dieser Daten mit den Fahrleistungen je Fahrzeuggruppe¹⁷ auf Autobahnen und sonstigen Außerortsstraßen sowie auf Ortsdurchfahrten und den Daten für Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs [UBA 2015d] können Aussagen zur Entwicklung der THG-Emissionen des Straßenverkehrs abgeleitet werden. Die CH₄- und N₂O-Emissionen in den Szenarien werden vereinfachend proportional zum Energieverbrauch abgeschätzt und nicht nach Straßenklassen und Geschwindigkeiten differenziert.

Schienenverkehr CRF 1.A.3.c und Schifffahrt CRF 1.A.3.d

Die CH₄- und N₂O-Emissionen des Schienenverkehrs und der Binnenschifffahrt werden in Analogie zur Methodik der UGRdL auf Basis der Kraftstoffabsätze in der Energiebilanz [HSL 2015a] [IE 2015] und den jährlichen spezifischen Emissionsfaktoren ermittelt.

Der Kraftstoffverbrauch bzw. die THG-Emissionen des **Offroad-Verkehrs** (CRF 1.A.3.e - Baumaschinen, Landwirtschaft, Forstwirtschaft, Industrie, Gartenpflege und Hobby, Militär) werden in Energiebilanzen nicht separat ausgewiesen, sondern sind in den Endenergiesektoren „Industrie (Verarbeitendes Ge-

¹⁷ Straßenverkehrszählungen 1995, 2000 und 2005

werbe)“, „Haushalte“ und „Gewerbe, Handel, Dienstleistung“¹⁸ enthalten. Die Ermittlung erfolgt auf Basis des Kraftstoffabsatzes und der spezifischen Emissionsfaktoren je Jahr. Die THG-Emissionen dieses Verkehrsbereiches werden nicht separat ausgewiesen, sondern sind Teil der genannten Endenergiesektoren.

Sektoren Haushalte und GHD

Zur Bestimmung von Treibhausgasemissionen der Endenergiesektoren **Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (CRF 1.A.4.a)** und **Haushalte (CRF 1.A.4.b)** wird vom Endenergieeinsatz, wie er in den Energiebilanzen Hessens bzw. in der Schätzprognose zur Energiebilanz ausgewiesen ist [HSL 2015a] [IE 2015], ausgegangen. Sofern Daten¹⁹ zu den Emissionen von CO₂, CH₄ und N₂O vorliegen, finden diese Eingang in die Eröffnungsbilanz.

Nicht verfügbare bzw. Treibhausgase aktueller Jahre werden auf Basis der in den Endenergiesektoren Haushalte und GHD in den jeweiligen Energiebilanzzeilen eingesetzten Energieträger ermittelt. Dazu werden diese mit den spezifischen Emissionsfaktoren des jeweiligen Jahres, differenziert nach Energieträgern, bewertet.

Sektor Landwirtschaft

Der Sektor Landwirtschaft umfasst die Tierhaltung (CRF 4.A bis 4.B) und landwirtschaftliche Flächen (CRF 4.D).

¹⁸ Im Sektor „Gewerbe, Handel, Dienstleistung“ ist auch der Kraftstoffverbrauch der Land- und Forstwirtschaft enthalten.

¹⁹ Hessische CO₂-Bilanzen beruhend auf den Energiebilanzen bis 2012, hessische Treibhausgasbilanzen bis 2011, Analysen des Arbeitskreis Umweltökonomische Gesamtrechnungen der Länder (AK UGRdL) zu den Emissionen von CH₄ und N₂O bis 2011

Tierhaltung (CRF 4.A bis 4.B)

Sofern Daten²⁰ zu den Emissionen von CH₄ und N₂O aus der **Tierhaltung** (CRF 4.A bis 4.B), der *Verdauung* und dem *Wirtschaftsdüngermanagement*, vorliegen, finden diese Eingang in die THG-Eröffnungsbilanz. Fehlende Angaben bzw. Differenzierungen werden auf Basis von

- Erhebungen nach dem Agrarstatistikgesetz zu den Tierbeständen in Hessen (Rinder, Pferde, Schafe, Schweine, Geflügel) sowie
- jährlichen spezifischen Emissionsfaktoren²¹ für die Verdauung und das Wirtschaftsdüngermanagement ermittelt.

Landwirtschaftliche Flächen (CRF 4.D)

Die Nutzung **landwirtschaftlicher Flächen**²² führt im Wesentlichen zu direkten²³ und indirekten²⁴ N₂O-Emissionen. Ebenso wie die Treibhausgasemissionen der Tierhaltung werden, soweit verfügbar, Daten der UGRdL zur Erstellung der THG-Eröffnungsbilanz genutzt.

Falls Angaben zu den direkten N₂O-Emissionen für einzelne Jahre nicht verfügbar sind, werden diese auf

²⁰ Angaben des Arbeitskreises Umweltökonomische Gesamtrechnungen der Länder (AK UGRdL) zu den Emissionen der Tierhaltung sowie Berechnungen des Johann Heinrich von Thünen-Instituts (vTI) für Hessen

²¹ Diese werden jährlich vom Johann Heinrich von Thünen-Institut (vTI) für den Nationalen Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar zur Verfügung gestellt.

²² Ackerland, Grünland, Dauerkulturen und Gartenland

²³ Ausbringung von Klärschlämmen, synthetischer N-Dünger (Mineraldünger), bewirtschaftete organische Böden, Wirtschaftsdünger (organischer Dünger), tierische Ausscheidungen auf der Weide, Ernterückstände

²⁴ aus ausgewaschenem & abgeflossenem Stickstoff, Deposition von reaktivem Stickstoff, biologische N-Fixierung aus dem Leguminosenanbau.

Basis der folgenden Aktivitätsraten (Agrar- bzw. Düngemittelstatistik) unter Nutzung spezifischer Emissionsfaktoren für die jeweiligen Aktivitätsraten ermittelt:

- Mengen stickstoffhaltiger Düngemittel
- Tierbestände (Rinder, Pferde, Schafe, Schweine, Geflügel)
- Fläche bewirtschafteter organischer Böden
- Fläche Dauergrünland
- Anbauflächen für Klee (Klee/Gras, Klee/Luzerne)/Luzerne/Hülsenfrüchte
- Flächen der Anbaukulturen

Die indirekten N₂O-Emissionen werden anhand der folgenden Aktivitätsraten in Verbindung mit den jeweiligen spezifischen Emissionsfaktoren ermittelt:

- Stickstofffrachten aus der Deposition von Wirtschaftsdüngern
- Auswaschung und Oberflächenabfluss
- Anteil der Stickstoff-Ausscheidung bei der Viehhaltung
- Anteile der jährlichen Stickstoff Emissionen aus der Verwendung von Mineraldünger (Düngemittelstatistik)
- Tierkategorien mit Weidegang und deren zeitlicher Anteil der Stallhaltung

Sektor Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft

Der Sektor Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft (LULUC) umfasst die Forstwirtschaft (5.A) sowie die Quellkategorien der Landnutzung und Landnutzungsänderungen (CRF 5.B bis 5.E)²⁵.

²⁵ Die Strukturierung entspricht der THG-Emissionsberichterstattung im Nationalen Inventarbericht (NIR) und folgt festen Vorgaben zu sogenannten Quellgrup-

In den hessischen Treibhausgasbilanzen sowie in der Umweltökonomischen Gesamtrechnung der Länder (UGRdL) wurden die zuvor genannten Herkunftsbe- reiche in der Vergangenheit nicht berücksichtigt²⁶.

Forstwirtschaft (CRF 5.A)

In Abstimmung mit dem Auftraggeber wurde die Forstwirtschaft, die auch im nationalen Treibhausgasinventar [UBA 2014a] ausgewiesen wird, berücksichtigt. Dazu wurden die CO₂-Emissionen der Forstwirtschaft in einem vereinfachten Verfahren auf Basis der Daten der Bundeswaldinventur ermittelt.

Landnutzungsänderungen (CRF 5.b bis E)

Die Emissionen aus LULUC (ohne Wälder) für die Landnutzungskategorien Ackerland, Grünland, Feuchtgebiete und Siedlungen werden für die nationale Berichterstattung vom Thünen-Institut geschätzt. Seitens Thünen-Institut wird die Schätzung als höchst unsicher (> 100 %) eingestuft, so dass in Abstimmung mit dem Auftraggeber die THG-Emissionen nicht in der THG-Bilanz Hessens Berücksichtigung finden.

Sektor Übrige Verbraucher

Der Sektor „Übrige Verbraucher“ umfasst die Quellkategorien Verbrauch von halogenierten Kohlenwasserstoffen und Schwefelhexafluorid (CRF 2.F), Lösemittel und andere Produktanwendungen (CRF 3.D) sowie Abfall und Abwasser (CRF 6.A bis 6.D).

pen. In der Quellgruppe 5 (LULUCF) werden in erster Linie Emissionen berichtet, die aus dem Auf- und Abbau von Kohlenstoffspeichern im Bereich der Landnutzungen entstehen.

²⁶ Die Quellgruppe LULUCF hat im Vergleich zu den anderen Kategorien des Inventars eine hohe Dynamik, die v. a. auf den fortlaufenden Datenerhebungen beruht (z. B. Bundeswaldinventur). Durch eine ständige Weiterentwicklung und Datenerhebung verbessert sich das Treibhausgasinventar kontinuierlich [UBA 2014a].

Verbrauch von halogenierten Kohlenwasserstoffen und Schwefelhexafluorid (CRF 2.F)

Die Emissionen aus dem Verbrauch halogenerter Fluorkohlenwasserstoffe, Schwefelhexafluorid und Stickstofftrifluorid²⁷ (FKW, HFKW, SF₆, NF₃), auch als F-Gase bezeichnet, wurden in der Vergangenheit in den hessischen Treibhausgasbilanzen sowie in den Analysen der UGRdL infolge einer fehlenden Methode zur Regionalisierung nicht berücksichtigt.

Aufgrund der zunehmenden Bedeutung dieser Quellenkategorie werden in Abstimmung mit dem Auftraggeber die Treibhausgasemissionen auf Basis eines einfachen Regionalisierungs-Verfahrens in der THG-Eröffnungsbilanz erfasst. Auf Grundlage der im NIR für Deutschland dokumentierten Angaben [UBA 2014b] zu den Emissionen von FKW, HFKW und SF₆ wurde in einem einfachen Verfahren unter Nutzung entsprechender Indikatorgrößen (F-Gase je Einwohner) die entsprechenden Emissionen für Hessen abgeleitet.

Die Emissionen von F-Gasen stellen somit eine erste grobe Indikation für Hessen dar, zukünftig wäre eine bundesländerübergreifende einheitliche Regionalisierung durch die UGRdL wünschenswert.

Andere Produktanwendungen (CRF 3.D)

Die Verwendung von Lösemitteln und andere Produktanwendungen verursachen im Wesentlichen indirekte Treibhausgasemissionen (NMVOC), die im Rahmen der THG-Eröffnungsbilanz nicht berücksichtigt werden. Unter den sonstigen Anwendungen von

Lösemitteln werden jedoch auch Lachgasemissionen (N₂O), vor allem durch den Einsatz in der Medizin, als Treibmittel in Sprühsahnedosen und Sprengstoffen erfasst.

Aufgrund der unzureichenden Datenlage werden die N₂O-Emissionen, sofern diese nicht bereits in den Treibhausgasbilanzen Hessens sowie über die Analysen der UGRdL zur Verfügung stehen, anhand des Anteils der Einwohner Hessens an der Gesamtbevölkerung Deutschlands aus den deutschen NIR-Werten abgeleitet [UBA 2014b].

Abfall und Abwasser (CRF 6 A bis 6.D)

Die IPCC-Quellenkategorie „Abfall und Abwasser“ (CRF 6. Bis 6.D) umfasst im Wesentlichen Bereiche der kommunalen Abwasserbehandlung (häusliche Abwässer und Sickergruben) und Abfallbehandlung bzw. -entsorgung (Kompostierungsanlagen und Deponien).

Abfalldponien (CRF 6.A)

Die in Siedlungsabfällen (Hausmüll, hausmüllähnlicher Gewerbeabfall, Sperrmüll, Marktabfälle u. a.) enthaltenen organischen Substanzen werden über einen langen Zeitraum durch aerobe und anaerobe Prozesse mikrobiell in Deponien abgebaut. Die Hauptbestandteile des dabei entstehenden Deponiegases sind Methan (CH₄), Kohlendioxid (CO₂) und Kohlenmonoxid (CO). Das Deponiegas wird überwiegend gefasst und anschließend energetisch verwertet (oder zumindest abgefackelt). Die nicht gefasste Methanmenge wird an die Atmosphäre abgegeben. Maßgebend für die THG-Emissionen aus Deponien

²⁷ Mit Beginn der zweiten Verpflichtungsperiode des Kyoto-Protokolls ist ab dem Jahr 2013 auch Stickstofftrifluorid (NF₃) zu erfassen. Dies wird vornehmlich in Produktionslinien zur Herstellung von Si-Dünnschichtzellen eingesetzt, die in Hessen nicht produziert werden.

sind die eingelagerten Müllmengen und die Müllzusammensetzung²⁸.

Die Methan-Emissionen (CH₄) aus Deponien werden, sofern verfügbar, aus der THG-Bilanz bzw. den Analysen der UGRdL für Hessen übernommen [UGRdL 2014].

Fehlende Jahresangaben werden, analog zur methodischen Vorgehensweise der UGRdL, auf Basis des arithmetischen Mittels der in Hessen deponierten organischen Abfallmenge der letzten 15 Jahre (Abfallstatistik) im Verhältnis zur Gesamtmenge in Deutschland und den entsprechenden Emissionen gemäß NIR für Deutschland ermittelt [UBA 2014b].

Kommunales Abwasser (CRF 6.B.2)

Die Behandlung der kommunalen Abwässer erfolgt in der Regel unter aeroben Bedingungen in kommunalen Kläranlagen bzw. Kleinkläranlagen. Unter diesen Bedingungen treten keine Methan-Emissionen (CH₄) auf. In sehr wenigen Fällen werden die Abwassermengen von Einwohnern nicht direkt in die Kanalisation bzw. Kleinkläranlagen eingeleitet, sondern bis zum Abtransport in ein Klärwerk in Gruben gesammelt. Dabei können teilweise unkontrollierte Prozesse (teils aerob, teils anaerob) ablaufen, die zur Methanbildung führen.

Der bei der Abwasserbehandlung anfallende Schlamm wird entweder aerob im Rahmen der Abwasserbehandlung (es entsteht kein Methan) oder im Nachgang anaerob im Faulurm stabilisiert²⁹. Das entstehende

Faulgas wird energetisch in Blockheizkraftwerken genutzt oder in Einzelfällen abgefackelt, wobei keine relevanten³⁰ Methanemissionen in die Umwelt gelangen.

Die CH₄-Emissionen aus abflusslosen Gruben (**Sickergruben**) werden, sofern vorhanden, aus den entsprechenden Veröffentlichungen (THG-Bilanz Hessen, Analysen der UGRdL) entnommen oder aus organischer Fracht, Methanbildungspotenzial, temperaturabhängigen Konversionsfaktor und der Anzahl der Einwohner, deren Abwasser über abflusslose Gruben entsorgt wird [HSL 2015c], ermittelt.

Bei der **Abwasserbehandlung** kann als Nebenprodukt der gezielten Stickstoffelimination, insbesondere bei der Denitrifikation, Distickstoffmonoxid (N₂O) entstehen. Sofern vorhanden, werden die N₂O-Emissionen aus den bereits genannten Veröffentlichungen entnommen oder auf Basis einwohnerspezifischer Emissionsfaktoren (NIR) ermittelt.

Kompostierungsanlagen (CRF 6.D.1)

Bei der Kompostierung organischer Abfälle (CRF 6.D.1) entstehen, bedingt durch den mikrobiellen Abbau der Ausgangsmaterialien, als klimawirksame Gase Methan (CH₄) und Distickstoffmonoxid (N₂O).

Die in Kompostierungsanlagen verwerteten Abfallmengen werden regelmäßig getrennt nach Bioabfällen und Grünabfällen (Garten- und Parkabfällen) durch die Abfallstatistik erfasst [HSL 2015c]. Nicht verfü-

²⁸ Seit Mitte 2005 dürfen in Deutschland nur noch vorbehandelte Abfälle, bei denen organische Bestandteile nahezu nicht mehr vorhanden sind (< 5 %), auf Deponien verbracht werden.

²⁹ Nach Entwässerung und Stabilisierung wird der Klärschlamm entweder thermisch entsorgt (und energetisch genutzt) oder stofflich verwertet, insbesondere in der Land-

wirtschaft. Die entsprechenden Emissionen dazu werden in den IPCC-Quellkategorien CRF 1.A.1 (Energieerzeugung und -umwandlung) bzw. unter CRF 4.D (landwirtschaftliche Flächen) berücksichtigt.

³⁰ Die zur Schlammstabilisierung genutzte offene Schlammfaulung, die zur Emission von CH₄ führte, wurde schrittweise reduziert und 1994 eingestellt.

bare Angaben werden auf Basis der kompostierten Abfallmenge und dem spezifischen jährlichen Emissionsfaktor³¹ (CH₄ und N₂O) gemäß NIR ermittelt.

Industrielle Abwasserbehandlung (6.B.1)

Bei der industriellen Abwasserbehandlung treten wie bei der Behandlung kommunaler Abwässer keine Methanemissionen auf. Lachgasemissionen können als Nebenprodukt bei der biologischen Abwasserreinigung mit gezielter Stickstoffelimination hauptsächlich bei der Denitrifikation entstehen. Aufgrund der unzureichenden Datenlage und der niedrigen Emissionen wurden die N₂O-Emissionen aus der industriellen Abwasserbehandlung in der THG-Bilanz Hessens in der Vorstudie nicht bilanziert und adressiert.

³¹ Die Unsicherheiten der Emissionsfaktoren sind hoch und hängen u. a. von dem Kompostierungsverfahren (offene oder geschlossene Anlagen), der Zusammensetzung der Abfälle, dem Rottegrad des Kompostes, der Sauerstoffversorgung und -verteilung, der Miettemperatur sowie der Wirkung der eingesetzten Biofilter ab.

2.4 Sektoren- und deren IPCC-Quellkategorien

Die strukturelle Aufbereitung der Treibhausgasbilanz sowie der THG-Szenarien erfolgt entsprechend der vom Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) verwendeten Nomenklatur sowie unter Be-

rücksichtigung der geforderten sektoralen Struktur des Auftraggebers. Die direkten Treibhausgase werden für die in Tabelle 2 aufgeführten Sektoren bilanziert.

Sektoren und deren IPCC Quellkategorien		IPCC	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	FKW	HFKW	SF ₆
Quellen								
01	Energieerzeugung und -verteilung							
	- Strom- und Wärmeerzeugung	CRF 1.A.1	■	■	■			
	- Diffuse Emissionen aus der Verteilung von Brennstoffen	CRF 1.B.2		■				
02	Industrie (Verarbeitendes Gewerbe)							
	- Industrie - energiebedingt	CRF 1.A.2	■	■	■			
	- Industrie - prozessbedingt	CRF 2.A bis 2.E	■		■			
03	Verkehr							
	- Flugverkehr (national)	CRF 1.A.3.a	■	■	■			
	- Straßenverkehr	CRF 1.A.3.b	■	■	■			
	- Schienenverkehr	CRF 1.A.3.c	■	■	■			
	- Schifffahrt	CRF 1.A.3.d	■	■	■			
04	Gewerbe, Handel, Dienstleistung							
	- Gewerbe, Handel, Dienstleistungen	CRF 1.A.4.a	■	■	■			
05	Haushalte							
	- Haushalte	CRF 1.A.4.b	■	■	■			
06	Landwirtschaft							
	- Tierhaltung	CRF 4.A bis 4.B		■	■			
	- Landwirtschaftliche Böden	CRF 4.D			■			
07	Übrige Verbraucher							
	- Verbrauch von halogenierten Kohlenwasserstoffen und Sonstiger	CRF 2.F				(■)	(■)	(■)
	- Andere Produktanwendungen	CRF 3.D			■			
	- Abfalldeponien	CRF 6.A		■				
	- Kommunales Abwasser	CRF 6.B.2		■	■			
	- Kompostierungsanlagen	CRF 6.D.1		■	■			
Senken								
08	Forstwirtschaft							
	- Forstwirtschaft	CRF 5.A	(■)					
09	Strom austausch							
	- Emissionen aus dem Stromaustauschsaldo	(n.r.)	(n.r.)	(n.r.)	(n.r.)			
■ für Hessen relevante Treibhausgas-Emissionen im Zuge der Berichterstattung (■) Emissionen wurden in der hessischen Treibhausgasbilanz des statistischen Landesamtes nicht bilanziert, werden jedoch im Rahmen dieser Studie ausgewiesen (n.r.) nicht relevant - Emissionen gehen nicht in die Zielerfüllung des Kyoto-Protokolls ein								

Tabelle 2 THG-Bilanz: Sektoren und deren IPCC-Quellkategorien
Quelle: [IPCC 2013] Darstellung: IE Leipzig

2.5 Szenarien

Vor dem Hintergrund der langfristigen THG-Reduktionsziele des Landes Hessen wurden zwei Entwicklungsszenarien im Zeitablauf bis zum Jahr 2050 entwickelt. Es werden nicht nur die Pfade der künftigen Entwicklung hinsichtlich der damit verbundenen technischen Maßnahmen konzipiert, sondern auch die – vor allem für den Zielpfad – betreffenden Handlungsfelder bestimmt. Die sektorspezifischen Handlungsfelder zur Energieeinsparung/-effizienz sowie Nutzung erneuerbarer Energien variieren in ihrer Intensität, so dass eine Ausgestaltung gemäß der folgenden Szenariendefinitionen erfolgte. Dies gilt in gleicher Weise für die nichtenergetischen Bereiche hinsichtlich der THG-Emissionen. Die Annahmen sind als Vorschläge bzw. Empfehlungen zu Erreichung zu sehen und können im Zuge des Beteiligungsprozesses angepasst werden.

Trendszenario: business as usual

Im Trend wird die weitere Entwicklung der Treibhausgasemissionen auf Grundlage der Entwicklung der wesentlichen Aktivitätsraten (u.a. Energieverbrauch, Energieerzeugung, Tierbestände, Fahrleistungen) der Sektoren (bzw. IPCC-Quellkategorien) abgebildet, wie sie sich aus den gegenwärtigen und absehbaren Rahmenbedingungen bis zum Jahr 2050 abzeichnet. Allerdings werden keine Maßnahmen unterstellt, die den Klimaschutz in den Mittelpunkt des Handelns stellen. Das Szenario orientiert sich bei den relevanten Aktivitätsgrößen (z. B. energetische Gebäudesanierungsrate) am gegenwärtigen Stand und in der Grundrichtung an den Referenzszenarien für Deutschland. Es wird davon ausgegangen, dass bisherige Entwicklungen sich weitgehend fortsetzen. Be-

stehende Hemmnisse für einen zielorientierten Klimaschutz bleiben bestehen.

Das Trendszenario stellt somit einen wahrscheinlichen Pfad dar, wenn die existierenden energiepolitischen Instrumente in die Zukunft fortgeschrieben und nicht zielorientierter effektiviert werden. Zum Beispiel wird von Folgendem ausgegangen:

- Verschärfung der Energieeinsparverordnung (EnEV)
- Steigende Effizienzanforderungen im industriellen und gewerblichen Sektor zur Erlangung von Steuer- und Umlageerleichterungen
- Keine Technologie- bzw. Innovationssprünge
- Trägheiten und Beharrungskräfte innerhalb der Volkswirtschaft (z. B. Investitionen orientieren sich an den ökonomisch typischen Investitionszyklen)
- Hemmnisse wirtschaftlicher, anwendungsbezogener, marktstruktureller sowie informationeller Natur bleiben bestehen

Zielszenario: klimaneutrales Hessen 2050

Das Zielszenario stellt einen möglichen Pfad dar, der zum Erreichen der vordefinierten energie- und klimapolitischen Ziele bzw. Reduktionsziele des Landes Hessen gänzlich oder zumindest weitgehend beiträgt. Zur Erreichung des Ziels – Klimaneutrales Hessen: THG-Reduktion minus 90 % bis 2050 – müssen die Anstrengungen in allen Bereichen sehr stark intensiviert werden. Folgende allgemeine Annahmen gelten für das Zielszenario:

- Vielfältige Verschärfung und Einhaltung von Effizienzstandards
- Technologie- bzw. Innovationssprünge werden erzielt und umgesetzt

- Trägheiten und Beharrungskräfte innerhalb der Volkswirtschaft werden verringert (z. B. durch erhöhte Förderung von Investitionen)
- Verstärkter Abbau von Hemmnissen wirtschaftlicher, anwendungsbezogener, marktstruktureller sowie informationeller Natur

Hierzu wurden die dafür notwendigen Handlungsoptionen innerhalb der einzelnen Sektoren nach Aktivitäten sowie deren spezifischer Emissionsintensität konkret bestimmt und deren Wirkung auf die Treibhausgasemissionen dargestellt.

Die über die Trendentwicklung hinausgehenden, mit dem Zielszenario verbundenen Handlungsoptionen erfordern geeignete Instrumente, um eine Realisierung zu ermöglichen bzw. zu gewährleisten. Dabei konzentrieren sich die möglichen Handlungsoptionen auf direkt wirkende Instrumente (z. B. EEWärmeG auf Landesebene, Flächenausweisungen für Windenergie), während eher „weiche Instrumente“ (z. B. Informations- und Kommunikationsmaßnahmen) im Zusammenhang mit dem noch ausstehenden Partizipationsprozess stehen.

In beiden Szenarien wird zudem auf die Entwicklung des Kraftwerksparks in Hessen eingegangen. Mit Bezug auf die erneuerbaren Energien erfolgt einerseits eine Orientierung an den vorhandenen Potenzialen und deren Realisierung gemäß bisheriger Entwicklungen (Trendszenario) sowie andererseits an den energiepolitischen Zielen (Zielszenario).

Zwischenziele für die Jahre 2020 | 2025

Bei der Erstellung des Szenarios standen nicht nur langfristige Entwicklungen bis zum Jahr 2050 im Mittelpunkt, sondern auch die Fragestellung, welche Handlungsfelder kurz- und mittelfristig bereits bis

2020 bzw. 2025 bearbeitet werden müssen, damit somit auch langfristig ein erfolgreicher Weg eingeschlagen wird. Hierfür wurden folgende grundlegende Annahmen getroffen:

- Zusätzliche Aktivitäten und Maßnahmen zum Klimaschutz, die über den Ausbau der Stromerzeugung auf Basis erneuerbaren Energien hinausgeht, werden – im Vergleich zum Trend – erst ab 2018 wirksam. Die Jahre zuvor können bzw. müssen für die Implementierung verstärkter Klimaschutzanstrengungen genutzt werden.
- Die zusätzlichen Aktivitäten bzw. Maßnahmen über den Trend hinaus basieren auf bekannten und heute verfügbaren Technologien.
- Neuere Technologien, wie z.B. Elektrofahrzeuge, kommen bis 2025 erst in sehr begrenztem Umfang zum Einsatz. Sie sind keine tragende Säule der zusätzlichen Klimaschutzanstrengungen.
- Kritische oder noch sehr unwirtschaftliche Technologien (z.B. CCS, Power to Gas) sind im Szenario bis 2025 nicht enthalten.
- Die Realisierung der zusätzlichen Klimaschutzpotenziale bedarf einer intensiven und aktiven Beteiligung aller Akteure im Land.

Als Ergebnis der Vorstudie liegen zwei Pfade vor, die die Bandbreite der möglichen Entwicklungen der Treibhausgasemissionen in den Sektoren aufzeigen. Es wird der Handlungsbedarf vermittelt, der zur Erreichung der Reduktionsziele erforderlich ist. Für die Szenarienbetrachtung wird von einem einheitlichen Entwicklungsrahmen der sozio-ökonomischen Rahmenbedingungen ausgegangen, welcher im Folgenden ausführlicher dargestellt wird.

2.6 Sozioökonomische Rahmenbedingungen

Als Basis für die zukünftige Entwicklung werden jene sozioökonomischen Rahmenbedingungen definiert, die vor allem einen relevanten Einfluss auf den künftigen Energieverbrauch haben bzw. die Entwicklung der THG-Emissionen wesentlich beeinflussen. Insbesondere für die wirtschaftlichen Rahmenbedingungen wird eine Entwicklung analog zu der in Deutschland unterstellt. Hierbei wird allerdings die spezifische Wirtschaftsstruktur in Hessen berücksichtigt und in der Vergangenheit abweichende Entwicklungen werden zur nationalen Entwicklung weitergeführt. Die unterschiedliche Bedeutung der Wirtschaftszweige zeigt sich am Beispiel der Anteile der Erwerbstätigen in Hessen und Deutschland im Jahr 2014 [destatis 2015b]:

- Land- und Forstwirtschaft, Fischerei (WZ 08 A)
Hessen: 0,9 % | Deutschland: 1,5 %
- Produzierendes Gewerbe (WZ 08 B-F)
Hessen: 21,6 % | Deutschland: 24,6 %
- Dienstleistungsbereiche (WZ 08 G-T)
Hessen: 77,4 % | Deutschland: 73,9 %

Mit insgesamt 6,09 Mio. Einwohnern am 31. Dezember 2014 [HSL 2015f] und einer sich daraus ergebenden Bevölkerungsdichte von 289 Einwohnern pro Quadratkilometer ist die Bevölkerungsdichte in Hessen seit 1990 um 5 % gestiegen (1990: 5,76 Mio. Einwohner und 273 Einwohner je km²). Obwohl die Bevölkerung in den letzten Jahren kontinuierlich angestiegen ist, wird laut Bevölkerungsvorausberechnung [HSL 2010] mittel- bis langfristig ein deutlicher Rückgang erwartet (Ø - 0,37 %/a vgl. Abbildung 3):

- Im Jahr 2020: 5.946.000 Einwohner
- Im Jahr 2030: 5.797.000 Einwohner
- Im Jahr 2040: 5.567.000 Einwohner

- Im Jahr 2050: 5.259.000 Einwohner

Nach bisherigen Erkenntnissen wird aufgrund des demografischen Wandels die Zahl der Einwohner in den nächsten Jahren zurückgehen. Die zunehmende Vergreisung der Bevölkerung führt darüber hinaus zu einem wachsenden Geburtendefizit mit den entsprechenden Auswirkungen auf die Zahl der Einwohner³².

Aus den Statistiken der Bevölkerungsentwicklung lassen sich Rückschlüsse auf den Wohnungsbestand ziehen. Die Anzahl der Wohneinheiten stieg von 2,4 Mio. im Jahr 1990 auf fast 3,0 Mio. im Jahr 2014 [HSL 2015g]. Dies entspricht einer Steigerung von 23 %. Die Wohnfläche vergrößerte sich um 33 % von 215 km² im Jahr 1990 auf 286 km² im Jahr 2014 [HSL 2015g]; d.h. jährlich wuchs die Wohnfläche um 1,2 %. Der Anstieg der Wohnfläche liegt auch darin begründet, dass die Anzahl der Personen je Wohneinheit kontinuierlich sinkt. Lebten im Jahr 1990 laut Statistik noch 2,4 Personen in einer Wohneinheit, sind es 2014 nur noch 2,0 Personen [HSL 2015f] [HSL 2015g]. Die Entwicklung spiegelt sich auch in der Wohnfläche je Einwohner wider. Heute steht einem Bewohner eine Wohnfläche von durchschnittlich 47,65 m² zur Verfügung, 1990 waren es 37,27 m²; das entspricht einem Anstieg von 30 % [HSL 2015f] [HSL 2015g].

Für Hessen wird trotz der rückläufigen Bevölkerung in Analogie zu der für Deutschland angenommenen Entwicklung [Öko-I/Prognos 2009] von einem langfristigen Wachstum des Bruttoinlandsproduktes (BIP)

³² Sondereffekte, wie die derzeit gestiegene Zuwanderung sind in den langfristigen Prognosen nicht berücksichtigt

um jährlich durchschnittlich 0,69 % (preisbereinigt) bis zum Jahr 2050 ausgegangen (siehe Abbildung 3).

Der Wirtschaftsstandort Hessen befindet sich innerhalb Deutschlands in einer günstigen Mittellage. In Hessen waren im Jahr 2014 3.308.700 Erwerbstätige zu verzeichnen [destatis 2015b]. Davon beschäftigt sind 0,9 % im Bereich Land- und Forstwirtschaft, Fischerei, ca. 22 % im Produzierenden Gewerbe und 77,3 % im Bereich Dienstleistungen [destatis 2015b]. Diese entfielen folgendermaßen auf die Wirtschaftsbereiche:

- Handel, Instandhaltung u. Reparatur von Kfz: 18 %
- Verkehr und Lagerei: 8 %
- Gastgewerbe: 5 %
- Information und Kommunikation: 4 %
- Finanz- u. Versicherungsleistungen: 6 %
- Grundstücks- und Wohnungswesen: 2 %
- Freiberufliche, wiss. u. techn. Dienstleistungen: 9 %
- Sonstige wirtschaftliche Dienstleistungen: 10 %

- Verwaltung, Verteidigung, Sozialversicherung: 7 %
- Erziehung und Unterricht: 7 %
- Gesundheits- und Sozialwesen: 14 %
- Kunst, Unterhaltung und Erholung: 2 %
- Erbringung von sonstigen Dienstleistungen: 5 %
- Private Haushalte: 2 %

Gegenüber dem Jahr 2000 stieg die Anzahl der Erwerbstätigen um 6 % an [destatis 2015b]. Den stärksten Zuwachs gab es in den Bereichen Erziehung und Unterricht (+26 %) sowie Öffentliche Verwaltung, Verteidigung, Sozialversicherung (+27 %) und im Gesundheits- und Sozialwesen (+19 %).

Bis zum Jahr 2050 wird ein Rückgang der Erwerbstätigen in Anlehnung an [Öko-I/Prognos 2009] um 14 % (- 457.000, Ø - 0,41 %/a) berücksichtigt. Für die Branchen Gesundheit, Verkehr/Nachrichten, Kredit/Versicherungen, Handel und Bildung/Erziehung werden mittel- bis langfristig noch Zuwächse erwartet (vgl. Abbildung 3).

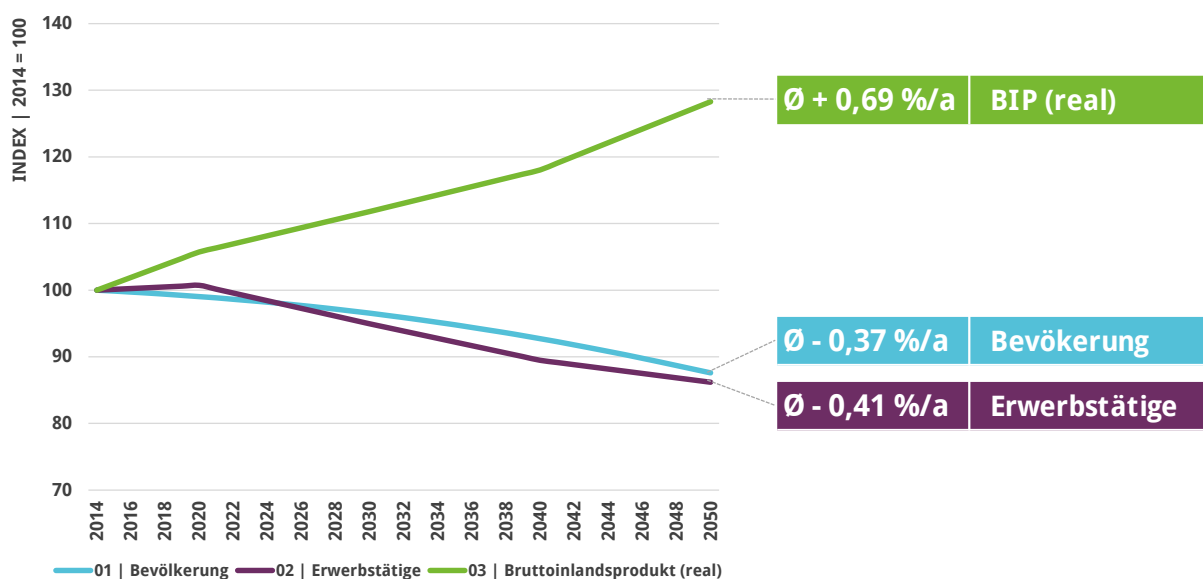


Abbildung 3 Relevante sozioökonomische Rahmenbedingungen in Hessen bis 2050

Quelle: Prognose auf Basis von [destatis 2015b] [HSL2015f] [VGRdL 2015] [Öko-I/Prognos 2009] , Darstellung IE Leipzig

3 Treibhausgas-Emissionen – Historie | Trend | Ziel

3.1 Ergebnisse im Überblick

In diesem Kapitel werden die Gesamtergebnisse über alle Sektoren und Treibhausgase dargestellt. Dazu werden zunächst die historischen Entwicklungen und daran anschließend die zu erwartenden Entwicklungen der THG-Szenarien (Trend und Ziel) dargestellt.

Historie

Die CO_{2äq}-Emissionen Hessens verringerten sich, ohne die Berücksichtigung von Senken und des Strombezuges, im Zeitraum 1990 bis 2014 um 13,3 Mio. t/a auf 38,2 Mio. t/a CO_{2äq} im Jahr 2014 (siehe Abbildung 4). Gegenüber dem Kyoto-Basisjahr konnten die CO_{2äq}-Emissionen bis zum Jahr 2014 um 25,8 % reduziert werden.

Anmerkung zu Sondereffekten im Jahr 2014: Infolge einer Havarie im Kraftwerk Staudinger (Block 5) am 12. Mai 2014 reduzierte sich der Kohleeinsatz und die damit verbundenen CO_{2äq}-Emissionen im Jahr 2014 deutlich. Zudem war das Jahr 2014 ein gegenüber dem langfristigen Durchschnitt relativ warmes Jahr mit den entsprechenden Auswirkungen auf den Energieeinsatz bzw. CO_{2äq}-Emissionen insbesondere für die Raumwärmebereitstellung.

Die höchsten CO_{2äq}-Minderungen im Zeitraum 1990 bis 2014 wurden in den Sektoren Industrie, GHD, Private Haushalte und den Übrigen erzielt:

- 01 | Energie: -0,2 Mio. t CO_{2äq}
- 02 | Industrie: -3,7 Mio. t CO_{2äq}
- 03 | Verkehr: -1,2 Mio. t CO_{2äq}
- 04 | GHD: -2,1 Mio. t CO_{2äq}
- 05 | Haushalte: -2,8 Mio. t CO_{2äq}
- 06 | Landwirtschaft: -0,3 Mio. t CO_{2äq}
- 07 | Übrige: -3,1 Mio. t CO_{2äq}

Ursächlich für die Reduktion der CO_{2äq}-Emissionen der energiebedingten³³ Sektoren war der grundlegende Wandel in der Energiewirtschaft. Das gilt sowohl für die Bereiche der Energieträgerbereitstellung als auch für die der Energieanwendung. Die Ursachen für diesen Wandel sind vielschichtig. Hierzu gehören gestiegene Anforderungen an die Effektivität im Rahmen der allgemeinen Wettbewerbsbedingungen auf den nationalen und internationalen Märkten, veränderte Bedingungen des Umweltschutzes und die Entwicklung der Energiepreise.

Der Endenergieeinsatz sank infolge fortwährender Effizienzbemühungen im Zeitraum 1990 bis 2014 um ca. 9 %. Zugleich kann eine kontinuierliche Energieträgersubstitution von Kohle und Mineralölprodukten hin zu Erdgas, Strom und Erneuerbaren Energien verzeichnet werden. Obwohl der Energieeinsatz in den Umwandlungsbereichen (01 | Energie) im Zeitraum 1990 bis 2014 um ca. 12 % anstieg, konnten die THG-Emissionen in etwa auf konstantem Niveau verbleiben, da sich auch in diesem Bereich eine kontinuierliche Substitution von Energieträgern (von Kohle hin zu Erdgas und erneuerbaren Energien) vollzog.

Der Rückgang des Bestandes an Milchkühen und Rindern in Hessen und demzufolge die Reduktion der verdauungsbedingten CO_{2äq}-Emissionen (Fermentation) war überwiegend für die Senkung der Emissionen im Sektor Landwirtschaft (07) verantwortlich.

Die Reduktion der CO_{2äq}-Emissionen im Sektor Übrige (07) ist maßgeblich auf die zunehmende Deponie-

³³ 01 | Energie, 02 | Industrie, 03 | Verkehr, 04 | GHD, 05 | Haushalte

gasnutzung und dem Verbot der Deponierung unbehandelter organischer Abfälle zurückzuführen. Gleichzeitig erhöhten sich die CO_{2äq}-Emissionen der halogenierten Fluorkohlenwasserstoffen infolge des zunehmenden Einsatzes dieser (insbesondere HFKW) als Ersatzstoffe für ozonschichtschädigende Substanzen (FCKW und Halone) im Bereich der Kälte- und Klimaanlage.

Infolge der deutlichen CO_{2äq}-Minderungen in den Sektoren Industrie, GHD, Private Haushalte und den

Übrigen verschoben sich im Zeitraum 1990 bis 2014 die Anteile der Sektoren an den CO_{2äq}-Emissionen merklich (siehe Abbildung 4). Die Sektoren Energie (01), Verkehr (03) und Landwirtschaft (06) tragen zunehmend zu den gesamten CO_{2äq}-Emissionen Hessens bei. Hervorzuheben ist insbesondere die zunehmende Bedeutung des Sektors Verkehr (Anteil 2014: 35%), obwohl sich die CO_{2äq}-Emissionen im Zeitraum 1990 bis 2014 um 1,2 Mio. t CO_{2äq} verringerten.

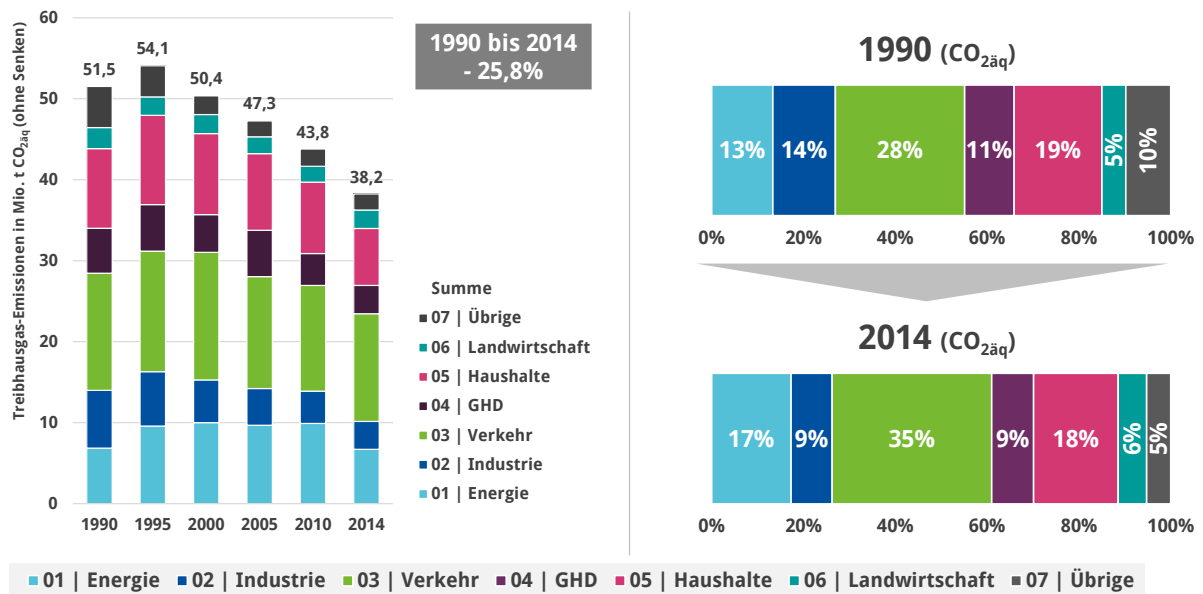


Abbildung 4 Treibhausgasemissionen nach Sektoren 1990 bis 2014 (Quellenbilanz)

Quelle: siehe Angaben zu den jeweiligen Sektoren, Berechnung und Darstellung IE Leipzig, Normierung der Treibhausgase (CO₂, CH₄, N₂O, F-Gase) in CO_{2äq}-Emissionen mittels GWP_{SAR}-Werte

Die Betrachtung der Reduktion nach Gasen zeigt, dass im Zeitraum 1990 bis 2014 der Rückgang der Kohlenstoffdioxid-Emissionen (01) maßgeblich für die CO_{2äq}-Gesamtreduktion Hessens war (Reduktionsanteil ca. 65,9%). Dies ist, wie bereits zuvor erwähnt, auf die Reduktion des Endenergieeinsatzes

sowie Energieträgersubstitution zurückzuführen. Neben den Kohlenstoffdioxid-Emissionen reduzierten sich auch die Methan-Emissionen (02) (Reduktionsanteil ca. 29,7%) infolge der zunehmenden Deponiegasnutzung, dem Verbot der Deponierung unbehandelter organischer Abfälle sowie des Rückgangs des

Bestandes an Milchkühen und Rindern in Hessen erheblich. Die Emissionen von Distickstoffmonoxid (03) hingegen sanken nur in geringem Maße, im Wesentliche hervorgerufen durch die Reduktion des Einsatzes von N₂O als analgetisch wirkendes Gas zu Narkosezwecken und der Substitution von Kohle durch andere Energieträger in den Endenergiesektoren. Der Ersatz von ozonschichtschädigenden Substanzen durch halogenierte Fluorkohlenwasserstoffe (insbesondere HFKW) führt zu einem Anstieg der THG-Emissionen durch F-Gase (04). Der Anteil der F-Gase an den gesamten CO_{2äq}-Emissionen ist mit etwa 3 % in Hessen etwa doppelt so hoch als auf gesamtdeutscher Ebene (etwa 1,4 %). Ursächlich dafür ist der im Vergleich zu Deutschland geringe Anteil des Sektors Energieumwandlung an den CO_{2äq}-Emissionen, der im Jahr 2014 nur etwa 38 % des gesamten hessischen Strombedarfs (Nettostromver-

brauch) bereitstellt. Die Veränderung der THG-Emissionen nach Gasen für den Zeitraum 1990 bis 2014 ist folgendermaßen:

- 01 | Kohlenstoffdioxid (CO₂): -9,6 Mio. t CO_{2äq}
- 02 | Methan (CH₄): -4,1 Mio. t CO_{2äq}
- 03 | Distickstoffmonoxid (N₂O): -0,1 Mio. t CO_{2äq}
- 04 | F-Gase (HFKW, FKW, SF₆): +0,7 Mio. t CO_{2äq}

Der Rückgang der Methan-Emissionen (CH₄) um ca. zwei Drittel und den Kohlenstoffdioxid-Emissionen (CO₂) um ca. 23 % sowie der Anstieg der THG-Emissionen durch F-Gase gegenüber dem Jahr 1990 führte zu einer Veränderung der Anteile der Gase an den THG-Emissionen Hessens (siehe Abbildung 5).

Abbildung 5 und Abbildung 6 zeigen die absolute und prozentuale Verteilung der Treibhausgase nach Sektoren (CO₂, CH₄ und N₂O) für das Basisjahr 1990 und 2014.

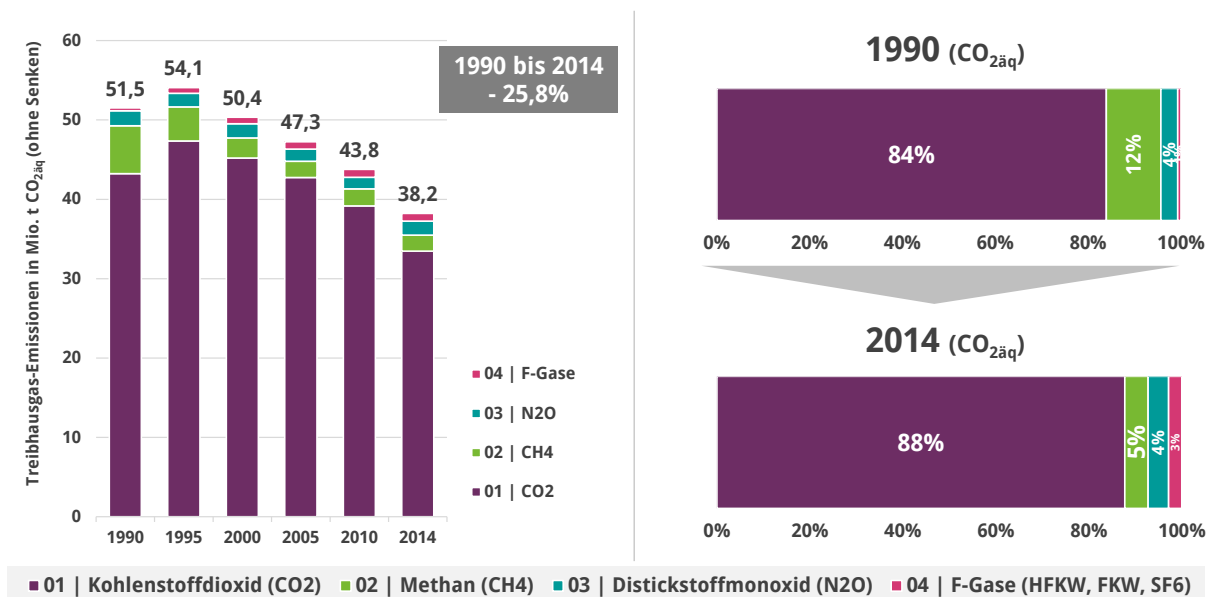


Abbildung 5 Treibhausgasemissionen nach Gasen 1990 bis 2014 (Quellenbilanz)

Quelle: siehe Angaben in den Sektoren, Berechnung und Darstellung IE Leipzig, Normierung der Treibhausgase (CO₂, CH₄, N₂O, F-Gase) in CO_{2äq}-Emissionen mittels GWP_{SAR}-Werte

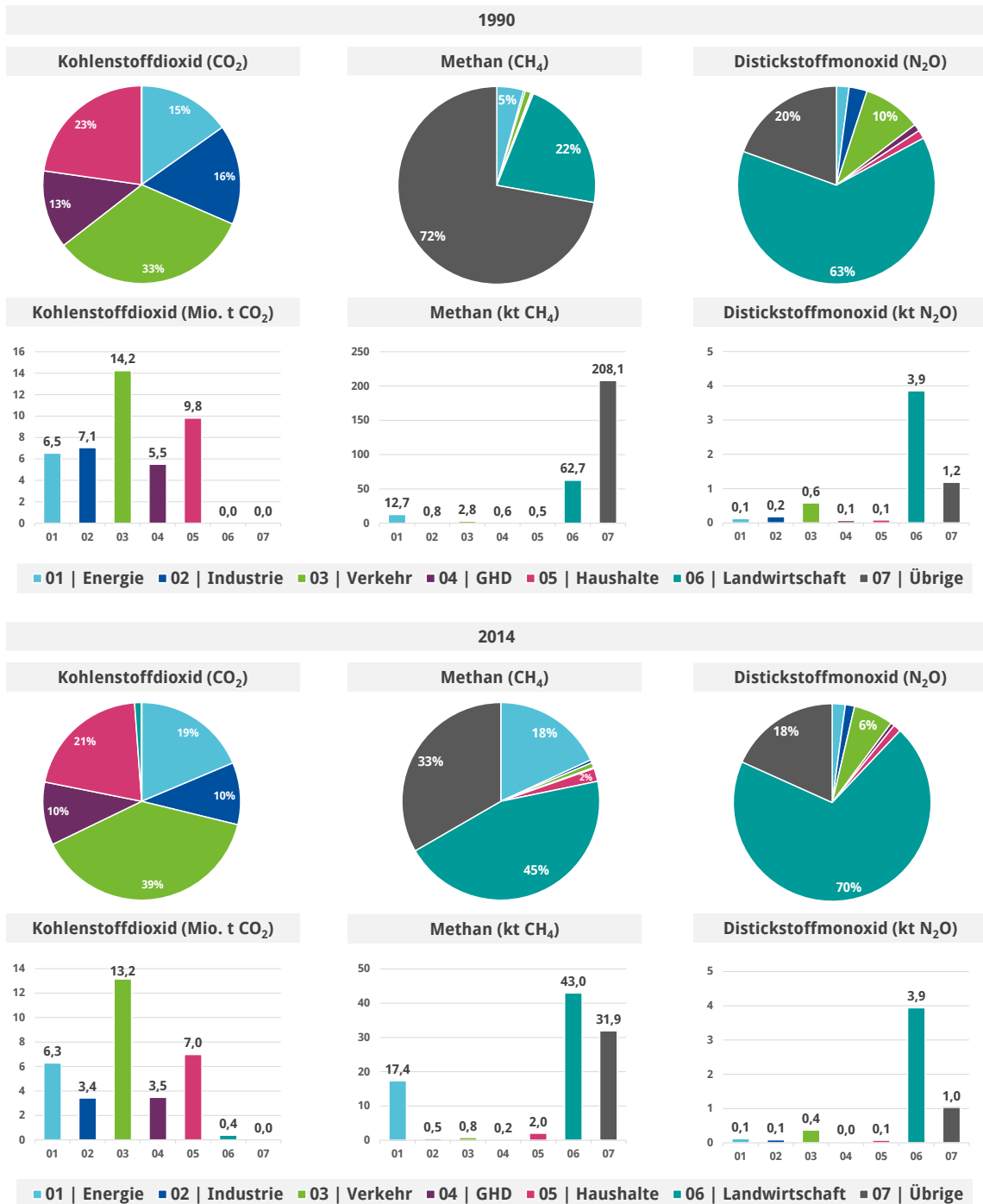


Abbildung 6 Emissionen nach Gasen (CO₂, CH₄, N₂O) und Sektoren 1990 und 2014 (Quellenbilanz)
 Quelle: siehe Angaben zu den jeweiligen Sektoren, Berechnung und Darstellung IE Leipzig

Nachdem die wesentlichen Ursachen für die Reduktion bzw. Anstiege bereits zuvor aufgeführt wurden, werden im Folgenden die Hauptverursacher und deren Anteile an den Treibhausgasen im Jahr 2014 benannt.

Kohlenstoffdioxid (CO₂) - 2014

Energieumwandlung- und -verteilung (19 %):

- 80 % der CO₂-Emissionen wurden von den Heiz- und Wärmekraftwerken der allgemeinen Versorgung verursacht.

Industrie – Verarbeitendes Gewerbe (10 %):

- 55 % der CO₂-Emissionen wurden von den Branchen „Chemische Grundstoffe“, „Papier, Pappe“, „Glas und Keramik“ sowie „Stahlerzeugung und –verarbeitung“ verursacht.

Verkehr (39 %):

- Etwa 95 % der CO₂-Emissionen wurden im Straßenverkehr von Pkw (ca. 60 %) und Nutzfahrzeugen (ca. 40 %) verursacht.

GHD und Haushalte (31 %):

- 92 % der CO₂-Emissionen wurden durch erdgas- und heizölbasierte Feuerungsanlagen verursacht.

Landwirtschaft (1 %):

- Die Freisetzung von Kohlenstoff wurde überwiegend aus der Kalkung von Böden (81 %) sowie der Ausbringung von Harnstoff (19 %) verursacht.

Methan (CH₄) - 2014

Energieumwandlung- und -verteilung (18 %):

- 95 % der Emissionen wurden durch die Verteilung von Erdgas, im Wesentlichen durch den Transport im Erdgasnetz sowie die Erdgasverdichtung, hervorgerufen.

GHD und Haushalte (3 %):

- Etwa 91 % der Emissionen gehen auf Kohle- und Holz-Feuerungsanlagen zurück.

Landwirtschaft (45 %):

- 83 % der Emissionen wurden durch Tierhaltung, insbesondere Rinderhaltung (ca. 95 %), verursacht.
- Etwa 83 % Emissionen sind auf die Verdauung, 15 % auf die Düngewirtschaft und 2 % auf die Lagerung von Energiepflanzen zurückzuführen.

Übrige (33 %):

- 95 % der Emissionen wurden durch Abfalldeponien und etwa 4 % durch Abfallkompostierung von Grün- und Bioabfall verursacht.

Distickstoffmonoxid (N₂O) - 2014

Verkehr (6 %):

- Die Emissionen sind maßgeblich auf Nutzfahrzeuge zurückzuführen.

Landwirtschaft (70 %):

- Etwa 86 % der Emissionen entstehen auf landwirtschaftlichen Böden durch Düngenanwendung (54 %, insbesondere Synthetischer N-Dünger und org. Wirtschaftsdünger), tierische Ausscheidungen auf der Weide, Ernterückstände sowie indirekt aus der Deposition von reaktivem und ausgewaschenem Stickstoff.
- Etwa 14 % der Emissionen entstehen bei der Düngewirtschaft, Lagerung von Energiepflanzen und der Güllelagerung.

Übrige (18 %):

- Der Großteil (69 %) der Emissionen resultiert aus im kommunalen Abwasser enthaltenem Eiweiß.

- 31 % der Emissionen wurden durch die Abfallkompostierung von Grün- und Bioabfall verursacht.

F-Gase (HFKW, FKW, SF₆) - 2014

- Der Großteil der HFKW-Emissionen wurde durch die Nutzung von Kühlmitteln verursacht, die FKW-Emissionen hingegen vorwiegend durch sonstige Einsatzbereiche.
- Die SF₆-Emissionen resultieren hauptsächlich aus dem Recycling von Isolierglasfenstern.

Historie: Senken – Forstwirtschaft

Neben den Quellen von Treibhausgasemissionen werden im Folgenden die mit der hessischen Forstwirtschaft³⁴ verbundenen THG-Senken berücksichtigt und deren Einfluss auf die Gesamtbilanz aufgezeigt. Die THG-Emissionen aus Wäldern werden größtenteils bestimmt durch die Einbindung und Freisetzung von CO₂.

Zwischen 1990 und 2014 sind die jährlichen Kohlenstoffeinbindungen im Wald durch eine zunehmende Holznutzung bei nahezu unveränderter Waldfläche um 26 % (1,4 Mio. t CO_{2äq}) zurückgegangen. In Abbildung 7 ist die jährliche Kohlenstoffbilanz als Saldo aus Einbindung und Freisetzung im Zeitraum 1990 bis 2014 dargestellt³⁵. Die Bilanz für die Wälder in Hes-

sen ergab für das Jahr 2014 eine CO₂-Senke von etwa -3,9 Mio. t CO_{2äq}, d. h. das Waldgebiet Hessens war insgesamt ein Kohlenstoffspeicher. Die Kohlenstoffeinbindungen in Biomasse (-3,5 Mio. t CO_{2äq}) und mineralische Böden (-0,7 Mio. t CO_{2äq}) überwogen deutlich die Kohlenstofffreisetzungen aus Totholz (0,2 Mio. t CO_{2äq}) und Streu (0,1 Mio. t CO_{2äq})³⁶

Die in forstwirtschaftlichen Senken gespeicherten THG-Emissionen sanken von 5,3 Mio. t CO_{2äq} im Jahr 1990 auf 3,9 Mio. t CO_{2äq} im Jahr 2014 (siehe Abbildung 7). Unter Berücksichtigung der Senken verringerten sich die THG-Emissionen Hessens im Zeitraum 1990 bis 2014 somit um 11,9 Mio. t CO_{2äq} auf 34,4 Mio. t CO_{2äq} im Jahr 2014.

³⁴ Die Forstwirtschaft gehört zur Quellgruppe LULUCF (Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft) und wird im Zuge der nationalen THG-Emissionsberichterstattung im Nationalen Inventarbericht (NIR) berücksichtigt. In der Emissionsberichterstattung Hessens (Treibhausgasbilanz 2011) ist die Quellgruppe LULUCF nicht in der Berechnung enthalten. Die Emissionen aus Landnutzungsänderungen und Boden werden in dieser Studie nicht berücksichtigt.

³⁵ Aufgrund der periodischen Erfassung der Daten Bundeswaldinventur 1987, 2002 und 2012, Inventurstudie 2008, Bodenzustandserhebung 1990 und 2006) entwickeln sich die Treibhausgaseinbindungen der Wälder sprunghaft. In den

Zwischenjahren werden gleichbleibende Faktoren angenommen.

³⁶ Angegeben sind die jährlichen Änderungen durch Kohlenstoffeinbindung und -freisetzung.

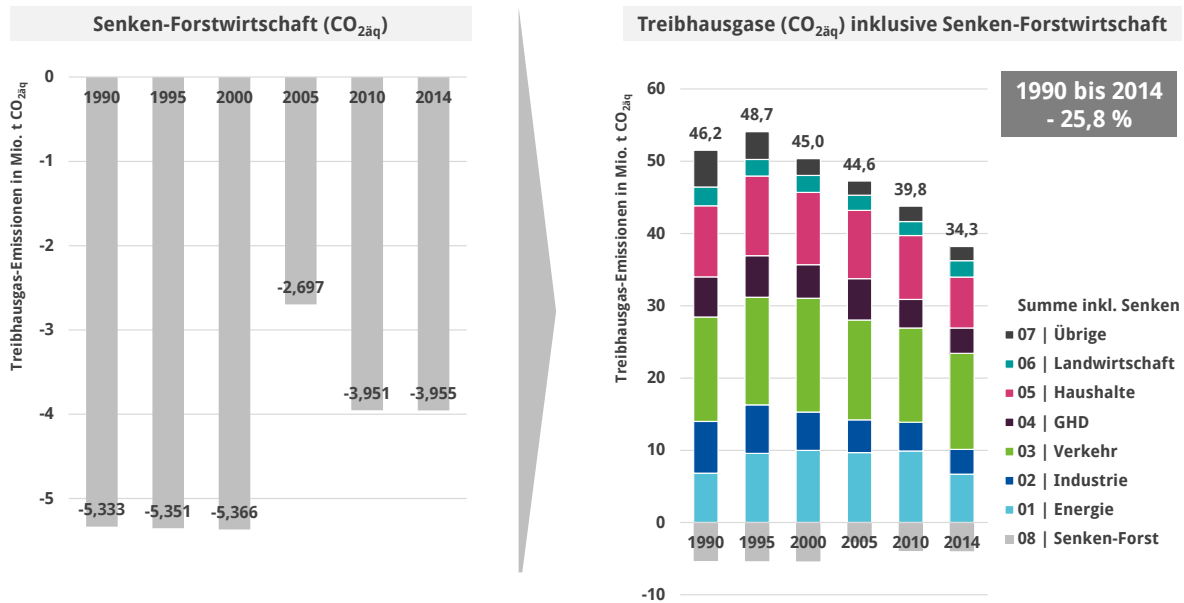


Abbildung 7 Treibhausgasemissionen nach Sektoren inkl. Senken 1990 bis 2014 (Quellenbilanz)

Quelle: siehe Angaben zu den jeweiligen Sektoren, Berechnung und Darstellung IE Leipzig, Normierung der Treibhausgase (CO₂, CH₄, N₂O, F-Gase) in CO_{2äq}-Emissionen mittels GWP_{SAR}-Werte, Waldflächen 1990 bis 2014 nahezu unverändert, Sprünge durch periodische Erfassung der Kohlenstoffvorräte im Wald (Bundeswaldinventur alle 10 Jahre), durch Veränderung der Holznutzung ändern sich die Kohlenstoffvorräte, Wald Hessens ist ein Kohlenstoffspeicher, d. h. es wird mehr CO₂ eingebunden als freigesetzt

Historie: Stromaustausch

Die existierenden Stromerzeugungskapazitäten Hessens waren in den Jahren 1990 bis 2014 nicht ausreichend, um den Stromverbrauch Hessens zu decken. Demzufolge ist ein Strombezug aus anderen Bundesländern bzw. anderen Ländern des europäischen Verbundsystems (UTCE) notwendig. Die damit verbundenen THG-Emissionen außerhalb Hessens und deren Einfluss auf die THG-Bilanz werden im Folgenden für die Jahre 1990 bis 2014 aufgezeigt. Diese gehen jedoch nicht in die Gesamtbetrachtung der Quellenbilanz ein und werden daher nur zur Information bzw. zur Einordnung des Stellenwertes ausgewiesen werden.

Nachdem sich das Verhältnis von Stromerzeugung zu Stromverbrauch ab dem Jahr 1995 deutlich verbesserte, d. h. zunehmend weniger Strom importiert werden musste, reduzierte die Abschaltung des Kernkraftwerkes Biblis im Jahr 2011 sowie die Havarie im Kraftwerk Staudinger im Jahr 2014 die konventionelle Inlandsstromerzeugung Hessens. Auch der dynamische Ausbau der Inlandsstromerzeugung aus erneuerbaren Energien konnte den Rückgang der konventionellen Inlandsstromerzeugung nicht kompensieren. In der Folge stiegen die THG-Emissionen aus dem Strombezug bis zum Jahr 2014 wieder deutlich auf 13,7 Mio. t CO_{2äq} an. Über den Zeitraum von 1990 bis 2014 stiegen die THG-Emissionen aus dem Strombezug um 6,1 Mio. t CO_{2äq} (siehe Abbildung 8).

Unter Berücksichtigung des Strombezuges verringerten sich die THG-Emissionen Hessens im Zeitraum

1990 bis 2014 um 7,2 Mio. t CO_{2äq} auf 51,9 Mio. t CO_{2äq} im Jahr 2014 (-12,2 %).

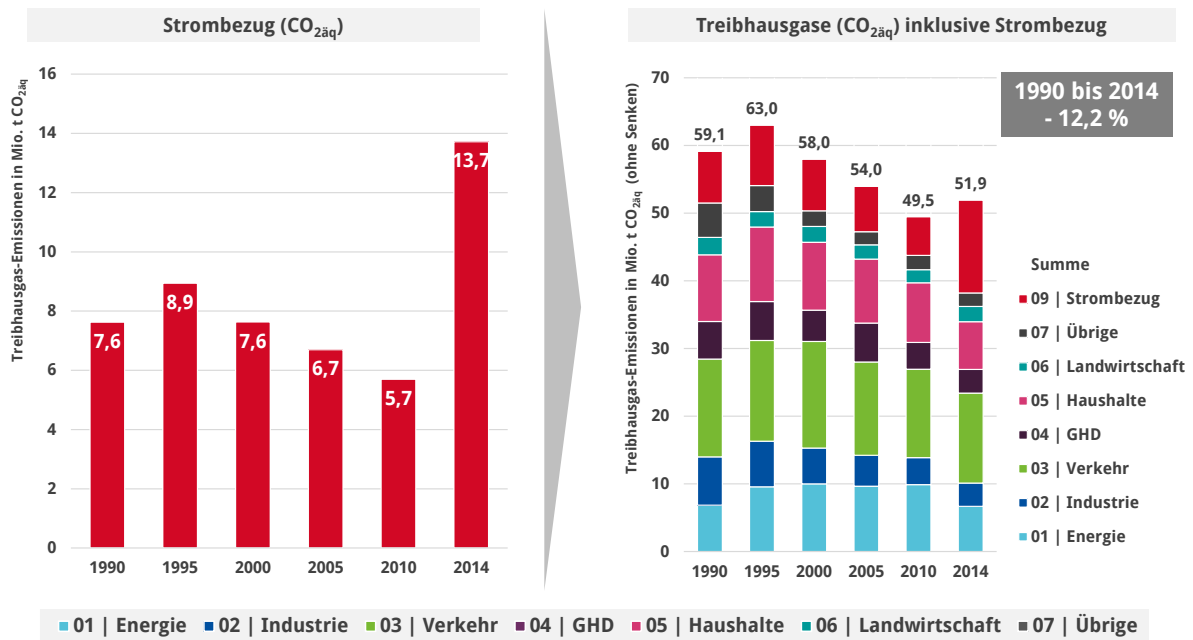


Abbildung 8 Treibhausgasemissionen nach Sektoren inkl. Strombezug 1990 bis 2014 (Quellenbilanz)
 Quelle: siehe Angaben zu den jeweiligen Sektoren, Berechnung und Darstellung IE Leipzig, Normierung der Treibhausgase (CO₂, CH₄, N₂O, F-Gase) in CO_{2äq}-Emissionen mittels GWP_{SAR}-Werte

Trendzenario

Im Folgenden werden die Ergebnisse des Trendzenarios bis zum Jahr 2050 dargestellt. Das Trendzenario stellt einen wahrscheinlichen Pfad dar, wenn die existierenden energiepolitischen Instrumente in die Zukunft fortgeschrieben und nicht zielorientiert effektiviert werden. Unter anderem werden die nachfolgenden allgemeinen Annahmen für das Trendzenario getroffen:

- Weitere Verschärfung der Energieeinsparverordnung (EnEV)

- Steigende Effizienzanforderungen im industriellen und gewerblichen Sektor zur Erlangung von Steuer- und Umlageerleichterungen
- Keine Technologie- bzw. Innovationssprünge
- Trägheiten und Beharrungskräfte innerhalb der Volkswirtschaft (z. B. orientieren sich Investitionen an den ökonomisch typischen Investitionszyklen)
- Hemmnisse wirtschaftlicher, anwendungsbezogener, marktstruktureller sowie informationeller Natur bleiben bestehen

Über die allgemeinen Annahmen hinaus basiert das Trendzenario auf den folgenden sektorspezifischen Annahmen.

01 | Energieumwandlung und -verteilung

- Die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien in Hessen wird gegenüber dem Basisjahr 2014 bis zum Jahr 2050 um 3,4 TWh auf 8,8 TWh ansteigen. Dabei wird vor allem ein Leistungs- und Stromerzeugungszuwachs bei Windenergie- und Photovoltaikanlagen erwartet.
- Steigerung des EE-Anteils an der Bruttostromerzeugung auf ca. 50 % bis 2050.
- Großteil der fossilen Kraftwerksleistung in Hessen wird bis 2050 aus Netzstabilisierungsgründen weiterbetrieben.

02 | Industrie

- Technologischer Effizienzfortschritt setzt sich fort; die Durchdringung mit BAT („Best Available Technologies“), z.B. im Bereich Prozesswärme, Beleuchtung und Raumkühlung, nimmt zu
- Strukturwandel (weniger energieintensive, dafür mehr wissensintensive Produkte) führt zur weiteren Senkung des Energieeinsatzes
- Die wirtschaftsleistungsbezogene Endenergieintensität sinkt durchschnittlich um etwa 0,9 % pro Jahr.
- Reduktion des Endenergieverbrauchs gegenüber 2014 um 14 % bis 2050. Der Einsatz von erneuerbaren Energien und Strom nimmt zu.

03 | Verkehr

- Durch den wachsenden Bestand an Elektro- und Erdgasfahrzeugen verschiebt sich die Energieträgerstruktur
- Rückgang im Schienenverkehr (7 %) und ÖPNV (13 %) vor allem durch rückläufige Bevölkerung
- Zunahme des Flugverkehrs (national), aber um ca. 12 %; höhere Effizienz senkt den Einsatz von Treibstoffen

- Zunahme der Güterverkehrsleistung um 91 %; steigender Anteil wird von der Bahn abgewickelt
- Die Personenverkehrsleistung sinkt gegenüber 2014 um ca. 15 % bis zum Jahr 2050.
- Insgesamt wird der Endenergieverbrauchs gegenüber 2014 um 25 % bis 2050 reduziert. Gleichzeitig wird der Anteil der erneuerbaren Energien auf 17 %, der Stromanteil auf ca. 13 % und der Erdgasanteil auf ca. 3 % bis 2050 erhöht. Der restliche Anteil wird weiterhin über fossile Kraftstoffe abgedeckt.

04 | Gewerbe, Handel, Dienstleistung

- Wirtschaftsleistungsbezogene Endenergieintensität sinkt um durchschnittlich ca. 1,5 % pro Jahr.
- Rückgang der Endenergieintensität je Erwerbstätigen um 13 % bis 2050.
- Reduzierung des Endenergieverbrauchs bis 2050 gegenüber 2014 um ca. 22 % bei gleichzeitiger Erhöhung des Anteils erneuerbarer Energien auf ca. 8 % sowie Senkung des Anteils von Mineralöl auf 11 % und Erdgas auf 19 % bis 2050.
- Strom wird dominierender Energieträger mit ca. 59 % Anteil am EEV im Jahr 2050.

05 | Haushalte

- Wohnfläche je Einwohner wird von 47,7 m² im Jahr 2014 auf 52,7 m² im Jahr 2050 weiter ansteigen (Ø ca. + 0,3 % pro Jahr).
- Die rückläufige Belegungsquote je Wohneinheit wird bis 2050 anhalten, so dass die Zahl der Einwohner je Wohneinheit (WE) von 2,02 Einwohner je WE im Jahr 2014 auf 1,83 Einwohner je WE zurückgeht.
- Wohnflächenbezogene Endenergieintensität sinkt um durchschnittlich ca. 0,2 % pro Jahr.
- Steigerung der Effizienz von Heizungsanlagen; Austausch und/oder Optimierung.

- Senkung des Endenergieverbrauchs bis 2050 gegenüber 2014 um ca. 10 % bei gleichzeitiger Erhöhung des Anteils erneuerbarer Energien auf ca. 34 % und Senkung des Anteils von Mineralöl und Erdgas auf ca. 40 % bis 2050.

06 | Landwirtschaft

- Die Strukturen der Landwirtschaft Hessens bleiben weitgehend bestehen.
- Für die landwirtschaftlichen Erträge je Fläche sowie die Leistung je Tier (Fleisch und Milch) wird ein moderater Anstieg unterstellt.
- Das heutige Verbraucherverhalten und damit der Nahrungsmittelverbrauch pro Kopf bleiben unverändert.

07 | Übrige Verbraucher

- Seit 2005 Verbot der Deponierung unbehandelter organischer Abfälle; Emissionen bis 2050 nahezu Null
- Nur geringe Veränderung der Emissionen aus der Abwasserbehandlung und der Abfallkompostierung bis 2050.
- Produktanwendungen (z.B. Narkosemittel, Sprühdosen) sinken bis 2050 proportional zur Bevölkerung.
- Zunahme der Nutzung von F-Gasen durch zunehmenden Kühl- und Kältebedarf.

Trendszenario – Ergebnisse

Im Trendszenario verringern sich die CO_{2äq}-Emissionen Hessens ohne die Berücksichtigung von Senken und des Strombezuges gegenüber dem Basisjahr 2014 um 13,6 Mio. t CO_{2äq} auf 24,6 Mio. t CO_{2äq} im Jahr 2050 (siehe Abbildung 9). Gegenüber dem Kyoto-Basisjahr könnten die CO_{2äq}-Emissionen im

Trendszenario um ca. 32 % (-16,3 Mio. t CO_{2äq}) bis zum Jahr 2025 und um 52 % (-26,9 Mio. t CO_{2äq}) bis zum Jahr 2050 reduziert werden.

Die höchsten CO_{2äq}-Minderungen werden im Trendszenario bis zum Jahr 2050 gegenüber dem Jahr 2014 in den Sektoren Verkehr, Haushalte und GHD erzielt:

▪ 01 Energie:	- 0,7 Mio. t CO _{2äq}
▪ 02 Industrie:	- 0,9 Mio. t CO _{2äq}
▪ 03 Verkehr:	- 5,7 Mio. t CO _{2äq}
▪ 04 GHD:	- 1,9 Mio. t CO _{2äq}
▪ 05 Haushalte:	- 3,2 Mio. t CO _{2äq}
▪ 06 Landwirtschaft:	- 0,5 Mio. t CO _{2äq}
▪ 07 Übrige:	- 0,7 Mio. t CO _{2äq}

Infolge der deutlichen CO_{2äq}-Minderungen in den Sektoren Verkehr, GHD und Private Haushalte im Trendszenario werden sich die Anteile der Sektoren an den CO_{2äq}-Emissionen merklich verschieben (siehe Abbildung 9). Die Sektoren Energie (01), Industrie (02) und Landwirtschaft (06) werden im Trendszenario einen zunehmenden Anteil an den gesamten CO_{2äq}-Emissionen Hessens aufweisen.

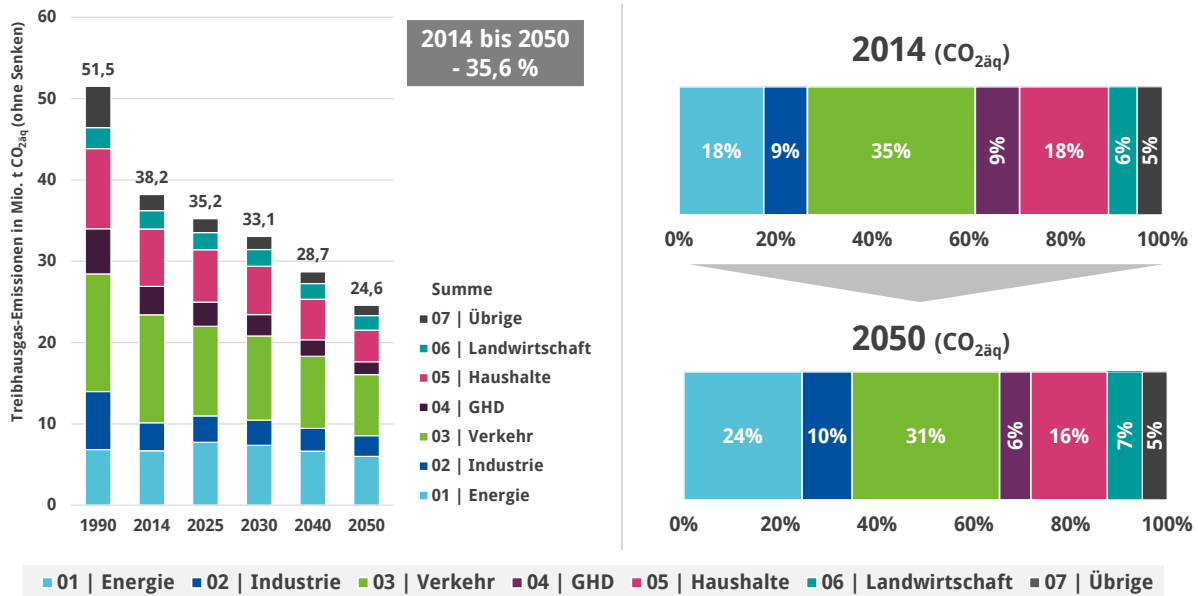


Abbildung 9 Trendszenario: Treibhausgasemissionen nach Sektoren 1990 bis 2050 (Quellenbilanz)

Quelle: siehe Angaben zu den jeweiligen Sektoren, Berechnung und Darstellung IE Leipzig, Normierung der Treibhausgase (CO₂, CH₄, N₂O, F-Gase) in CO_{2äq}-Emissionen mittels GWP_{SAR}-Werte

Im Zeitraum 2014 bis 2050 werden im Trendszenario die Kohlenstoffdioxid-Emissionen (01) maßgeblich die CO_{2äq}-Minderung in Hessen beeinflussen (Reduktionsanteil ca. 91 %). Im Wesentlichen ist dies auf die zukünftig weiterhin fortschreitende Verringerung des Energieeinsatzes sowie der Energieträgersubstitution in den Endenergiesektoren und im Umwandlungsbereich zurückzuführen.

Die Methan-Emissionen (02) werden im Trendszenario insbesondere infolge des Verbots der Deponierung unbehandelter organischer Abfälle sowie des Rückgangs des Bestandes an Milchkühen und Rindern in Hessen sinken (Reduktionsanteil ca. 6 %).

Der geringere Einsatz von synthetischem Stickstoff-Dünger (Mineraldünger) bis zum Jahr 2050 wird überwiegend zur Reduktion der Distickstoffmonoxid-Emissionen (03) beitragen (Reduktionsanteil ca. 3 %).

Die Emissionen aus halogenierten Fluorkohlenwasserstoffen (F-Gase) werden bis zum Jahr 2050 im Trendszenario nur leicht zurückgehen. Die Minderung Gasen ist wie folgt:

- 01 | Kohlenstoffdioxid (CO₂): - 12,4 Mio. t CO_{2äq}
- 02 | Methan (CH₄): - 0,8 Mio. t CO_{2äq}
- 03 | Distickstoffmonoxid (N₂O): - 0,4 Mio. t CO_{2äq}
- 04 | F-Gase (HFKW, FKW, SF₆): - 0,1 Mio. t CO_{2äq}

Der Rückgang der Methan-Emissionen (CH₄) und der Kohlenstoffdioxid-Emissionen (CO₂) bis zum Jahr 2050 um ca. ein Drittel gegenüber dem Jahr 2014 wird zu einer leichten Veränderung der Anteile der Gase an den CO_{2äq}-Emissionen Hessens führen (siehe Abbildung 10); insbesondere der Anteil der F-Gase und der Distickstoffmonoxid-Emissionen wird zunehmen.

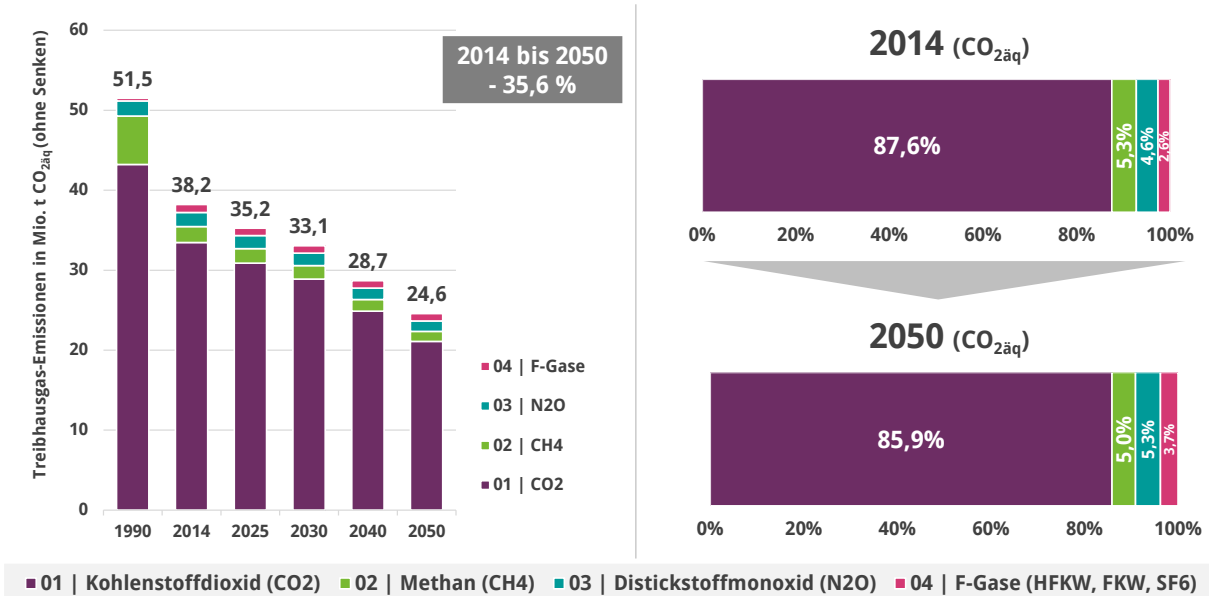


Abbildung 10 Trendszenario: Treibhausgasemissionen nach Gasen 1990 bis 2050 (Quellenbilanz)

Quelle: siehe Angaben zu den jeweiligen Sektoren, Berechnung und Darstellung IE Leipzig, Normierung der Treibhausgase (CO₂, CH₄, N₂O, F-Gase) in CO_{2äq}-Emissionen mittels GWP_{SAR}-Werte

Trendszenario: Senken - Forstwirtschaft

Für eine mögliche Entwicklung der Kohlenstoffbilanz der Wälder in Hessen wird im Trendszenario davon ausgegangen, dass die Waldfläche zwischen 2014 und 2050 unverändert bleibt und eine nachhaltige Holznutzung bei steigender Nachfrage nach Holz stattfindet. Unter den beschriebenen Annahmen werden der jährliche Holzzuwachs und die Holznutzung bis zum Jahr 2050 ausgeglichen sein. Die Bilanz aus jährlicher Einbindung und Freisetzung von CO₂ geht auf null zurück, d. h. der Wald wird dann keine CO₂-Senke mehr sein (siehe Abbildung 11)³⁷.

³⁷ Das Minderungspotenzial im Waldbereich lässt sich nur schwer einschätzen. Zur weiteren Waldentwicklung und dem Holzbedarf werden die Projektionen des Thünen-Instituts für Deutschland (WEHAM Modell) verwendet. Abgeleitet von den WEHAM Szenarien des Thünen-Instituts und der Forderung nach strikter Einhaltung des Prinzips der nachhaltigen Waldbewirtschaftung sieht das UBA es für plausibel und realistisch an, dass die Emissions-/ Einbindungsbi-

Im Trendszenario verringern sich die THG-Emissionen Hessens unter Berücksichtigung der Senken von 34,3 Mio t CO_{2äq} auf 24,6 Mio. t CO_{2äq} im Jahr 2050. Gegenüber dem Jahr 2014 entspricht dies einer Senkung um 28,3 % bis zum Jahr 2050 (9,7 Mio. t CO_{2äq})³⁸.

lanz der deutschen Wälder langfristig (ab 2040) nur wenig um die Nulllinie schwankt, wobei Holzprodukte nicht berücksichtigt werden [UBA 2014a].

³⁸ Tatsächlich wird der Kohlenstoff in Holzprodukten gespeichert. Diese Speicherfunktion wurde bisher nicht in der Treibhausgasberichterstattung berücksichtigt. Das Thünen-Institut hat die Aufgabe übernommen, die Emissionen aus der verzögerten Freisetzung von Kohlenstoff in Holzprodukten für die jährliche Klimaberichterstattung zu ermitteln. Das System befindet sich derzeit im Aufbau. Neben der Speicherwirkung können aus Holz hergestellte Produkte auch andere Materialien ersetzen, deren Herstellung mit einem höheren Energieverbrauch verbunden ist. Diese stoffliche Substitutionswirkung wird nicht in der Quellgruppe LULUCF berichtet, sondern macht sich indirekt durch einen geringeren Energieverbrauch in den Sektoren Industrie und Energie bemerkbar [Thünen 2015b].

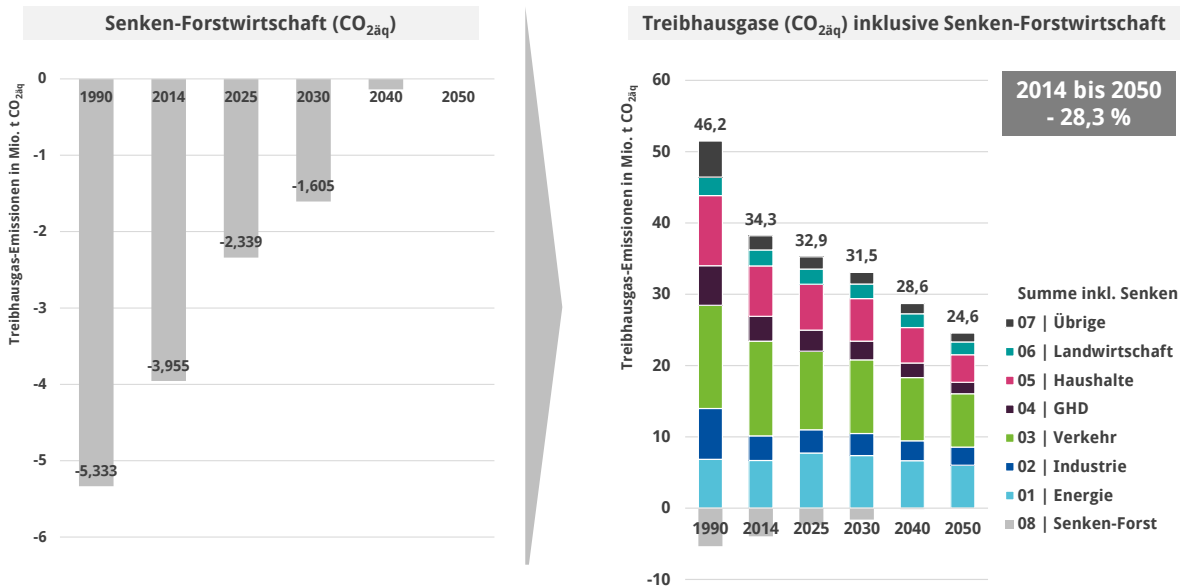


Abbildung 11 Trendszenario: Treibhausgasemissionen nach Sektoren inkl. Senken 1990 bis 2050 (Quellenbilanz)

Quelle: siehe Angaben zu den jeweiligen Sektoren, Berechnung und Darstellung IE Leipzig, Normierung der Treibhausgase (CO₂, CH₄, N₂O, F-Gase) in CO_{2äq}-Emissionen mittels GWP_{SAR}-Werte

Trendszenario: Stromaustausch

Im Trendszenario wird davon ausgegangen, dass die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien in Hessen gegenüber dem Basisjahr 2014 bis zum Jahr 2050 vor allem Zuwachs bei Windenergie- und Photovoltaikanlagen um 3,4 TWh auf 8,8 TWh verzeichnen wird. Die konventionelle Stromerzeugung (Industriewärme- kraftwerke, Wärmekraftwerke, Heizkraftwerke und sonstige Energieerzeuger) hingegen sinkt gegenüber dem Basisjahr 2014 um 1,2 TWh auf 8,9 TWh im Jahr 2050. Bei gleichzeitig leicht steigenden Stromverbrauch (+ 1,2 TWh) wird der Strombezug gegenüber 2014 um ca. 1,6 TWh abnehmen. In der Folge werden die THG-Emissionen aus dem Strombezug im Trendszenario bis zum Jahr 2050 auf 10,1 Mio. t CO_{2äq} sinken. Über den Zeitraum von 2014 bis 2050

gehen die THG-Emissionen aus dem Strombezug um 3,6 Mio. t CO_{2äq} zurück (siehe Abbildung 12).

Unter Berücksichtigung des Strombezuges verringern sich die THG-Emissionen Hessens im Zeitraum 2014 bis 2050 um 17,1 Mio. t CO_{2äq} auf 34,7 Mio. t CO_{2äq} im Jahr 2050 (-33,1 %).

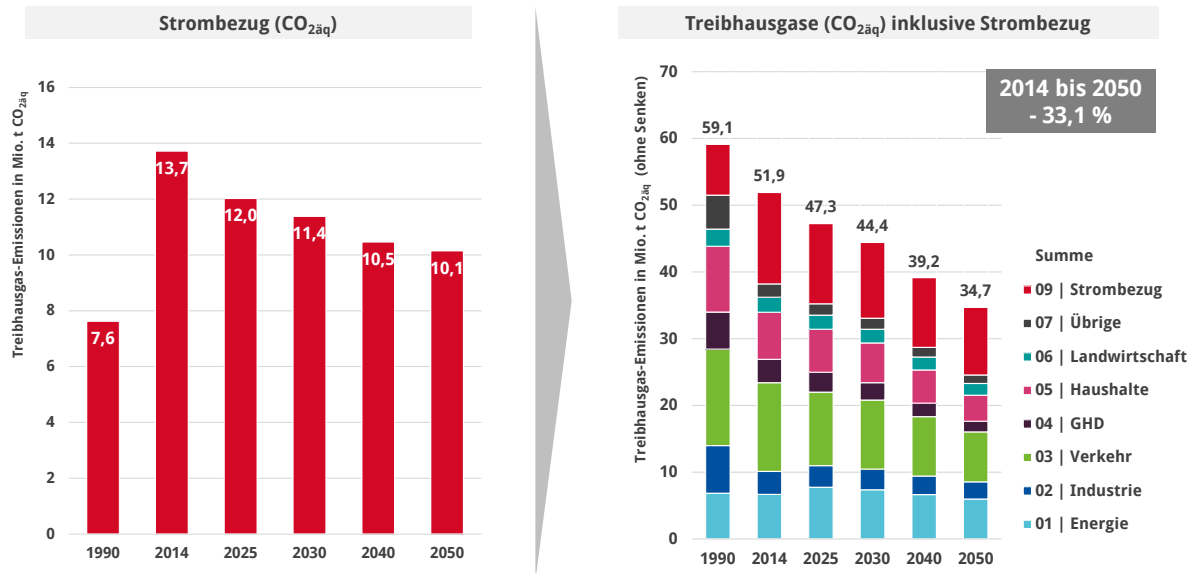


Abbildung 12 Trendszenario: Treibhausgasemissionen nach Sektoren inkl. Strombezug 1990 bis 2050 (Quellenbilanz)
 Quelle: siehe Angaben zu den jeweiligen Sektoren, Berechnung und Darstellung IE Leipzig, Normierung der Treibhausgase (CO₂, CH₄, N₂O, F-Gase) in CO_{2äq}-Emissionen mittels GWP_{SAR}-Werte

Zielszenario

Im Folgenden werden die Ergebnisse des Zielszenarios bis zum Jahr 2050 dargestellt. Das Zielszenario stellt einen möglichen Pfad dar, der zum Erreichen der vordefinierten energie- und klimapolitischen Ziele bzw. Reduktionsziele des Landes Hessen gänzlich beiträgt. Zum Erreichen des Ziels „Klimaneutrales Hessen³⁹“ müssen die Anstrengungen in allen Bereichen sehr stark intensiviert werden. Die nachfolgenden allgemeinen Annahmen gelten für das Zielszenario:

- Vielfältige Verschärfung und Einhaltung von Effizienzstandards
- Technologie- bzw. Innovationssprünge werden erzielt und umgesetzt

³⁹ Minderung der Treibhausgasemissionen um 90 % bis 2050 gegenüber dem Basisjahr 1990

- Trägheiten und Beharrungskräfte innerhalb der Volkswirtschaft werden verringert (z. B. durch erhöhte Förderung von Investitionen)
- Verstärkter Abbau von Hemmnissen wirtschaftlicher, anwendungsbezogener, marktstruktureller sowie informationeller Natur

Über die allgemeinen Annahmen hinaus basiert das Zielszenario auf den folgenden sektorspezifischen Annahmen (siehe dazu auch die Abschnitte 3.2 bis 3.9). Diese sind als Vorschläge bzw. Empfehlungen zur Erreichung des politischen Ziels „Klimaneutrales Hessen“ zu sehen und können im des Beteiligungsprozesses bzw. im Nachgang entsprechend angepasst werden.

Die hessische Landesregierung hat mit den Beschlüssen des Energiegipfels im Jahr 2011 Ziele des Anteils erneuerbarer Energien im Endenergieverbrauch und

dem Wärmebereich für das Jahr 2050 gesetzt. Da Prognosen für langfristige Ziele immer auch einen gewissen Korridor der tatsächlichen Entwicklung haben, weichen die in dieser Vorstudie angenommenen Entwicklungen bis 2050 leicht von den Zielsetzungen aus dem Jahr 2011 ab. Dies ist dabei keine Revidierung der Beschlüsse des Energiegipfels, sondern berücksichtigt mögliche Unsicherheiten hinsichtlich der tatsächlichen Entwicklung, die mit langfristigen Zielen einhergehen.

01 | Energieumwandlung und -verteilung

- Verachtfachung der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien gegenüber 2014 (2050: 42,2 TWh); vor allem Windenergieanlagen (von 1,5 TWh im Jahr 2014 auf 28,0 TWh im Jahr 2050 mit Verteilung auf ca. 2 % der Landesfläche) sowie Photovoltaik mit hohem Eigennutzungspotenzial (von 1,5 TWh in Jahr 2014 auf 11,2 TWh im Jahr 2050).
- Steigerung des EE-Anteils am Nettostromverbrauch auf über 116 % bis 2050 und an der Bruttostromerzeugung auf 93 % bis 2050 (7 % bleibt als fossile Back-Up-Kapazität zur Sicherung der Netzstabilität erhalten).
- Nutzung von Strom aus erneuerbaren Energien zur Gaserzeugung (Power to Gas) langsam beginnend ab 2025 und kontinuierlich steigend bis 2050. Gas besteht im Jahr 2050 zu 80 % aus EE-Gas und wird im Umwandlungssektor und in den Endenergiesektoren eingesetzt. EE-Gas resultiert zu etwa 13 % aus dezentralen Anlagen in Hessen und wird zu etwa 87 % aus zentralen Anlagen mit Strom aus Offshore-Anlagen bezogen.

02 | Industrie

- Verdopplung der durchschnittlichen jährlichen Senkung der wirtschaftsleistungsbezogenen Endener-

gieintensität durch Prozessoptimierung, Abwärmennutzung und effizientere Technologien auf durchschnittlich etwa 1,6 % pro Jahr.

- Einsatz effizienter Technologien zur Materialbearbeitung und zum Transport sowie Optimierung von Prozessketten (z.B. geringere Transportlängen und Transportwege, Erhöhung Materialeffizienz durch hohe Recyclingfähigkeit)
- Reduktion des Endenergieverbrauchs gegenüber 2014 um 32 % bis 2050.
- Senkung des Anteils emissionsintensiver Energieträger (Kohle und Mineralöl) auf 3,2 % bis 2050.
- Erhöhung des Anteils erneuerbarer Energien (u.a. Biomasse) auf ca. 12,2 % und Erdgas auf ca. 35 % (Erdgas besteht 2050 zu 80 % aus EE-Gas)
- Strom wird im Jahr 2050 zu etwa 34 % zum Endenergieverbrauch des Sektors beitragen (Strom zu 100 % aus erneuerbaren Energien).

03 | Verkehr

- Sowohl im Personenverkehr als auch im Güterverkehr wird die Verlagerung im Modal Split weg vom motorisierten Straßenverkehr gefördert. Dadurch gewinnen effizientere Verkehrsträger (z. B. Bahn) Anteile an der Verkehrsleistung.
- Maßnahmen zur Raumordnung und Marketing begünstigen kurze Wege im Personenverkehr. Die Arbeitsteilung der Wirtschaft wird stärker regional ausgerichtet (Verkehrsvermeidung).
- Anreize führen zum beschleunigten Ersatz älterer Pkw, Lkw und Schienenfahrzeuge durch besonders energieeffiziente Neufahrzeuge. Damit sinkt der Energiebedarf stärker als die Verkehrsleistung. Pro Personenkilometer steigt die Effizienz zusätzlich durch bessere Auslastung (Fahrgemeinschaften).

- Die Personenverkehrsleistung sinkt gegenüber 2014 um ca. 28 % bis zum Jahr 2050, die Personenkilometer je Einwohner sinken um ca. 17 %.
- Der Anstieg der Güterverkehrsleistung wird ab 2025 stabilisiert und steigt gegenüber 2014 um ca. 25 % bis 2050.
- Insgesamt wird der Endenergieverbrauch gegenüber 2014 um 59 % bis 2050 reduziert. Gleichzeitig wird der Stromanteil auf ca. 60 % (100 % aus erneuerbaren Energien) und der Erdgasanteil auf ca. 28,5 % (Erdgas besteht zu 80 % aus EE-Gas) bis 2050 erhöht. Der restliche Anteil wird weiterhin über fossile Kraftstoffe abgedeckt. Der Energieträgermix für die Verkehrssektoren bis 2050 ist wie folgt:
 - Binnenschifffahrt: 100 % importierter Agrodiesel
 - PKW-Verkehr: 80 % Strom, 20 % Gas
 - Schienenverkehr: 100 % Strom
 - Straßengüterverkehr: 60 % Gas, 20 % Strom, 20 % Diesel

04 | Gewerbe, Handel, Dienstleistung

- Erhöhung der jährlichen Senkung der wirtschaftsleistungsbezogenen Endenergieintensität durch Effizienzbemühungen, Verdopplung der Sanierungsrate und erhöhter Abriss und Neubau auf durchschnittlich etwa 2,6 % pro Jahr.
- Rückgang der Endenergieintensität je Erwerbstitigen um 40 % bis 2050 und Halbierung des Endenergieverbrauchs bis 2050 gegenüber 2014.
- Erhöhung des Anteils erneuerbarer Energien (Biomasse, Solarthermie, Umweltwärme) auf ca. 14 % bis zum Jahr 2050.
- Senkung des Anteils von Mineralöl auf 14 % und Erdgas auf 12 % bis 2050 (Erdgas besteht 2050 zu 80 % aus EE-Gas).

- Strom wird dominierender Energieträger am Endenergieverbrauch; Anteil ca. 55 % im Jahr 2050 (Strom zu 100 % aus erneuerbaren Energien).

05 | Haushalte

- Wohnfläche je Einwohner wird von 47,7 m² im Jahr 2014 auf 52,7 m² im Jahr 2050 weiter ansteigen (Ø ca. + 0,3 % pro Jahr).
- Die rückläufige Belegungsquote je Wohneinheit wird bis 2050 anhalten, so dass die Zahl der Einwohner je Wohneinheit (WE) von 2,02 Einwohner je WE im Jahr 2014 auf 1,83 Einwohner je WE zurückgeht.
- Erhöhung der jährlichen Senkung der wohnflächenbezogenen Endenergieintensität auf durchschnittlich etwa 1,8 % pro Jahr.
- Senkung des Raumwärmebedarfs um 60 % durch Verdopplung der Sanierungsrate auf 2,5 % pro Jahr, Erhöhung der Sanierungseffizienz und Erhöhung der Neubaustandards (EnEV).
- Steigerung der Effizienz von Heizungsanlagen; Austausch und/oder Optimierung u.a. durch Verschärfung und Vollzug der EnEV.
- Ausweitung und Vollzug des EEWärmeG auf den Bestand.
- Halbierung des Endenergieverbrauchs bis 2050 gegenüber 2014.
- Erhöhung des Anteils erneuerbarer Energien (Biomasse, Solarthermie, Umweltwärme) auf ca. 47 %
- Senkung des Anteils von Mineralöl auf ca. 2,4 % bis 2050.
- Senkung des Anteils von Erdgas auf ca. 2,4 % bis 2050; Erdgas besteht im Jahr 2050 zu 80 % aus EE-Gas.
- Der Stromverbrauch wird durch die Verschärfung und Ausweitung von Effizienzstandards (Kühlung/Belüftung) gegenüber 2014 um 20 % bis 2050

zurückgehen. Dadurch wird Strom zum zweitwichtigsten Energieträger mit einem Anteil von ca. 32 % am Endenergieverbrauch, dieser wird im Jahr 2050 zu 100 % aus erneuerbaren Energien bereitgestellt.

06 | Landwirtschaft⁴⁰

- Durch ein verändertes Verbraucherverhalten wird der Fleischverbrauch pro Kopf deutlich reduziert.
- Anpassung des Tierbestandes an emissionsarme Haltungen.
- Die Menge ausgebrachter Düngemittel nimmt signifikant ab; durch Optimierung der Ausbringetechniken, Düngeplanung, -mengen und -zeitpunkte werden die N-Produktivität der Düngung verbessert und N-Überschüsse reduziert.
- Anbaubiomasse wird für energetische Nutzungen im Jahr 2050 nicht verwendet (nur Rest- und Abfallstoffe aus der Pflanzen- und Tierproduktion).
- 80 % des Wirtschaftsdüngers tierischer Herkunft und andere landwirtschaftliche Reststoffe werden überwiegend in Biogasanlagen genutzt.

07 | Übrige Verbraucher

- Seit 2005 Verbot der Deponierung unbehandelter organischer Abfälle; Emissionen bis 2050 nahezu Null
- Signifikante Veränderung der Emissionen aus der Abwasserbehandlung und der Abfallkompostierung bis 2050 durch aktive Förderung von Wasser sparenden Armaturen, Geräten und Anlagen

⁴⁰ Um in Deutschland bis zum Jahr 2050 eine Minderung der THG-Emissionen in der Quellgruppe Landwirtschaft auf jährlich 35 Mio. t CO_{2äq} (das entspricht gegenüber dem Jahr 2010 einer Reduktion um knapp 50 %) zu erreichen, hat das Thünen-Institut technische Minderungspotenziale von Maßnahmen untersucht, mit deren Hilfe dieses Ziel erreicht werden kann [Thünen 2013]. Die Maßnahmen wurden entsprechend auf Hessen übertragen.

- Produktanwendungen (z.B. Narkosemittel, Sprühdosens) sinken stark ab
- Verschärfung des Ordnungsrechts zur Vermeidung von HFKW, FKW und SF₆
- Erstfüll-, Nachfüll-, Verwendungs- und Inverkehrbringungsverbote für F-Gase

Zielszenario – Ergebnisse

Im Zielszenario verringern sich die CO_{2äq}-Emissionen Hessens, ohne die Berücksichtigung von Senken und des Strombezuges, gegenüber dem Basisjahr 2014 um 32,9 Mio. t CO_{2äq} auf 5,3 Mio. t CO_{2äq} im Jahr 2050 (siehe Abbildung 13). Gegenüber dem Kyoto-Basisjahr 1990 könnten die CO_{2äq}-Emissionen im Zielszenario um ca. 41 % (-21,1 Mio. t CO_{2äq}) bis zum Jahr 2025 und um 90 % (-46,2 Mio. t CO_{2äq}) bis zum Jahr 2050 reduziert werden.

Die höchsten absoluten CO_{2äq}-Minderungen werden im Zielszenario bis zum Jahr 2050 gegenüber dem Jahr 2014 in den Sektoren Verkehr, Haushalte und Energie erzielt:

▪ 01 Energie:	- 5,5 Mio. t CO _{2äq}
▪ 02 Industrie:	- 2,6 Mio. t CO _{2äq}
▪ 03 Verkehr:	- 12,5 Mio. t CO _{2äq}
▪ 04 GHD:	- 2,8 Mio. t CO _{2äq}
▪ 05 Haushalte:	- 6,7 Mio. t CO _{2äq}
▪ 06 Landwirtschaft:	- 1,1 Mio. t CO _{2äq}
▪ 07 Übrige:	- 1,6 Mio. t CO _{2äq}

Infolge der deutlichen CO_{2äq}-Minderungen in den Sektoren Verkehr, Haushalte und Energie im Zielszenario werden sich die Anteile der Sektoren an den CO_{2äq}-Emissionen merklich verschieben (siehe Abbildung 13).

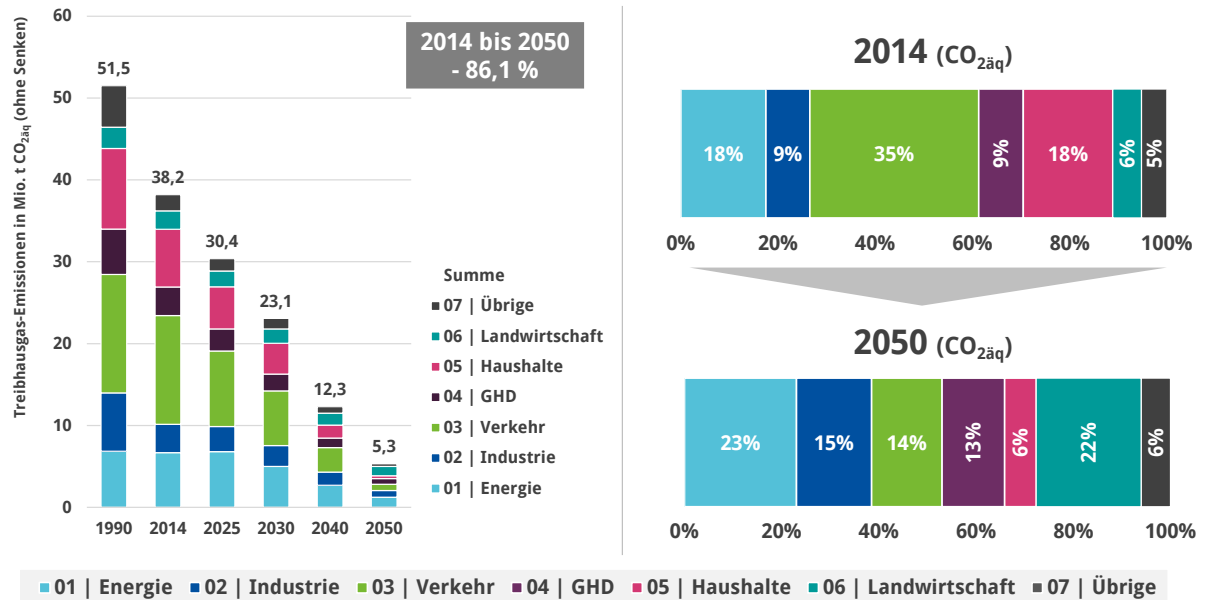


Abbildung 13 Zielszenario: Treibhausgasemissionen nach Sektoren 1990 bis 2050 (Quellenbilanz)

Quelle: siehe Angaben in Sektoren, Berechnung und Darstellung IE Leipzig, Normierung der Treibhausgase (CO₂, CH₄, N₂O, F-Gase) in CO_{2äq}-Emissionen mittels GWP_{SAR}-Werte

Im Zeitraum 2014 bis 2050 werden im Zielszenario ebenso wie im Trendszenario die Kohlenstoffdioxid-Emissionen (01) maßgeblich die THG-Minderung in Hessen beeinflussen (CO₂-Reduktionsanteil ca. 91 %). Im Wesentlichen ist dies auf die zukünftig deutliche Erhöhung des Anteils der erneuerbaren Energien in den Endenergiesektoren und im Umwandlungsbereich zurückzuführen. Die Methan-Emissionen (02) werden im Zielszenario insbesondere durch die Anpassung des Tierbestandes an emissionsarme Haltungen zurückgehen (CH₄-Reduktionsanteil ca. 3 %). Der geringere Einsatz von synthetischem Stickstoff-Dünger (Mineraldünger) sowie der mit den sinkenden Tierbeständen zurückgehende Anfall von Wirtschaftsdünger (organischer Dünger) bis zum Jahr 2050 wird überwiegend zur Reduktion der Distickstoffmonoxid-Emissionen (03) beitragen (N₂O-

Reduktionsanteil ca. 3 %). Die Emissionen aus halogenierten Fluorkohlenwasserstoffen (F-Gase) werden durch Verschärfung des Ordnungsrechts sowie durch die Erstfüll-, Nachfüll-, Verwendungs- und Inverkehrbringungsverbote für F-Gase bis zum Jahr 2050 im Zielszenario zurückgehen (F-Gase-Reduktionsanteil ca. 3 %).

- 01 | Kohlenstoffdioxid (CO₂): - 29,9 Mio. t CO_{2äq}
- 02 | Methan (CH₄): - 1,0 Mio. t CO_{2äq}
- 03 | Distickstoffmonoxid (N₂O): - 1,0 Mio. t CO_{2äq}
- 04 | F-Gase (HFKW, FKW, SF₆): - 0,9 Mio. t CO_{2äq}

Der starke Rückgang der Kohlenstoffdioxid-Emissionen (CO₂) bis zum Jahr 2050 gegenüber dem Jahr 2014 wird zu einer deutlichen Veränderung der Anteile der Gase an den THG-Emissionen Hessens führen (siehe Abbildung 14).

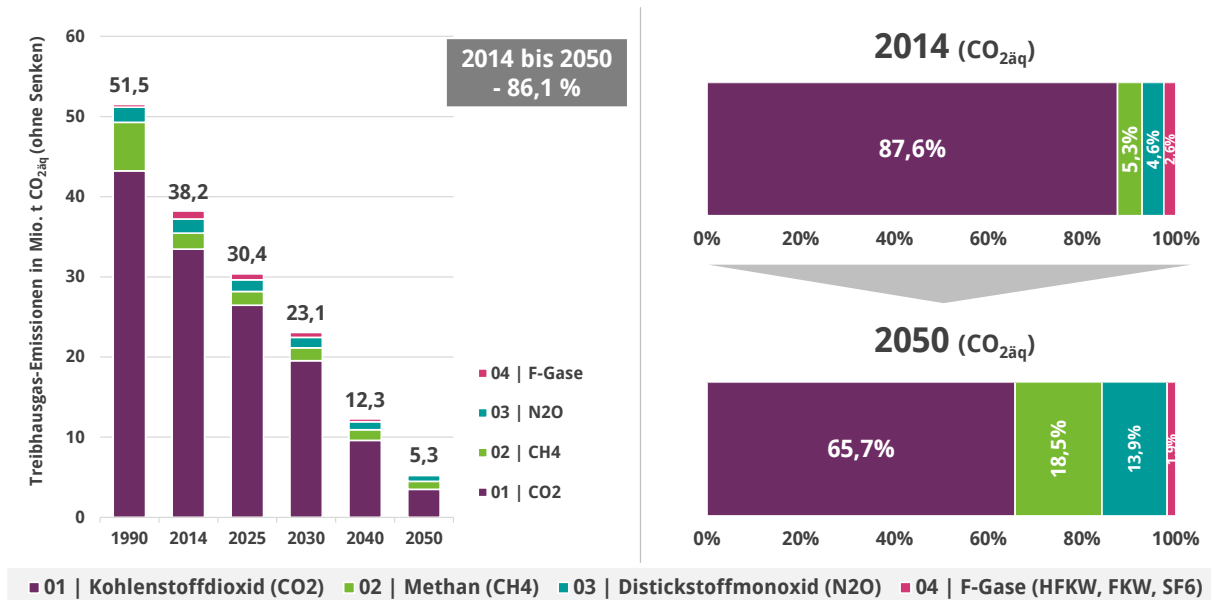


Abbildung 14 Zielszenario: Treibhausgasemissionen nach Gasen 1990 bis 2050 (Quellenbilanz)

Quelle: siehe Angaben zu den jeweiligen Sektoren, Berechnung und Darstellung IE Leipzig, Normierung der Treibhausgase (CO₂, CH₄, N₂O, F-Gase) in CO_{2äq}-Emissionen mittels GWP_{SAR}-Werte

Zielszenario: Senken - Forstwirtschaft

Ebenso wie im Trendszenario wird für eine mögliche Entwicklung der Kohlenstoffbilanz der Wälder in Hessen im Zielszenario davon ausgegangen, dass die Waldfläche zwischen 2014 und 2050 unverändert bleibt und eine nachhaltige Holznutzung bei steigender Nachfrage nach Holz stattfindet. Die Bindung von CO₂ in Holzprodukten (langfristige Verwendung von Holz in einer langen Wertstoffkaskade) sowie die Verwendung von Holz als Substitution von energieintensiven Materialien, wie u.a. Aluminium, Stahl, Kunststoffen und Beton, sowie deren Wirkung als CO₂-Senke werden im Rahmen der Vorstudie nicht berücksichtigt.⁴¹

⁴¹ Die Speicherwirkung von Holzprodukten wurde bisher nicht in der Treibhausgasberichterstattung berücksichtigt. Letztendlich ist davon auszugehen, dass der Kohlenstoff

Unter den beschriebenen Annahmen werden der jährliche Holzzuwachs und die Holznutzung bis zum Jahr 2050 im Zielszenario ausgeglichen sein. Die Bilanz aus jährlicher Einbindung und Freisetzung von CO₂ geht auf null zurück, d. h. der Wald wird dann keine CO₂-Senke mehr sein.⁴²

auch aus Holzprodukten als CO₂ in Abhängigkeit von deren Halbwertszeit verzögert freigesetzt wird. Das Thünen-Institut entwickelt derzeit ein System, die entsprechenden Emissionen für die jährliche Klimaberichterstattung zu ermitteln. Die stoffliche Substitutionswirkung von Holz wird dagegen nicht in der Quellgruppe LULUCF berichtet, sondern macht sich indirekt durch einen geringeren Energieverbrauch in den Sektoren Industrie und Energie bemerkbar [Thünen et al 2015].

⁴² Während die Speicherung von Kohlenstoff im Wald durch erhöhten Einschlag zurückgeht, steigt bei einer zunehmenden stofflichen Nutzung die Speicherfunktion in den Holzprodukten [UBA 2014a].

Im Zielszenario verringern sich die THG-Emissionen Hessens unter Berücksichtigung der Senken von 34,3 Mio. t CO_{2äq} im Jahr 2014 auf 5,3 Mio. t CO_{2äq} im

Jahr 2050. Gegenüber dem Jahr 2014 entspricht dies einer Senkung um 84,5 % bis 2050 (29 Mio. t CO_{2äq}).

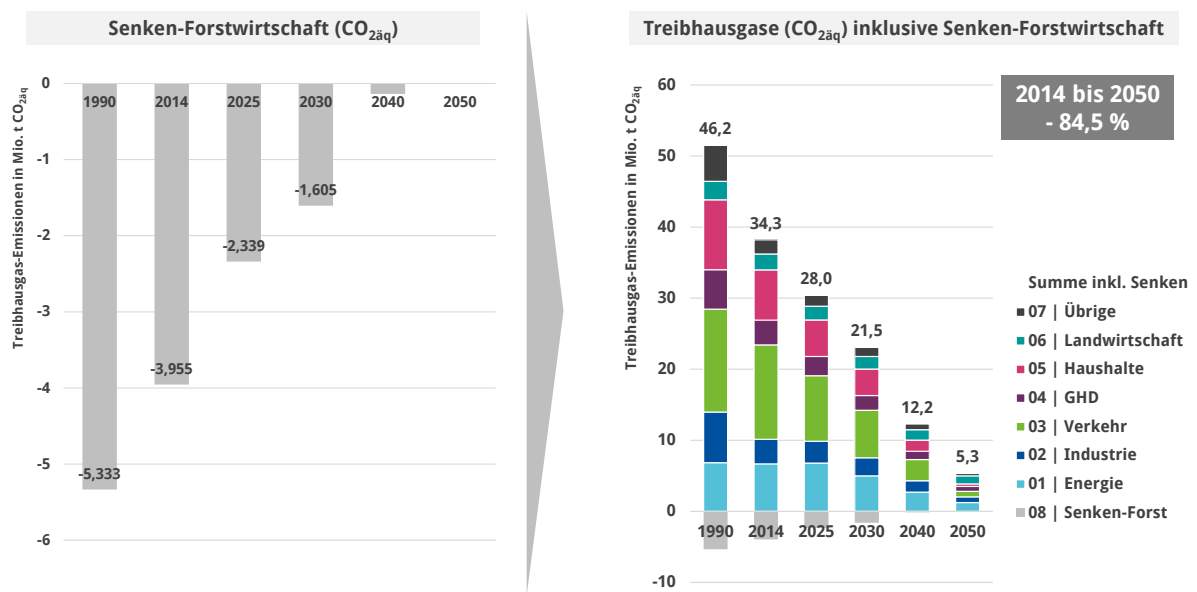


Abbildung 15 Zielszenario: Treibhausgasemissionen nach Sektoren inkl. Senken 1990 bis 2050 (Quellenbilanz)

Quelle: siehe Angaben zu den jeweiligen Sektoren, Berechnung und Darstellung IE Leipzig, Normierung der Treibhausgase (CO₂, CH₄, N₂O, F-Gase) in CO_{2äq}-Emissionen mittels GWP_{SAR}-Werte

Zielszenario: Stromaustausch

Im Zielszenario wird davon ausgegangen, dass die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien in Hessen gegenüber dem Basisjahr 2014 bis zum Jahr 2050 deutlich ausgebaut wird; vor allem Windenergieanlagen (von 1,5 TWh im Jahr 2014 auf 28,0 TWh im Jahr 2050 auf 2 % der Landesfläche) sowie Photovoltaik mit hohem Eigennutzungspotenzial (von 1,5 TWh in Jahr 2014 auf 11,2 TWh im Jahr 2050). Damit wird eine Steigerung des EE-Anteils an der Bruttostromer-

zeugung⁴³ auf 93 % bzw. am Nettostromverbrauch⁴⁴ auf über 116 % bis 2050 erreicht. Die über den Nettostromverbrauch hinausgehende Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien wird zur EE-Gaserzeugung (Power to Gas) genutzt.

⁴³ Als Bruttostromerzeugung wird jene Menge an erzeugter elektrischer Arbeit bezeichnet, die in einem Kraftwerk direkt an den Generatorklemmen erzeugt wird. Die Bruttostromerzeugung eines Landes entspricht der elektrischen Arbeit, die sämtliche Kraftwerke erzeugen. Stromimporte und -exporte über die Grenzen dieses Landes sowie der Eigenverbrauch der Erzeuger werden nicht berücksichtigt

⁴⁴ Der Nettostromverbrauch bezeichnet die elektrische Energie, die Verbraucher nutzen, ohne den Eigenbedarf der Kraftwerke und die Übertragungs- bzw. Netzverluste.

Die THG-Emissionen aus dem Strombezug werden im Zielszenario bis zum Jahr 2050 deutlich sinken (siehe Abbildung 16). Unter Berücksichtigung des Strombezuges verringern sich die THG-Emissionen

Hessens im Zeitraum 2014 bis 2050 um 46,6 Mio. t CO_{2äq} auf 5,3 Mio. t CO_{2äq} im Jahr 2050 (-92,7 %).

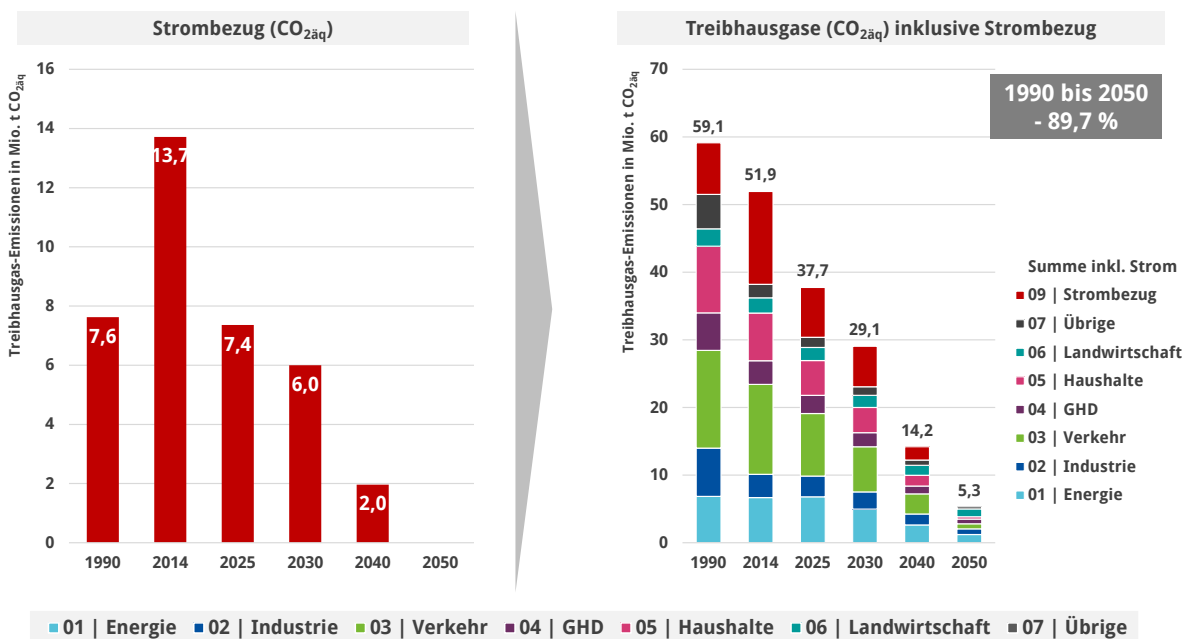


Abbildung 16 Zielszenario: Treibhausgasemissionen nach Sektoren (Quellenbilanz) inkl. Strombezug 1990 bis 2050
 Quelle: siehe Angaben zu den jeweiligen Sektoren, Berechnung und Darstellung IE Leipzig, Normierung der Treibhausgase (CO₂, CH₄, N₂O, F-Gase) in CO_{2äq}-Emissionen mittels GWP_{SAR}-Werte

3.2 Energieumwandlung und -verteilung

Innerhalb dieses Kapitels werden die THG-Emissionen aus der Energieumwandlung sowie der Verteilung von Energieträgern behandelt.

Energieumwandlung

Der Sektor Energieumwandlung umfasst Anlagen zur Strom- und Wärmeerzeugung. Dazu gehören auch Erneuerbare-Energien-Anlagen, wie Windenergie- und Photovoltaikanlagen, welche jedoch als emissionsneutral gelten. Treibhausrelevante Anlagen sind [LAK 2014]:

- **Wärme­kraftwerke der allgemeinen Versorgung (ohne KWK):** Wärme­kraftwerke der Energieversorger, mit Ausnahme von Atomkraftwerken, zur ungekoppelten Stromversorgung
- **Heizkraftwerke der allgemeinen Versorgung (nur KWK):** Strom- und Wärmeerzeugung ausschließlich auf Basis von Kraft-Wärme-Kopplung (KWK)
- **Heizwerke:** Anlagen, in der der eingesetzte Primärenergieträger ausschließlich zur Wärmebereitstellung genutzt wird
- **Industriewärme­kraftwerke:** Verbuchung des Brennstoffeinsatzes für die Stromerzeugung, während der Brennstoffeinsatz für die Wärmeerzeugung in industriellen KWK-Anlagen beim Endenergieverbrauch ausgewiesen wird
- **Verbrauch in der Energiegewinnung und in Umwandlungsbereichen:** Eigenverbrauch aller Strom- und Fernwärmeerzeugungsanlagen
- **Sonstige Erzeuger:** Ortsgaswerke, Kohlenwertstoffbetriebe, chemische Industrie, Raffinerien, Aufbereitungsanlagen, BHKW etc.

Stromerzeugung

Insbesondere die Abschaltung des Kernkraftwerkes Biblis im Jahr 2011 sowie die Havarie im Kraftwerk Staudinger im Jahr 2014 führten zwischen 1990 und 2014 zu einer Reduzierung der konventionellen inländischen Bruttostromerzeugung um ca. 16,9 TWh [HSL 2015a] [IE Leipzig 2015]. Dies konnte auch durch den dynamischen Ausbau der Inlandsstromerzeugung aus erneuerbaren Energien nicht kompensiert werden (1990 bis 2014: ca. + 5,0 TWh). Die Bruttostromerzeugung Hessens reduzierte sich zwischen den Jahren 1990 und 2014 somit um insgesamt 11,4 TWh auf etwa 13,1 TWh (siehe Tabelle 3). Nachdem sich das Verhältnis von Bruttostromerzeugung und Nettostromverbrauch ab dem Jahr 1995 deutlich verbesserte, d. h. zunehmend weniger Strom importiert werden musste, erhöhte insbesondere die Abschaltung des Kernkraftwerkes Biblis im Jahr 2011 den zur Deckung des hessischen Nettostromverbrauchs notwendigen Strombezug um ca. 13,4 TWh zwischen 1990 und 2014. Im gleichen Zeitraum erhöhte sich der Anteil der erneuerbaren Energieträger an der Bruttostromerzeugung von 1,1 auf 41,2 % und am Nettostromverbrauch von 0,9 auf 15,1 % (siehe Tabelle 3). Dabei konnten unter den erneuerbaren Energien insbesondere Biomasse, Windkraft und Photovoltaik ihren Beitrag zur Bruttostromerzeugung Hessens ausweiten (siehe Tabelle 4).

Bei der Entwicklung der Bruttostromerzeugung im Zeitraum bis 2050 wird im Trend von folgenden Annahmen ausgegangen:

- Die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien in Hessen wird gegenüber dem Basisjahr 2014 bis zum Jahr 2050 um 3,4 TWh auf 8,8 TWh ansteigen. Da-

bei wird vor allem ein Leistungs- und Stromerzeugungszuwachs bei Windenergie- und Photovoltaikanlagen erwartet.

- Die Stromerzeugung aus Industriewärme- kraftwerken, Wärmekraftwerken, Heizkraftwerken und sonstigen Energieerzeugern auf Basis fossiler Energien steigt 2015 zunächst auf 10,1 TWh an und sinkt anschließend kontinuierlich auf 8,9 TWh im Jahr 2050.

Ein Ziel des hessischen Energiegipfels ist es, den Nettostromverbrauch bis zum Jahr 2050 zu möglichst 100 % aus erneuerbaren Energiequellen zu decken [HMUELV 2010]. Um dieses Ziel zu erreichen, muss der Ausbau der erneuerbaren Energien massiv vorangetrieben werden. Aus diesem Grund wird im Ziel-Szenario bei der Entwicklung der Stromerzeugung im Zeitraum bis 2050 von folgenden Annahmen ausgegangen:

- Die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien in Hessen wird gegenüber dem Basisjahr 2014 bis zum Jahr 2050 um 36,9 TWh auf ca. 42,2 TWh ansteigen.
- Zum Ausbau der Stromerzeugung sollen insbesondere die Windenergie mit einem Potenzial von ca. 28 TWh [IWES/BWE 2011] bei Nutzung von 2 % der Landesfläche und die Photovoltaik mit einem Potenzial von rund 11 TWh [EuPD 2008] beitragen.
- Die Stromerzeugung aus Industriewärme- kraftwerken, Wärmekraftwerken, Heizkraftwerken und sonstigen Energieerzeugern auf Basis fossiler Energien steigt 2015 zunächst wieder auf ca. 10,1 TWh an und sinkt anschließend auf ca. 3,3 TWh im Jahr 2050.

In Tabelle 4 ist die Bruttostromerzeugung in Hessen für die konventionellen und erneuerbaren Energien in der Vergangenheit sowie im Zielszenario dargestellt.

Stromerzeugung und -verbrauch in TWh/a	1990	2000	2014	2020	2025	2050
01 Bruttostromerzeugung	24,48	27,52	12,96	19,47	22,91	45,49
02 Bruttostromerzeugung konventionell	24,20	26,66	7,62	9,27	8,27	3,28
03 Bruttostromerzeugung EE	0,28	0,85	5,33	10,19	14,64	42,21
04 Eigenenergieverbrauch	1,60	1,88	0,78	0,92	0,91	0,83
05 Nettostromerzeugung	22,88	25,63	12,18	18,54	22,00	44,66
06 Stromaustauschsaldo	10,75	11,85	24,18	20,35	16,61	-7,42
07 Bruttostromverbrauch	33,63	37,48	36,36	38,89	38,61	37,24
08 Pumpstrom & Netzverluste	1,51	2,52	0,94	0,95	0,95	0,95
09 Nettostromverbrauch	32,13	34,96	35,41	37,94	37,66	36,29
<i>Anteil EE an Bruttostromerzeugung</i>	<i>1,1%</i>	<i>3,1%</i>	<i>41,2%</i>	<i>52,4%</i>	<i>63,9%</i>	<i>92,8%</i>
<i>Anteil EE am Nettostromverbrauch</i>	<i>0,9%</i>	<i>2,4%</i>	<i>15,1%</i>	<i>26,9%</i>	<i>38,9%</i>	<i>116,3%</i>

Tabelle 3 Stromerzeugung, Stromverbrauch, Strombezug und Anteil der erneuerbaren Energien am Stromverbrauch – Historie und Zielszenario

Quelle: 1990, 2000: [HSL 2015a] [LAK 2015a], 2014: [IE Leipzig 2015], 2020, 2025, 2050: Szenario IE Leipzig

Bruttostromerzeugung in TWh/a	1990	2000	2014	2020	2025	2050
01 Konventionelle	24,20	26,66	7,62	9,27	8,27	3,28
02 Wasserkraft	0,13	0,34	0,35	0,37	0,38	0,45
03 Windkraft	0,00	0,22	1,49	4,62	7,63	27,99
04 Photovoltaik	0,00	0,00	1,47	3,09	4,44	11,17
05 Biomasse	0,15	0,18	1,88	1,99	2,08	2,51
06 Klär-, Deponiegas und Sonstige	0,00	0,11	0,14	0,12	0,12	0,10
Hessen Gesamt	24,48	27,52	12,96	19,47	22,91	45,49

Tabelle 4 Bruttostromerzeugung aus konventionellen und erneuerbaren Energien – Historie und Zielszenario

Quelle: 1990, 2000: [HSL 2015a] [LAK 2015a], 2014: [IE Leipzig 2015], 2020, 2025, 2050: Szenario IE Leipzig

Bruttostromerzeugung in %	1990	2000	2014	2020	2025	2050
01 Konventionelle	98,9%	96,9%	58,8%	47,6%	36,1%	7,2%
02 Wasserkraft	0,5%	1,2%	2,7%	1,9%	1,7%	1,0%
03 Windkraft	0,0%	0,8%	11,5%	23,8%	33,3%	61,5%
04 Photovoltaik	0,0%	0,0%	11,4%	15,9%	19,4%	24,6%
05 Biomasse	0,6%	0,7%	14,5%	10,2%	9,1%	5,5%
06 Klär-, Deponiegas und Sonstige	0,0%	0,4%	1,1%	0,6%	0,5%	0,2%
Hessen Gesamt	100%	100%	100%	100%	100%	100%

Tabelle 5 Anteile der konventionellen und erneuerbaren Energien an der Bruttostromerzeugung – Historie und Zielszenario

Quelle: 1990, 2000: [HSL 2015a] [LAK 2015a], 2014: [IE Leipzig 2015], 2020, 2025, 2050: Szenario IE Leipzig

Fernwärmeerzeugung

Zwischen 1990 und 2014 stieg der Nettofernwärmeverbrauch um 20,2 PJ, damit einhergehend stieg ebenso die Bruttofernwärmeerzeugung an. Die größten Zuwächse des Fernwärmeverbrauchs konnten in den Sektoren Industrie (+ 18,8 PJ) und Haushalte (+ 2,9 PJ) verzeichnet werden, wohingegen der Fernwärmeverbrauch im Sektor GHD leicht rückläufig war. Der zukünftige Fernwärmeverbrauch Hessens sowohl im Trend- als auch im Zielszenario resultiert aus den unterstellten Entwicklungen zum Fernwärme-

verbrauch der Endenergiesektoren (siehe Abschnitt 3.3, 3.5 und 3.6). Im Trendszenario wird davon ausgegangen, dass der Fernwärmeverbrauch gegenüber 2014 um ca. 10,4 PJ auf rund 21 PJ bis zum Jahr 2050 abnimmt. Aufgrund der unterstellten höheren energetischen Sanierungsrate von Gebäuden sowie effizienteren Prozessen im Sektor Industrie, geht der Fernwärmeverbrauch im Zielszenario gegenüber 2014 um ca. 15,7 PJ auf 15,6 PJ im Jahr 2050 zurück (siehe Tabelle 6).

Fernwärmeerzeugung und -verbrauch in PJ/a	1990	2000	2014	2020	2025	2050
01 Bruttofernwärmeerzeugung	12,7	27,1	35,4	34,1	30,9	17,6
02 Eigenverbrauch und Leitungsverluste	1,5	2,7	4,1	3,9	3,6	2,0
03 Nettofernwärmeverbrauch	11,1	24,4	31,3	30,1	27,3	15,6

Tabelle 6 Fernwärmeerzeugung und -verbrauch – Historie und Zielszenario
 Quelle: 1990, 2000: [HSL 2015a], 2014: [IE Leipzig 2015], 2020, 2025, 2050: Szenario IE Leipzig

Umwandlungseinsatz

Der zur Erzeugung von Strom und Fernwärme erforderliche Umwandlungseinsatz ist die maßgebliche Grundlage zur Ermittlung der THG-Emissionen im Sektor Energieumwandlung.

Der Umwandlungseinsatz wurde in der Vergangenheit maßgeblich durch die Kernenergie bestimmt, der jedoch als emissionsfrei gilt. Die Entscheidung der Bundesregierung im Zuge des Atom-Moratoriums führte zur Abschaltung des Kernkraftwerkes Biblis am 30. Mai 2011. Ohne die Berücksichtigung der Kernenergie erhöhte sich der Umwandlungseinsatz zur Strom- und Wärmeerzeugung im Zeitraum von 1990 bis 2014 um 36,5 PJ [HSL 2015a] [IE 2015]. Der Anstieg des Umwandlungseinsatzes wurde überwiegend durch den zunehmenden Einsatz von Erdgas und erneuerbaren Energien (insbesondere Biomasse) hervorgerufen. Bei den Energieträgern Steinkohle, Braunkohle und Mineralölen ist hingegen ein Rückgang (- 26,3 PJ) festzustellen (siehe Tabelle 7). Der deutliche Rückgang des Umwandlungseinsatzes von Steinkohle im Jahr 2014 wurde durch eine Havarie im Kraftwerk Staudinger (Block 5) am 12. Mai 2014 verursacht. Im Jahr 2014 wurde der Umwandlungseinsatz im Sektor Energieumwandlung in Hessen, durch zuvor genannten Sondereffekt, zu 67 % durch die Energieträger Erdgas und erneuerbare Energien

dominiert. Ohne diesen Sondereffekt liegt der Anteil der Steinkohle am Umwandlungseinsatz im Sektor Energieumwandlung bei ca. 29 %. Insbesondere die Anteile der erneuerbaren Energien sowie Erdgas erhöhten sich im Zeitraum 1990 bis 2014 kontinuierlich (siehe Tabelle 11).

Gegenwärtig existieren in Hessen u.a. fünf weitere fossil betriebene Großkraftwerke. Im Trendszenario wird davon ausgegangen, dass diese aus Netzstabilisierungsgründen bis 2050 weiterbetrieben werden können bzw. müssen [BNetzA 2013] [BNetzA 2015].

Im Zielszenario hingegen wird unterstellt, dass die fossilen Großkraftwerke entsprechend einer angenommenen durchschnittlichen Lebensdauer von 50 Jahren nach deren Inbetriebnahme abgeschaltet werden. Es handelt sich dabei u.a. um folgende Kraftwerke (voraussichtliche Lebensdauer in Klammern):

- Kraftwerk Staudinger (1977-2027):
Dampfkraftwerk auf Basis von Steinkohle
teilw. Erdgas/Heizöl
- Heizkraftwerk Kassel (1988-2038):
KWK auf Basis von Braunkohle, teilw. Steinkohle
- Heizkraftwerk West Frankfurt (1989-2039):
KWK auf Basis von Steinkohle
- Müllheizkraftwerk Offenbach (1990-2040):
KWK auf Basis von Abfällen, teilw. Steinkohle

Die bis dahin von diesen Kraftwerken produzierte Strom- bzw. Fernwärmemenge wird zukünftig durch erneuerbare Energien und zum Teil durch Erdgas bereitgestellt. Der Umwandlungseinsatz nimmt im

Zielszenario zwischen 2014 und 2050, im Wesentlichen durch den zunehmenden Einsatz von erneuerbaren Energien, um ca. 48 % (103,9 PJ) auf etwa 230,5 PJ zu (siehe Abbildung 17 und Tabelle 7).

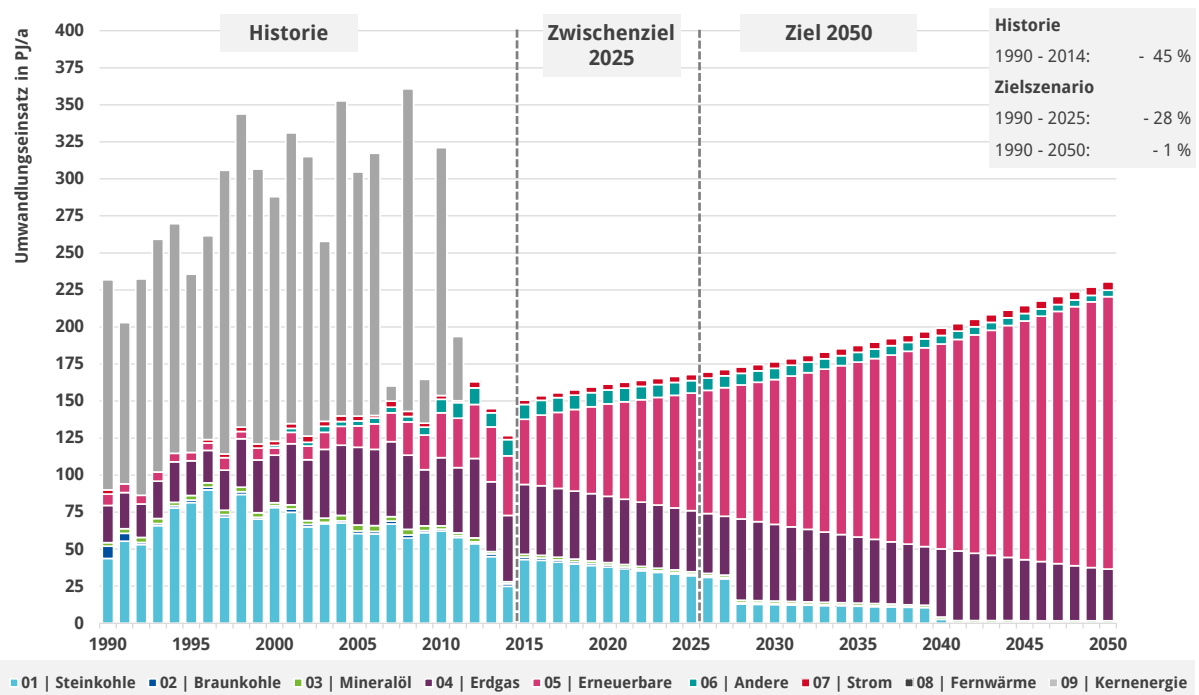


Abbildung 17 Sektor Energieumwandlung: Umwandlungseinsatz – Historie und Zielszenario
Quelle: 1990 – 2012: [HSL 2015a], 2013 – 2014: [IE Leipzig 2015], 2015 – 2050: Szenario IE Leipzig

Umwandlungseinsatz in PJ/a	1990	2000	2014	2020	2025	2050
01 Steinkohle	43,8	78,0	24,9	37,8	32,0	0,2
02 Braunkohle	8,2	1,4	1,7	1,4	1,1	0,1
03 Mineralöl	2,3	1,9	1,4	1,7	1,6	1,3
04 Erdgas	25,2	32,1	44,7	44,8	41,2	34,9
05 Erneuerbare	7,7	5,0	40,3	62,4	79,5	184,0
06 Andere	0,0	1,7	10,9	9,4	8,4	4,3
07 Strom	2,9	2,8	2,6	4,0	4,1	5,7
08 Fernwärme	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
09 Kernenergie	141,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Hessen Gesamt	231,8	288,0	126,6	161,4	167,9	230,5

Tabelle 7 Sektor Energieumwandlung: Umwandlungseinsatz in PJ – Historie und Zielszenario
Quelle: 1990, 2000: [HSL 2015a], 2014: [IE Leipzig 2015], 2020, 2025, 2050: Szenario IE Leipzig

Umwandlungseinsatz in %	1990	2000	2014	2020	2025	2050
01 Steinkohle	18,9%	27,1%	19,7%	23,4%	19,1%	0,1%
02 Braunkohle	3,5%	0,5%	1,3%	0,9%	0,7%	0,0%
03 Mineralöl	1,0%	0,6%	1,1%	1,0%	1,0%	0,6%
04 Erdgas	10,9%	11,2%	35,3%	27,8%	24,5%	15,2%
05 Erneuerbare	3,3%	1,7%	31,8%	38,7%	47,3%	79,8%
06 Andere	0,0%	0,6%	8,6%	5,8%	5,0%	1,9%
07 Strom	1,3%	1,0%	2,1%	2,5%	2,5%	2,5%
08 Fernwärme	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
09 Kernenergie	61,2%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Hessen Gesamt	100%	100%	100%	100%	100%	100%

Tabelle 8 Sektor Energieumwandlung: Energieträgeranteile am Umwandlungseinsatz – Historie und Zielszenario
 Quelle: 1990, 2000: [HSL 2015a], 2014: [IE Leipzig 2015], 2020, 2025, 2050: Szenario IE Leipzig

Erdgasverteilung

Die THG-Emissionen werden auf Basis der eingesetzten Energieträger ermittelt. Dazu werden diese mit den spezifischen Emissionsfaktoren (CO₂, CH₄, N₂O) des jeweiligen Jahres, differenziert nach Energieträgern, bewertet. Der Sekundärenergieträger Strom, der im Umwandlungssektor im Wesentlichen in Form des Kraftwerkseigenverbrauchs enthalten ist gilt im Folgenden als emissionsfrei.

Neben den THG-Emissionen aus dem Umwandlungseinsatz entstehen im Sektor Energieumwandlung und -verteilung auch Methanemissionen aus der Verteilung von Erdgas (CRF 1.B.2.b), die auf den folgenden Stufen der Gasverteilung anfallen:

- Transport in Ferngasnetzen
- Transport in Rohrleitungen (Leitungsemissionen)
- Gasdruckregel(mess)anlagen
- Verdichter
- Obertagespeicher
- Untertagespeicher

Während im Jahr 1990 noch 0,25 Mio. t CO_{2äq} an CH₄-Emissionen aus der Gasverteilung resultierten, sind diese bis zum Jahr 2014 auf 0,35 Mio. t CO_{2äq} angestiegen. Innerhalb des Trendszenarios wird wieder von einer Minderung bis zum Jahr 2050 auf 0,26 Mio. t CO_{2äq} ausgegangen, im Zielszenario jedoch lediglich auf 0,28 Mio. t CO_{2äq}. Dass in diesem Fall das Zielszenario weniger Einsparungen aufweist als das Trendszenario liegt darin begründet, dass im Sektor Verkehr im Rahmen des Zielszenarios deutlich mehr Gaseinsatz prognostiziert wird als im Trendszenario. Dadurch treten folglich etwas höhere diffuse CH₄-Emissionen bei der Verteilung der höher angeforderten Gasmenge auf.

THG-Emissionen - Historie und Szenarien

Wie in Abbildung 18 zu sehen ist, sind die THG-Emissionen aus dem Sektor Energieumwandlung und -verteilung von 1990 bis zum Jahr 1999 stark angestiegen, danach aber wieder abgesunken, wobei 2014 dabei kein repräsentatives Jahr darstellt. Grund für die dort punktuell so niedrigen THG-Emissionen ist zum

einen eine Havarie im Kraftwerk Staudinger, welches dann erst im Januar 2015 wieder in Betrieb gegangen ist. Zum anderen war 2014 ein überdurchschnittlich warmes Jahr, weswegen die Kraftwerke und Heizwerke deutlich weniger Primärenergieeinsatz für die Wärmebereitstellung benötigten. Daher setzt die Prognose – sowohl im Trend als auch im Ziel – dort an, wo die Historie der THG-Emissionen im Jahr 2013 aufgehört hat.

Im Trendszenario wird von einem vermehrten Ausbau erneuerbarer Energien – vor allem Photovoltaik- und Windenergieanlagen – und einem Weiterbestand der EEG-Förderung bis zum Jahr 2020 ausgegangen. Der EE-Anteil an der Bruttostromerzeugung wird von ca. 32 % im Jahr 2013 auf 50 % bis 2050 gesteigert. Die fossile Kraftwerksleistung bleibt aus Netzstabilisierungsgründen weitgehend erhalten. Gegenüber 1990 wird im Trendszenario bis zum Jahr 2050 eine Reduktion um ca. 11 % auf 6,1 Mio. t CO_{2äq} erwartet.

Innerhalb des Zielszenarios wird hingegen von einem deutlich höheren Ausbau erneuerbarer Energien, einer

daraus folgenden Steigerung des EE-Anteils an der Bruttostromerzeugung auf ca. 93 % und am Nettostromverbrauch auf ca. 116 % bis 2050. Die über den Nettostromverbrauch hinausgehende Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien (2050: ca. 5,9 TWh) wird zur Gaserzeugung mittels Power-to-Gas-Verfahren eingesetzt. Dies erfolgt langsam beginnend ab dem Jahr 2025 und kontinuierlich steigend bis 2050. Zusätzliche erfolgt ab 2025 ein Bezug von EE-Gas aus zentralen Anlagen mit Strom aus Offshore-Anlagen, so dass das in Hessen genutzte Erdgas im Jahr 2050 zu 80 % aus erneuerbaren Energien resultiert. Die THG-Emissionen des Sektors Energieumwandlung und -verteilung sinken im Zielszenario von ca. 6,85 Mio. t CO_{2äq} im Jahr 1990 auf ca. 6,80 Mio. t CO_{2äq} (- 1 %) im Jahr 2025 und auf ca. 1,2 Mio. t CO_{2äq} (- 82 %). Gegenüber dem Trendszenario bedeutet dies bis zum Jahr 2050 eine zusätzliche THG-Reduktion um ca. 4,9 Mio. t CO_{2äq} (siehe Abbildung 18).

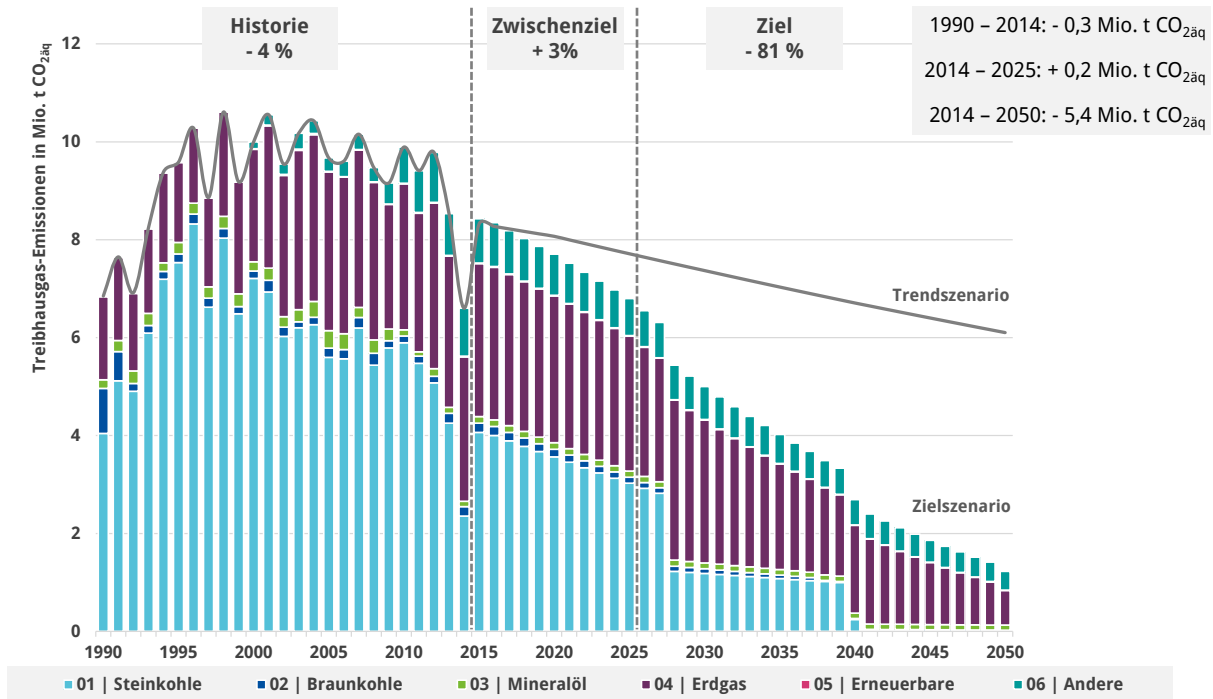


Abbildung 18 Sektor Energieumwandlung und -verteilung: THG-Emissionen – Historie sowie Trend und Ziel (Quellenbilanz)

Quelle: [HSL 2015h] [HSL 2015b] [HSL 2015d] [UGRdL 2014] [IE Leipzig 2015] [UBA 2015a] [UBA 2015e], Szenario und Berechnung IE Leipzig, Normierung der Treibhausgase (CO₂, CH₄, N₂O, F-Gase) in CO_{2äq}-Emissionen mittels GWPSAR-Werte

Zusammenfassung

Im Trendszenario wird von einem vermehrten Ausbau erneuerbarer Energien – vor allem Photovoltaik- und Windenergieanlagen – und einem Weiterbestand der EEG-Förderung ausgegangen. Der EE-Anteil an der Bruttostromerzeugung wird von 36 % im Jahr 2013 auf 50 % bis 2050 gesteigert. Innerhalb des Zielszenarios wird hingegen von einem deutlich höheren Ausbau erneuerbarer Energien, einer daraus folgenden Steigerung des EE-Anteils an der Bruttostromerzeugung auf 93 % bis 2050 ausgegangen. Außerdem erfolgt die Nutzung von Strom aus erneuerbaren Energien zur Gaserzeugung mittels Power-to-Gas-

Verfahren langsam beginnend ab dem Jahr 2025 und kontinuierlich steigend bis 2050. Der Gasmix wird somit im Jahr 2050 zu 80 % aus erneuerbaren Energien bestehen. Im Trendszenario wird daher von einem leichten Rückgang der THG-Emissionen von 6,85 Mio. t CO_{2äq} im Jahr 1990 auf 6,10 Mio. t CO_{2äq} im Jahr 2050 (Absenkung um 11 %). Im Zielszenario sinken die THG-Emissionen um ca. 1 % bis 2025 und um ca. 82 % bis zum Jahr 2050 (2050: ca. 1,2 t CO_{2äq}). In der nachfolgenden Tabelle sind kurz- und längerfristige potenzielle Handlungsfelder zur THG-Minderung im Sektor Energieumwandlung und -verteilung dargestellt (siehe Tabelle 9).

Handlungsfelder bis 2020/25	Handlungsfelder bis 2050
<p>Energieumwandlung</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Ausbau der Stromerzeugung auf Basis erneuerbarer Energien (insbesondere Windenergie- und Photovoltaik) ▪ Ausbau und Etablierung innovativer Kraft-Wärme-Kopplung zur Bereitstellung von Regelleistung ▪ Ersatz der fossilen Kraftwerke (vor allem Steinkohle) durch Kraftwerke auf Basis erneuerbarer Energien und Erdgas <p>Primärenergieverbrauch</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Erhöhung der Kraftwerkswirkungsgrade ▪ Senkung des Fernwärmeverbrauchs in den Endenergiesektoren durch energetischer Sanierung von Gebäuden und effizientere Prozesse in der Industrie <p>Erdgasverteilung</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Ersatz von Stahl -und Duktulgussrohren durch emissionsärmere Kunststoffrohrleitungen ▪ Minderung der diffusen Verteilungsverluste durch technische Verbesserungen (dichte Armaturen wie Flansche, Ventile, Pumpen, Kompressoren) 	<p>Energieumwandlung</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Erhöhung des Anteils erneuerbarer Energien an der Bruttostromerzeugung (93 %) und am Nettostromverbrauch (116 %) ▪ 80 % erneuerbares Erdgas aus Power-to-Gas-Anlagen (aus dezentralen hessischen Anlagen und aus zentralen Anlagen mit Strom aus Offshore-Anlagen) ▪ Ersatz fossiler Energieträger durch erneuerbare (Biogas, EE-Gas/Windgas aus Power to Gas, Holzpellets, Hackschnitzel) <p>Primärenergieverbrauch</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Senkung des Fernwärmeverbrauches infolge vollständiger energetischer Sanierung aller Gebäude <p>Erdgasverteilung</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Fortführung des Ersatzes von Stahl -und Duktulgussrohren durch emissionsärmere Kunststoffrohrleitungen ▪ Fortführung der Minderung der diffusen Verteilungsverluste durch technische Verbesserungen (dichte Armaturen wie Flansche, Ventile, Pumpen, Kompressoren)

Tabelle 9 Empfohlene Handlungsfelder zur Minderung der Treibhausgasemissionen im Sektor Energieumwandlung und -verteilung

3.3 Industrie

Die THG-Emissionen im Sektor Industrie werden in **energiebedingte** und **prozessbedingte Emissionen** unterschieden. Den größeren Anteil stellen die energiebedingten Emissionen dar, welche aus dem Primärenergieeinsatz (Erdgas, Heizöl, Kohle etc.) zur Bereitstellung von Prozesswärme und Strom zur Ermöglichung der Herstellungsprozesse resultieren. Prozessbedingte Emissionen entstehen hingegen infolge der Freisetzung von C-Atomen, welche sich mit dem Umgebungssauerstoff zu CO₂ verbinden, aus dem zu bearbeitenden Rohstoff.

Energiebedingte Emissionen

Wesentliche Grundlage zur Ermittlung der energiebedingten THG-Emissionen im Sektor Industrie ist der Endenergieverbrauch nach Energieträgern auf Basis der Energiebilanz.

Endenergieverbrauch

Der Endenergieverbrauch im Sektor Industrie sank von 1990 bis 2014 um etwa 27,4 PJ (- 20 %) [HSL 2015a] [IE 2015]. Infolge der Finanz- und Wirtschaftskrise ging die Wirtschaftsleistung im Sektor Industrie ab dem vierten Quartal 2008 spürbar zurück. Dadurch sank der Endenergieverbrauch 2008 gegenüber dem Jahr 2007 um ca. 4,5 PJ und im Jahr 2009 reduzierte sich der Endenergieverbrauch um etwa 15,8 PJ gegenüber 2008. In den darauffolgenden Jahren stieg der Endenergieverbrauch wieder an, erreichte jedoch nie wieder das Vorkrisenniveau. Der Rückgang des Endenergieverbrauches im Zeitraum 1990 bis 2014 wurde durch die Energieträger Erdgas, Mineralölprodukte, Kohle und Strom hervorgerufen (- 52,1 PJ), wobei der Rückgang des Erdgas- und Mineralöleinsatz (- 39,7 PJ) maßgeblich für diese

Entwicklung war. Bei den Energieträgern Fernwärme, Erneuerbare und Andere ist hingegen eine Verbrauchszunahme (+ 24,7 PJ) zu konstatieren. Die Zunahme des Fernwärmeverbrauches mit etwa 18,8 PJ und der direkte Einsatz von erneuerbaren Energien mit ca. 3,9 PJ im Zeitraum 1990 bis 2014 trugen im wesentlichen zu dieser Entwicklung bei (siehe Tabelle 10).

Der Endenergieverbrauch des Sektors Industrie in Hessen wird im Jahr 2014 zu 86 % durch die Energieträger Strom, Erdgas und Fernwärme dominiert, insbesondere der Anteil von Fernwärme und Strom ist im Beobachtungszeitraum kontinuierlich anstiegen.

Ausgehend von der Schätzung zur Energiebilanz 2014 [IE 2015] wurden durch das Verarbeitende Gewerbe in Hessen im Jahr 2014 109,4 PJ Endenergie verbraucht, davon etwa 40,8 PJ Strom. Etwas mehr als die Hälfte des Endenergie- wie auch des Stromverbrauchs entfiel im Jahr 2014 auf die folgenden fünf Wirtschaftszweige:

- Herstellung von chemischen Grundstoffen
- Herstellung von Papier, Pappe und Waren
- Herstellung von Kraftwagen und Kraftwagenteilen
- Herstellung von Gummi- und Kunststoffwaren
- Erzeugung u. erste Bearbeitung von NE-Metallen, Gießereien

Im Zeitraum 2000 bis 2014 nahm die reale Bruttowertschöpfung im Sektor Industrie (Verarbeitendes Gewerbe, Bergbau und Gewinnung von Steinen und Erden) durchschnittlich um ca. 0,3 % pro Jahr zu [VGRdL 2015], der Endenergieverbrauch sank hingegen um durchschnittlich ca. 0,5 % pro Jahr. Entsprechend der Entwicklung dieser maßgeblichen Einfluss-

größen weist die Endenergieintensität einen insgesamt abnehmenden Trend im Sektor Industrie auf, d. h. für die Produktion einer Einheit Wirtschaftsleistung wird tendenziell weniger Endenergie eingesetzt. Dabei sank die wirtschaftsleistungsbezogene Endenergieintensität⁴⁵ im Zeitraum 2000 bis 2014 um durchschnittlich ca. 0,8 % pro Jahr.

Im Zielszenario wird davon ausgegangen, dass sich die Senkungsdynamik der wirtschaftsleistungsbezogenen Endenergieintensität durch vielfältige Effizienzbemühungen (u.a. Prozessoptimierung, Steigerung der Ressourcen- und Materialeffizienz, Abwärmenutzung, effizientere Technologien siehe Tabelle 12) auf durchschnittlich etwa 1,6 % pro Jahr im Zeitraum bis 2050 deutlich erhöhen lässt. Dies entspricht in etwa einer Verdopplung gegenüber der durchschnittlichen jährlichen Senkung der Endenergieintensität im Zeitraum 2000 bis 2014.

Der Endenergieverbrauch im Sektor Industrie nimmt im Zielszenario zwischen 2014 und 2050 um ca. 32 % (35,4 PJ) auf etwa 74 PJ ab (siehe Abbildung 19 und Tabelle 10). Gegenüber dem Trendszenario bedeutet dies eine zusätzliche Reduktion um 20,2 PJ bis zum Jahr 2050. Zwischen den Endenergieträgern gibt es infolge der unterstellten Reduktion des Einsatzes von Kohle und Mineralöl zur Prozesswärmeerzeugung sowie durch Effizienzmaßnahmen strukturelle Verschiebungen (siehe Tabelle 11). Die unterstellten Maßnahmen führen zu einem deutlichen Rückgang des Kohleeinsatzes um 77 %, des Mineralöleinsatzes um 67 % und des Erdgaseinsatzes um 23 % bis zum Jahr 2050. Der Einsatz erneuerbarer Energien (Biomasse, Umwelt- und Solarwärme) nimmt um ca. 5 PJ

zu und wird damit auch seinen Anteil von 3,6 % im Jahr 2014 auf etwa 12,2 % bis zum Jahr 2050 erhöhen (siehe Tabelle 11). Erdgas und Strom sind im Jahr 2050 die dominierenden Energieträger im Sektor Industrie. Erdgas besteht im Jahr 2050 zu 80 % aus EE-Gas und Strom wird zu 100 % aus erneuerbaren Energien bereitgestellt.

⁴⁵ Quotient aus Endenergieverbrauch und der realen Bruttowertschöpfung

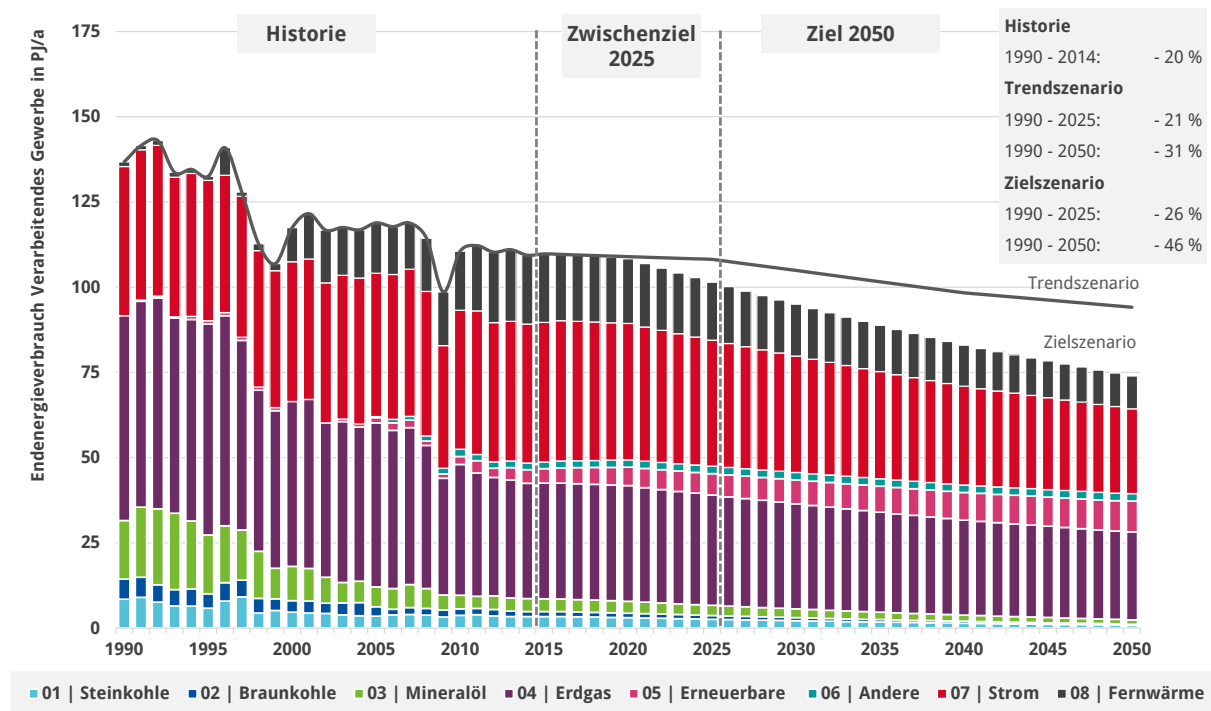


Abbildung 19 Sektor Industrie: Endenergieverbrauch – Historie, Trend- und Zielszenario

Quelle: 1990 – 2012: [HSL 2015a], 2013 – 2014: [IE Leipzig 2015], 2015 – 2050: Szenario IE Leipzig

Endenergieverbrauch in PJ/a	1990	2000	2014	2020	2025	2050
01 Steinkohle	8,5	4,6	3,4	3,1	2,6	0,8
02 Braunkohle	5,9	3,4	1,5	1,3	1,1	0,3
03 Mineralöl	17,2	10,1	3,8	3,5	3,0	1,3
04 Erdgas	60,1	48,4	33,8	33,9	32,4	25,9
05 Erneuerbare	0,0	0,0	4,0	5,4	6,3	9,0
06 Andere	0,0	0,0	1,9	2,1	2,2	2,2
07 Strom	43,7	41,0	40,8	40,0	36,9	24,9
08 Fernwärme	1,4	10,0	20,2	19,0	17,0	9,6
Hessen Gesamt	136,8	117,4	109,4	108,3	101,5	74,0
EEV je BWS _{real} (GJ/10 ³ Euro)	k.A.	3,17	2,84	2,62	2,41	1,61

Tabelle 10 Sektor Industrie: Endenergieverbrauch in PJ – Historie und Zielszenario

Quelle: 1990, 2000: [HSL 2015a] [VGRdL 2015], 2014: [IE Leipzig 2015] [VGRdL 2015] [destatis 2015b], 2020, 2025, 2050: Szenario IE Leipzig

Endenergieverbrauch in %	1990	2000	2014	2020	2025	2050
01 Steinkohle	6,2%	4,0%	3,1%	2,8%	2,6%	1,1%
02 Braunkohle	4,3%	2,9%	1,3%	1,2%	1,1%	0,4%
03 Mineralöl	12,6%	8,6%	3,5%	3,2%	2,9%	1,7%
04 Erdgas	44,0%	41,2%	30,9%	31,3%	31,9%	35,0%
05 Erneuerbare	0,0%	0,0%	3,6%	5,0%	6,2%	12,2%
06 Andere	0,0%	0,0%	1,8%	2,0%	2,1%	3,0%
07 Strom	32,0%	34,9%	37,3%	36,9%	36,4%	33,6%
08 Fernwärme	1,0%	8,5%	18,4%	17,5%	16,8%	13,0%
Hessen Gesamt	100%	100%	100%	100%	100%	100%

Tabelle 11 Sektor Industrie: Anteil der Energieträger am Endenergieverbrauch – Historie und Zielszenario
Quelle: 1990, 2000: [HSL 2015a], 2014: [IE Leipzig 2015], 2020, 2025, 2050: Szenario IE Leipzig

THG-Emissionen – Historie und Szenarien

Die THG-Emissionen werden auf Basis der eingesetzten Energieträger ermittelt. Dazu werden diese mit den spezifischen Emissionsfaktoren (CO₂, CH₄, N₂O) des jeweiligen Jahres, differenziert nach Energieträgern, bewertet. Die Sekundärenergieträger Strom und Fernwärme gelten im Folgenden als emissionsfrei, da bei ihrer Umwandlung in Nutzenergie keine direkten THG-Emissionen freigesetzt werden (siehe Abschnitt 2.2; Bilanzierungsprinzipien – Quellenprinzip).

Wie in Abbildung 20 zu sehen ist, verursacht der Einsatz von Erdgas im Jahr 2014 im Sektor Industrie den höchsten Anteil der THG-Emissionen, gefolgt von Kohle sowie Mineralöl und Mineralölprodukten. Bereits in der Historie sind die energiebedingten Emissionen von 6,12 Mio. t CO_{2äq} im Jahr 1990 auf 2,82 Mio. t CO_{2äq} im Jahr 2014 gesunken. Während diese Emissionen im Trendszenario mit 2,19 Mio. t CO_{2äq} nur leicht sinken, wird im Zielszenario von einem Rückgang auf 0,63 Mio. t CO_{2äq} (Absenkung

um 90 %) bis zum Jahr 2050 ausgegangen. Zum überwiegenden Teil soll dies durch Prozessoptimierung erreicht werden. Dazu gehören die Steigerung der Ressourcen- und Materialeffizienz, der Einsatz von Membran- oder Absorptionstechniken sowie mechanisches statt thermisches Trocknen. Eine weitere Möglichkeit stellt die Abwärmenutzung, z. B. in Form von Wärmerückgewinnung und Verwendung zur Vorwärmung von Produkten, zur Raumwärmebereitstellung und durch Einsatz von Absorptionskältemaschinen, dar. Außerdem können effizientere Technologien zur Materialbearbeitung und zum Transport genutzt werden (verringertes Einsatz von Strom und Brennstoffen bei der Erzeugung von mechanischer Energie, z.B. effiziente Maschinen zum Bohren, Fräsen, Verformen und für Transportvorgänge). Ein wichtiger Punkt ist die Substitution fossiler Energien durch erneuerbare, wie z.B. in allen Sektoren der 80%-ige Ersatz fossilen Erdgases durch EE-Gas aus Power-to-Gas-Anlagen.

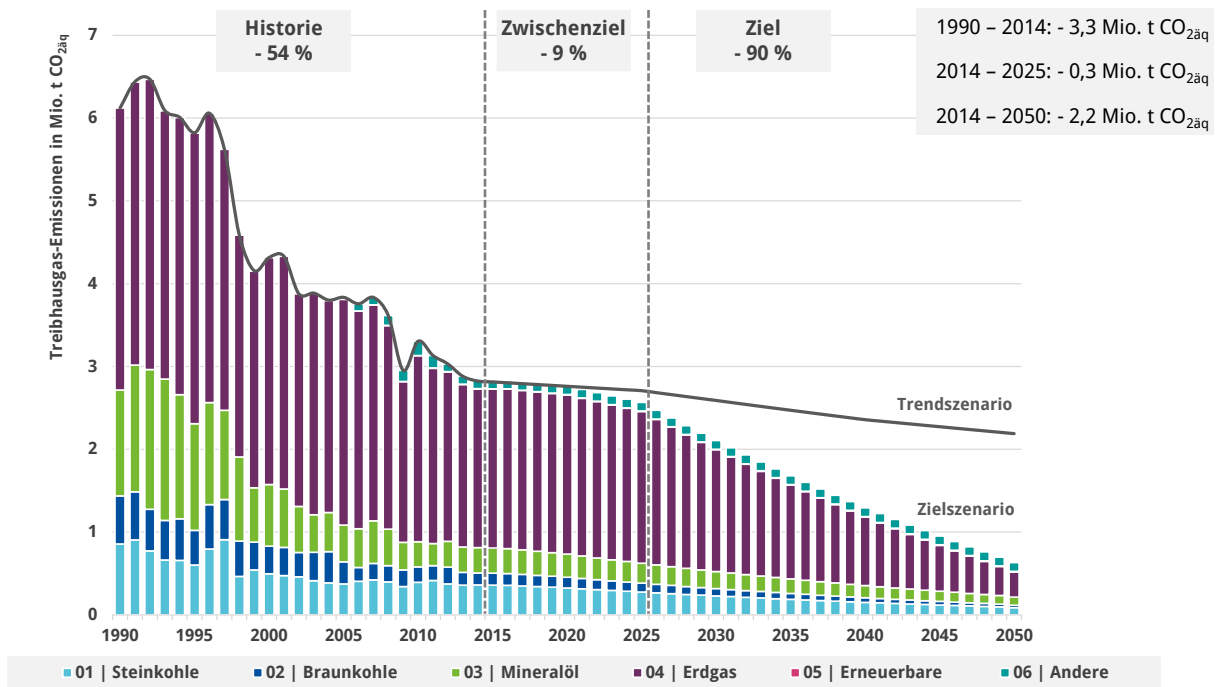


Abbildung 20 Sektor Industrie: Energiebedingte THG-Emissionen – Historie, Trend- und Zielszenario (Quellenbilanz)
 Quelle: [HSL 2015h] [HSL 2015b] [HSL 2015d] [UGRdL 2014] [IE Leipzig 2015] [UBA 2015a], Szenario und Berechnung IE Leipzig, Normierung der Treibhausgase (CO₂, CH₄, N₂O, F-Gase) in CO_{2äq}-Emissionen mittels GWP_{SAR}-Werte

Prozessbedingte Emissionen

Bei den **prozessbedingten Emissionen** handelt es sich nicht um Treibhausgasemissionen, die infolge des Energieeinsatzes für die Produktion eines Stoffes frei werden. Diese entstehen, wenn aus dem zu bearbeitenden Rohstoff enthaltene Kohlenstoffatome z.B. mit dem Sauerstoff der Umgebung reagieren und sich daraus CO₂ bildet. CH₄- und N₂O-Emissionen sind hingegen vernachlässigbar gering [UBA 2014b].

Für das Bundesland Hessen werden in folgenden Sektoren prozessbedingte Treibhausgasemissionen ausgewiesen:

- Zementherstellung
- Kalkproduktion

- Rußproduktion
- Glasproduktion
- Ziegelherstellung
- Ammoniakproduktion

Zuletzt wurden CO₂-Emissionen aus der Ammoniakproduktion im Jahr 2007 und aus der Ziegelproduktion im Jahr 2008 aufgezeichnet. Daher wird bei der Prognose davon ausgegangen, dass die Herstellung dieser Produkte in Hessen eingestellt wurde und demnach mit keinen weiteren THG-Emissionen aus diesen Bereichen zu rechnen ist.

Zement

Die Herstellung von Zementklinkern basiert auf den Rohstoffen Kalkstein und Ton, welche zu Rohmehl

gemahlen und anschließend im Drehrohrofen zu Klinkern gesintert (chemisch umgewandelt) werden. Etwa zwei Drittel der CO₂-Emissionen bei der Zementherstellung stammen aus der Entsäuerung des Kalksteins (CaCO₃), bei der aggressive Kohlensäure mit Kalkstein zu Kalziumhydrogencarbonat (Ca(HCO₃)₂) reagiert.

Kalk

Zur Herstellung von Kalk wird Kalkstein ebenfalls zerkleinert und im Drehrohrofen gebrannt, wobei CO₂ freigesetzt wird. Der Kalkstein zerfällt beim anschließenden Löschen zu Kalkpulver.

Glas

Ausgangsstoffe für die Glasherstellung sind Kalk, Sand, Soda und weitere Zusatzstoffe. Diese werden zusammen mit zu recycelnden Glasscherben gemischt und in einer Schmelzwanne eingeschmolzen. Die prozessbedingten CO₂-Emissionen entstehen während des Schmelzvorganges (Temperatur: 1.450 °C bis 1.650 °C) im Ofen aus den Karbonaten (z.B. Kalziumcarbonat: CaCO₃) der Primär- und Sekundärrohstoffe. Auch im Fall der Ziegelherstellung stammen diese aus dem Rohstoff; i.d.R. Lehme und Tone mit unterschiedlichen Anteilen Kalkstein (CaCO₃).

Ruß

Industrieruß ist ein wichtiges technisches Produkt, welches durch unvollständige Verbrennung oder Pyrolyse von Kohlenwasserstoffen hergestellt wird. In einer Brennkammer wird durch Gas- oder Ölverbrennung ein Heißgas (Temperatur: 1.200 °C bis 1.800 °C) erzeugt, in dieses ein Rußrohstoff (meist aromatenreiche kohle- und erdölstämmige Ruß-Öle) eingedüst und daraus infolge der thermischen Spal-

tung (Pyrolyse) Ruß gebildet. Industrieruß wird gezielt hergestellt und vor allem als Füllstoff und Schwarzpigment verwendet.

THG-Emissionen – Historie und Szenarien

Die prozessbedingten CO₂-Emissionen sind in den CO₂-Berichten des Statistischen Landesamtes Hessen für die Industrieprozesse zur Herstellung von Zementklinkern, Kalk, Glas, Ammoniak, Ziegel und Ruß von 1995 bis 2012 ausgewiesen und werden in Anlehnung an [Öko-I/prognos 2009] bis zum Jahr 2050 fortgeschrieben.

Die mit Abstand höchsten prozessbedingten Emissionen treten in Hessen demnach bei der Zementherstellung auf; gefolgt von der Kalkherstellung. Die Glasherstellung spielt hinsichtlich der THG-Emissionen hingegen eine sehr untergeordnete Rolle. Die CO₂-Emissionen aus der Rußherstellung sind ebenfalls verschwindend gering, während für Ammoniak und Ziegel seit 2009 keine Emissionen mehr ausgewiesen sind. Bereits in der Historie sind die prozessbedingten CO₂-Emissionen von 1,01 Mio. t CO_{2äq} im Jahr 1990 auf 0,64 Mio. t CO_{2äq} im Jahr 2014 gesunken (siehe Abbildung 21). Während diese Emissionen im Trendszenario leicht zurückgehen, wird im Zielszenario von einem Rückgang auf 0,19 Mio. t CO_{2äq} (Absenkung um 81 %) bis zum Jahr 2050 ausgegangen. Dies soll vor allem durch anspruchsvolle Minderungsoptionen bei den besonders emissionsintensiven Prozessen erreicht werden. Dazu gehört die Beimischung von Flugaschen oder Hütensand bei der Zementproduktion, wodurch es zu einer erheblichen Reduzierung des Klinkeranteils kommen kann.

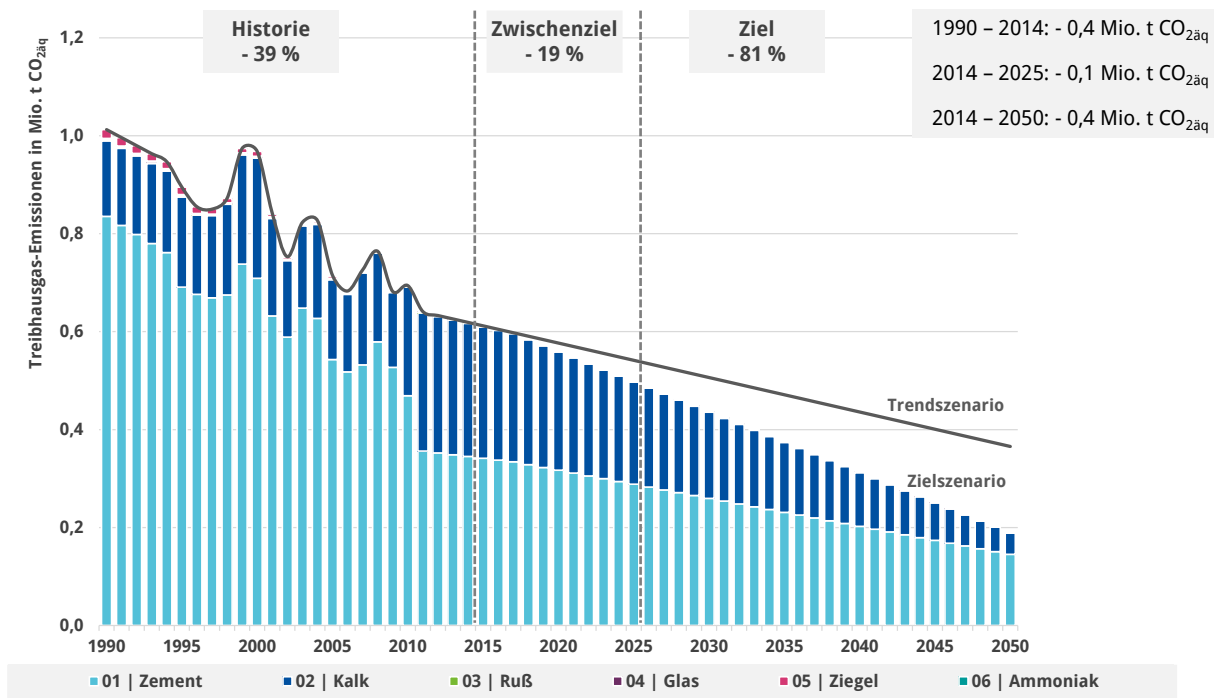


Abbildung 21 Sektor Industrie: Prozessbedingte THG-Emissionen – Historie, Trend- und Zielszenario (Quellenbilanz)
 Quelle: 1990 – 1994: Abschätzung IE Leipzig, [UGRdL 2014] [HSL 2015h], [UBA 2015b], Berechnung IE Leipzig, Normierung der Treibhausgase (CO₂, CH₄, N₂O, F-Gase) in CO_{2äq}-Emissionen mittels GWP_{SAR}-Werte

Zusammenfassung

Wie in Abbildung 22 zu sehen ist, sinken die THG-Emissionen des Verarbeitenden Gewerbes im Trendszenario gegenüber 1990 von 7,13 Mio. t CO_{2äq} auf 2,55 Mio. t CO_{2äq} im Jahr 2050. Im Zielszenario sinken die THG-Emissionen gegenüber 1990 auf 3,1 Mio. t CO_{2äq} (- 57 %) bis 2025 und auf 0,82 Mio. t CO_{2äq} bis zum Jahr 2050 (ca. - 88 %). Den größten Anteil an den Emissionen verursacht der energiebedingte Einsatz von Erdgas, welcher infolge einer Substitution durch EE-Gas aus regenerativem Wind-

und PV-Strom sehr stark gesenkt werden kann. Die THG-Emissionen aus Mineralöl sind bereits in der Vergangenheit gesunken, so dass gegenwärtig die prozessbedingten Emissionen an zweiter Stelle stehen. Aber auch diese können durch anspruchsvolle Minderungsoptionen bei den besonders emissionsintensiven Prozessen zukünftig gesenkt werden.

Die kurz- und langfristigen Handlungsfelder im Sektor Industrie sind in Tabelle 12 nach energie- und prozessbedingten Emissionen aufgeführt.

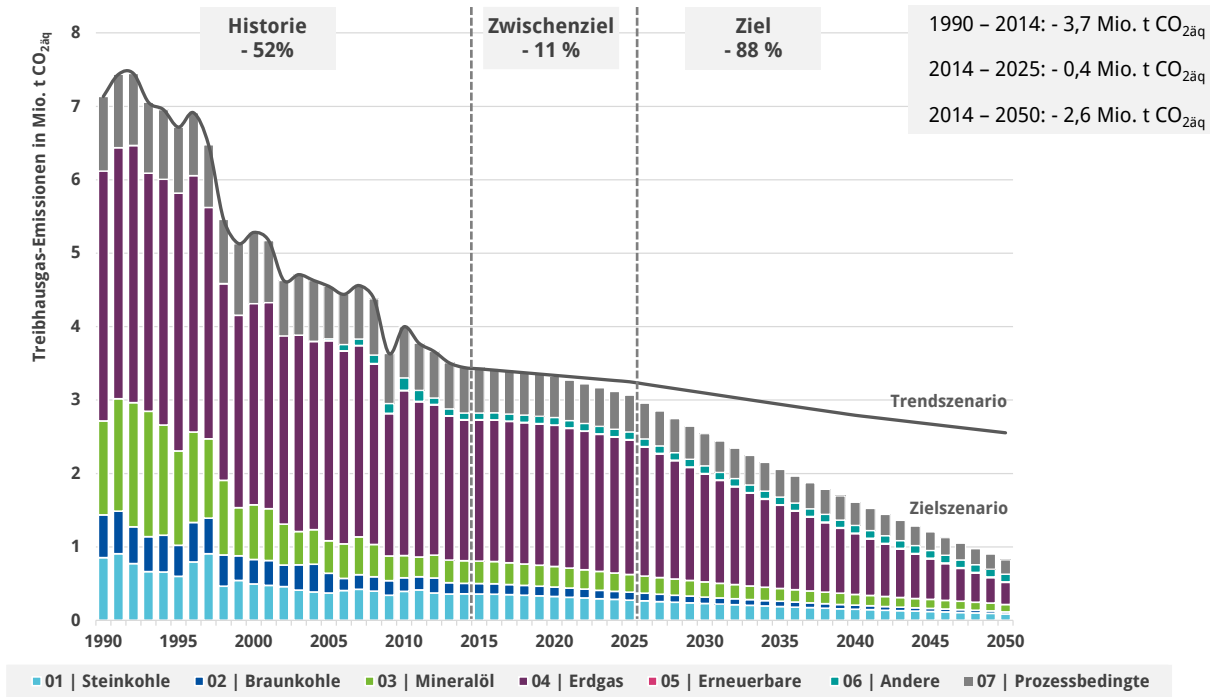


Abbildung 22 Sektor Industrie: THG-Emissionen – Historie, Trend- und Zielszenario (Quellenbilanz)

Quelle: siehe Quellenangaben zu den energie- und prozessbedingten Emissionen im Sektor Industrie, Normierung der Treibhausgase (CO₂, CH₄, N₂O, F-Gase) in CO_{2äq}-Emissionen mittels GWP_{SAR}-Werte

Handlungsfelder bis 2020/25	Handlungsfelder bis 2050
<p>Energiebedingte Emissionen:</p> <p>Gebäude</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Gebäudesanierung sowie -ersatz und Heizungserneuerung ▪ Nutzung der Abwärmepotenziale ▪ Einsatz effizienter Leuchtmittel ▪ Einsatz effizienter IKT-Technologien <p>Technologien</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Prozessoptimierung: Steigerung der Ressourcen- und Materialeffizienz, Einsatz von Membran- oder Absorptionstechniken ▪ Optimierung von Prozessen: z.B. Reduktion von Leckagen in Druckluftanlagen, effiziente Verdichter, effiziente Pumpen mit Drehzahlsteuerung ▪ Optimierung von Prozessketten: z.B. geringere Transportlängen und Transportwege, Erhöhung Materialeffizienz durch hohe Recyclingfähigkeit ▪ Abwärmenutzung: Wärmerückgewinnung und Verwendung zur Vorwärmung von Produkten, -Raumwärmebereitstellung und Absorptionskältemaschinen 	<p>Energiebedingte Emissionen:</p> <p>Gebäude</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Neubau ▪ Substitution von fossilen Energien mit Low-Carbon-Energieträgern <p>Technologien</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Einsatz effizienter Prozesswärme-Technologien (BAT): Tiefgreifende technologische Veränderungen, die zu verringertem Einsatz von Strom und Brennstoffen bei der Erzeugung von Prozesswärme führen; z.B. Infrarotlaser für die Erzeugung lokaler chemischer Reaktionen oder zur Durchführung von Schmelzprozessen, UV-Bestrahlung zur Desinfektion etc. ▪ Einsatz effizienter Technologien zur Materialbearbeitung und zum Transport (BAT): verringerter Einsatz von Strom und Brennstoffen bei der Erzeugung von mechanischer Energie (z.B. effiziente Maschinen zum Bohren, Fräsen, Verformen und Transportvorgängen)
<p>Prozessbedingte Emissionen:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Zementproduktion Beimischung von Flugaschen oder Hüttensand bei Zementproduktion --> Reduzierung des Klinkeranteils 	<p>Prozessbedingte Emissionen:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Optimierung von Prozessketten z.B. geringere Transportlängen und Transportwege, Erhöhung Materialeffizienz durch hohe Recyclingfähigkeit

Tabelle 12 Empfohlene Handlungsfelder zur Minderung der Treibhausgasemissionen im Sektor Industrie (Verarbeitendes Gewerbe)

3.4 Verkehr

Im Sektor Verkehr werden die Treibhausgasemissionen erfasst, die sich auf den Energieeinsatz im Verkehrssektor beziehen; d. h. alle motorisierten Verkehrsmittel auf Straßen, Schienen, Binnenwasserstraßen sowie in der Luftfahrt. Dabei gilt in der Regel der Grundsatz, dass die Emissionsbilanz auf der Energiebilanz beruht, wobei diese von den in Hessen abgegebenen Mengen an Kraftstoff und Elektrizität ausgeht. Eine Abweichung gibt es in der Luftfahrt, wo der Energieeinsatz des internationalen Flugverkehrs und dessen Emissionen nicht mit bilanziert werden. Daher werden beim Luftverkehr nur die Inlandsflüge in die Betrachtung mit einbezogen, während die übergroße Mehrheit der Emissionen auf dem internationalen Flugverkehr beruht. Die Analyse gliedert sich somit in folgende Verkehrssektoren:

- Straßenverkehr (CRF 1.A.3.b)
- Schienenverkehr (CRF 1.A.3.c)
- Binnenschifffahrt (CRF 1.A.3.d)
- Inländischer Flugverkehr (CRF 1.A.3.a)

Umgerechnet in CO₂-Äquivalente machten die Emissionen von CO₂ in den letzten 10 Jahren durchweg mehr als 99 % aller Treibhausgas-Emissionen des Verkehrs aus, auf Lachgas entfielen zuletzt rund 0,86 %, auf Methan rund 0,12 % der Treibhausgasemissionen. Im Rahmen der Vorstudie werden daher für Lachgas und Methan die Emissionen vereinfachend proportional zum Energieverbrauch abgeschätzt und auch im Straßenverkehr nicht nach Straßenklassen und Geschwindigkeiten differenziert.

Endenergieverbrauch

Maßgeblich für den Endenergieverbrauch sowie die THG-Emissionen im Sektor Verkehr sind die Güter-

und Personenverkehrsleistung die überwiegend durch die Zahl der Einwohner sowie der Nachfrage nach Wirtschaftsgütern beeinflusst wird.

Im Vergleich zum Jahr 1990 nahm die Einwohnerzahl in Hessen bis zum Jahr 2014 um ca. 241.000 Einwohner zu (Ø +0,2 % pro Jahr), ab dem Jahr 2004 ist jedoch ein Rückgang der Einwohnerzahl um ca. 93.000 Einwohner zu verzeichnen [HSL 2015f]. Die Personenverkehrsleistung erhöhte sich im gleichen Zeitraum um 2.808 km auf 14.733 km je Einwohner. Im Zielszenario wird davon ausgegangen, dass der ansteigende historische Trend der Personenverkehrsleistung je Einwohner gebrochen werden kann. Im Straßenverkehr soll durch Maßnahmen der Verkehrsvermeidung (z. B. kürzere Wege) und beginnend mit dem Jahr 2018 bis zum Jahr 2050 insgesamt 15 % der Verkehrsleistung des Trendszenarios eingespart werden, weiterhin sollen 25 % der MIV-Verkehrsleistung bis 2050 auf die Schiene verlagert werden. Die Personenverkehrsleistung je Einwohner liegt im Jahr 2050 dadurch nur knapp über dem Niveau von 1990 (siehe Tabelle 13).

Die Wirtschaftsleistung Hessens ausgedrückt als reales Bruttoinlandsprodukt erhöhte sich zwischen 1990 und 2014 durchschnittlich um ca. +1 % pro Jahr [VGRdL 2015]. Die im engen Zusammenhang stehende Güterverkehrsleistung erhöhte sich gleichzeitig um durchschnittlich 1,5 % je Jahr. Im Zielszenario wird davon ausgegangen, dass die Güterverkehrsleistung durchschnittlich um 0,6 % pro Jahr steigt, jedoch bezogen auf das reale Bruttoinlandsprodukt sich nicht wesentlich verändert (siehe Tabelle 14).

Personenverkehrsleistung in Mio. Pkm	1990	2000	2014	2020	2025	2050
01 Straßenverkehr	55.046	66.736	69.922	66.266	60.794	37.867
02 Schienenverkehr + Sonstige	13.617	16.684	17.382	18.430	20.121	25.599
03 Inlandsflüge	k.A.	1.407	1.152	1.100	1.012	576
Hessen Gesamt	68.663	84.827	88.456	85.796	81.928	64.042
Personenkilometer je Einwohner (Pkm/Ew)	11.915	13.979	14.733	14.429	13.931	12.178

Tabelle 13 Sektor Verkehr (ohne intern. Flugverkehr): Personenverkehrsleistung – Historie und Zielszenario

Quelle: [KBA 2004] [KBA 2014] [ITP 2014] [destatis 2015c] [BAST 2012] [HSL 2010] [HSL 2015f]], Berechnung und Szenario IE Leipzig

Güterverkehrsleistung in Mio. tkm	1990	2000	2014	2020	2025	2050
01 Straßenverkehr	15.898	21.488	27.901	31.501	32.432	27.539
02 Schienenverkehr	2.618	3.476	5.353	6.057	6.946	14.170
03 Binnenschiff	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
Hessen Gesamt (ohne Binnenschiff)	18.516	24.963	33.254	37.558	39.378	41.709
Tonnenkilometer je BIP_{real} (tkm/10³ Euro)	99	115	141	151	154	138

Tabelle 14 Sektor Verkehr (ohne intern. Flugverkehr): Güterverkehrsleistung – Historie und Zielszenario

Quelle: [KBA 2004] [KBA 2014] [ITP 2014] [destatis 2015c] [BAST 2012] [VGRdl 2015], Berechnung und Szenario IE Leipzig

Nach einem Anstieg des Endenergieverbrauchs (ohne internationaler Flugverkehr) in den Jahren 1990 bis 1999 ist ab dem Jahr 2000 ein tendenziell rückläufiger Verbrauch zu verzeichnen (siehe Abbildung 23). Zwischen dem Jahr 1990 und 2014 sank der Endenergieverbrauch um etwa 7,6 PJ (-4 %) auf 194,3 PJ [HSL 2015a] [IE 2015].

Der Rückgang des Endenergieverbrauches wurde überwiegend durch den Rückgang des Einsatzes von Mineralölen (-16,2 PJ), insbesondere Kraftstoffen im Straßenverkehr, hervorgerufen. Bei den Energieträgern Erdgas und erneuerbare Energien ist hingegen eine Verbrauchszunahme (+9,5 PJ) festzustellen (siehe Tabelle 15). Der Anteil erneuerbarer Energien an den bereit gestellten Kraftstoffen ergibt sich in erster Linie aus der Beimischung von Agrokraftstoffen.

Der Endenergieverbrauch des Sektors Verkehr in Hessen wird im Jahr 2014 zu 92,4 % durch die Mineralöl und Mineralölprodukte dominiert, deren Anteil gegenüber dem Jahr 1990 zurück ging (siehe Tabelle 16).

Der Endenergieverbrauch des Verkehrssektors je Einwohner verringerte sich zwischen 1990 und 2014 um durchschnittlich ca. -0,3 % pro Jahr, bezogen auf das reale Bruttoinlandsprodukt um 1,3 % pro Jahr. Im Zielszenario zwischen 2014 und 2050 wird davon ausgegangen, dass sich die Senkungsdynamik des Endenergieverbrauchs je Einwohner durch die Senkung der Personenverkehrsleistung, der Verkehrsverlagerung im Personen- und Güterverkehr von Straße zur Schiene, und effizienteren Antrieben (Handlungsfelder siehe Tabelle 17 und Tabelle 18) auf durch-

schnittlich 2,1 % pro Jahr bzw. je realem Bruttoinlandsprodukt auf 3,2 % pro Jahr erhöhen lässt.

Der Endenergieverbrauch im Sektor Verkehr nimmt im Zielszenario zwischen 2014 und 2050 um ca. 61 % (115,2 PJ) auf etwa 79,1 PJ ab (siehe Abbildung 23 und Tabelle 15). Gegenüber dem Trendszenario bedeutet dies eine zusätzliche Reduktion um 67,0 PJ bis zum Jahr 2050. Insbesondere durch avisierte Substitution von Otto- und Dieselmotoren durch Erdgas, Strom und erneuerbare Energien werden sich die Anteile der Energieträger am Endenergieeinsatz bis zum Jahr 2050 deutlich verschieben. Mit etwa 60 %

wird Strom (zu 100 % aus erneuerbaren Energien) im Zielszenario zum dominierenden Energieträger im Verkehrssektor, der Anteil von Erdgas steigt auf ca. 29 %. Das im Erdgas befindliche Gas wird beginnend ab 2025 und kontinuierlich steigend bis 2050 zu 80 % aus erneuerbaren Energien (Power to Gas) bereitgestellt. Der Einsatz erneuerbarer Energien in Form von Agrokraftstoffen wird bis 2025 noch zunehmen, dann aber bis zum Jahr 2050 durch den vermehrten Einsatz von Gas- und Elektromotoren auf einen Anteil von etwa 3 % zurückgehen (siehe Tabelle 16).

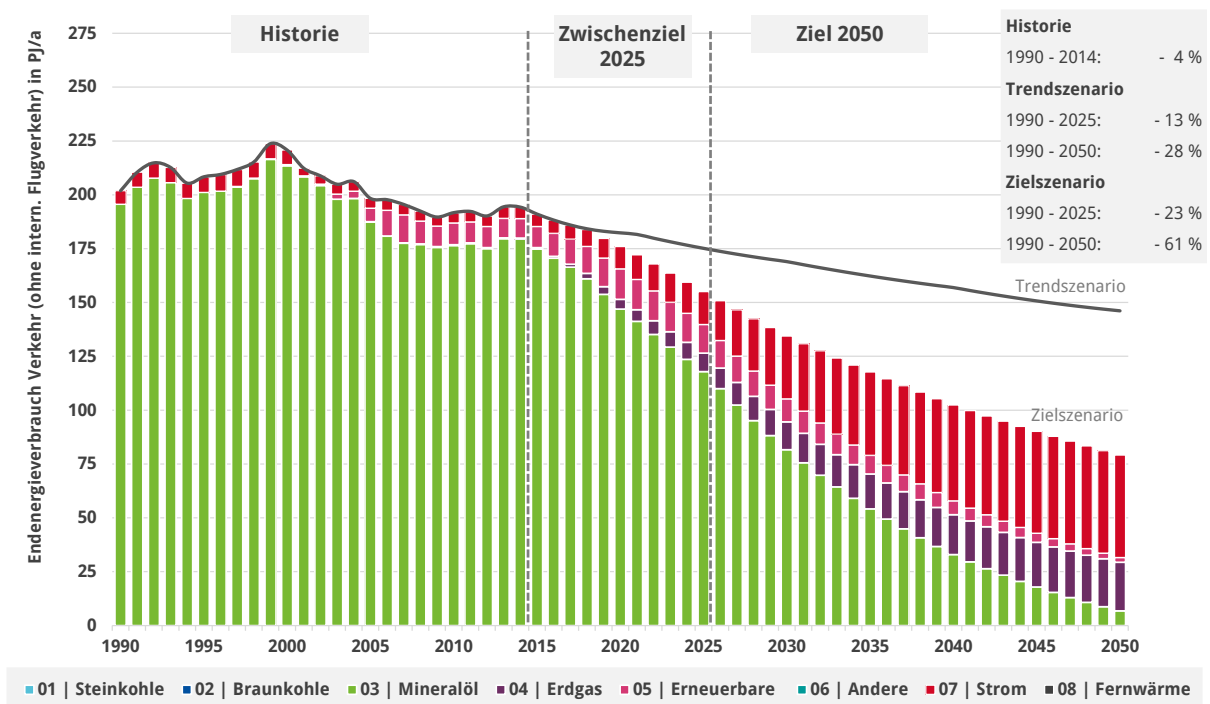


Abbildung 23 Sektor Verkehr (ohne intern. Flugverkehr): Endenergieverbrauch – Historie, Trend- und Zielszenario

Quelle: 1990 – 2012: [HSL 2015a], 2013 – 2014: [IE Leipzig 2015], 2015 – 2050: Szenario IE Leipzig

Endenergieverbrauch in PJ/a	1990	2000	2014	2020	2025	2050
01 Steinkohle	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
02 Braunkohle	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
03 Mineralöl	195,6	213,5	179,5	147,0	117,9	6,8
04 Erdgas	0,0	0,0	0,4	4,5	8,6	22,5
05 Erneuerbare	0,0	0,5	9,1	14,2	13,3	2,2
06 Andere	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
07 Strom	6,3	6,8	5,3	10,3	15,2	47,5
08 Fernwärme	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Hessen Gesamt	201,9	220,8	194,3	175,9	155,1	79,1
EEV je Einwohner (GJ/Ew)	35,0	36,4	32,4	29,6	26,4	15,0
EEV je BIP _{real} (GJ/10 ³ Euro)	k.A.	1,02	0,83	0,71	0,61	0,26

Tabelle 15 Sektor Verkehr (ohne intern. Flugverkehr): Endenergieverbrauch in PJ – Historie und Zielszenario
 Quelle: 1990, 2000: [HSL 2015a] [VGRdL 2015] [VGRdL 2015], 2014: [IE Leipzig 2015], 2020, 2025, 2050: Szenario IE Leipzig

Endenergieverbrauch in %	1990	2000	2014	2020	2025	2050
01 Steinkohle	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
02 Braunkohle	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
03 Mineralöl	96,9%	96,7%	92,4%	83,5%	76,1%	8,6%
04 Erdgas	0,0%	0,0%	0,2%	2,6%	5,5%	28,5%
05 Erneuerbare	0,0%	0,2%	4,7%	8,0%	8,6%	2,8%
06 Andere	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
07 Strom	3,1%	3,1%	2,7%	5,8%	9,8%	60,1%
08 Fernwärme	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Hessen Gesamt	100%	100%	100%	100%	100%	100%

Tabelle 16 Sektor Verkehr (ohne intern. Flugverkehr): Anteil der Energieträger am Endenergieverbrauch – Historie und Zielszenario
 Quelle: 1990, 2000: [HSL 2015a], 2014: [IE Leipzig 2015], 2020, 2025, 2050: Szenario IE Leipzig

THG-Emissionen - Historie und Szenarien

Die THG-Emissionen werden auf Basis der eingesetzten Energieträger ermittelt. Dazu werden diese mit den spezifischen Emissionsfaktoren (CO₂, CH₄, N₂O) des jeweiligen Jahres, differenziert nach Energieträgern, bewertet. Der Sekundärenergieträger Strom gilt im Folgenden als emissionsfrei, da bei seiner Um-

wandlung in Nutzenergie keine direkten THG-Emissionen freigesetzt werden (siehe Abschnitt 2.2; Bilanzierungsprinzipien – Quellenprinzip).

Straßenverkehr

Der Straßenverkehr mit Kraftfahrzeugen (Pkw, Lkw und sonstige Kfz) war in den zurückliegenden 25 Jahren die wichtigste Quelle von Treibhausgasemissi-

onen. Bei diesen Emissionen lag sein Anteil am Gesamtverkehr durchgängig zwischen 93 % und 96 %, der Anteil am Energieverbrauch lag nur wenig darunter. Der Energieverbrauch sowie die Treibhausgasemissionen bewegen sich seit 1990 in einem relativ stabilen Korridor. Auswirkungen ergaben sich dabei einerseits aus der Wirtschaftsentwicklung und dem dadurch schwankenden Aufkommen im Straßengüterverkehr, andererseits aus der Preisentwicklung beim Erdöl und dem damit verbundenen unterschiedlich sparsamen Umgang privater Autofahrer mit dem Kraftstoff.

Im Trend-Szenario werden die EU-weit geltenden Emissionsgrenzen für neuzugelassene Kfz sowie eine allmähliche Ausweitung der Biokraftstoffquoten, der Gas- sowie der Elektromotoren angenommen. Dadurch sinken die THG-Emissionen des Straßenverkehrs von 2014 bis 2050 um rund 45 %. Im Vergleich zum Jahr 1990 ergibt sich eine Verminderung um nicht ganz die Hälfte.

Für das Ziel-Szenario wurde daher ein wesentlich breiterer Ansatz gewählt, der sowohl Maßnahmen der Verkehrsvermeidung (Raumordnung, kurze Wege, Wohnungsbau im Umfeld von Arbeitsplätzen, regionale Wirtschaftskreisläufe, Marketing für kurze Alltagswege und Naherholung usw.), der Verkehrsverlagerung (Modal Shift von der Straße zur Schiene) sowie der Energieträgerumstellung (weitgehende Dominanz der Elektromobilität bis 2050 im Personenverkehr, verstärkte Gas- und Elektroantriebe im Straßengüterverkehr) umfasst. Zudem wurde davon ausgegangen, dass zwischen 2025 und 2050 das eingesetzte Erdgas zu mindestens 80 % durch regenerativ erzeugte Gase ersetzt werden kann. Unter diesen Annahmen wird das Ziel erreicht, die THG-

Emissionen des Straßenverkehrs bis 2025 um 37 % und bis 2050 um mehr als 96 % gegenüber 1990 zu vermindern (Abbildung 24).

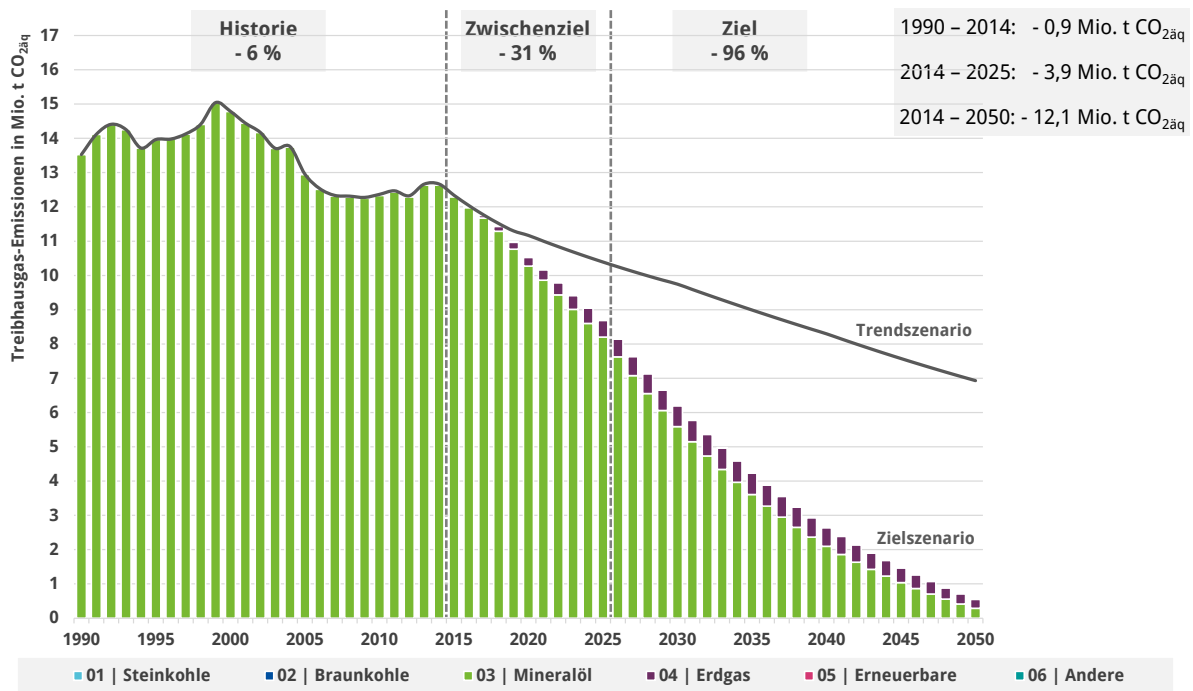


Abbildung 24 Straßenverkehr: THG-Emissionen – Historie, Trend- und Zielszenario (Quellenbilanz)

Quelle: [HSL 2015h] [HSL 2015b] [HSL 2015d] [UGRdL 2014] [IE Leipzig 2015] [UBA 2015a] [UBA 2015d], Szenario und Berechnung IE Leipzig, Normierung der Treibhausgase (CO₂, CH₄, N₂O, F-Gase) in CO_{2äq}-Emissionen mittels GWP_{SAR}-Werte

Schieneverkehr

Für den Schienenverkehr in Hessen stellt der elektrische Strom bereits jetzt mit mehr als 86 % den Hauptenergieträger dar. Der Rest des Schienenverkehrs ist dieselbetrieben, wobei dem Dieselkraftstoff bereits ein Anteil von Biokraftstoffen beigemischt ist.

Im Trend-Szenario steigen das Verkehrsaufkommen und der Energieverbrauch im Schienenverkehr an, da die Aufgabenträger des SPNV eine Ausweitung der bestellten Zugkilometer planen und auch im Schienengüterverkehr eine wachsende Transportleistung prognostiziert wird. Durch eine stärkere Konzentration des Verkehrs auf die Hauptstrecken und durch die Elektrifizierung einiger Nebenbahnen wird der Anteil der Dieseltraktion auf weniger als 8 % zurückgehen.

Im Ziel-Szenario steigt das Verkehrsaufkommen durch die Verlagerung von Verkehr von der Straße und der Luftfahrt noch deutlicher an. Der Energieverbrauch wächst jedoch nicht im gleichen Umfang, da die Züge zugleich besser ausgelastet werden. Eine beschleunigte Umstellung auf energieeffiziente Lokomotiven und Triebwagen verbessert die Effizienz weiter. Weiterhin wird im Zielszenario eine vollständige Elektrifizierung des Bahnnetzes unterstellt. Unter diesen Annahmen wird das Ziel erreicht, die THG-Emissionen des Schienenverkehrs bis 2025 um mehr als 57 % und bis 2050 um 100 % zu senken (Abbildung 25). Dies gilt für die Quellenbilanz, in der die Emissionen der Stromerzeugung nicht den Verbrauchssektoren zugeordnet werden.

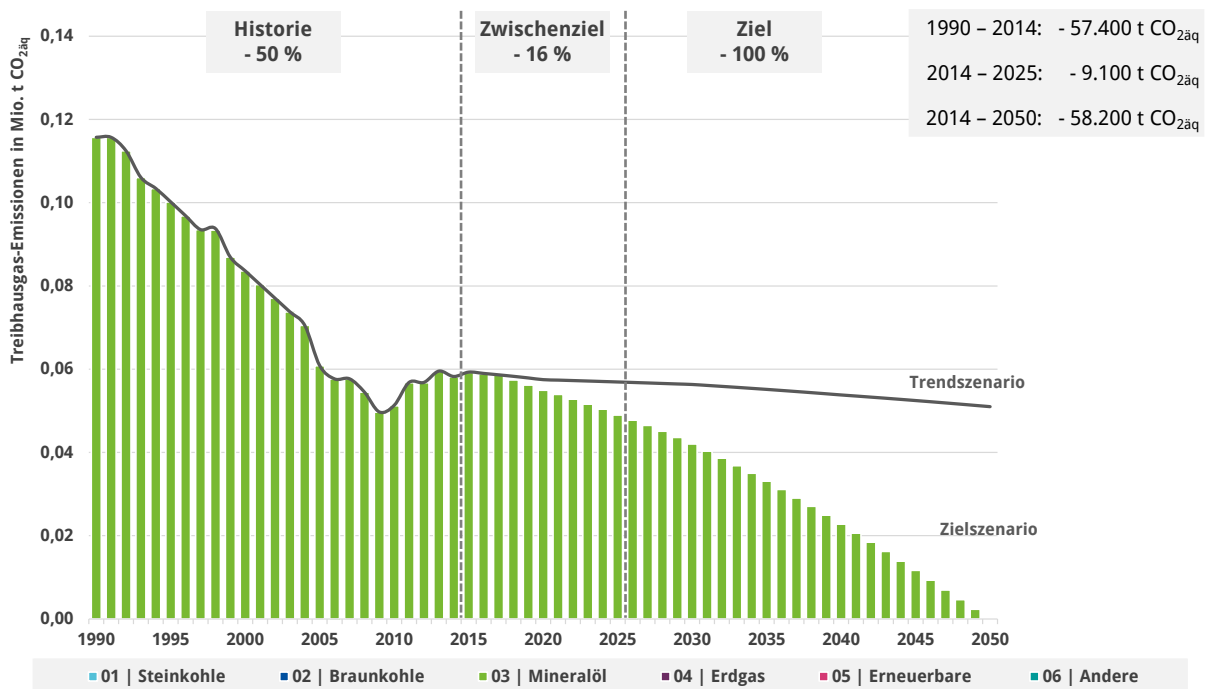


Abbildung 25 Schienenverkehr: THG-Emissionen – Historie, Trend- und Zielszenario (Quellenbilanz)

Quelle: [HSL 2015h] [HSL 2015b] [HSL 2015d] [UGRdL 2014] [IE Leipzig 2015] [UBA 2015a], Szenario und Berechnung IE Leipzig, Normierung der Treibhausgase (CO₂, CH₄, N₂O, F-Gase) in CO_{2äq}-Emissionen mittels GWP_{SAR}-Werte

Binnenschifffahrt

Die Emissionen der Binnenschifffahrt sanken bereits von 1990 bis 2014 um rund zwei Drittel, was überwiegend mit einem gesunkenen Güteraufkommen erklärt werden kann. Während die Binnenschifffahrt ihre Stärke bei den Massengütern besitzt, erfordert die Wirtschaftsstruktur der letzten Jahre vorwiegend kleinteilige Sendungen.

Das Trend-Szenario geht dennoch davon aus, dass der wachsende Güterverkehr auch für die Binnenschifffahrt ein wieder wachsendes Transportaufkommen mit sich bringt. Auch der Energieverbrauch (Dieselkraftstoff) wird bis 2050 dementsprechend wieder steigen, erreicht jedoch auch dann weniger als die Hälfte des Ausgangsniveaus aus dem Jahr 1990.

Im Zielszenario bleiben die Annahmen zum Energieverbrauch aufgrund der Langlebigkeit der bestehenden Binnenschiffe sowie der Güterstruktur unverändert. Allerdings wird im Zielszenario bis 2050 ein vollständiger Energieträgerwechsel auf Agrodiesel unterstellt. Damit kommt dieser Energieträger konzentriert in einem Bereich zum Einsatz, wo er – ähnlich wie in der Landwirtschaft – zugleich zur Schonung der Gewässer bei Zwischenfällen beiträgt. Unter diesen Annahmen wird das Ziel erreicht, die THG-Emissionen der Binnenschifffahrt in Hessen bis 2025 um rund 70 % und bis 2050 um annähernd 99 % gegenüber 1990 zu vermindern (Abbildung 26). Die verbliebenen Emissionen beruhen dann nur noch auf Lachgas und Methan, welche auch bei der Verbrennung von Agrodiesel entstehen.

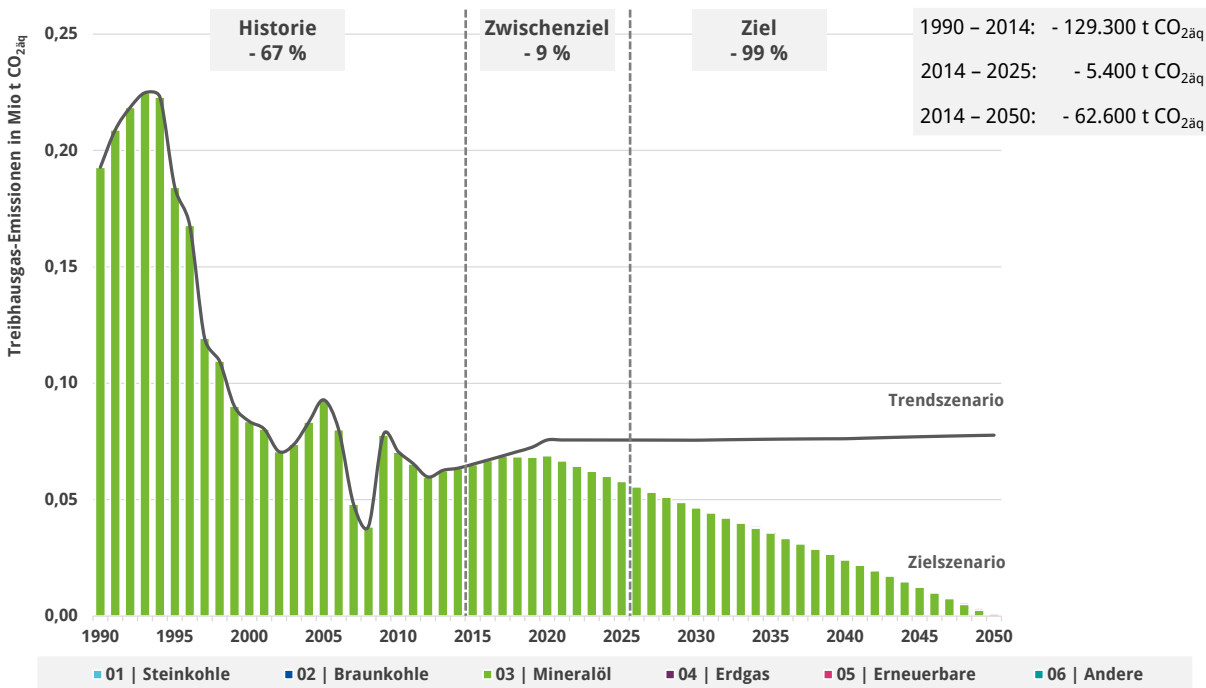


Abbildung 26 Binnenschifffahrt: THG-Emissionen – Historie, Trend- und Zielszenario (Quellenbilanz)

Quelle: [HSL 2015h] [HSL 2015b] [HSL 2015d] [UGRdL 2014] [IE Leipzig 2015] [UBA 2015a], Szenario und Berechnung IE Leipzig, Normierung der Treibhausgase (CO₂, CH₄, N₂O, F-Gase) in CO_{2äq}-Emissionen mittels GWP_{SAR}-Werte

Inländischer Luftverkehr

Energieverbrauch und THG-Emissionen des inländischen Luftverkehrs sind – im Gegensatz zum internationalen Luftverkehr – seit 1990 um mehr als 20 % zurückgegangen. Hauptursache dafür war das zunehmend attraktive ICE-Angebot auf der Schiene, das gegenüber Kurzstreckenflügen Marktanteile zum Bahnverkehr verlagerte. Die Flughäfen nutzten die Start-Slots wegfallender Inlandsflüge für die wachsende Nachfrage nach internationalen Flügen.

Im Trend-Szenario findet ein langsamer weiterer Rückgang des Inlandsflugverkehrs statt (bis 2050 um 12,5 %).

Im Ziel-Szenario wird das ICE-Angebot im innerdeutschen Fernverkehr weiter verstärkt, so dass die Verkehrsleistung und der Energieverbrauch des inländischen Luftverkehrs bis 2050 nur halb so hoch liegen wie im Referenz-Szenario. Unter dieser Annahme wird das Ziel erreicht, die THG-Emissionen der inländischen Luftfahrt bis 2025 um rund 32 % und bis 2050 um mehr als 65 % gegenüber 1990 zu senken (Abbildung 27).

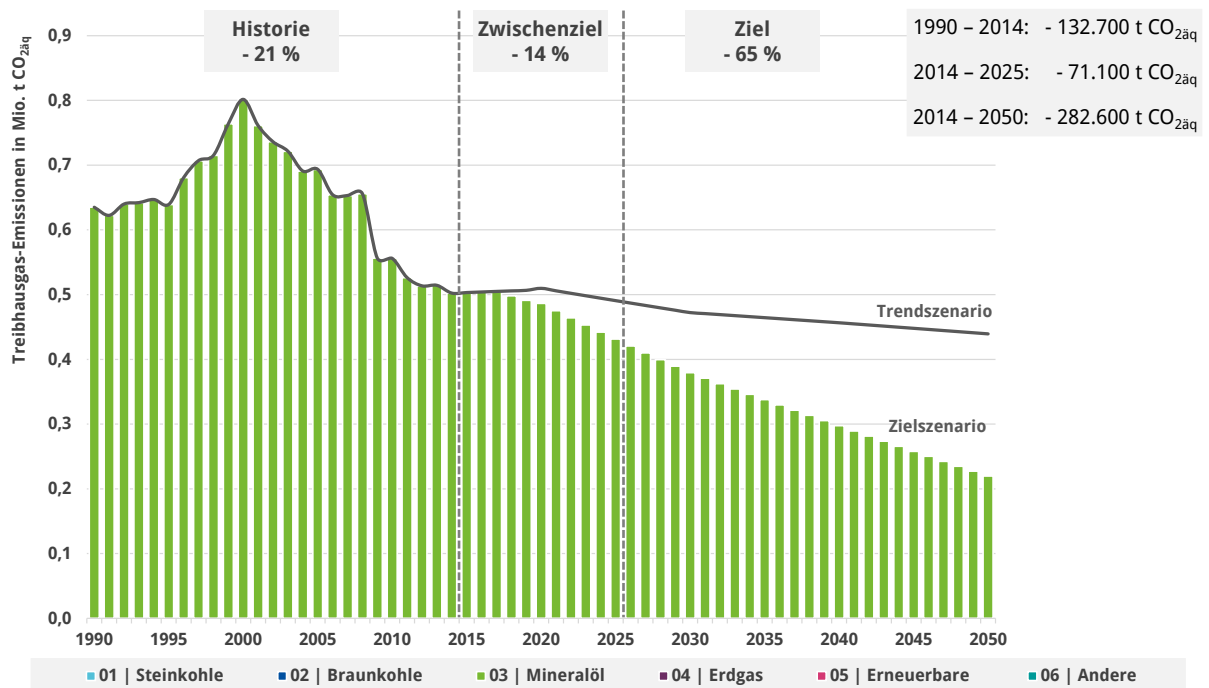


Abbildung 27 Luftverkehr: THG-Emissionen – Historie, Trend- und Zielszenario (Quellenbilanz)

Quelle: [HSL 2015h] [HSL 2015b] [HSL 2015d] [UGrDL 2014] [IE Leipzig 2015] [UBA 2015a], Szenario und Berechnung IE Leipzig, Normierung der Treibhausgase (CO₂, CH₄, N₂O, F-Gase) in CO_{2äq}-Emissionen mittels GWP_{SAR}-Werte

Zusammenfassung

In Abbildung 28 sind die THG-Emissionen des Verkehrssektors in Mio. t. CO₂-Äquivalenten dargestellt. Die Mineralölprodukte dominieren das Bild, lediglich ab 2020 spielt Erdgas im Zielszenario eine weitere nennenswerte Rolle. Die Emissionen der Elektroantriebe sind in der Quellenbilanz nur bei der Energieerzeugung enthalten, diejenigen der Agrokraftstoffe beschränken sich auf Methan und Lachgas, da Kohlendioxid durch das Pflanzenwachstum ausgeglichen wird. Im Zielszenario sinken zudem die Emissionen

aus dem Erdgasantrieb, da dieses bis 2050 zu rund 80 % durch Gas aus regenerativen Quellen ersetzt wird. Im Trend-Szenario sinken die THG-Emissionen somit bis 2025 um 24 % und bis 2050 um 48 % gegenüber 1990, das Ziel-Szenario bringt eine Minde- rung bis 2025 um 36 % und bis 2050 um 95 % gegen- über 1990 mit sich.

In den Tabelle 17 und Tabelle 18 sind kurz- und län- gerfristige Handlungsfelder differenziert dargestellt.

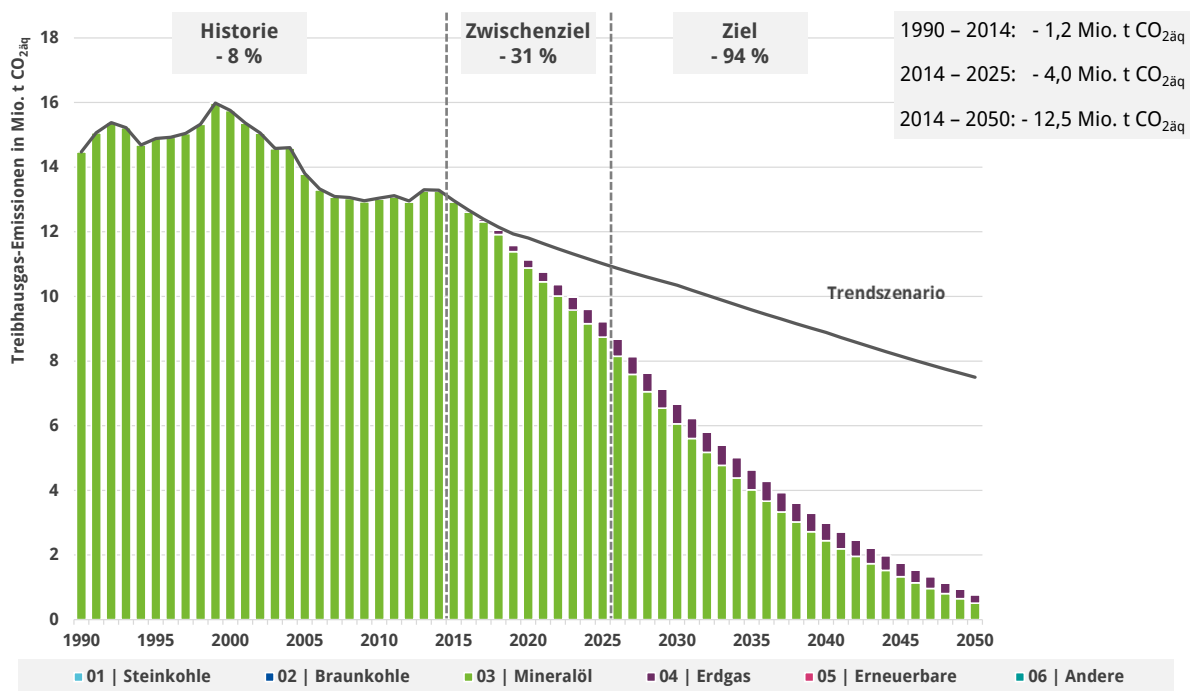


Abbildung 28 Sektor Verkehr: THG-Emissionen – Historie, Trend- und Zielszenario (Quellenbilanz)

Quelle: [HSL 2015h] [HSL 2015b] [HSL 2015d] [UGRdL 2014] [IE Leipzig 2015] [UBA 2015a], Szenario und Berechnung IE Leipzig, Normierung der Treibhausgase (CO₂, CH₄, N₂O, F-Gase) in CO_{2äq}-Emissionen mittels GWP_{SAR}-Werte

Handlungsfelder bis 2020/25	Handlungsfelder bis 2050
<p>Übergreifend</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Vermeidung von Verkehrsleistung im Personenverkehr: Neubürgermarketing: Neu zugezogene Einwohner werden auf nahe gelegene Verkehrsziele - v. a. im Bereich der Versorgung (Einkauf, medizinische Versorgung) und der Freizeit (Sportvereine, Ausflugsziele) hingewiesen, um die Zielwahl zugunsten naher Ziele zu beeinflussen. ▪ Förderung des kombinierten Verkehrs und Förderung von Gleisanschlüssen zu Industriebetrieben: Verbesserte Wettbewerbslage für Schiene und Binnenschiff gegenüber Lkw durch Wegfall von Umladevorgängen <p>Straßenverkehr</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Tarifliche und steuerliche Begünstigung des öffentlichen Verkehrs, dadurch Anreize zur Verlagerung von MIV zu ÖPNV ▪ Radverkehrsförderung, dadurch Verlagerung vom MIV zum Radverkehr (einschl. E-Bikes) ▪ Mobilitätsmanagement für Betriebe: Vorhandene Ansätze unterstützen, Ausweitung auf viele Unternehmen im Land ▪ Vermeidung von Leerfahrten durch firmenübergreifende Kooperationen im Lieferverkehr (z. B. City-Logistik) ▪ Senkung des spezifischen Verbrauchs von PKW durch Training defensiver Fahrweisen auch auf dem Autobahnnetz ▪ Tempolimit auf Autobahnen, dadurch Senkung des spezifischen Verbrauchs auf tempobeschränkten Teil des Autobahnnetzes 	<p>Übergreifend</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Vermeidung von Verkehrsleistung im Personenverkehr durch Raumordnung: Nutzungsmischung zur Verkürzung von Wegen, besonders Verkürzungen der Pendlerentfernungen durch Wohnungsbau in Ballungskernen und Schaffung von Arbeitsplätzen in Räumen mit Auspendlerüberschuss. ▪ Verkehrsvermeidung im Güterverkehr: Regionale Wirtschaftskreisläufe, Marketing für Produkte mit kurzen Wegen, Produktkennzeichnung zum Thema Transportaufwand - dadurch Vermeidung des Anstiegs der Güterverkehrsleistung <p>Straßenverkehr</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Verbesserung und Ausweitung des ÖPNV-Angebots, besonders im Umland der Städte mit hohem Pendleraufkommen (verstädterte Räume), dadurch Verlagerung von MIV zu ÖPNV ▪ Steigerung des Besetzungsgrades vorhandener Pkw (z. B. durch Akquisition vieler Fahrer in Projekten wie Mobilfalt) ▪ schärfere und kontrollierte CO₂-Grenzwerte für neue Pkw und Lkw ▪ Ausweitung der Lkw-Maut auf alle Straßenkategorien und Größenklassen, damit verbesserte Wettbewerbssituation von Schiene und Binnenschiff ▪ Besteuerung der Kraftstoffe nach deren Kohlenstoffgehalt ▪ verpflichtende Einführung von Tempobegrenzern in Lkw und später auch Pkw – geringerer spezifischer Verbrauch ohne Geschwindigkeitsspitzen ▪ Weitestgehende Umstellung des Pkw- und Lkw-Verkehrs auf Elektromobilität (bzw. Erdgas, wo technisch sinnvoll, z.B. größere Lkw)

Tabelle 17 Empfohlene Handlungsfelder zur Minderung der Treibhausgasemissionen im Sektor Verkehr (1)

Handlungsfelder bis 2020/25	Handlungsfelder bis 2050
<p>Luftverkehr</p> <ul style="list-style-type: none"> Keine weitere Ausweitung der Start- und Landekapazitäten <p>Schienerverkehr</p> <ul style="list-style-type: none"> Verlagerung von Straßenverkehr und Luftverkehr auf die Schiene (s. o.), dadurch bessere Auslastung der Züge (Zugangebot wird etwas weniger stark ausgeweitet als die Verkehrsleistung ansteigt) <p>Binnenschifffahrt</p> <ul style="list-style-type: none"> Sicherung bisheriger Verkehrsanteile im Güterverkehr (auch mit Maßnahmen zur Gewährleistung ausreichender Wasserstände zu Trockenzeiten) 	<p>Luftverkehr</p> <ul style="list-style-type: none"> Ganztäglich dichtes und schnelles Verkehrsangebot auf vielen ICE-Linien, dadurch Verlagerung von Personenverkehrsleistung von Inlandsflügen auf die Schiene <p>Schienerverkehr</p> <ul style="list-style-type: none"> Auswechseln von weniger effizienten Lokomotiven und Triebfahrzeugen durch energieeffizientere (z. B. beschleunigt durch Förderprogramm) Vollständige Elektrifizierung des hessischen Bahnnetzes <p>Binnenschifffahrt</p> <ul style="list-style-type: none"> Umstellung der Binnenschifffahrt auf 100 % Agrodiesel (anstelle Beimischung)

Tabelle 18 Empfohlene Handlungsfelder zur Minderung der Treibhausgasemissionen im Sektor Verkehr (2)

3.5 Gewerbe, Handel, Dienstleistung

Der GHD⁴⁶-Sektor ist relativ heterogen und umfasst die Bereiche Gewerbebetriebe mit im allgemeinen weniger als 20 Beschäftigten, soweit sie nicht im Produzierenden Gewerbe (Sektor Industrie) erfasst werden, z. B. Geschäftsgebäude und Räume gewerblicher Art; Landwirtschaft; Handelsunternehmen und Private und öffentliche Dienstleistungsunternehmen und Einrichtungen (z.B. Banken, Versicherungen, Wäschereien, Krankenhäuser, Behörden, Deutsche Post AG).

Endenergieverbrauch

Wesentliche Grundlage und die maßgebliche Einflussgröße auf die THG-Emissionen im Sektor GHD ist der energieträgerspezifische Endenergieverbrauch auf Basis der Energiebilanz. Nach einigen Jahren des Anstiegs des **Endenergieverbrauchs** ist ab dem Jahr 2006⁴⁷ im GHD-Sektor ein tendenziell rückläufiger Verbrauch zu beobachten. Im Zeitraum von 1990 bis 2014 sank der Endenergieverbrauch im GHD-Sektor um etwa 13,3 PJ (- 11 %) auf 107,3 PJ [HSL 2015a] [IE 2015].

Der Rückgang des Endenergieverbrauches wurde überwiegend durch den Rückgang des Einsatzes von Mineralölen (- 29,3 PJ), insbesondere leichtem Heizöl, hervorgerufen. Bei den Energieträgern Erdgas, Strom und erneuerbare Energien ist hingegen eine Verbrauchszunahme (+ 18,1 PJ) festzustellen (siehe Tabelle 19). Der Endenergieverbrauch des Sektors

GHD in Hessen wird im Jahr 2014 zu 75 % durch die Energieträger Strom und Erdgas dominiert, deren Anteil im Zeitraum 1990 bis 2014 kontinuierlich anstieg (siehe Tabelle 20).

Die Wirtschaftsleistung des Sektors GHD ausgedrückt als reale Bruttowertschöpfung (WZ 08 A, D-T) nahm zwischen 2000 und 2014 durchschnittlich um ca. 1,8 % pro Jahr zu, die Anzahl der Erwerbstätigen hingegen stieg nur um durchschnittlich 0,7 % pro Jahr [VGRdL 2015]. Im gleichen Zeitraum sank der Endenergieverbrauch des GHD-Sektors um durchschnittlich ca. -0,7 % pro Jahr [HSL 2015a] [IE 2015]. Die daraus resultierende wirtschaftsleistungsbezogene Endenergieintensität⁴⁸ im GHD-Sektor reduzierte sich somit im Zeitraum 2000 bis 2014 um durchschnittlich ca. 2,4 % pro Jahr; d. h. für die Produktion einer Einheit Wirtschaftsleistung im GHD-Sektor wird tendenziell immer weniger Endenergie eingesetzt. Analog zur wirtschaftsleistungsbezogenen Endenergieintensität des GHD-Sektors reduzierte sich der Endenergieverbrauch pro Erwerbstätigen im Zeitraum 2000 bis 2014, jedoch mit durchschnittlich 1,4 % pro Jahr weniger dynamisch⁴⁹.

Im Zielszenario wird davon ausgegangen, dass sich die Senkungsdynamik der wirtschaftsleistungsbezogenen Endenergieintensität durch Effizienzbemühungen (siehe Tabelle 21) auf durchschnittlich 2,6 % pro Jahr erhöhen lässt.

⁴⁶ Gewerbe, Handel, Dienstleistungen und übrige Verbraucher einschl. militärische Dienststellen

⁴⁷ Der deutliche Anstieg des Endenergieverbrauchs in den Jahren 2005 und 2006 ist auf die Umsatzsteuererhöhung im Jahr 2007 und die vorher erfolgten Vorratskäufe zurückzuführen.

⁴⁸ Quotient aus Endenergieverbrauch und realer Bruttowertschöpfung

⁴⁹ Eine Reihe von Einflussfaktoren bewirken, dass beide Indikatoren Unterschiedliches messen. Insbesondere erklärt die zunehmende Wertschöpfung je Erwerbstätigen, d.h. die Zunahme der Arbeitsproduktivität, einen Teil des Unterschieds zwischen den beiden Indikatoren.

Der Endenergieverbrauch im Sektor GHD nimmt im Zielszenario zwischen 2014 und 2050 um ca. 48 % (51,2 PJ) auf etwa 56,1 PJ ab (siehe Abbildung 30 und Tabelle 19). Gegenüber dem Trendszenario bedeutet dies eine zusätzliche Reduktion um 27,4 PJ bis zum Jahr 2050.

Im Zielszenario wird unterstellt, dass die höchsten Einsparungen (ca. 70 %) im Bereich der Raumwärme durch Verdopplung der Sanierungsrate und Erhöhung der Sanierungseffizienz, erhöhter Abriss und Neubau, Erhöhung der Neubaustandards und Steigerung der Effizienz von Heizungsanlagen erzielt werden. Die Bereitstellung von Raumwärme, Warmwasser und teilweise Kälte wird stärker über erneuerbare Energien (Steigerung des Anteils auf 14 % bis 2050) erfolgen. Zudem wird angenommen, dass die Stromeffizienz je Erwerbstätigen um durchschnittlich 1 % pro Jahr steigt, um den Mehrbedarf zu kompensieren und zusätzliche Einsparungen zu erzielen.

Insbesondere durch die Reduktion des Raumwärmebedarfes im GHD-Sektor und der Substitution von fossilen durch erneuerbare Energieträger werden sich die Anteile der Energieträger am Endenergieeinsatz deutlich verschieben. Mit etwa 55 % wird Strom (zu 100 % aus erneuerbaren Energien) im Zielszenario der dominierende Energieträger bis zum Jahr 2050. Der Anteil von Erdgas am Endenergieverbrauch sinkt auf ca. 12 %. Das im Erdgas befindliche Gas wird beginnend ab 2025 und kontinuierlich steigend bis 2050 zu 80 % aus erneuerbaren Energien (Power to Gas) bereitgestellt. Der Einsatz erneuerbarer Energien (Biomasse, Umwelt- und Solarwärme) nimmt um ca. 7,3 PJ zu und wird damit auch seinen Anteil von 0,8 % im Jahr 2014 auf etwa 14,4 % bis zum Jahr 2050 erhöhen (siehe Tabelle 20).

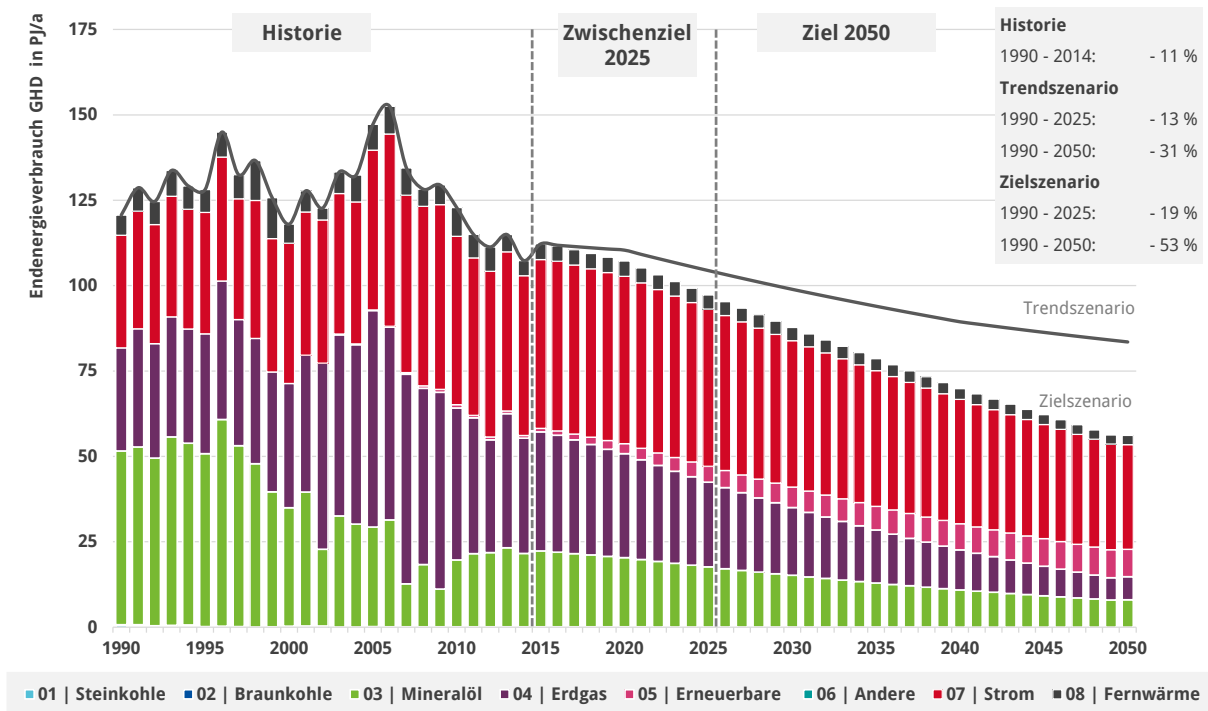


Abbildung 29 Sektor GHD: Endenergieverbrauch – Historie, Trend- und Zielszenario
 Quelle: 1990 – 2012: [HSL 2015a], 2013 – 2014: [IE Leipzig 2015], 2015 – 2050: Szenario IE Leipzig

Endenergieverbrauch in PJ/a	1990	2000	2014	2020	2025	2050
01 Steinkohle	0,6	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0
02 Braunkohle	0,2	0,3	0,1	0,1	0,1	0,0
03 Mineralöl	50,8	34,7	21,5	20,3	17,6	8,1
04 Erdgas	30,2	36,4	33,7	30,4	24,8	6,7
05 Erneuerbare	0,0	0,0	0,8	3,0	4,7	8,1
06 Andere	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
07 Strom	33,0	41,0	46,8	49,0	46,0	30,6
08 Fernwärme	5,9	5,6	4,4	4,4	4,1	2,7
Hessen Gesamt	120,7	118,0	107,3	107,2	97,3	56,1
EEV je Erwerbstätigen (GJ/ET)		46,5	38,4	37,5	34,9	22,4
EEV je BWS_{real} (GJ/10³ Euro)		0,83	0,59	0,56	0,49	0,23

Tabelle 19 Sektor GHD: Endenergieverbrauch in PJ – Historie und Zielszenario
 Quelle: 1990, 2000: [HSL 2015a] [VGRdL 2015] [destatis 2015b], 2014: [IE Leipzig 2015], 2020, 2025, 2050: Szenario IE Leipzig

Endenergieverbrauch in %	1990	2000	2014	2020	2025	2050
01 Steinkohle	0,5%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
02 Braunkohle	0,1%	0,2%	0,1%	0,1%	0,1%	0,0%
03 Mineralöl	42,1%	29,4%	20,0%	18,9%	18,1%	14,4%
04 Erdgas	25,0%	30,8%	31,4%	28,4%	25,5%	12,0%
05 Erneuerbare	0,0%	0,0%	0,8%	2,8%	4,8%	14,4%
06 Andere	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
07 Strom	27,3%	34,8%	43,6%	45,7%	47,3%	54,5%
08 Fernwärme	4,9%	4,7%	4,1%	4,1%	4,2%	4,8%
Hessen Gesamt	100%	100%	100%	100%	100%	100%

Tabelle 20 Sektor GHD: Anteil der Energieträger am Endenergieverbrauch – Historie und Zielszenario

Quelle: 1990, 2000: [HSL 2015a], 2014: [IE Leipzig 2015], 2020, 2025, 2050: Szenario IE Leipzig

THG-Emissionen - Historie und Szenarien

Die THG-Emissionen werden auf Basis der eingesetzten Energieträger ermittelt. Dazu werden diese mit den spezifischen Emissionsfaktoren (CO₂, CH₄, N₂O) des jeweiligen Jahres, differenziert nach Energieträgern, bewertet. Die Sekundärenergieträger Strom und Fernwärme gelten im Folgenden als emissionsfrei, da bei ihrer Umwandlung in Nutzenergie keine direkten THG-Emissionen freigesetzt werden (siehe Abschnitt 2.2; Bilanzierungsprinzipien – Quellenprinzip).

Wie in Abbildung 30 zu sehen ist, werden im Jahr 2014 die THG-Emissionen im GHD-Sektor maßgeblich durch den Einsatz von Erdgas und Mineralölprodukten verursacht. Die THG-Emissionen aus dem Kohleeinsatz und Einsatz erneuerbarer Energien (insbesondere Biomasse) haben im Jahr 2014 einen Anteil von 0,3 % an den gesamten THG-Emissionen des Sektors. Bereits in der Historie sind die THG-Emissionen von 5,5 Mio. t CO_{2äq} im Jahr 1990 um 37 % auf 3,5 Mio. t CO_{2äq} im Jahr 2014 gesunken.

Für die Entwicklung der THG-Emissionen des GHD Sektors bis zum Jahr 2050 werden im Trendszenario folgende wesentliche Annahmen getroffen:

- Infolge der zunehmenden Anstrengungen bei der Wärmedämmung und der Erhöhung der Effizienz von Heizungsanlagen wird der Heizenergiebedarf weiter zurückgehen.
- Der Endenergieverbrauch wird ggü. 2014 bis zum Jahr 2050 um 22 % reduziert, wobei Wärmeeinsparungen um 35 % zu erwarten sind.
- Erhöhung des Prozesswärmebedarfs um 24 % wegen Zunahme u.a. bei Gesundheit und industriellen Dienstleistungen
- Erhöhung des Energieverbrauchs zum Kühlen/Lüften

Unter Zugrundelegung der Annahmen könnten sich im Trendszenario gegenüber 1990 die THG-Emissionen im Sektor GHD bis 2025 um 47 % auf 2,96 Mio. t CO_{2äq} und bis 2050 um 71 % auf 1,58 Mio. t CO_{2äq} verringern (vgl. Abbildung 30). Für den Zeitraum zwischen 2014 und 2025 bedeutet das eine Verminderung um 15 % (-0,8 Mio t CO_{2äq}).

Für das Zielszenario werden über den Trend hinaus folgende Annahmen getroffen:

- Halbierung des Endenergieverbrauches bis 2050 gegenüber 2014
- Senkung des Raumwärmebedarfs um 70 % bis 2050 gegenüber 2014 durch Verdopplung der Sanierungsrate und Erhöhung der Sanierungstiefe, erhöhter Abriss & Neubau
- Bereitstellung von Raumwärme, Warmwasser und teilweise Kälte über erneuerbare Energien (15 % am EEV im Jahr 2050)
- Strom wird dominierender Energieträger mit ca. 55 % Anteil am EEV im Jahr 2050 (zu 100 % aus erneuerbaren Energien)
- Steigerung der Stromeffizienz um durchschnittlich 1 % pro Jahr (Kompensation Mehrbedarf und zusätzliche Einsparungen) 2014 bis 2050

- Anteile von Erdgas sowie Mineralöl und Mineralölprodukten am EEV sinkt auf ca. 26 % bis zum Jahr 2050
- Strom aus erneuerbaren Energien wird zur Erdgas-erzeugung (Power to Gas) langsam beginnend ab 2025 und kontinuierlich steigend bis 2050 eingesetzt, so dass das im Erdgas befindliche Gas ab 2050 zu 80 % aus erneuerbaren Energien bereitgestellt wird

Unter Zugrundelegung der beschriebenen Annahmen könnten sich im Zielszenario gegenüber 1990 (5,5 Mio. t CO_{2äq}) die THG-Emissionen des GHD-Sektors Hessens bis 2025 um 51 % (2,7 Mio. t CO_{2äq}) und bis 2050 um 88 % (0,7 Mio. t CO_{2äq}) verringern (vgl. Abbildung 30).

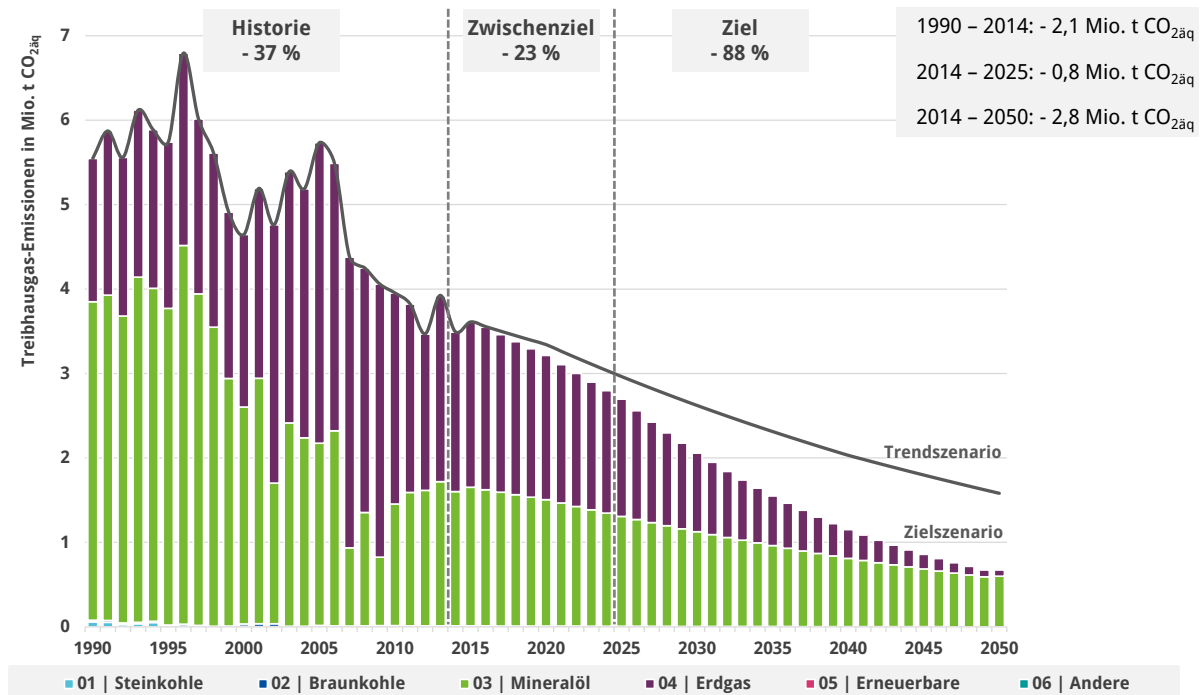


Abbildung 30 Sektor GHD: THG-Emissionen – Historie, Trend- und Zielszenario (Quellenbilanz)

Quelle: [HSL 2015h] [HSL 2015b] [HSL 2015d] [UGRdL 2014] [IE Leipzig 2015] [UBA 2015a], Szenario und Berechnung IE Leipzig, Normierung der Treibhausgase (CO₂, CH₄, N₂O, F-Gase) in CO_{2äq}-Emissionen mittels GWP_{SAR}-Werte

Zusammenfassung

Der Anteil der THG-Emissionen des Sektors GHD an der Gesamtbilanz im Jahr 2014 beträgt 9 %. Die THG-Emissionen sind im Zeitraum 1990 bis 2014 um 37 % zurückgegangen. In der Trendentwicklung wird im Zeitraum 2014 bis 2050 eine weitere Reduktion von 55 % erwartet (von derzeit 3,5 auf 1,6 Mio. t CO_{2äq}). Gegenüber 1990 wird im Zielszenario eine Reduktion um 51 % auf 2,7 Mio. t CO_{2äq} bis zum Jahr 2025 und um 88 % auf 2,7 Mio. t CO_{2äq} bis zum Jahr 2050 erwartet. Ein zentraler Schritt hierfür ist die Halbierung des Endenergieverbrauchs und die Erhöhung des Anteils der erneuerbaren Energien von derzeit 1 % auf 15 %. Strom wird mit 50 % Anteil der wichtigste Energieträger im Jahr 2050.

Um den langfristigen Zielpfad 2050 zu erreichen, sollte als Zwischenziel bis zum Jahr 2025 eine Reduktion der durch den Sektor GHD verursachten THG-Emissionen auf 2,7 Mio. t CO_{2äq} (- 51 % gegenüber 1990) angestrebt werden. Hierfür müssen Aktivitäten in den verschiedensten Handlungsfeldern sowohl kurzfristig, als auch langfristig ergriffen werden. Eine Übersicht hierzu gibt Tabelle 21.

Handlungsfelder bis 2020/25	Handlungsfelder bis 2050
<p>Gebäude</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Ausbau von KWK und Abwärmenutzung ▪ Erhöhung Effizienzstandards für Neubau ▪ Effizienzstandards für Kühltechnik ▪ Austauschpflicht für Altanlagen mit Vollzugskontrolle ▪ Nachträgliche Optimierung bereits geförderter Anlagen ▪ Sanierung kommunaler Liegenschaften ▪ Erhöhung der Investitionsanreize <p>Technologien</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Berücksichtigung von Effizienzkriterien bei der Beschaffung ▪ Einsatz von effizienten Motoren ▪ Effiziente Auslegung von Pumpen und Motoren ▪ Energetische Optimierung von Lüftungsanlagen ▪ Förderung raumluftechnischer Anlagen ▪ Förderung Druckluftsysteme ▪ Abwärmenutzung von Rechenzentren ▪ Dynamische Beleuchtungstechnologien <p>Übergreifendes</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Verschärfung und Ausweitung der EU-Ökodesign-Richtlinie und Energieverbrauchskennzeichnungs-Richtlinie 2010/30/EU ▪ Energieberatungen und Bewusstseinsbildung: ▪ Energiemanagementsysteme in Betrieben ▪ Anreize für kleine KMU zur Durchführung von Energieaudits schaffen ▪ Effizienznetzwerken/ Fortbildungsprogramme 	<p>Gebäude</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Einsatz effizienter Pumpen ▪ Einsatz von energieeffizienten Raumluftechnischen-Anlagen ▪ Einsatz von Regelungstechnik: Regelungen, Steuerungen und Leitsysteme ▪ Raumklimafreundliche Gebäude: Nutzen von Verschattungsmöglichkeiten, Luftkanäle <p>Technologien</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Nutzung von UV-Strahlung ▪ Kälteerzeugung aus Abwärme ▪ Einsatz von Wärmeübertragern ▪ Speicherung fluktuierender EE-Wärme (Solarthermie, Wärmepumpen): Einsatz von Wärmespeichern / Pufferspeichern, Weiterentwicklung innovativer Speicherarten (Latentwärmespeicher, Thermochemische Speicher) ▪ Umsetzung von Green-IT <p>Übergreifendes</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Förderung von Querschnittstechnologien: ▪ Umsetzung von Wärme- und Kältenutzungsplänen

Tabelle 21 Empfohlene Handlungsfelder zur Minderung der Treibhausgasemissionen im Sektor Gewerbe, Handel und Dienstleistung

3.6 Haushalte

Die maßgebliche Grundlage zur Ermittlung der THG-Emissionen im Sektor Haushalte ist der energieträgerspezifische Endenergieverbrauch auf Basis der Energiebilanz. Der Endenergieverbrauch der privaten Haushalte setzt sich zusammen aus dem Energieverbrauch für die Raumheizung, Warmwasserbereitung, Nahrungszubereitung, Beleuchtung, Nutzung energieverbrauchender Haushaltsgeräte sowie Geräte zur Freizeitgestaltung.

Endenergieverbrauch

Die Entwicklung des **Endenergieverbrauchs im Sektor Haushalte** ist im Zeitraum 1990 bis 2001 von einem tendenziellen Anstieg gekennzeichnet. Erst ab dem Jahr 2002 kann ein tendenzieller Rückgang beobachtet werden. Der deutliche Rückgang des Endenergieverbrauchs im Jahr 2007 ist einerseits auf die relativ warmen Witterungsbedingungen und andererseits auf die Umsatzsteuererhöhung in diesem Jahr zurückzuführen, die zu Vorratskäufe von Heizöl im Vorjahr führten. Zwischen dem Jahr 1990 und 2014 sank der Endenergieverbrauch im Sektor Haushalte um etwa 12 PJ (- 6 %) auf 173,2 PJ [HSL 2015a] [IE 2015]. Der Rückgang des Endenergieverbrauches wurde überwiegend durch den rückläufigen Einsatz von Mineralölen (- 37,5 PJ), insbesondere leichtem Heizöl, und den rückläufigen Kohleeinsatz (- 1,8 PJ) hervorgerufen. Bei den Energieträgern Erneuerbare (+ 21,1 PJ), Erdgas (+ 2,2 PJ), Fernwärme (+ 2,8 PJ) und Strom (+ 1,1 PJ) ist hingegen im Zeitraum 1990 bis 2014 eine Verbrauchszunahme (+ 27,3 PJ) festzustellen (siehe Tabelle 22). Der deutliche Anstieg des Einsatzes erneuerbarer Energien ist zum Großteil (85 %) auf den steigenden Einsatz von fester Biomasse (Scheitholz, Pellets) zurückzuführen.

Der Endenergieverbrauch des Sektors Haushalte in Hessen wird im Jahr 2014 zu 83 % durch die Energieträger Erdgas, Mineralöl und Strom dominiert (siehe Tabelle 23).

Die maßgeblichen Einflussfaktoren auf den Endenergieverbrauch im Sektor Haushalte sind die Einwohnerzahl und die von Einwohnern nachgefragte Wohnfläche bzw. Wohneinheiten. Die Einwohnerzahl nahm in Hessen im Vergleich zum Jahr 1990 bis zum Jahr 2014 um ca. 241.000 Einwohner zu (\emptyset +0,2 % pro Jahr), jedoch ist ab dem Jahr 2004 ein Rückgang der Einwohnerzahl um ca. 93.000 Einwohner zu verzeichnen [HSL 2015f]. Die Wohnfläche stieg hingegen zwischen 1990 und 2014 kontinuierlich an (\emptyset + 1,2 % pro Jahr) [HSL 2015g]. Pro Einwohner wurden im Jahr 2014 durchschnittlich 47,7 m² Wohnfläche bewohnt, damit etwa 10 m² mehr als noch im Jahr 1990 (37,3 m² Wohnfläche je Einwohner). Maßgeblich für diese Entwicklung ist die geringere Zahl an Einwohner bzw. Bewohner je Wohneinheit (1990: 2,40 Einwohner je WE, 2014: 2,02 Einwohner je WE) und die zunehmende Wohnfläche je Wohnungseinheit (1990: 89,3 m² je WE, 2014: 96,4 m² je WE) [HSL 2015g].

Die wohnflächenbezogene Endenergieintensität⁵⁰ reduzierte sich im Zeitraum 1990 bis 2014 um durchschnittlich ca. 1,5 % pro Jahr, d. h. pro m² Wohnfläche wird tendenziell immer weniger Endenergie eingesetzt (siehe Tabelle 22). Analog zur wohnflächenbezogenen Endenergieintensität⁵¹ reduzierte sich der Endenergieverbrauch pro Wohneinheit zwischen 1990

⁵⁰ Quotient aus Endenergieverbrauch und Wohnfläche

⁵¹ Quotient aus Endenergieverbrauch und Wohneinheiten

und 2014, jedoch mit durchschnittlich 1,2 % pro Jahr, infolge der zunehmenden Wohnfläche, weniger dynamisch (siehe Tabelle 22).

Sowohl im Trend- als auch im Zielszenario wird davon ausgegangen, dass zwischen 2014 und 2050 die Bevölkerung um durchschnittlich 0,37 % pro Jahr bzw. insgesamt um 12 % zurückgeht [HSL 2010]. Der in der Vergangenheit beobachtete Trend der zunehmenden Wohnfläche je Einwohner wird bis 2050 anhalten, so dass die Wohnfläche je Einwohner von 47,7 m² im Jahr 2014 auf 52,7 m² im Jahr 2050 weiter ansteigt (Ø ca. + 0,3 % pro Jahr). Die gegenläufigen Entwicklungen einer abnehmenden Bevölkerung und einer zunehmenden Wohnfläche je Einwohner führen insgesamt zu einer sinkenden Wohnfläche in Hessen (2014 bis 2050: - 2,7 %). Auch die in der Vergangenheit beobachtete rückläufige Belegungsquote je Wohneinheit wird bis 2050 anhalten, so dass die Zahl der Einwohner je Wohneinheit von 2,02 Einwohner je WE im Jahr 2014 auf 1,83 Einwohner je WE zurückgeht.

Im Zielszenario wird davon ausgegangen, dass sich die Senkungsdynamik der wohnflächenbezogenen Endenergieintensität und der Endenergieverbrauch je Wohneinheit durch Effizienzbemühungen (siehe Tabelle 24) auf durchschnittlich 1,8 % pro Jahr erhöhen lässt (siehe Tabelle 22).

Der Endenergieverbrauch im Sektor Haushalte nimmt durch die getroffenen Annahmen im Zielszenario zwischen 2014 und 2050 um ca. 53 % (85,8 PJ) auf etwa 87,4 PJ ab (siehe Abbildung 31 und Tabelle 22). Die Halbierung des Endenergieverbrauchs kann dabei im Wesentlichen durch die Reduktion des Raumwär-

mebedarfs (- 60 %) durch Erhöhung der Sanierungsrate bzw. – tiefe auf 2,5 % pro Jahr, Erhöhung der Neubaustandards sowie Steigerung der Effizienz von Heizungsanlagen erzielt werden. Die zweite wichtige Säule ist die Fortsetzung der Energieträgersubstitution, d.h. die komplette Verdrängung von Heizöl sowie eine Senkung des Anteils von Gas durch die Ausweitung des Einsatzes erneuerbarer Energieträger. Während in der Trendentwicklung ein nahezu konstanter Strombedarf erwartet wird, wird im Zielszenario durch die Verschärfung und Ausweitung der Umsetzung von Effizienzstandards der Stromverbrauch bis 2050 um 20 % gegenüber 2014 zurückgehen (siehe Tabelle 22).

Insbesondere durch die Reduktion des Raumwärmebedarfes im Sektor Haushalte und der Substitution von fossilen durch erneuerbare Energieträger werden sich die Anteile der Energieträger am Endenergieeinsatz deutlich verschieben. Der Einsatz erneuerbarer Energien (Biomasse, Umwelt- und Solarwärme) nimmt um ca. 19,1 PJ zu und wird damit auch seinen Anteil von 12,5 % im Jahr 2014 auf etwa 46,4 % bis zum Jahr 2050 erhöhen. Strom wird neben den erneuerbaren Energien zum zweitwichtigsten Energieträger bis zum Jahr 2050, der zu 100 % aus erneuerbaren Energien bereitgestellt wird. Der Anteil von Erdgas am Endenergieverbrauch sinkt auf ca. 15,7 %. (siehe Tabelle 23). Das im Erdgas befindliche Gas wird beginnend ab 2025 und kontinuierlich steigend bis 2050 zu 80 % aus erneuerbaren Energien (Power to Gas) bereitgestellt.

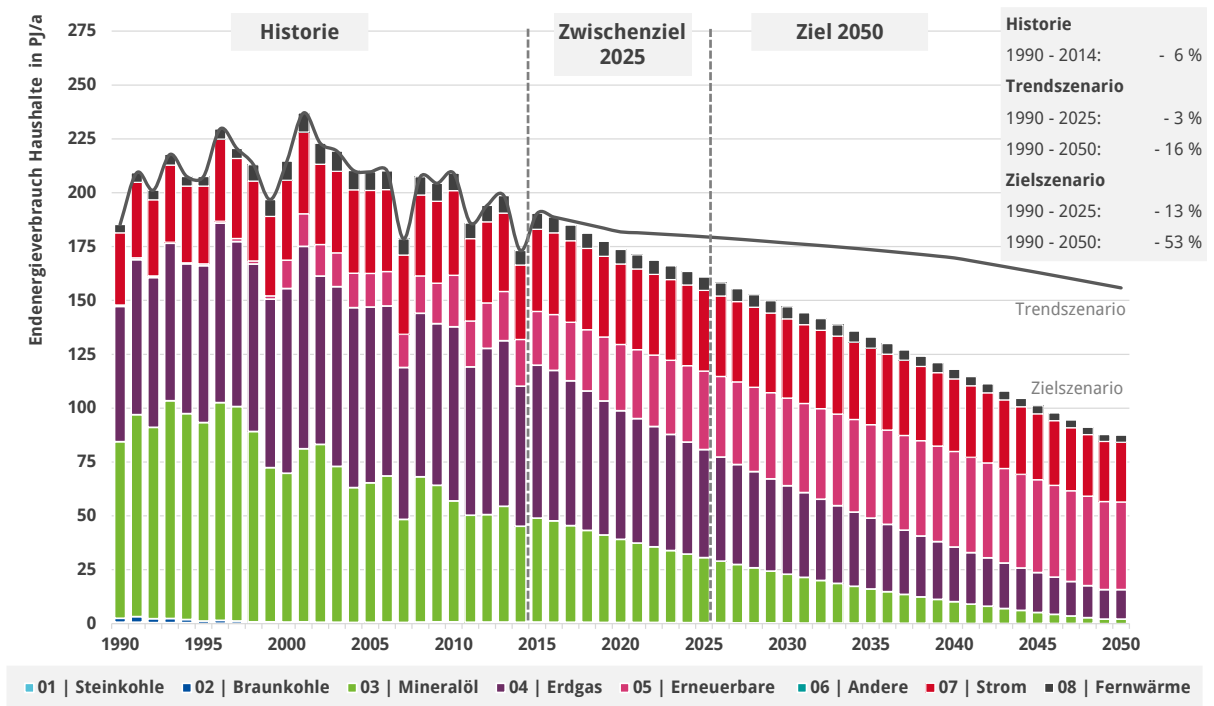


Abbildung 31 Sektor Haushalte: Endenergieverbrauch – Historie, Trend- und Zielszenario
 Quelle: 1990 – 2012: [HSL 2015a], 2013 – 2014: [IE Leipzig 2015], 2015 – 2050: Szenario IE Leipzig

Endenergieverbrauch in PJ/a	1990	2000	2014	2020	2025	2050
01 Steinkohle	0,6	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0
02 Braunkohle	1,9	0,6	0,6	0,5	0,4	0,0
03 Mineralöl	82,0	69,1	44,5	38,5	30,2	2,1
04 Erdgas	62,8	85,7	65,0	59,8	50,2	13,7
05 Erneuerbare	0,6	13,2	21,7	30,7	36,5	40,7
06 Andere	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
07 Strom	33,5	37,1	34,6	37,3	37,4	27,7
08 Fernwärme	3,9	8,8	6,7	6,7	6,2	3,3
Hessen Gesamt	185,2	214,6	173,2	173,6	160,8	87,4
EEV je Wohnungseinheit (GJ/WE)	77,0	78,5	58,3	57,2	52,8	30,3
EEV je Wohnfläche (GJ/m²)	0,86	0,87	0,61	0,62	0,57	0,32

Tabelle 22 Sektor Haushalte: Endenergieverbrauch in PJ – Historie und Zielszenario
 Quelle: 1990, 2000: [HSL 2015a] [HSL 2015g], 2014: [IE Leipzig 2015], 2020, 2025, 2050: Szenario IE Leipzig

Endenergieverbrauch in %	1990	2000	2014	2020	2025	2050
01 Steinkohle	0,3%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
02 Braunkohle	1,0%	0,3%	0,4%	0,3%	0,2%	0,0%
03 Mineralöl	44,3%	32,2%	25,7%	22,2%	18,8%	2,4%
04 Erdgas	33,9%	39,9%	37,5%	34,4%	31,2%	15,7%
05 Erneuerbare	0,3%	6,2%	12,5%	17,7%	22,7%	46,6%
06 Andere	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
07 Strom	18,1%	17,3%	20,0%	21,5%	23,2%	31,7%
08 Fernwärme	2,1%	4,1%	3,9%	3,9%	3,8%	3,7%
Hessen Gesamt	100%	100%	100%	100%	100%	100%

Tabelle 23 Sektor Haushalte: Anteil der Energieträger am Endenergieverbrauch – Historie und Zielszenario

Quelle: 1990, 2000: [HSL 2015a], 2014: [IE Leipzig 2015], 2020, 2025, 2050: Szenario IE Leipzig

THG-Emissionen – Historie und Szenarien

Die THG-Emissionen werden auf Basis der eingesetzten Energieträger ermittelt. Dazu werden diese mit den spezifischen Emissionsfaktoren (CO₂, CH₄, N₂O) des jeweiligen Jahres, differenziert nach Energieträgern, bewertet. Die Sekundärenergieträger Strom und Fernwärme gelten im Folgenden als emissionsfrei, da bei ihrer Umwandlung in Nutzenergie keine direkten THG-Emissionen freigesetzt werden (siehe Abschnitt 2.2; Bilanzierungsprinzipien – Quellenprinzip).

Der leicht gesunkene Endenergieverbrauch, aber hauptsächlich die Substitution von Mineralöl und Mineralölprodukten durch erneuerbare Energien (insbesondere Biomasse) haben eine deutliche Reduktion der THG-Emissionen im Sektor Haushalte zur Folge. In der Historie sind die THG-Emissionen damit von 9,8 Mio. t CO_{2äq} im Jahr 1990 um 28 % auf 7,0 Mio. t CO_{2äq} im Jahr 2014 gesunken (siehe Abbildung 32). Im Jahr 2014 werden die quellenbedingten THG-Emissionen im Sektor Haushalte hauptsächlich durch erdgas- und heizölbasierte Feuerungsanlagen verursacht. Der Anteil der THG-Emissionen des Sektors

Haushalte an der Gesamtbilanz im Jahr 2014 beträgt 18 %.

Für die Entwicklung der THG-Emissionen des Sektors Haushalte bis zum Jahr 2050 werden im Trendszenario folgende wesentliche Annahmen getroffen:

- Senkung des Endenergieverbrauches infolge verstärkter Absenkung des Heizenergiebedarfs durch Wärmedämmmaßnahmen und Erhöhung der Effizienz von Heizungsanlagen und Elektrogeräten
- Bei Erneuerung von ineffizienten Heizsystemen und Neubautätigkeiten werden immer mehr erneuerbare Energien eingesetzt, deren Anteil von 9 % auf 34 % steigt.
- Die Zunahme des Einsatzes von Biomasse, Solarenergie und Geothermie geht dabei zum größten Teil zu Lasten des Energieträgers Heizöl, gefolgt von Erdgas. Auch die fossilen Festbrennstoffe werden weiter zurückgehen und nur noch eine marginale Rolle spielen.

- Bei der Nutzung elektrischer Geräte wird eine Erweiterung der Geräteausstattung der Haushalte erwartet.
- Ebenso wird im Betrachtungszeitraum ein Geräte austausch stattfinden, d.h. die angeschafften Geräte werden durch neue, in der Regel mit besseren energetischen Kenngrößen versehene, Geräte ersetzt. Dadurch wird der höhere Elektroenergiebedarf infolge einer Erhöhung der Geräteausstattung (insbesondere Geräte der Kommunikationstechnik) kompensiert.
- Zusätzlich führt die anvisierte Nutzung der oberflächennahen Geothermie mittels Wärmepumpen zu einem zusätzlichen Bedarf an Elektroenergie, weshalb sich der Strombedarf bis zum Jahr 2050 kaum verändert.
- Bereitstellung von Raumwärme und Warmwasser über erneuerbare Energien (47 % am EEV)
- Steigerung der Stromeffizienz durch Verschärfung und Ausweitung der Umsetzung von Effizienzstandards
- Anteil von Erdgas am EEV sinkt auf ca. 15,7 % bis 2050
- Strom aus erneuerbaren Energien wird zur Erdgas-erzeugung (Power to Gas) langsam beginnend ab 2025 und kontinuierlich steigend bis 2050 eingesetzt, so dass das im Erdgas befindliche Gas ab 2050 zu 80 % aus erneuerbaren Energien bereitgestellt wird

Unter Zugrundelegung der Annahmen könnten sich im Trendszenario gegenüber 1990 die THG-Emissionen im Sektor Haushalte bis 2025 um - 35 % auf 6,4 Mio. t CO_{2äq} und bis 2050 um - 61 % auf 3,9 Mio. t CO_{2äq} verringern (vgl. Trendlinie Abbildung 32). Für den Zeitraum zwischen 2014 und 2025 bedeutet das eine Verminderung um 9 % (- 0,6 Mio. t CO_{2äq}).

Für das Zielszenario werden über den Trend hinaus folgende Annahmen getroffen:

- Halbierung des Endenergieverbrauches bis 2050 gegenüber 2014
- Senkung des Raumwärmebedarfs um 60 % bis 2050 durch Verdopplung der Sanierungsrate und Erhöhung der Sanierungstiefe, erhöhter Abriss und Neubau
- Fortsetzung der Energieträgersubstitution, d.h. die komplette Verdrängung von Heizöl sowie eine Senkung des Anteils von Gas unter 16 %

Unter Zugrundelegung der beschriebenen Annahmen könnten sich im Zielszenario gegenüber 1990 (9,8 Mio. t CO_{2äq}) die THG-Emissionen des Sektors Haushalte in Hessen bis 2025 um - 48 % auf 2,7 Mio. t CO_{2äq} und bis 2050 um - 96 % auf 0,4 Mio. t CO_{2äq} verringern (vgl. Abbildung 31).

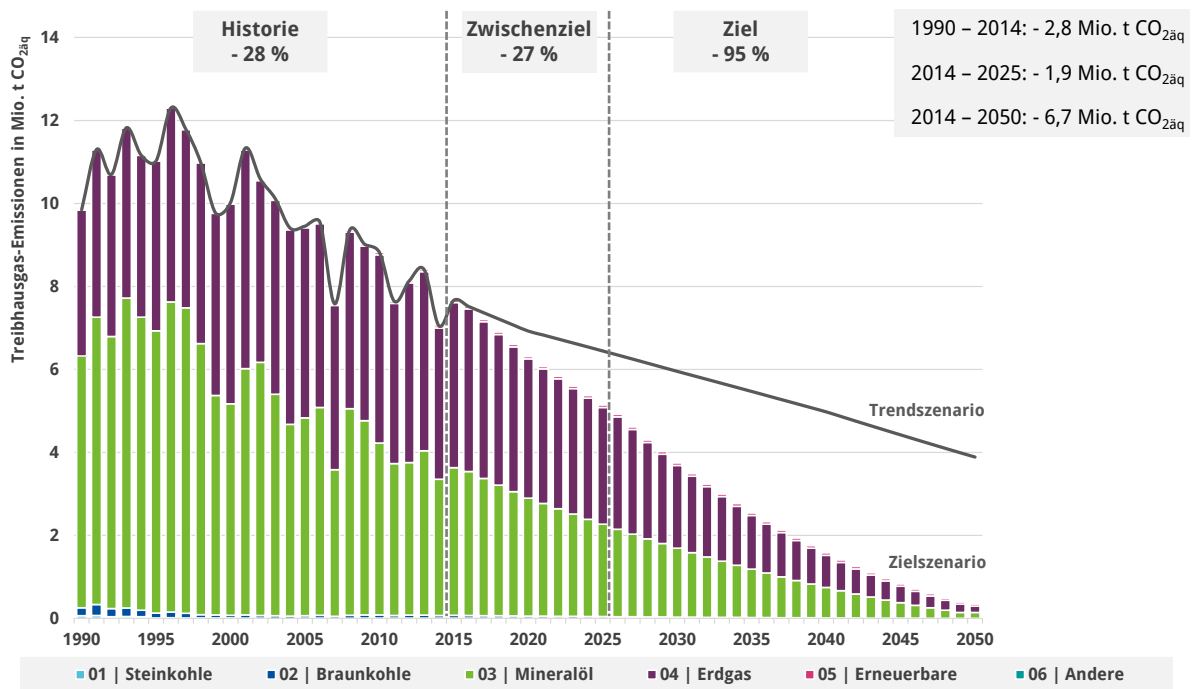


Abbildung 32 Sektor Haushalte: THG-Emissionen – Historie, Trend- und Zielszenario (Quellenbilanz)

Quelle: [HSL 2015h] [HSL 2015b] [HSL 2015d] [UGRdL 2014] [IE Leipzig 2015] [UBA 2015a] [UBA 2015c], Szenario und Berechnung IE Leipzig, Normierung der Treibhausgase (CO₂, CH₄, N₂O, F-Gase) in CO_{2äq}-Emissionen mittels GWP_{SAR}-Werte

Zusammenfassung

Der Anteil der THG-Emissionen des Sektors Haushalte an der Gesamtbilanz im Jahr 2014 beträgt 18 %, welche hauptsächlich durch erdgas- und heizölbasierte Feuerungsanlagen verursacht werden. Seit 1990 sind die THG-Emissionen um 28 % zurückgegangen. In der Trendentwicklung bis zum Jahr 2025 wird eine weitere Reduktion von - 45 % von derzeit 7,0 auf 3,9 Mio. t CO_{2äq} erwartet.

Im Zielszenario wird eine Reduktion gegenüber 1990 um - 48 % auf 5,1 Mio. t CO_{2äq} im Jahr 2025 und um - 96 % auf 0,3 Mio. t CO_{2äq} im Jahr 2050 erreicht. Diese Reduktion ist nur erreichbar, wenn in allen Handlungsbereichen die Aktivitäten verstärkt werden.

Die kurz- und langfristigen Handlungsfelder zur Reduktion der THG-Emissionen im Sektor Haushalte sind in Tabelle 24 aufgeführt.

Handlungsfelder bis 2020/25	Handlungsfelder bis 2050
<p>Gebäude und Technik</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Erhöhung Neubaustandard ▪ Steigerung der Effizienz von Heizungsanlagen durch Austauschpflicht für Altanlagen ▪ Ausbau von KWK und Nahwärmenetze ▪ Erhöhung der Investitionsanreize (Förderprogramme/ steuerliche Begünstigungen) ▪ Vollzugskontrolle und Sanktionen von ordnungsrechtlichen Instrumentarien ▪ Entwicklung von Energetischen Quartiers- und Stadtentwicklungskonzepten <p>Elektrische Anwendungen</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Umsetzung EU-Ökodesign-Richtlinie ▪ Förderung von Best-Geräten ▪ Effizientes Nutzerverhalten <p>Übergreifendes</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Weiterführung und Ausbau Energieberatung bzw. Wärme-oder Stromsparchecks ▪ Initiierung und Weiterführung von Effizienznetzwerken (Handwerker, Energieberater etc.) ▪ Fortbildungsprogramme zur Energieeffizienz und Emissionsvermeidung 	<p>Gebäude und Technik</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Verdopplung der Sanierungsrate und Erhöhung der Sanierungseffizienz ▪ Steigerung des Anteils erneuerbarer Energien ▪ Ausweitung des EEWärmeG auf den Bestand ▪ Komplette Verdrängung von Heizöl, Senkung des Anteils von Gas ▪ Verschärfung und Ausweitung von Effizienzstandards (Kühlung/Belüftung) ▪ Umsetzung von Energetischen Quartiers- und Stadtentwicklungskonzepten <p>Elektrische Anwendungen</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Bedarfsorientierte Geräteausstattung ▪ Einsatz von dynamischen Beleuchtungstechnologien ▪ Einsatz von Querschnittstechnologien ▪ Optimierung der Bauweise (Lichtkonzentration, Tageslichtnutzung) <p>Übergreifendes</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Weitere Einführung und Weiterentwicklung des Ökologischen Mietspiegels ▪ Innovation in den Bereichen Wärmestoffen und Techniken

Tabelle 24 Empfohlene Handlungsfelder zur Minderung der Treibhausgasemissionen im Sektor Haushalte

3.7 Landwirtschaft

In der Quellgruppe Landwirtschaft entstehen Emissionen in den folgenden Teil-Quellgruppen:

- Fermentation: verdauungsbedingte CH₄-Emissionen, vor allem bei der Haltung von Wiederkäuern (Rinder, Schafe, Ziegen),
- Düngewirtschaft: CH₄- und N₂O-Emissionen aus der Wirtschaftsdüngerlagerung,
- Landwirtschaftliche Böden: N₂O-Emissionen aus der Düngung, aus gasförmigen N-Verlusten sowie N-Austrägen ins Grund- und Oberflächenwasser, aus der Umsetzung von Ernterückständen und aus tierischen Ausscheidungen auf der Weide; hinzu kommen CO₂-Emissionen aus der Kalkung und aus der Ausbringung von Harnstoff.

Grundlagen

Die Ermittlung der landwirtschaftlich verursachten Emissionen basiert auf Berechnungen des Thünen Instituts (TI) [Thünen 2015a], die eine wesentliche Grundlage für die Berichterstattung im nationalen Inventarbericht (NIR) [UBA 2014b] sind. In [Thünen 2015a] kommen erstmals die neuen IPCC-Guidelines von 2006 zur Anwendung. Die darin enthaltenen methodischen Änderungen führen zu veränderten, berechneten THG-Emissionen. Dies ist beim Vergleich mit in Vorjahren publizierten Angaben zu berücksichtigen, beispielsweise mit den Ergebnissen der Treibhausgasbilanz Hessen für das Jahr 2011 [HSL 2015h]. Wesentliche Änderungen sind, dass die bisher berechneten direkten N₂O-Emissionen aus der leguminen N-Bindung ganz entfallen und der Emissionsfaktor für die indirekten N₂O-Emissionen aus der Auswaschung um 70 % geringer angenommen wird. Darüber hinaus wird mit der Emissionsberichterstattung

2015 im landwirtschaftlichen Inventar erstmals die Vergärung von Energiepflanzen⁵² berücksichtigt [Thünen 2015a].

Die Berechnungsmethoden des TI im Bereich der Tierhaltung sind sehr detailliert. Im Modell werden u. a. Angaben zu Futteraufnahme, Futterkennwerten, Aktivitätsdaten (Tiergewicht, Zuwachsraten etc.), Haltungssystemen sowie Weidedauer berücksichtigt. Die Berechnungen erfolgen auf Kreisebene, bevor sie zu Ergebnissen auf Bundeslandebene aggregiert und als solche ausgewiesen werden. Auf Ebene der Bundesländer sind je Tierkategorie die spezifischen Emissionsfaktoren der einzelnen Luftschadstoffe angegeben [Thünen 2015a]. Für Hessen wurden die Emissionen aus den Eingangsdaten Tierbestand und den spezifischen Emissionsfaktoren ermittelt. Das Hessische Statistische Landesamt erfasst im Rahmen der Agrarstrukturerhebung die Tierzahlen Hessens.

Die Emissionen aus der landwirtschaftlichen Bodennutzung werden für die Berichterstattung auf Länderebene berechnet [Thünen 2015a]. Als Aktivitätsgrößen werden die genutzten Flächen sowie die ausgebrachten Düngermengen (bspw. als verkaufte Mineraldüngermenge) berücksichtigt. Die Ableitung der Emissionsfaktoren erfolgt entsprechend der Mengen an Stickstoff bzw. Kohlenstoff im ausgebrachten Dünger. Angaben zur Bodennutzung stehen durch das Hessische Statistische Landesamt zur Verfügung.

⁵² Berechnet werden Emissionen, die sich als direkte oder indirekte Folge aus der Vergärung von Energiepflanzen sowie der Lagerung und Ausbringung der Energiepflanzen-Gärreste ergeben (Fermenter: CH₄, Lagerung: CH₄, direktes und indirektes N₂O, Ausbringung: direktes und indirektes N₂O).

Um die THG-Emissionen in Deutschland bis zum Jahr 2050 um 80 bis 95 % gegenüber dem Jahr 1990 zu verringern, muss in der Quellgruppe Landwirtschaft im Jahr 2050 ein Zielwert von 35 Mio. t CO_{2äq} erreicht werden [UBA 2014a]. Das TI hat für die Landwirtschaft untersucht, durch welche Minderungsmaßnahmen in Deutschland eine Reduktion dieser Größenordnung erreicht werden kann [Thünen 2013]. Die zugrunde liegenden Annahmen wurden für das Zielszenario für Hessen weitgehend übernommen.

Historie

In Abbildung 33 sind die THG-Emissionen in der bisherigen Entwicklung seit 1990 sowie im Trend- und Zielszenario bis 2050 dargestellt. Im Jahr 2014 betragen die Emissionen in der Landwirtschaft insgesamt ca. 2,3 Mio. t CO_{2äq}. Fast die Hälfte (47 %) entstanden als N₂O-Emissionen auf landwirtschaftlichen Böden durch die Anwendung von Düngemitteln, tierische Ausscheidungen auf der Weide, Ernterückstände sowie indirekt aus der Deposition von reaktivem und ausgewaschenem Stickstoff. Ein Drittel (33 %) der landwirtschaftlichen Emissionen kamen als CH₄ aus der Verdauung (v. a. Rinderhaltung), 13 % aus dem Wirtschaftsdüngermanagement (6 % CH₄, 7 % N₂O), 6 % als direkte CO₂-Emissionen aus der Anwendung von Kalkdünger (5 %) und Harnstoffen (1 %) sowie 1 % aus der Vergärung von Energiepflanzen (Lagerung der Gärreste).

Zwischen 1990 und 2014 haben sich die THG-Emissionen aus der Landwirtschaft um 13 % reduziert. Die Emissionsrückgänge sind vor allem auf die Verminderung der Tierbestände, insbesondere in der Rinderhaltung zurückzuführen. Die Emissionen aus N-Mineraldüngern waren bis 2010 rückläufig (-39 % ggü. 1990), sind jedoch zwischen 2010 und 2014

wieder angestiegen (um 22 %). Ob der Anstieg mit veränderten Absatzwegen oder mit tatsächlich höherer Mineraldüngeranwendung zusammenhängt, lässt sich nicht klären.⁵³

Trend

Für die Entwicklung der THG-Emissionen aus der Landwirtschaft bis zum Jahr 2050 werden im Trendszenario folgende wesentliche Annahmen getroffen:

- die Strukturen der Landwirtschaft Hessens bleiben weitgehend bestehen,
- für die landwirtschaftlichen Erträge je Fläche und sowie die Leistung je Tier (Fleisch und Milch) wird eine moderate Steigerung unterstellt
- und damit im gleichen Verhältnis die ausgebrachten Düngemittelmengen zurück,
- das heutige Verbraucherverhalten und damit der Nahrungsmittelverbrauch pro Kopf bleiben unverändert.

Unter Zugrundelegung der beschriebenen Annahmen könnten sich im Trendszenario gegenüber 1990 die THG-Emissionen aus der Landwirtschaft Hessens bis 2025 um 18 % und bis 2050 um 31 % verringern (vgl. Trendlinie Abbildung 33). Für den Zeitraum zwischen 2014 und 2025 bedeutet das eine Verminderung um 6 %.

⁵³ Daten ausgebrachter Düngermengen sind nicht verfügbar, so dass die Emissionen aus den statistisch erfassten Düngerverkaufsmengen in Hessen berechnet werden. Es handelt sich dabei um Lieferungen der Produzenten und Importeure an Absatzorganisationen oder Endverbraucher. Diese Mengen sind nicht mit dem tatsächlichen Verbrauch in der Land- und Forstwirtschaft identisch. Inlandsabsatz und tatsächlicher Verbrauch weichen z.B. durch Lagerhaltung voneinander ab. Außerdem kann der Absatz in anderen Bundesländern erfolgen, wenn Absatzorganisationen die Düngemittel an die Endverbraucher liefern.

Ziel

Es gibt verschiedene Möglichkeiten, mit welchen Produktionsstrukturen und daraus resultierenden Produktionsmengen eine weitergehende Minderung der landwirtschaftlich bedingten THG-Emissionen erreicht werden kann. Für das Zielszenario werden über den Trend hinaus folgende Annahmen getroffen:

- durch ein verändertes Verbraucherverhalten wird der Fleischverbrauch pro Kopf deutlich reduziert,
- der Tierbestand wird an emissionsarme Haltungen angepasst,
- die Menge ausgebrachter Düngemittel nimmt signifikant ab; durch Optimierung der Ausbringetechniken, Düngeplanung, -mengen und -zeitpunkte werden die N-Produktivität der Düngung verbessert und N-Überschüsse reduziert,
- die landwirtschaftliche Nutzung von Moorböden wird zugunsten einer Restaurierung von Mooren eingestellt,
- Anbaubiomasse wird für energetische Nutzungen im Jahr 2050 nicht verwendet (nur Rest- und Abfallstoffe aus der Pflanzen- und Tierproduktion),
- der Wirtschaftsdünger tierischer Herkunft und andere landwirtschaftliche Reststoffe werden überwiegend in Biogasanlagen genutzt

Unter Zugrundelegung der beschriebenen Annahmen könnten sich im Maßnahmen-Szenario gegenüber 1990 (2,6 Mio. t CO_{2äq}) die THG-Emissionen des Agrarsektors Hessens bis 2025 um 26 % (1,9 Mio. t CO_{2äq}) und bis 2050 um 55 % (1,2 Mio. t CO_{2äq}) verringern (vgl. Abbildung 33). Diese Größenordnung entspricht dem deutschlandweiten Zielwert. Für den Zeitraum zwischen 2014 und 2025 muss in Hessen eine Verminderung der landwirtschaftlich bedingten THG-Emissionen um 15 % erreicht werden.

Die deutliche Minderung der THG-Emissionen aus der Landwirtschaft zwischen 1990 und 2050 ist nach Ausschöpfung von Potenzialen zur Effizienzsteigerung (v. a. in der Düngemittelanwendung) und Emissionsvermeidung nur durch Einschränkung der Tierproduktion zu erreichen. Das TI hat in zwei Szenarien analysiert, wie das Reduktionsziel durch Umsetzung technischer Minderungspotenziale erreicht werden kann [Thünen 2013].⁵⁴ Bezüglich der Einschränkung der Tierproduktion stehen die Wiederkäuer aufgrund ihrer hohen, verdauungsbedingten Emissionen im Mittelpunkt. Abweichend zur UBA-Studie „Energieziel 2050“ [UBA 2014a] wird damit einhergehend eine Veränderung des heutigen Verbraucher- und Ernährungsverhaltens unterstellt.

⁵⁴ Das erste Szenario ist konventionell und baut auf der Fortschreibung des Status Quo auf. Im zweiten Szenario werden 20 % Ökolandbau an der Landwirtschaftsfläche untersucht. Um das THG-Minderungsziel zu erreichen, ist in beiden Szenarien ein Abbau der Tierbestände erforderlich.

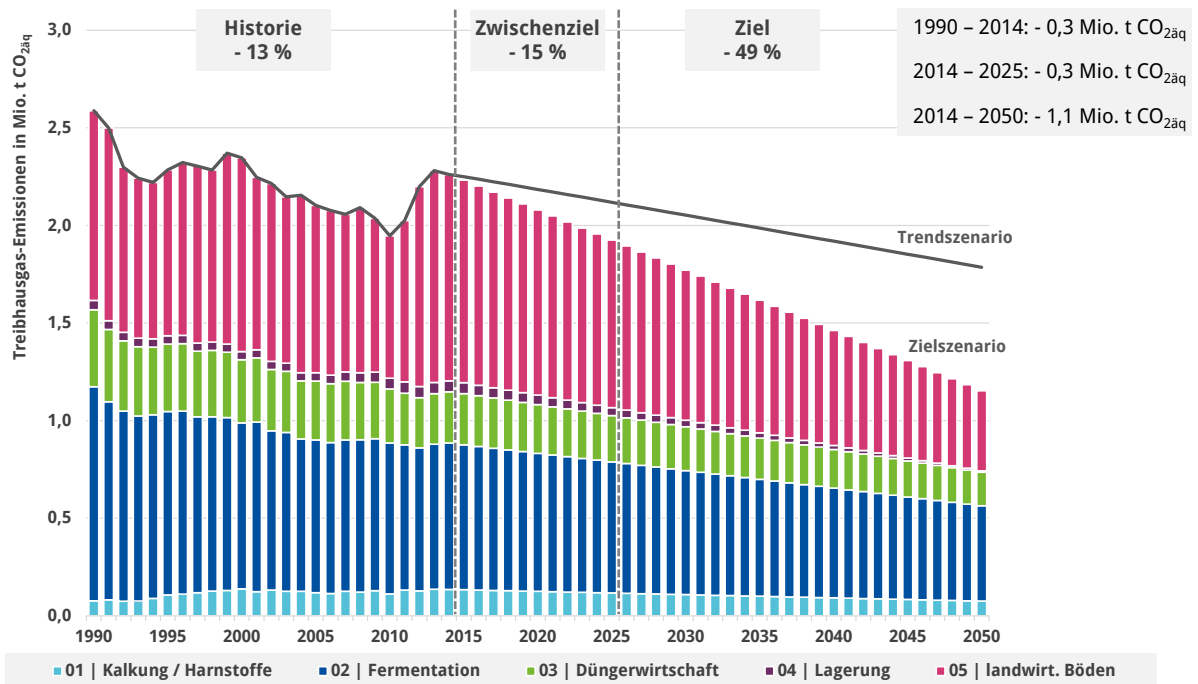


Abbildung 33 Sektor Landwirtschaft: THG-Emissionen – Historie, Trend- und Zielszenario (Quellenbilanz)

Quelle: [Thünen 2013], [Thünen 2015a], Szenario und Berechnung IE Leipzig, Normierung der Treibhausgase (CO₂, CH₄, N₂O, F-Gase) in CO_{2äq}-Emissionen mittels GWP_{SAR}-Werte

Zusammenfassung

Die THG-Emissionen aus der Landwirtschaft bestehen aus N₂O (54 %), CH₄ (40 %) und CO₂ (6 %), wobei die Emissionen hauptsächlich durch die Fermentation (verdauungsbedingt) und durch die Anwendung von stickstoffhaltigen Düngemitteln verursacht werden.

Zwischen 1990 und 2014 sind die THG-Emissionen um 13 % von 2,6 auf 2,3 Mio. t CO_{2äq} zurückgegangen.

Im Zielszenario wird bis zum Jahr 2050 gegenüber 1990 eine Reduktion um 55 % auf 1,2 Mio. t CO_{2äq} erwartet.

Um den langfristigen Zielpfad 2050 zu erreichen, sollte als Zwischenziel bis zum Jahr 2025 eine Reduktion der durch die Landwirtschaft verursachten THG-Emissionen auf 1,9 Mio. t CO_{2äq} (-26 % gegenüber 1990) angestrebt werden. Hierfür müssen Aktivitäten in den verschiedenen Handlungsfeldern sowohl kurz- und mittelfristig, als auch langfristig entsprechend der nachfolgenden Übersicht ergriffen werden (siehe Tabelle 25).

Handlungsfelder bis 2020/25	Handlungsfelder bis 2050
<p>Tierhaltung</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Anpassung des Tierbestandes an emissionsarme Haltungen ▪ Vermehrte Nutzung des Wirtschaftsdüngers tierischer Herkunft in Biogasanlagen <p>Landwirtschaftliche Nutzung der Böden</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Optimierung der Düngeplanung, -mengen und -zeitpunkte ▪ Reduzierung der Verwendung von Anbaubiomasse für energetische Nutzungen <p>Übergreifendes</p>	<p>Tierhaltung</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Anpassung des Tierbestandes an emissionsarme Haltungen ▪ Nutzung des Wirtschaftsdüngers tierischer Herkunft fast ausschließlich in Biogasanlagen <p>Landwirtschaftliche Nutzung der Böden</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Optimierung der Ausbringetechniken von Düngemitteln ▪ Einstellung der landwirtschaftlichen Produktion auf Moorflächen ▪ Vernässung der Moorflächen ▪ Ausschließliche Verwendung von Rest- und Abfallstoffen aus der Pflanzen- und Tierproduktion (z. B. Wirtschaftsdünger) für energetische Nutzungen <p>Übergreifendes</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Veränderung des Verbraucherverhaltens: der Fleischverbrauch pro Kopf wird deutlich reduziert (Empfehlungen der Deutschen Gesellschaft für Ernährung)

Tabelle 25 Empfohlene Handlungsfelder zur Minderung der Treibhausgasemissionen im Sektor Landwirtschaft

3.8 Forstwirtschaft

Die Forstwirtschaft gehört zur Quellgruppe LULUCF (Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft). Fast die gesamten Emissionen aus LULUCF entstehen aus dem Auf- und Abbau von Kohlenstoffspeichern. Die Veränderungen erfolgen sowohl unter gleich bleibender Landnutzung (z. B. landwirtschaftliche Nutzung von Moorböden) als auch durch Landnutzungsänderung (z. B. Umwandlung von Grünland in Ackerland).

In der Emissionsberichterstattung Hessens (Treibhausgasbilanz 2011) ist die Quellgruppe LULUCF nicht in der Berechnung enthalten. Das bedeutet, dass sowohl die Emissionen aus Landnutzungsänderungen als auch die Senken aus Wald und Boden nicht berücksichtigt werden (vgl. Abschnitt 2.3, Sektor Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft). In Deutschland ist es bis zum Jahr 2050 das Ziel, die Emissionen aus LULUCF auf null zu senken⁵⁵ [Thünen 2013]. Nachfolgend werden die mit den Wäldern verbundenen THG-Emissionen berücksichtigt.⁵⁶ Diese werden größtenteils bestimmt durch die Einbindung und Freisetzung von CO₂:

- in ober- und unterirdischer Biomasse,
- in mineralische Böden,
- aus Streu und
- aus Totholz.

⁵⁵ Tatsächlich werden auch im Jahr 2050 noch Emissionen auftreten, da davon auszugehen ist, dass nicht alle Moorflächen vollständig restauriert werden können und die Kalkung landwirtschaftlicher Böden zur Aufrechterhaltung der Bodenfruchtbarkeit notwendig ist [Thünen 2013].

⁵⁶ Durch das Thünen-Institut werden die Emissionen aus LULUC (ohne Wälder) für die Landnutzungskategorien Ackerland, Grünland, Feuchtgebiete und Siedlungen geschätzt. Insgesamt ist die Schätzung als höchst unsicher (>100 %) einzustufen.

Die CO₂-Emissionen aus der Kalkung sind im Bereich Landwirtschaft berücksichtigt.⁵⁷ Die THG-Emissionen aus Waldbrand (CO₂, CH₄, N₂O) und aus der Drainage organischer Böden (N₂O) werden vernachlässigt. Diese Quellen tragen nur einen sehr geringen Anteil zur Treibhausgasbilanz der Wälder bei.

Grundlagen

Die Daten zur Kohlenstoffbilanz aus Wäldern wurden dem Nationalen Inventarbericht (NIR) für Deutschland entnommen [UBA 2014a]. Für Hessen liegen keine entsprechenden länderspezifischen Daten vor. Im Rahmen der Bundeswaldinventuren werden die Kohlenstoffvorräte periodisch erfasst (BWI 2002 und BWI 2012). Für das Jahr 2008 steht zudem eine Inventurstudie [Thünen 2011] zur Verfügung. Durch die Berechnung der Änderungen der Kohlenstoffvorräte für die Biomasse erhält man einen durchschnittlichen Emissionsfaktor⁵⁸ für die Zeiträume zwischen den jeweiligen Jahren. Veränderungen bei der Holznutzung und bei der Altersstruktur der Wälder führen zu sprunghaften Veränderungen bei den CO₂-Einbindungen. Im NIR-Bericht sind für das Jahr 2012 für Deutschland die Einbindung von CO₂ aus dem Zuwachs an Phytomasse und in mineralischen Böden sowie die Freisetzung von CO₂ aus Totholz und Streu (Humus) angegeben [UBA 2014a]. Die sich daraus ergebenden spezifischen Faktoren (bezogen auf die Waldfläche) werden auf Hessen übertragen - unabhängig von Baumartenzusammensetzung, Altersstruktur

⁵⁷ Der Anteil der Forstwirtschaft an den insgesamt ausgebrachten Düngerkalkmengen betrug in Deutschland im Jahr 2013 etwa 3,5 % [Thünen 2015a]. Angaben zu Hessen liegen nicht vor.

⁵⁸ Die Einbindung von CO₂ in Biomasse ist durch einen negativen Wert gekennzeichnet.

tur der Wälder, stofflicher Nutzung etc. Die Daten zu den Waldflächen sind durch das Hessische Statistische Landesamt zur Verfügung gestellt worden.

Historie

Die Bilanz für die Wälder in Hessen ergab für das Jahr 2014 eine CO₂-Senke von etwa -3,9 Mio. t CO_{2äq}, d. h. der Wald Hessens war insgesamt ein Kohlenstoffspeicher. Die Kohlenstoffeinbindungen in Biomasse (-3,5 Mio. t CO_{2äq}) und mineralische Böden (-0,7 Mio. t CO_{2äq}) überwogen deutlich die Kohlenstofffreisetzungen aus Totholz (0,2 Mio. t CO_{2äq}) und Streu (0,1 Mio. t CO_{2äq}).⁵⁹ Zwischen 1990 und 2014 sind die jährlichen Kohlenstoffeinbindungen im Wald durch eine zunehmende Holznutzung bei nahezu unveränderter Waldfläche um 26 % (1,4 Mio. t CO_{2äq}) zurückgegangen. In Abbildung 34 ist die jährliche Kohlenstoffbilanz als Saldo aus Einbindung und Freisetzung seit 1990 und im Trend- und Zielszenario bis 2050 dargestellt.

Trend und Ziel

Für eine mögliche Entwicklung der Kohlenstoffbilanz der Wälder in Hessen werden sowohl für das Trend- als auch Zielszenario die gleichen Annahmen⁶⁰ getroffen:

⁵⁹ Angegeben sind die jährlichen Änderungen durch Kohlenstoffeinbindung und -freisetzung.

⁶⁰ Zur Berechnung der Wirkung von Maßnahmen und ihrer Umsetzungsmöglichkeiten stehen für den Forstsektor keine Projektionen zur Verfügung. Nach [UBA 2014a] werden zur weiteren Waldentwicklung und dem Holzbedarf in Deutschland die Szenarien des Thünen-Instituts (WEHAM) bis 2040 verwendet. Es wurden drei verschiedene Szenarien untersucht (1. Waldbewirtschaftung wie bisher, 2. Verlängerung der Umtriebszeiten mit einer Reduktion des Holzeinschlags, 3. kürzere Umtriebszeit, d. h. intensivere Nutzung). Unabhängig von der Wahl des Szenarios und der unterschiedlichen Entwicklung in den Zwischenjahren schwankt die Emissions-/Einbindungsbilanz der deutschen Wälder im Jahr 2040 nur wenig um die Nulllinie [UBA 2014a]. Daher

- die Waldfläche bleibt zwischen 2014 und 2050 unverändert (angesichts einer Abnahme der landwirtschaftlichen Nutzfläche bis 2050 wird davon ausgegangen, dass keine weiteren Flächen zur Aufforstung zur Verfügung stehen),
- eine Optimierung der nachhaltigen Waldbewirtschaftung (Verlängerung der Umtriebszeiten etc.),
- nachhaltige Holznutzung aufgrund der steigenden Nachfrage nach Holz
- die Bindung von CO₂ in Holzprodukten (langfristige Verwendung von Holz in einer langen Wertstoffkaskade)
- Energieholz wird nicht extra bereitgestellt, da dieses das Ende der Nutzungskaskade kennzeichnet
- die Verwendung von Holz als Substitution von energieintensiven Materialien wie Aluminium, Stahl, Kunststoffen, Beton etc.

Mögliche Änderungen in der Baumartenzusammensetzung durch Einwuchs von Bäumen aus der Verjüngung finden keine Berücksichtigung. Unter den beschriebenen Annahmen werden der jährliche Holzzuwachs und die Holznutzung bis zum Jahr 2050 ausgeglichen sein. Die Bilanz aus jährlicher Einbindung und Freisetzung von CO₂ geht auf null zurück (vgl. Abbildung 34), d. h. der Wald wird dann keine CO₂-Senke mehr sein.

wurde auf eine Differenzierung zwischen Trend- und Zielszenario verzichtet.

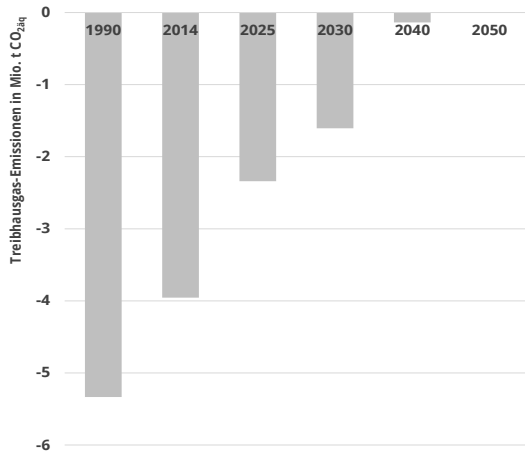


Abbildung 34 Sektor Forstwirtschaft: THG-Emissionen – Historie, Trend- und Zielszenario
Quelle: Prognose und Darstellung IE Leipzig

Nicht bilanzwirksam im eigentlichen Sinne, aber einen hohen Einfluss auf den Klimaschutz haben jedoch die langfristige Bindung von CO₂ in Holzprodukten und die (gleichzeitige) Substitution von energieintensiven Materialien durch Holz. Im Vergleich zur direkten Speicherung spart die Substitution ein Vielfaches an CO₂ ein. Die direkte Speicherung in Holzprodukten ist nach oben hin begrenzt und wird zu einem bestimmten Zeitpunkt einen Sättigungspunkt erreichen, an dem sich der Eintrag und der Austrag

die Waage halten werden. Holzproduktspeicher lassen sich nicht grenzenlos ausweiten. Während die direkte Speicherung gleichzeitig neben neuen Einträgen einen Abbau verzeichnet, bauen sich Substitutionseffekte ständig auf [LWF 2012].

Zusammenfassung

In der Kohlenstoffbilanz der Wälder werden die Kohlenstoffeinbindungen in Biomasse und mineralische Böden sowie die Kohlenstofffreisetzungen aus Streu und Totholz berücksichtigt.

Zwischen 1990 und 2014 ist die jährliche Kohlenstoffeinbindung um 26 % von -5,3 auf -3,9 Mio. t CO₂eq zurückgegangen. Im Zielszenario wird bis zum Jahr 2050 erwartet, dass die Bilanz aus jährlicher Einbindung und Freisetzung von Kohlenstoff im Wald auf null zurückgeht, d. h. der Wald ist keine CO₂-Senke mehr. Allerdings erfolgen eine für den Klimaschutz bedeutsame (jedoch nicht bilanzwirksame) Speicherung von CO₂ in Holzprodukten und die Substitution von energieintensiven Materialien durch Holz. Die damit verbundenen Aktivitäten in den Handlungsfeldern werden eher langfristig gesehen (siehe Tabelle 26).

Handlungsfelder bis 2020/25	Handlungsfelder bis 2050
<ul style="list-style-type: none"> Nachhaltige Waldbewirtschaftung Reduzierung der Emissionen durch Verlängerung der Umtriebszeiten Ausbau der Wertstoffkaskade für eine langfristige Verwendung von Holz 	<ul style="list-style-type: none"> Bindung von CO₂ in Holzprodukten (nicht bilanzwirksam) Verwendung von Holz als Substitution von energieintensiven Materialien (nicht bilanzwirksam)

Tabelle 26 Empfohlene Handlungsfelder im Sektor Forstwirtschaft

3.9 Übrige Verbraucher

In den Sektor der übrigen Verbraucher gehören die folgenden Quellkategorien:

- Emissionen aus dem Verbrauch von halogenierten Kohlenwasserstoffen und Schwefelhexafluorid (CRF 2.F):
HFKW-, FKW- und SF₆-Emissionen
- Abfall und Abwasser (CRF 6.A/6.B/6.D):
CH₄- und N₂O-Emissionen
- Produktanwendungen (CRF 3.D):
N₂O-Emissionen

Emissionen aus dem Verbrauch von halogenierten Kohlenwasserstoffen (HFKW/HKW) und Schwefelhexafluorid (SF₆)

Auf Landesebene stehen derzeit noch keine Daten zu den Emissionen der F-Gase (HFKW, FKW und SF₆) zur Verfügung. Auf Grundlage der im NIR für Deutschland dokumentierten Angaben [UBA 2014b] zu den Emissionen von FKW, HFKW und SF₆ wurde in einem einfachen Verfahren unter Nutzung entsprechender Indikatorgrößen (F-Gase je Einwohner) die entsprechenden Emissionen für Hessen abgeleitet. Die Emissionen von F-Gasen stellen somit eine erste grobe Indikation für Hessen dar, zukünftig wäre eine bundesländerübergreifende einheitliche Regionalisierung durch die UGRdL wünschenswert.

Innerhalb dieser Quellenkategorie werden die Emissionen von HFKW, FKW und SF₆ (F-Gase) aus folgenden Prozessen und Anlagen behandelt:

- Kälte- und Klimaanlage (2.F.1)
- Schaumherstellung (2.F.2)
- Feuerlöschmittel (2.F.3)
- Aerosole (2.F.4)
- Lösemittel (2.F.5)

- Andere ODS-Ersatzstoff-Anwendungen (2.F.6)
- Halbleiterproduktion (2.F.7)
- Elektrische Betriebsmittel (2.F.8)
- Sonstige Anwendungen (2.F.9)

Die massivste Quelle für HFKW-Emissionen stellt die Verwendung von Kältemitteln in stationären und mobilen Klimaanlage dar, während die FKW-Emissionen vorwiegend aus der Halbleiterindustrie und ebenfalls zu einem großen Teil aus Kälte- und Klimaanlage stammen. SF₆-Emissionen resultieren in erster Linie aus der Entsorgung von Schallschutzscheiben, gefolgt von der Herstellung elektrischer Betriebsmitteln.

Halogenierte Kohlenwasserstoffe (HFKW/HKW) und Schwefelhexafluorid (SF₆) wurden einerseits in so genannten „offenen Anwendungen“ vollständig und noch im selben Jahr emittiert. Andererseits gibt es auch Anwendungen, bei denen es zu großen Speichermengen – so genannte „stocks“ – kommt, wobei diese Treibhausgase über die gesamte Nutzungsphase und bei der Entsorgung entweichen. Somit ist die Angabe eines gemittelten THG-Emissionsfaktors nicht möglich und wenig sinnvoll, zumal die zahlreichen verschiedenen HFKW und FKW sehr unterschiedliche GWP-Werte aufweisen.

Kälte- und Klimaanlage: Der Bereich Kälte- und Klimaanlage ist in folgende Untergruppen aufgeteilt:

- Haushaltskälte
- Gewerbekälte
- Transportkälte
- Industriekälte
- Stationäre Klimaanlage
- Mobile Klimaanlage

In Deutschland werden innerhalb dieser Untergruppen mit Abstand am häufigsten die HFKW-Kältemittel HFKW-134a sowie die Gemische R404A, R407c und R507A eingesetzt.

Schaumherstellung: Bei der Herstellung von Schäumen werden seit dem Jahr 1993 HFKW als Ersatz für die Ozonschicht schädigenden FCKW und HFCKW als Treibmittel für PU-Hartschaum, PU-Integralschaum, PU-Montage-schaum (OCF) und XPS-Dämmschaum eingesetzt.

Feuerlöschmittel: HFKW-227ea wurde 1998 in Deutschland als Halonersatz zugelassen, da Halon die Ozonschicht schwer schädigt. Seit 2001 wird HFKW-236fa ausschließlich im militärischen Bereich und allgemein HFKW-23 seit 2005 eingesetzt, wobei die HFKW-Feuerlöschmittel importiert und in Deutschland in Anlagen eingefüllt werden.

Lösemittel: Bis zum Jahr 2001 war der Einsatz von HFKW nach der 2. BImSchV verboten und ist auch gegenwärtig stark eingeschränkt. Ein Einsatz der als Lösemittel üblichen HFKW-4310mee, HFKW-245fa und C₆F₁₄ muss bei jeder Anwendung beantragt werden und wird i.d.R. nur im Sonderfall bewilligt.

Halbleiterproduktion: Im Fertigungsprozess der Halbleiterindustrie werden HFKW (CHF₃), FKW (CF₄, C₂F₆, C₃F₈, c-C₄F₈), NF₃ und SF₆ emittiert, da diese Gase zum Strukturätzen dünner Schichten und zum Reinigen der Reaktionskammern nach dem CVD-Prozess (Chemical Vapour Deposition) eingesetzt werden.

Elektrische Betriebsmittel: SF₆ findet in der Stromübertragung und -verteilung als Lösch- und Isoliermittel vor allem in Schaltanlagen der Hochspannungs- und Mittelspannungsebene Verwendung. Zudem wird

es bei der Herstellung von Komponenten in gasisolierten Innenraum-Schaltanlagen eingesetzt. Erstmals wurde SF₆ im Berichtsjahr 2002 auch für weitere Anwendungen erfasst, so dass es ab da in der Zeitreihe einen sprunghaften Anstieg zu verzeichnen gibt.

Sonstige Anwendungen: Diese Emittentengruppe umfasst die Anwendungen von SF₆ bei der Herstellung von Isolierglasfenstern, Autoreifen, Sportschuhen, optischen Glasfasern, Photovoltaik- und ORC-Anlagen sowie beim Schweißen und bei der AWACS-Wartung.

THG-Emissionen – Historie und Szenarien

In Abbildung 35 ist die bisherige Entwicklung der F-Gas-Emissionen seit 1990 sowie die zukünftige Entwicklung gemäß Trend- und Zielszenario dargestellt. Die HFKW-Emissionen sind seit dem Jahr 1990 sehr stark angestiegen, was damit zu begründen ist, dass F-Gase insbesondere im Bereich Kälte- und Klimaanlage als Ersatzstoffe für ozonschichtschädigende Substanzen (FCKW und Halone) entwickelt und eingeführt wurden [UBA 2015f]. Im Trendszenario wird davon ausgegangen, dass diese Emissionen bis zum Jahr 2020 absinken und dann konstant bleiben. Im Zielszenario wird hingegen vorgesehen, dass die HFKW-, FKW- und SF₆-Emissionen insgesamt um ca. 90 % abgesenkt werden. Dies soll insbesondere durch eine massive Verschärfung des Ordnungsrechts zur Vermeidung von HFKW, FKW und SF₆ erreicht werden, wobei der Einsatz von HFKW in mobilen Kälteanlagen (Fahrzeuge) sowie in der privaten und gewerblichen Kältebereitstellung ordnungsrechtlich ausgeschlossen werden. Weiterhin ist ein Verbot von HFKW bei der Herstellung von PU-Schaumprodukten, XPS-Hartschäumen und Aerosolen (Dossier- und technische Aerosole) vorgesehen.

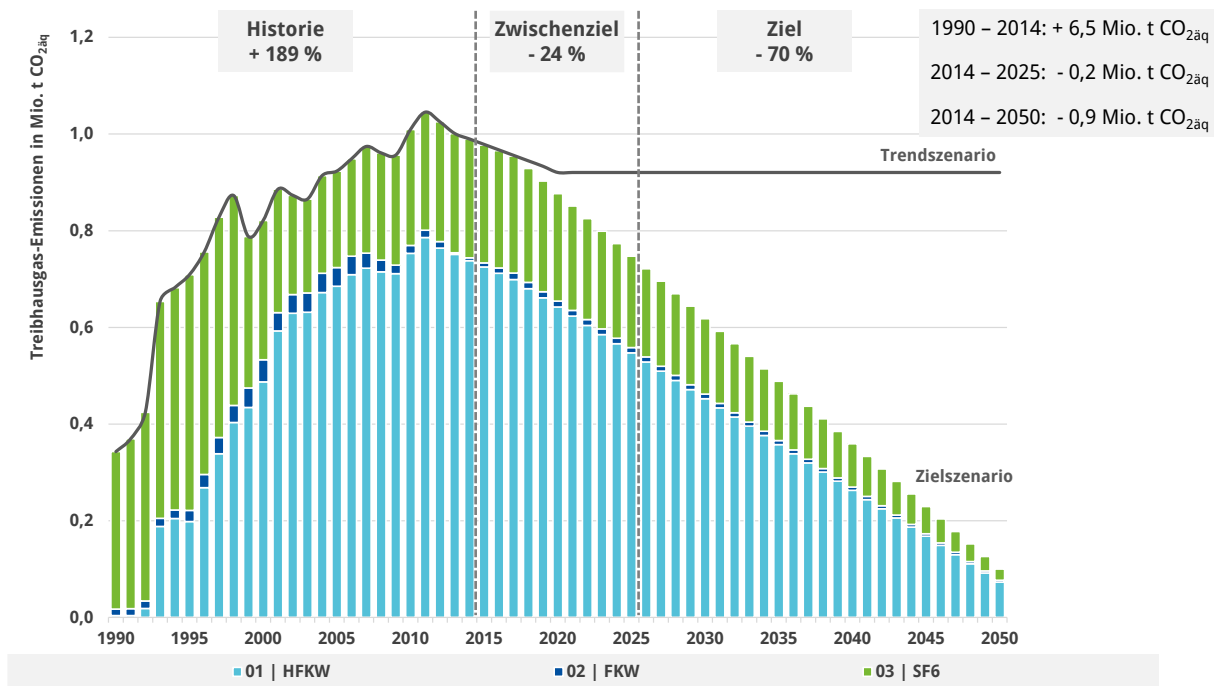


Abbildung 35 F-Gase: THG-Emissionen – Historie, Trend- und Zielszenario (Quellenbilanz)

Quelle: [UBA 2014b] [HSL 2015f] [UBA 2015f], Berechnung und Darstellung: IE Leipzig, Normierung der Treibhausgase (CO₂, CH₄, N₂O, F-Gase) in CO₂äq-Emissionen mittels GWP_{SAR}-Werte

Auch wenn die Verwendung von HFKW unabdingbar ist, gilt zudem ein Nachfüll- und Erstverfüllverbot für HFKW mit einem GWP-Wert über 2.500 ab dem Jahr 2020; das betrifft vor allem die Kältemittel R404A (GWP-Wert: 3.922) und R507A (GWP-Wert: 3.985). Außerdem sollen bisherige Regelungen zur Dichtungsprüfung, Zertifizierung, Entsorgung und Kennzeichnung konsequent fortgeführt und ergänzt werden. Die SF₆-Emissionen können vor allem durch eine Verwendung von Ersatzstoffen, wie elementares Fluor (F) oder Chlortrifluorid (ClF₃), gemindert werden [UBA 2015f].

Ein Teil dieser Anforderungen ist bereits in der EU-Verordnung Nr. 517/2014 (F-Gase-Verordnung) verankert. Ergänzend dazu wurde in Deutschland die

Chemikalien-Klimaschutzverordnung (ChemKlimaschutzV) erlassen, welche infolge des Inkrafttretens der neuen F-Gase-Verordnung überarbeitet werden muss [USN 2015].

Abfall und Abwasser

Nachfolgend werden die Emissionen aus folgenden Bereichen dargestellt:

- Abfalldponie (NFR 6.A)
- Kommunales Abwasser (NFR 6.B.2)
- Kompostierungsanlagen (NFR 6.D.1)

Die Emissionen aus der Abfallverbrennung (CRF 6.C) werden in der Quellkategorie (CRF 1.A.1) im Sektor Energieumwandlung und -verteilung berücksichtigt,

da Abfälle vollständig energetisch verwertet werden. Die Emissionen aus der industrieller Abwasserbehandlung (CRF 6.B.1) werden aufgrund der unzureichenden Datenlage für Hessen nicht berücksichtigt.

Kommunale Abwasserbehandlung: Die Behandlung der Abwässer erfolgt in der Regel unter aeroben Bedingungen in kommunalen Kläranlagen bzw. Kleinkläranlagen. Unter diesen Bedingungen treten keine Methan-Emissionen (CH_4) auf. In sehr wenigen Fällen werden die Abwassermengen von Einwohnern nicht direkt in die Kanalisation bzw. Kleinkläranlagen eingeleitet, sondern bis zum Abtransport in ein Klärwerk in Gruben gesammelt. Dabei können teil-weise unkontrollierte Prozesse (teils aerob, teils anaerob) ablaufen, die zur Methanbildung führen [UBA 2014b].

Der bei der Abwasserbehandlung anfallende Schlamm wird entweder aerob im Rahmen der Abwasserbehandlung (es entsteht kein Methan) oder im Nachgang anaerob im Faulturn stabilisiert. Das entstehende Faulgas wird energetisch in Blockheizkraftwerken genutzt oder in Einzelfällen abgefackelt, wobei keine relevanten Methanemissionen in die Umwelt gelangen. Die zur Schlammstabilisierung genutzte offene Schlammfäulung, die zur Emission von CH_4 führte, wurde schrittweise reduziert und 1994 eingestellt [UBA 2014b].

Nach Entwässerung und Stabilisierung wird der Klärschlamm entweder thermisch entsorgt (und energetisch genutzt) oder stofflich verwertet, insbesondere in der Landwirtschaft. Die entsprechenden Emissionen werden in den Kapiteln 4 (Industrie und Gewerbe) und 7 (Landwirtschaftliche Flächen) berichtet.

Die CH_4 -Emissionen aus abflusslosen Gruben werden aus organischer Fracht (60 g BSB5 pro Einwohner),

Methanbildungspotenzial (0,6 kg CH_4 /kg BSB5) und temperaturabhängigen Konversionsfaktor (0,173) entsprechend der IPCC Methode berechnet [UBA 2014b].

Abfallkompostierung: Bei der Kompostierung organischer Abfälle (NFR 6.D.1) entstehen, bedingt durch den mikrobiellen Abbau der Ausgangsmaterialien, als treibhausrelevante Gase Methan (CH_4), Distickstoffmonoxid (N_2O) sowie Ammoniak (NH_3).

Die in Kompostierungsanlagen verwerteten Abfallmengen werden regelmäßig getrennt nach Bioabfällen und Grünabfällen (Garten- und Parkabfällen) erfasst [HSL 2015c].

Die Emissionsfaktoren basieren auf einer Studie des Witzhausen-Instituts für Abfall, Umwelt und Energie, die im Auftrag des Umweltbundesamtes durchgeführt wurde [UBA 2010b]. Die Unsicherheiten der Emissionsfaktoren sind hoch und hängen u. a. von dem Kompostierungsverfahren (offene oder geschlossene Anlagen), der Zusammensetzung der Abfälle, dem Rottegrad des Kompostes, der Sauerstoffversorgung und -verteilung, der Miettemperatur sowie der Wirkung der eingesetzten Biofilter ab. Im Rahmen der Vorstudie wurden folgende CH_4 - und N_2O -Emissionsfaktoren gemäß [UBA 2014b] verwendet:

- Bioabfall: 2,50 kg CH_4 /t | 83,0 g N_2O /t
- Grünabfall: 3,36 kg CH_4 /t | 60,3 g N_2O /t

Abfalldeponie: Bei Deponien handelt es sich um Entsorgungsanlagen, auf denen umweltschädliche Abfälle, die nicht wiederverwertet werden können, endgelagert werden. Im Gegensatz zu herkömmlichen Müllhalden sind Deponien baulich und technisch so dimensioniert, dass die Umwelt infolge der Ablagerung dieser Abfälle möglichst wenig geschädigt wird.

Gemäß der Regelungen der Deponieverordnung müssen alle Abfälle in Deutschland mit einem höheren organischen Anteil von 5 % vor der Ablagerung behandelt. Seit 2005 dürfen auf Hausmülldeponien nur noch vorbehandelte Abfälle aufgenommen werden, deren organische Bestandteile nahezu vollständig entfernt wurden [DepV 2009].

Innerhalb der Deponieverordnung (DepV) sind für die oberirdische Ablagerung, je nach Gefährlichkeit der abzulagernden Abfälle, folgende fünf Deponieklassen (DK) vorgesehen [DepV 2009]:

- Deponie für Inertabfälle DK 0: gering belastete mineralische Abfälle
- Deponie für nicht gefährliche Abfälle DK I: mineralische Abfälle mit sehr geringem organischen Anteil
- Deponie für nicht gefährliche Abfälle DK II: mineralische Abfälle mit geringem organischen Anteil
- Deponie für gefährliche Abfälle DK III
- Untertagedeponie DK IV

Bei DK 0 handelt es sich um oberirdische Deponien für Inertabfälle, wie z.B. unbelasteten Bauschutt und Boden. Solche Deponien müssen eine mindestens 1 m dicke geologische Barriere sowie eine mineralische Entwässerungsschicht (Dicke: 30 cm) aufweisen.

DK I sind oberirdische Deponien für Abfälle mit sehr geringem organischem Anteil, bei denen nur eine sehr geringe Schadstofffreisetzung im Auslaugversuch stattfindet.

Bei DK II handelt es sich um so genannte Hausmülldeponien, welche höhere Schadstoffbelastungen vertragen als DK I. Im Vergleich zu DK I muss zusätzlich eine zweite Abdichtungskomponente von 50 cm

Dicke vorhanden und die mineralische Entwässerungsschicht mindestens 50 cm dick sein.

DK III stellen oberirdische Deponien für gefährliche Abfälle dar, zu denen auch Sonderabfälle mit besonderem Überwachungsbedarf gehören. Über eine geologische Barriere von mindestens 5 m Dicke hinaus ist ein Dichtungskontrollsystem vorgeschrieben, um Leckagen rechtzeitig erkennen und beseitigen zu können.

DK IV sind Untertagedeponien für gefährliche Abfälle, welche entweder in einem Bergwerk mit eigenständigem Ablagerungsbereich (getrennt von der Mineralgewinnung) oder in einer Kaverne vollständig im Gestein eingeschlossen abgelagert werden.

THG-Emissionen – Historie und Szenarien

Das Statistische Landesamt Hessen veröffentlicht Umweltdaten, in denen u.a. die Anzahl der Einwohner mit Anschluss an eine Kläranlage bzw. an die Kanalisation aufgeführt sind [HSL 2015c]. Zudem werden in den jährlich erscheinenden Treibhausgasbilanzen jeweils die CH₄- und N₂O-Emissionen aus der Abwasserbeseitigung veröffentlicht [HSL 2015h] [UGRdL 2014].

In den jährlich erscheinenden Treibhausgasbilanzen des Statistischen Landesamtes Hessen werden jeweils die CH₄-Emissionen aus der Abfalldeponie veröffentlicht, welche entsprechend dem Referenz- und Innovationsszenario aus [Öko-I/prognos 2009] ab dem Jahr 2011 fortgeschrieben wurden. N₂O wird bei Abfalldeponien nicht emittiert.

Bei der Abfallkompostierung wurde im Rahmen der Vorstudie der Ansatz gewählt, die Treibhausgasemissionen mittels Aktivitätsrate und der zuvor aufgeführten Emissionsfaktoren zu ermitteln. Bei der Fort-

schreibung des Abfallaufkommens wird davon ausgegangen, dass sich die aufkommende Abfallmenge entsprechend der Bevölkerungsprognose entwickelt. Im Fall des Bioabfalls wird dabei berücksichtigt, dass sich in der Vergangenheit das Verhältnis von Abfallaufkommen zu Bevölkerung stetig leicht erhöht hat.

In Abbildung 36 sind Historie sowie Trend und Ziel im Bereich Abfall und Abwasser dargestellt.

Bei der **Abwasserbeseitigung** ist ein Anstieg der CH₄- und N₂O-Emissionen von 173.000 t CO_{2äq} im Jahr 1990 auf 204.539 t CO_{2äq} im Jahr 2014 zu verzeichnen. Im Trendszenario wird von einem leichten Rückgang auf 169.959 t CO_{2äq} und im Zielszenario auf 127.404 t CO_{2äq} im Jahr 2050 ausgegangen. Eine Vermeidung von Emissionen auf diesem Gebiet ist nahezu ausgeschlossen. Eine geringfügige Minderung kann jedoch durch aktive Förderung von Wasser sparenden Armaturen, Geräten und Anlagen erreicht werden.

Der größte Anteil der THG-Emissionen im Bereich Abfall und Abwasser wird durch die **Abfalldeponie** verursacht, wobei diese bereits in der Historie sehr stark gesunken sind (1990: 206.258 t CO_{2äq} / 2014: 30.281 t CO_{2äq}). Dies ist auf die steigenden Anforderungen bei der Deponierung unbehandelter organischer Abfälle zurückzuführen. Seit 2005 gilt dafür ein bereits wirksames Deponieverbot. Entsprechend sind Referenz- und Zielszenario in diesem Falle identisch. Bis zum Jahr 2050 werden die CH₄-Emissionen auf lediglich noch 2.123 t CO_{2äq} gesenkt.

Die THG-Emissionen aus der **Abfallkompostierung** machen hingegen in der Historie den geringsten Anteil aus und sind wegen der wachsenden Bevölkerungszahl von 87.887 t CO_{2äq} im Jahr 1990 auf

126.818 t CO_{2äq} im Jahr 2014 gestiegen. Im Trendszenario wird von einem leichten Rückgang auf 102.942 t CO_{2äq} und im Zielszenario auf 34.868 t CO_{2äq} im Jahr 2050 ausgegangen. Dies lässt sich in erster Linie durch Müllvermeidung und -verwertung erreichen, aber auch durch die Sammlung des entstehenden Faulgases in Gasgewinnungsanlagen und dessen energetische Nutzung als Biogas.

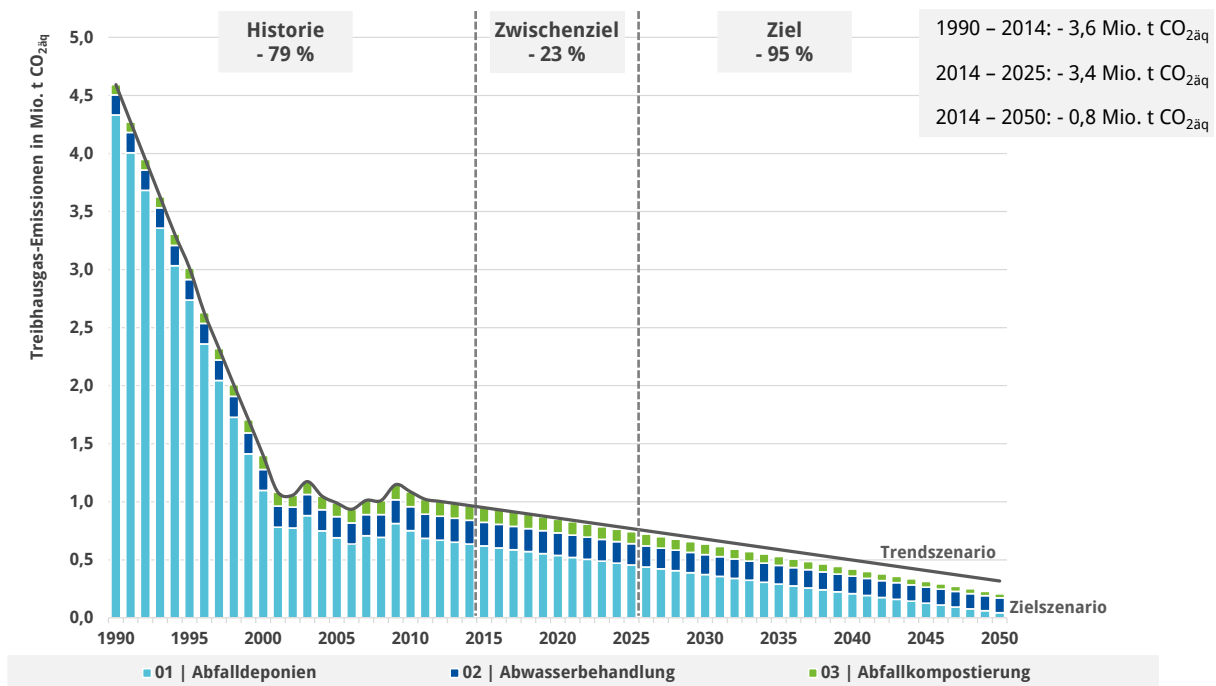


Abbildung 36 Abfall und Abwasser: THG-Emissionen – Historie, Trend- und Zielszenario (Quellenbilanz)

Quelle: [HSL 2015h] [UGrDL 2014] [UBA 2014b] [UBA 2010b], Berechnung und Szenario IE Leipzig, Normierung der Treibhausgase (CO₂, CH₄, N₂O, F-Gase) in CO₂äq-Emissionen mittels GWP_{SAR}-Werte

Produktanwendung

Die Emittentengruppe Prozesse und Produktanwendungen (CRF 3.D) umfasst die N₂O-Emissionen aus der Anwendung von Narkosemitteln, Sprühdosen und Sprengstoffen.

Lachgas (N₂O) wird in der **Medizin** als analgetisch wirkendes Gas zu Narkosezwecken eingesetzt, wobei es mit reinem Sauerstoff (O₂) im Verhältnis 70 % N₂O und 30 % O₂ gemischt wird. Der Einsatz von N₂O ist bislang in diesem Bereich nicht verboten, es gibt jedoch Bestrebungen in der deutschen Medizin gegen dessen allgemeine Verwendung.

In der **Lebensmittelindustrie** wird N₂O als Zusatzstoff (E 942) bzw. Treibgas verwendet, um Lebens-

mittel unter Druck aus ihren Behältern zu pressen. Dabei kommt es zur Aufschäumung oder zur Herstellung einer cremigen Konsistenz. Zum Beispiel werden Sahne aus Sprühdosen, Quark, Fertigpudding u.a. mit N₂O versetzt.

Außerdem entstehen N₂O-Emissionen bei dem militärischen und gewerblichen Einsatz von **Sprengstoffen**; vorwiegend bei der Detonation von ammoniumnitrathaltigen und Emulsionssprengstoffen. Zwar entstehen bei der Herstellung von Sprengstoffen keine N₂O-Emissionen, jedoch können diese bei deren thermischen Zersetzung freigesetzt werden, da beim thermischen Zerfall von Ammoniumnitrat (H₄N₂O₃) Lachgas (N₂O) und Wasser (H₂O) gebildet wird.

THG-Emissionen – Historie und Szenarien

Wie in Abbildung 37 zu sehen ist, machen die N₂O-Emissionen aus der Anwendung von Narkosemitteln den mit Abstand größten Anteil unter den THG-Emissionen aus. Aber bereits in der Historie sind die erfolgreichen Bestrebungen, N₂O in diesem Bereich zu vermeiden, erkennbar. Daher sanken die N₂O-Emissionen von 143.550 t CO_{2äq} im Jahr 1990 auf 23.839 t CO_{2äq} im Jahr 2014. Dies wird sich in Zukunft weiter verstärken. Im Trendszenario werden diese THG-Emissionen weiter bis auf 20.881 t CO_{2äq} und im Zielszenario bis auf 12.460 t CO_{2äq} im Jahr 2050 gesenkt. Möglich wird

dies u.a. durch eine Absaugung des anästhetischen Gases mit anschließender Adsorption und katalytischer Zersetzung des N₂O (Dekompensation) in Stickstoff (N₂) und Sauerstoff (O₂). Es besteht zudem die Möglichkeit, N₂O durch intravenöse Anästhetika, wie Halotan (C₂HBrClF₃) und Xenon (Xe), zu ersetzen. Im Bereich der Sprengstoffe könnte es darüber hinaus zum Ersatz von Ammoniumnitrat-Sprengstoffen und im Bereich der Sprühdosen zum Einsatz alternativer Treibmittel anstelle von N₂O kommen.

Jedoch spielen die Produktanwendungen in der Emittentengruppe „Übrige Verbraucher“ hinsichtlich ihrer THG-Emissionen nur eine untergeordnete Rolle.

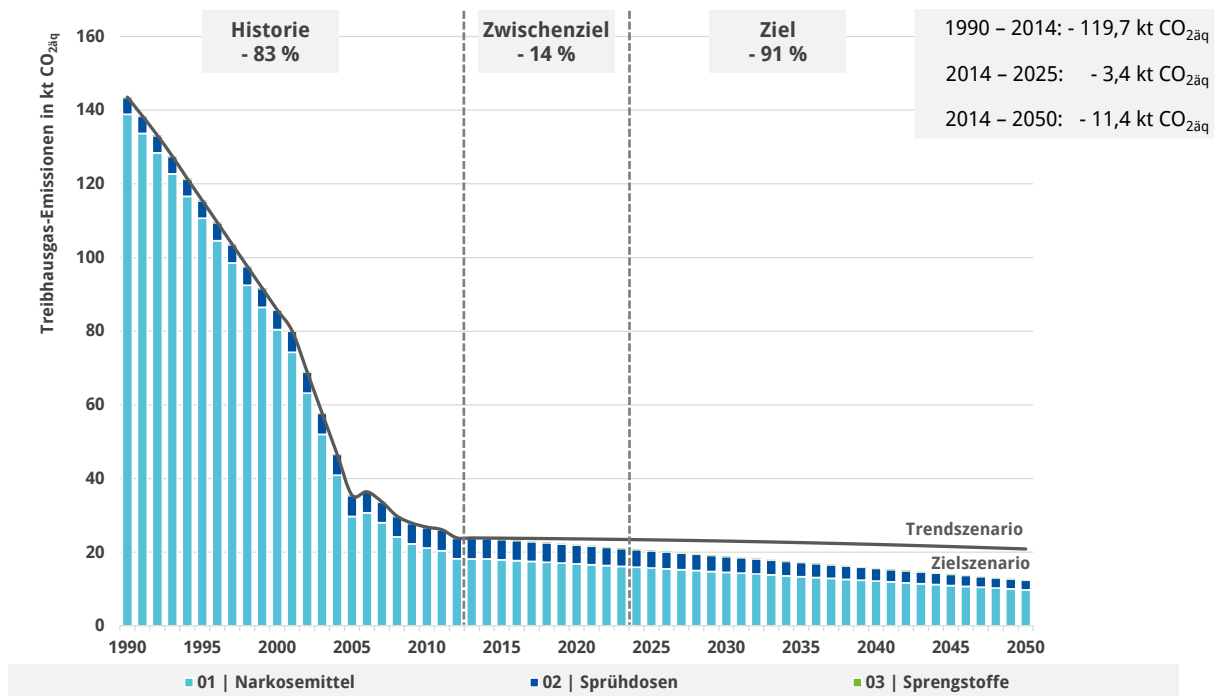


Abbildung 37 Produktanwendungen: THG-Emissionen – Historie, Trend- und Zielszenario (Quellenbilanz)

Quelle: [UBA 2014b] [HSL 2015f], Prognose und Darstellung: IE Leipzig, Normierung der Treibhausgase (CO₂, CH₄, N₂O, F-Gase) in CO_{2äq}-Emissionen mittels GWP_{SAR}-Werte

Zusammenfassung

Die THG-Emissionen setzen sich im Sektor „Übrige Verbraucher“ aus den Bereichen „Abfall und Abwasser“ (NFR 6), „Produktanwendungen“ (NFR 3.D) und „Nutzung F-Gase“ (NFR 2.F) zusammen. In der Vergangenheit dominierten in dieser Emittentengruppe besonders die CH₄-Emissionen aus der Abfalldeponierung, welche jedoch wegen des seit 2005 geltenden Deponieverbots für unbehandelte organische Abfälle bereits in der Historie stark abgesunken sind. Dafür spielen, wegen des Ersatzes ozonschichtschädigender FCKW und Halone durch HFKW und HFW, die F-Gas-Emissionen in der Gegenwart eine umso größere Rolle. Im Trendszenario werden diese weitgehend stagnieren, während im Zielszenario eine starke Sen-

kung mittels massiver Verschärfungen des Ordnungsrechts zur Vermeidung von HFKW, FKW und SF₆ unterstellt wird.

Insgesamt sinken die THG-Emissionen des Sektors „Übrige Verbraucher“ im Trendszenario von 5,08 Mio. t CO_{2äq} im Jahr 1990 auf 1,65 Mio. t CO_{2äq} (Absenkung um 68 %) und im Zielszenario auf 0,32 Mio. t CO_{2äq} (Absenkung um 94 %) bis zum Jahr 2050. Um den langfristigen Zielpfad 2050 zu erreichen, sollte als Zwischenziel bis zum Jahr 2025 eine Reduktion der durch die übrigen Verbraucher verursachten THG-Emissionen auf 1,5 Mio. t CO_{2äq} (-70 % gegenüber 1990) angestrebt werden.

Die Handlungsfelder zur Minderung der THG-Emissionen sind in Tabelle 27 aufgeführt.

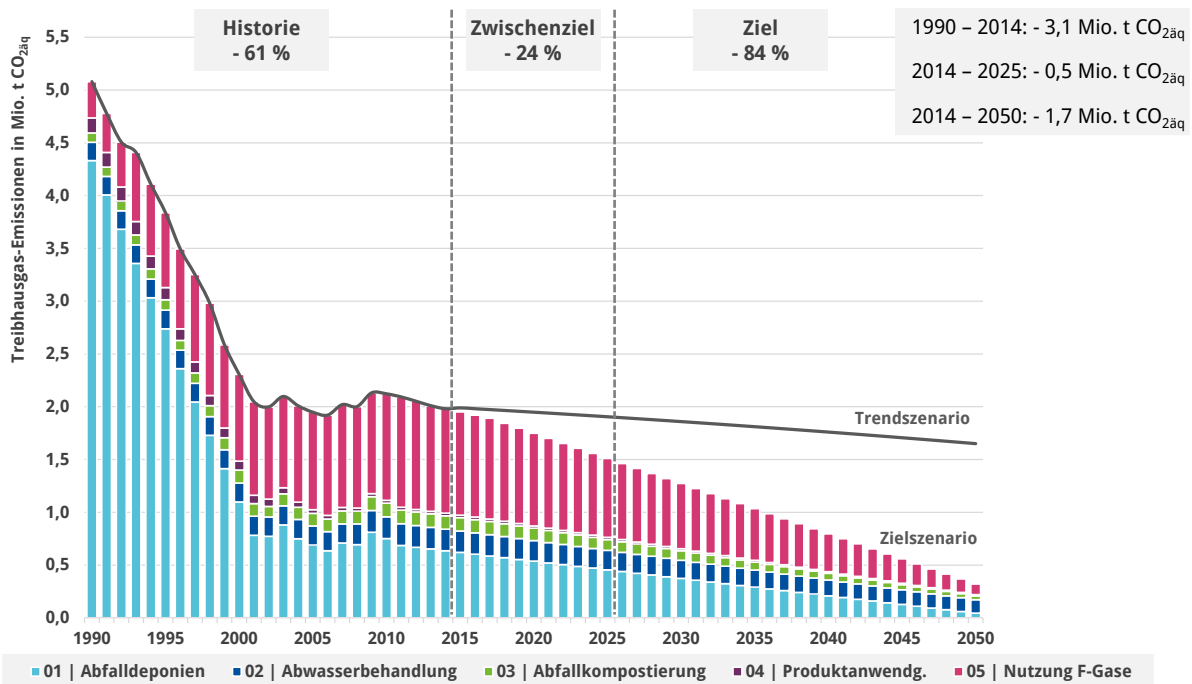


Abbildung 38 Sektor Übrige Verbraucher – Historie, Trend- und Zielszenario (Quellenbilanz)

Quelle: [UBA 2015f] [UBA 2014b] [HSL 2015f] [HSL 2015h] [UGRdL 2014] [HSL 2015c], Prognose und Berechnung IE Leipzig, Normierung der Treibhausgase (CO₂, CH₄, N₂O, F-Gase) in CO_{2äq}-Emissionen mittels GWP_{SAR}-Werte

Handlungsfelder bis 2020/25	Handlungsfelder bis 2050
<p>F-Gase</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Verschärfung des Ordnungsrechts zur Vermeidung von HFKW, FKW und SF₆ ▪ Nachfüll- und Erstfüllverbote für HFKW mit GWP ≥ 2.500 (v.a. Kältemittel R404A und R507) ▪ Fortführung und Ergänzung bisheriger Regelungen zu Dichtheitsprüfungen, Zertifizierung, Entsorgung und Kennzeichnung <p>Abfall und Abwasser</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Aktive Förderung von Wasser sparenden Armaturen, Geräten und Anlagen <p>Produktanwendungen</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Narkosemittel: Absaugung des anästhetischen Gases mit anschließender Adsorption und katalytische Zersetzung des N₂O (Dekompensation) in Stickstoff und Sauerstoff oder Ersatz durch intravenöse Narkosemittel 	<p>F-Gase</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Verbot von HFKW bei der Herstellung von PU-Schaumprodukten, XPS-Hartschäumen und Aerosolen ▪ Importverbot für vorgefüllte Anlagen ▪ Verwendung von Ersatzstoffen für SF₆ (z.B. elementares Fluor oder Chlortrifluorid) <p>Abfall und Abwasser</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Müllvermeidung und –verwertung ▪ Vollständige energetische Nutzung von Faulgas aus Abfallkompostierung <p>Produktanwendungen</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Sprengstoffe: Ersatz von Ammoniumnitrat-Sprengstoffen ▪ Sprühdosen: Einsatz von alternativen N₂O-Treibmitteln

Tabelle 27 Empfohlene Handlungsfelder zur Minderung der Treibhausgasemissionen im Sektor Übrige Verbraucher

4 Gesamtwirtschaftliche Effekte

Im Vergleich zum Trendszenario führt die Realisierung der mit dem Zielszenario verbundenen Maßnahmen zu vielfältigen strukturellen Veränderungen bei Energieverbrauch und Energiebereitstellung.

Im Rahmen dieser Vorstudie wurde der Fokus auf die **qualitative Betrachtung** dieser Effekte gelegt, während die **quantitativen Analysen** hierzu der Hauptstudie vorbehalten sind.

Die gesamtwirtschaftlichen Effekte werden im Folgenden anhand

- der allgemeinen Wirkungszusammenhänge,
- nationale und internationale Wirkungszusammenhänge und
- Struktureffekten

am Beispiel von Energieverbrauch und -bereitstellung erläutert. Daran anschließend erfolgt die qualitative Betrachtung der möglichen positiven und negativen gesamtwirtschaftlichen Wirkungen eines ambitionierten Klimaschutzes in Hessen nach Sektoren.

Allgemeine Wirkungszusammenhänge

Die gesamtwirtschaftlichen Effekte ergeben sich durch eine Veränderung der Zahlungsströme bei den Energiekonsumenten und bei der Energieversorgung. Infolgedessen oder auch als eigenständiger wirtschaftlicher Impuls ergeben sich Veränderungen bei der Energiebereitstellung sowohl in Bezug auf die Menge und Art der Energieträger als auch auf die Form der Umwandlungsanlagen (Erzeugung von Strom und Wärme).

Zwei generelle Hauptwirkungsrichtungen ergeben sich aus der Realisierung des Zielszenarios:

- Der **Energieverbrauch** wird durch Investitionen in Energieeinspar- und Energieeffizienzmaßnahmen

verringert. Bei den Zahlungsströmen ergeben sich vor allem folgende Veränderungen:

- + Mehrausgaben durch Investitionen
- Minderausgaben durch Energieeinsparung

Ungeachtet der gesamtwirtschaftlichen Effekte ergibt sich aus betriebswirtschaftlicher Sicht für den **Energiekonsumenten** daraus im **Saldo** eine positive, neutrale oder negative Budgetwirkung (+|0|-). Diese Budgetwirkung kann im Zeitablauf unterschiedlich ausfallen. Beispielsweise können Investitionen in einen verbesserten Wärmeschutz zunächst zu Mehrkosten führen, während sich erst im Zeitablauf bei entsprechenden Energiepreissteigerungen im Saldo Minderausgaben ergeben. Zunächst müssen durch die Minderausgaben die Mehrkosten der Anfangsjahre ausgeglichen werden, bis schließlich die Minderkosten tatsächlich wirksam werden.

In Abhängigkeit vom Saldo werden die Energieverbraucher ihr Ausgabenverhalten steuern. Bei auftretenden Minderkosten stehen finanzielle Mittel für Konsumausgaben in anderen Bereichen zur Verfügung oder es werden bei Mehrkosten in anderen Bereichen die Konsumausgaben gekürzt. Die Wirkungen sind somit nicht nur bei den Energieverbrauchern zu berücksichtigen, sondern auch bei den von ihren Konsumausgaben abhängigen Wirtschaftssektoren:

- Bei einem negativen Saldo aus Investitionsbelastung und Kosteneinsparung treten negative Effekte (Konsumrückgang) bei Sektoren auf, die nicht von den Investitionsmaßnahmen profitieren.
- 0 Stellt sich ein neutraler Saldo aus Investitionsbelastung und Kosteneinsparung ein, ist mit keinen

weiteren Konsumverschiebungen durch die Energiekonsumenten zu rechnen.⁶¹

- + Bei einem positiven Saldo aus Investitionen und Kosteneinsparungen ist damit zu rechnen, dass die Energiekonsumenten in anderen Konsumbereichen höhere Ausgaben tätigen.

Mit dem Zielszenario sind nicht nur Annahmen zu einer veränderten, sondern auch zu einer höheren Investitionstätigkeit verbunden. In diesem Zusammenhang ist somit davon auszugehen, dass Investitionen in anderen Bereichen nicht oder nur in vermindertem Umfang getätigt werden. Hieraus ergeben sich somit gegenläufige Investitionsströme:

- Minderausgaben für Investitionen oder beim Konsum außerhalb energetischer Maßnahmen
- + Mehrausgaben für Investitionen für energetische Maßnahmen

Analog gelten diese Wirkungsbeziehungen in vergleichbarer Weise auch für Unternehmen.

- Die **Energiebereitstellung** kann sich auf sehr unterschiedliche Weise verändern:
 - Beim **Energiekonsumenten** erfolgt ein Energieträgerwechsel mit entsprechend verändertem Zahlungsvolumen und Zahlungsempfänger (z. B. vom Heizöl- zum Holzpelletlieferanten). Zudem wird aufgrund von Einsparungen und erhöhter Effizienz weniger Energie bezogen. Bei den Zah-

lungsströmen ergeben sich somit folgende Effekte:

- Mindereinnahmen durch verminderte Energiemengen
- Mindereinnahmen durch Wegfall der Nachfrage (z. B. Heizöl)
- + Mehreinnahmen durch vermehrte Nachfrage an anderer Stelle (z. B. Holzpellets)
- Im Bereich der **Anlagenlieferanten** (z. B. Heizkessel) werden andere Produkte bezogen, die zu veränderten Investitionsvolumina führen. Hierbei stellen sich folgende Effekte ein:
 - Mindereinnahmen z. B. bei Heizölkesseln
 - + Mehreinnahmen z. B. bei Holzpelletkesseln
- Die **Energieversorgung** mit zentraler oder dezentraler Strom- und Wärmeerzeugung einschließlich Netzen ist auf sehr vielfältige Weise von den Veränderungen betroffen. Einerseits bedeutet ein verringerter Energieverbrauch Mindereinnahmen in diesem Bereich, wobei kostenseitig in der Regel nur die variablen Kosten entfallen, während Fixkosten für Anlagen (Erzeugung und Netze) bestehen bleiben. Aufgrund des gegenwärtigen Umlagesystems werden zumindest die wegfallenden Netzentgelte durch Energieeinsparung auf alle Verbraucher umgelegt. Andererseits wird in neue Erzeugungsanlagen – insbesondere zur Nutzung erneuerbarer Energien – investiert. Bei den Zahlungsströmen ergeben sich hieraus folgende Effekte:
 - Mindereinnahmen durch verminderte Energiemengen

⁶¹ Der sogenannte „Rebound-Effekt“ wird hier nicht unterstellt. Mit diesem Effekt wird die Verhaltensweise beschrieben, dass durch die tatsächliche Einsparung beim Verbraucher der Eindruck entsteht, durch sein energiesparendes Verhalten nunmehr weitere Energienutzungen „sorglos“ anwenden zu können. Dies kann dazu führen, dass im Ergebnis von Einspar-/Effizienzmaßnahmen im Saldo ein Mehrverbrauch steht.

- 0 Unveränderte Fixkosten bei weiter bestehenden Anlagen und bestehenden Netzen
 - + Mehrausgaben für Investitionen zur Anpassung der Netzinfrastruktur (Strom, Gas, Fernwärme)
 - Minderausgaben für Investitionen in nicht mehr notwendige Anlagen auf Basis fossiler Energien
 - + Mehrausgaben für Investitionen in notwendige Anlagen auf Basis erneuerbarer Energien
- In Abbildung 39 sind die dargestellten Effekte noch einmal im Überblick zusammengefasst.

Positive Effekte		Negative Effekte	
ENERGIEVERBRAUCH ▶ Einsparung und Effizienz			
Investitionen in Energieeinsparung und Energieeffizienz		Minderinvestitionen/-ausgaben in Bereichen außerhalb energetischer Maßnahmen	
Energieeinsparung und Energieeffizienz		Mindererlöse bei den Energielieferanten	
Saldo Investitionsbelastung versus Kosteneinsparung Wirkung auf Konsumausgaben			
Energiekosteneinsparung höher als Investitionsbelastung	Energiekosteneinsparung gleich hoch wie Investitionsbelastung	Energiekosteneinsparung niedriger als Investitionsbelastung	
ENERGIEBEREITSTELLUNG ▶ Substitution und erneuerbare Energien			
Investitionen in Anlagen zur Nutzung erneuerbarer Energien oder Energieträgersubstitution		Keine Investitionen in Anlagen zur Nutzung fossiler Energien	
Einsparung von Brennstoffen		Fixkosten für Anlagen ohne bzw. vermindertem Absatz	
Investitionen in den Ausbau der Netzinfrastruktur		Höhere Netzkosten und Verteilung der Netznutzungsentgelte auf geringeres Volumen	

Abbildung 39 Überblick zu den direkten Wirkungszusammenhängen bei Energieverbrauch und Energiebereitstellung
Quelle: IE Leipzig

Nationale und internationale Wirkungszusammenhänge

Die vorgenannten Effekte beziehen sich auf die direkten Zusammenhänge von Energieverbrauch und Energiebereitstellung. Für die Betrachtung der gesamtwirtschaftlichen Effekte ist diese Betrachtungsebene aber nicht ausreichend.

So verändern sich aufgrund eines verminderten Energiebezugs nicht nur die Zahlungsströme zwischen Energiekonsument und Energielieferant, sondern der Energielieferant bezieht wiederum Vorleistungen (z. B. Erdgas von einem anderen Vorlieferanten). Das bedeutet, dass vorgelagerte Prozesse in die gesamtwirtschaftlichen Effekte einzubeziehen sind. Diese Effekte werden dabei nicht auf Hessen beschränkt bleiben, sondern die Ebene von Deutschland und darüber hinaus (z. B. Erdgasimport aus dem Ausland) einbeziehen müssen.

Dies gilt in analoger Weise für Investitionen in Energieeinsparmaßnahmen (z. B. Wärmedämmung) oder Anlagen. Wird z. B. eine Wärmedämmung noch vom örtlichen Bauunternehmen ausgeführt, so können die dafür benötigten Baustoffe aus Produktionsstätten außerhalb von Hessen und sogar außerhalb von Deutschland stammen. Wesentliche Wertschöpfungseffekte der Investition entfalten sich somit nicht zwangsläufig dort, wo die Investition getätigt wird.

In Bezug auf Investitionen, z. B. in erneuerbare Energien zur Stromerzeugung, ist dies analog zu bewerten. Während der Bau von Windenergieanlagen noch auf eine breite Basis von Produktionsstätten in Deutschland aufsetzen kann, werden hingegen die Module für Photovoltaikanlagen weitgehend aus Asien importiert.

Insgesamt ergibt sich somit ein komplexes Geflecht von Wirkungseffekten nicht nur auf der lokalen und

landesbezogenen Ebene, sondern schließt auch die nationalen und internationalen Wirkungen mit ein. Methodisch wird hierzu eine Input-Output-Analyse durchgeführt, in der die Wirkungsbeziehungen zwischen den einzelnen Branchen aufgrund von Zahlungsströmen verknüpft sind und der Außenhandel abgebildet ist. Für Hessen liegt eine aktuelle Input-Output-Matrix nicht vor und muss im Rahmen der anstehenden Hauptstudie zu dieser Thematik generiert werden.

Mit Blick auf die internationalen Effekte ist zudem zu berücksichtigen, wie sich Minderimporte beispielsweise von Öl und Erdgas auf das Importverhalten dieser Länder auswirkt. Vereinfacht gefragt: Wenn Deutschland weniger Erdöl und Erdgas importiert, werden dann weniger Waren in diese Länder exportiert? Führt dies also in umgekehrter Richtung nicht nur bei den Energieexportländern, sondern auch bei den Energieimportländern zu Mindereinnahmen durch unterbliebene Exporte. Dieser Aspekt ist unter der langfristigen Perspektive 2050 und den grundlegenden strukturellen Veränderungen in Bezug auf den Energieträgereinsatz eine nicht zu vernachlässigende Größenordnung.

Umgekehrt gilt dies selbstverständlich auch für den Effekt, dass im Zusammenhang mit der Energiewende mehr Waren (z.B. Photovoltaikmodule) aus dem Ausland von Deutschland importiert werden. Zwar fließt in diesem Fall Wertschöpfung aus Deutschland ab, aber die Steigerung der Kaufkraft in diesen Ländern kann zu höheren Importen aus Deutschland führen.

Struktureffekte

Neben den vielfältigen Veränderungen bei den Zahlungsströmen ergeben sich vor allem auch Strukturverschiebungen hinsichtlich der Gewinner und Verlie-

rer der Energiewende in den einzelnen Branchen und zum Teil auch Regionen.

In Bezug auf die Anlageninvestitionen ist die Wirkung weitgehend von der Lage der Produktionsstätte abhängig. Ob das Produkt in Hessen, Deutschland oder im Ausland hergestellt wird, ist ein entscheidender Faktor für die Generierung lokaler/regionaler oder eher weltweiter Wertschöpfungseffekte. Dies ist im Rahmen der Hauptstudie mittels der Input-Output-Analyse zu prüfen.

Klarer ist hier schon die Wirkungsrichtung, wenn die Maßnahmen mit Bauleistungen und Installationstätigkeiten verbunden sind. Hier ist in der Regel ein klarer regionaler Wertschöpfungsgewinn feststellbar. Das Baugewerbe und Handwerk profitieren von den Investitionen, während die klassische Energieversorgung Wertschöpfungsverluste hinnehmen muss.

Strukturelle Verschiebungen zu Gunsten der Regionen ergeben sich auch aus der zunehmenden Dezentralität der Energieerzeugung. Diese positiven Wertschöpfungseffekte sind besonders hoch, wenn auch weiterhin Einsatzstoffe – wie bei der Nutzung von Biomasse – für die Energieerzeugung benötigt werden. Zudem können mittels lokaler Investitionstätigkeiten und vor allem der Beteiligung daran auch Kapitaleinkünfte in den Regionen verbleiben. Allerdings darf hierbei nicht übersehen werden, dass eine umfassende Energiewende auf Großinvestoren nicht verzichten kann.

Effekte in Hessen

Der Umbau der Energieversorgung hin zu hohen Anteilen erneuerbarer Energien führt insgesamt zu positiven Bruttobeschäftigungseffekten in Deutsch-

land (371.000 Beschäftigte⁶² im Jahr 2013) [DIW ECON 2015]. Diese verteilen sich auf die folgenden Teilbereiche der erneuerbaren Energien [DIW ECON 2015]:

- Herstellung inländischer Anlagen: 35 %
- Export von Anlagen und Komponenten: 27 %
- Betrieb und Wartung: 17 %
- Öffentliche Forschung und Verwaltung: 2 %
- Brennstoffbereitstellung: 19 %

Innerhalb Deutschlands verteilt sich die durch die erneuerbaren Energien induzierte Bruttobeschäftigung regional sehr unterschiedlich. Die Bruttobeschäftigung je 1.000 Beschäftigte der Windenergie ist in den Küsten-Bundesländern sowie in Sachsen-Anhalt, der Solarenergie- und der Biomassebranche in den neuen Bundesländern am höchsten [GWS 2014]. Sofern die Bruttobeschäftigung nicht von den Standorten der Anlagenhersteller dominiert wird, ist im Wesentlichen der Zubau von Anlagen maßgebend für die Beschäftigungseffekte [GWS 2014].

Die Beschäftigung durch erneuerbare Energien in Hessen liegt im deutschlandweiten Vergleich im Jahr 2013 mit nur 6,9 Beschäftigten⁶³ je 1.000 Beschäftigten auf Rang 13.

⁶² Infolge des starken Rückgangs in der heimischen Herstellung von Photovoltaik-Modulen reduzierte sich gegenüber dem Jahr 2012 die Bruttobeschäftigung um ca. 7 % im Jahr 2013. Seit dem Jahr 2006 ist jedoch insgesamt ein Zuwachs von etwa 140.000 Erwerbstätigen zu verzeichnen [DIW ECON 2015]

⁶³ Sachsen-Anhalt: 26,8 Beschäftigte (Rang 1) | Berlin: 3,9 Beschäftigte (Rang 16)

Die Bruttobeschäftigung der Erneuerbaren-Energien Hessens (2013: 20.160 Beschäftigte⁶⁴) verteilt sich wie folgt auf die Branchen [GWS 2014]:

▪ Windenergie:	26 %
▪ Biomasse ⁶⁵ :	34 %
▪ Solarenergie ⁶⁶ :	31 %
▪ Geothermie ⁶⁷ :	7 %
▪ Wasserkraft:	2 %

Den positiven Beschäftigungsimpulsen im Zuge der Transformation des Energiesystems steht eine Reihe an negativen Einflüssen gegenüber, u.a.:

- Verdrängung von Investitionen in konventionelle Strom- und Wärmekraftwerke (Substitutionseffekt)
- Höhere Energiekosten für Verbraucher und Unternehmen (Budgeteffekt)

Die aus den positiven und negativen Einflüssen resultierende Nettobeschäftigung in Deutschland wird von [DIW ECON 2015] auf etwa 18.000 neue Arbeitsplätze pro Jahr geschätzt. In Relation zur Gesamtzahl der Erwerbstätigen in Deutschland ist der gesamtwirtschaftliche Beschäftigungsgewinn relativ gering [DIEW ECON 2015].

Über die Beschäftigungseffekte hinausgehende positive Wirkungen wie

- vermiedene externe Kosten,
- Schonung endlicher Ressourcen,
- verbesserter Klimaschutz,

⁶⁴ Angabe ohne Beschäftigung aus öffentlich geförderter Forschung /Verwaltung. Infolge des starken Rückgangs in der Beschäftigung in der Solarenergiebranche reduzierte sich die Bruttobeschäftigung gegenüber dem Jahr 2012 um ca. 10 % im Jahr 2013 [GWS 2014].

⁶⁵ inkl. Biogas und Biokraftstoffe,

⁶⁶ Photovoltaik und Solarthermie

⁶⁷ Tiefengeothermie und oberflächennahe Geothermie

- erhöhte Versorgungssicherheit und
- Abschirmung gegen Preisschwankungen fossiler Energieträger

wurden in [DIW ECON 2015] nicht quantifiziert. In [GWS 2013] werden allein die durch Klimaschutzmaßnahmen vermiedenen externen Kosten in Deutschland auf 11,5 bis 35 Mrd. Euro im Jahr 2030 beziffert.

Die möglichen positiven und negativen gesamtwirtschaftlichen Wirkungen eines ambitionierten Klimaschutzes in Hessen werden im Folgenden nach Sektoren erörtert.

01 | Energieumwandlung

Wesentliche gesamtwirtschaftliche Effekte ergeben sich für den Sektor Energieumwandlung Hessens auf folgenden Ebenen:

- Der zur Erreichung der Klimaschutzziele notwendige Umbau der Energieversorgung hin zu hohen Anteilen erneuerbarer Energien könnte in Hessen zu positiven Wertschöpfungs- und Bruttobeschäftigungseffekten führen.
- Die Wertschöpfungs- und Bruttobeschäftigungseffekte durch den Ausbau der erneuerbaren Energien sind am höchsten, wenn die gesamte Wertschöpfungskette und nicht nur Betrieb und Wartung der Anlagen sowie die Brennstoffbereitstellung für die Anlagen in Hessen erfolgt, sondern auch der Großteil der Anlagen in Hessen hergestellt werden [GWS 2014].
- Neben den positiven Effekten des Umbaus der Energieversorgung entstehen durch geringere Investitionen in konventionelle (fossile) Strom- und Wärmekraftwerke zugleich negative Wertschöpfungs- und Beschäftigungseffekte in der konventio-

nellen Energiewirtschaft (Substitutionseffekt) [DIW ECON 2015].

- Der beobachtete Beschäftigungsrückgang im konventionellen Energiesektor infolge stattfindender Rationalisierungsprozesse [DIW ECON 2015] wird zukünftig weiter anhalten und auch den Bereich der erneuerbaren Energien zunehmend erfassen; mit den daraus resultierenden negativen Folgen auf die Beschäftigung.

02 | Industrie

Die folgenden Effekte ergeben sich durch Klimaschutzmaßnahmen im Sektor Industrie:

- Die hohen Investitionen in energieeffizientes Bauen und Sanieren sowie in Anlagen zur Energieumwandlung führten zu einer Nachfrage der dafür notwendigen Industriegüter (u.a. Wärmedämmmaterial, Generatoren, Rotorblätter, Wechselrichter) und können zu positiven Wertschöpfungs- bzw. Beschäftigungseffekten in der Industrie führen. Hohe Wertschöpfungs- und Beschäftigungseffekte resultieren für den hessischen Industriesektor, wenn die erforderlichen Industriegüter für energieeffizientes Bauen und Anlagen zur Energieumwandlung überwiegend in Hessen hergestellt werden [DIW ECON 2015] [GWS 2014]. Im Bereich der Photovoltaik (SMA: Wechselrichter-Hersteller) sowie Solar- und Geothermie (Buderus: Heizungsanlagenhersteller) existieren dafür in Hessen gute Ausgangsbedingungen. Der Zubau von Windkraftanlagen in Hessen wird hingegen maßgeblich über den Betrieb und Wartung der Anlagen positive Beiträge zur hessischen Wertschöpfung und Bruttobeschäftigung generieren.
- Zusätzlich zur inländischen Nachfrage nach Industriegütern zur Nutzung erneuerbarer Energien sowie

Technologien zur Verbesserung der Energie- und Materialeffizienz können durch deren Export positive Beschäftigungseffekte resultieren [DIW ECON 2015].

- Durch den Umbau des Energiesystems steigen infolge der EEG-Umlage insbesondere die Stromkosten der Industrie. Die höheren Strompreise beeinträchtigen wiederum die Kosten⁶⁸ der im europäischen und internationalen Wettbewerb stehenden Unternehmen. Sofern diese nicht durch Ausnahmeregelungen⁶⁹ (Industriebefreiungen) sowie stärkere Effizienzmaßnahmen kompensiert werden können, könnte dies zu signifikant negativen Folgen für Wachstum und Beschäftigung, insbesondere für die exportorientierte hessische Industrie, führen [DIW ECON 2015].
- Neben Nachteilen im europäischen und internationalen Wettbewerb können höhere Kosten zu einer verringerten Nachfrage nach Gütern und Dienstleistungen (Budgeteffekt) in anderen Branchen führen und sich negativ auf die Beschäftigung auswirken [DIW ECON 2015].

02 | Verkehr

Wesentliche gesamtwirtschaftliche Effekte aus den unterstellten Klimaschutzmaßnahmen ergeben sich im Verkehrsbereich auf drei Ebenen:

- Die Einsparung von Verkehrsleistung vermindert den Bedarf an Fahrzeugen und entsprechenden Dienstleistungen, so dass sich in diesem Sektor ein gewisser Rückgang der Wertschöpfung ergibt.

⁶⁸ Die Budgeteffekte aus dem Strompreisanstieg unterscheiden sich zwischen Verbrauchergruppen deutlich.

⁶⁹ Unternehmen der energieintensiven Industrie sind teilweise oder komplett von der EEG-Umlage, der Stromsteuer, den Netzentgelten oder den Konzessionsabgaben befreit [DIW ECON 2015].

Gleichzeitig stehen die Einsparungen für Konsumenten und Unternehmen an anderer Stelle für zusätzlichen Konsum zur Verfügung.

- Die Verlagerung von Verkehrsleistung von der Straße zur Schiene führt im Bereich Straßenverkehr zu einer weiteren Verkleinerung des Sektors, während im Umfeld des Schienenverkehrs zusätzliche Wertschöpfung und Beschäftigung entstehen.
- Die Umstellung der Primärenergieträger von importiertem Mineralöl zu Strom und Gas aus einheimischen erneuerbaren Energien führt im Energiesektor zu einer größeren Wertschöpfung, während Importe von Energierohstoffen eingespart werden.

04 | Gewerbe, Handel und Dienstleistung

Folgende gesamtwirtschaftliche Effekte könnten sich durch die Klimaschutzmaßnahmen in anderen Sektoren sowie innerhalb des Sektors GHD ergeben:

- Die hohen Investitionen in energieeffizientes Bauen und Sanieren könnten zu deutlich positiven Wertschöpfungs- bzw. Beschäftigungseffekten in der Bauwirtschaft, in Handwerk sowie in baunahen Dienstleistungen führen [DIW ECON 2015] [GWS 2013]. Aufgrund der hohen spezifischen Sanierungskosten (insbesondere Dämmmaßnahmen an der Gebäudehülle, Fensteraustausch, Austausch der Heizungsanlagen) sowie der Bedeutung der Einfamilienhäuser am Gesamtbestand entfällt ein Großteil der Wertschöpfungseffekte auf Einfamilienhäuser [IÖW / ECOFYS 2014].
- Höhere Energiekosten (insbesondere Stromkosten durch den Ausbau der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien) könnten die Kaufkraft sowie Wettbewerbsfähigkeit der Unternehmen und Verbraucher des Sektors GHD negativ beeinträchtigen, da diese in der Regel nicht durch Sonderregelungen von staatlich induzierten Belastungen (u.a. EEG-

Umlage, Netzentgelte, Stromsteuer) befreit sind. [DIW ECON 2015].

- In Folge der zusätzlichen Ausgaben für Klimaschutzmaßnahmen (u.a. energieeffizientes Bauen und Sanieren) für private Haushalte und Unternehmen und des damit verbundenen Rückgangs des zur Verfügung stehenden Budget könnte den Konsum und damit die Wertschöpfung bzw. Beschäftigung bei Handel und Dienstleistungen negativ beeinflussen [DIW ECON 2015] [GWS 2013].

05 | Haushalte

Die folgenden Effekte ergeben sich durch Klimaschutzmaßnahmen im Sektor Haushalte:

- Investitionen in energieeffizientes Bauen und Sanieren (insbesondere Dämmmaßnahmen an der Gebäudehülle, Fensteraustausch, Austausch der Heizungsanlagen) induzieren positive Wertschöpfungs- bzw. Beschäftigungseffekte im Sektor GHD (insbesondere Bauwirtschaft und Handwerk) [DIW ECON 2015] [GWS 2013] [IÖW / ECOFYS 2014].
- Die hohen Investitionen bzw. die finanziellen Aufwendungen der privaten Haushalte für energieeffizientes Bauen und Sanieren führen dazu, dass Konsumeinschränkungen an anderer Stelle erforderlich werden können (Budgeteffekt) [GWS 2013]. Sofern die höhere Energieeffizienz sowie der bessere bauliche Wärmeschutz sinkende Energie- bzw. Heizkosten induziert, kann die Kaufkraft der privaten Haushalte gesteigert werden [DIW ECON 2015].
- Höhere Energiekosten (insbesondere Stromkosten durch den Ausbau der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien) könnten, sofern diese nicht durch Energieeinsparungen kompensiert werden, die Kaufkraft der privaten Haushalte negativ beeinträchtigen. Dies könnte zu einer verringerten Nachfrage nach Gütern und Dienstleistungen in anderen

Branchen und ggf. zu einem Beschäftigungsrückgang führen [DIW ECON 2015].

06 | Landwirtschaft

Die folgenden Effekte ergeben sich durch die angestrebten Klimaschutzmaßnahmen in der Landwirtschaft:

- Die Veränderung des Verbraucherverhaltens im Sinne einer deutlichen Reduzierung des Fleischverbrauchs pro Kopf gemäß den Empfehlungen der Deutschen Gesellschaft für Ernährung wird zu einer Verlagerung der Nahrungsmittelproduktion hin zu pflanzlichen Nahrungsmitteln führen. Damit resultiert in der Tierproduktion ein gewisser Rückgang an Wertschöpfung bzw. Beschäftigung. Gleichzeitig entstehen positive Effekte in der landwirtschaftlichen Pflanzenproduktion. Gegebenenfalls kann eine stärkere an der Biolandwirtschaft orientierte Tierproduktion gewisse Rückgänge der Wertschöpfung und Beschäftigung auffangen. Die in der Regel höheren Preise müssten die Konsumenten jedoch durch Konsumeinschränkungen an anderer Stelle kompensieren (Budgeteffekt).
- Die Anpassung des hessischen Tierbestandes an emissionsarme Haltungen führt zu einer Verlagerung der Wertschöpfung sowie Beschäftigung zu emissionsarmen Tierarten.
- Die Verbesserung der Stickstoffproduktivität geht mit einem höheren technologischen bzw. finanziellen Aufwand einher, während sich jedoch die Stickstoff-Kostenintensität pro Flächeneinheit reduziert. Eine ausgewogene Balance vorausgesetzt, könnte dies zu einer zusätzlichen Wertschöpfung führen.

07 | Übrige Verbraucher

Die folgenden gesamtwirtschaftlichen Effekte könnten durch die Maßnahmen im Sektor Übrige Verbraucher entstehen:

- Die Verschärfung des Ordnungsrechts zur Vermeidung von HFKW, FKW und SF₆ führt zur Substitution dieser F-Gase durch andere Kältemittel. Es findet somit eine Verlagerung der Wertschöpfung sowie Beschäftigung statt. Inwiefern dies zu positiven oder negativen gesamtwirtschaftlichen Effekten führt, ist noch zu analysieren.
- Die Fortführung und Ergänzung der bisherigen Regelungen zu Dichtheitsprüfungen, Zertifizierung, Entsorgung und Kennzeichnung von F-Gasen führt zu einer Ausweitung der entsprechenden Dienstleistungen und damit einhergehend zu einer höheren Wertschöpfung und Beschäftigung in diesem Bereich. Die dafür anfallenden Kosten müssten die privaten Haushalte sowie Unternehmen durch Konsumeinschränkungen an anderer Stelle kompensieren.

Fazit

Im Vergleich zum Trendszenario führt die Realisierung der mit dem Zielszenario verbundenen Maßnahmen zu vielfältigen strukturellen Veränderungen.

Die Zahlungsströme innerhalb der Versorgungsstrukturen ändern sich nicht nur regional, sondern hier ist die nationale und internationale Verflechtung der Wirtschaft zu berücksichtigen.

Als Gewinner der Energiewende sowie eines ambitionierten Klimaschutzes können – unter dem regionalen Blickwinkel – in Regel das Baugewerbe und das Handwerk identifiziert werden. Die mit Anlageninvestitionen verbundenen Wertschöpfungseffekte sind

sehr von den Produktionsstätten der Anlagenhersteller abhängig. Hierbei kommen alle räumlichen Dimensionen – also Hessen, Deutschland und das Ausland – in Betracht. In der Summe lassen sich meist positive Effekte ermitteln. Diese quantitative Analyse wird allerdings erst in der Hauptstudie zum Klimaschutzplan vorgenommen.

Trotz der tendenziell positiven volkswirtschaftlichen Effekte darf nicht übersehen werden, dass die Ent-

scheidung zu Investitionen von vielen Einzelentscheidungen abhängt. Bei den Menschen und Unternehmen im Land sind volkswirtschaftliche Sichtweisen meist kein Investitionskriterium. Es ist daher notwendig, die bekannten Investitionshemmnisse im weiteren Prozess des Klimaschutzplanes zu berücksichtigen, um die gesamtwirtschaftlichen Effekte für Hessen nutzbar zu machen.

Verzeichnisse

Abkürzungsverzeichnis	123
Abbildungsverzeichnis	125
Tabellenverzeichnis	128
Literaturverzeichnis	130

Abkürzungsverzeichnis

a	Jahr
BIP	Bruttoinlandsprodukt
BWS	Bruttowertschöpfung
BSB5	Biochemischer Sauerstoffbedarf nach 5 Tagen
C	Kohlenstoff
ca.	circa
CH ₄	Methan
C _m H _n	Kohlenwasserstoffe
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
CO _{2äq}	Kohlenstoffdioxidäquivalent
DWD	Deutscher Wetterdienst
EE	Erneuerbare Energien
EE-Gas	Gas aus erneuerbaren Energien (Power to Gas)
EnEV	Energieeinsparverordnung
FKW	Fluorkohlenwasserstoffe
GHD	Sektor Gewerbe, Handel und Dienstleistungen und übrige Verbraucher
GWh	Gigawattstunde
GWP	Global Warming Potential
ha	Hektar
HFKW	halogenierte Fluorkohlenwasserstoffe
IPCC	Intergovernmental Panel of Climate Change
Kfz	Kraftfahrzeug
km	Kilometer
Lkw	Lastkraftwagen
LULUC	Landnutzung und Landnutzungsänderung
MBA	Mechanisch-biologische Abfallbehandlung
Mio.	Millionen

N ₂ O	Distickstoffmonoxid
Nr.	Nummer
PJ	Petajoule
SF ₆	Schwefeldioxid
t	Tonnen
t/a	Tonnen pro Jahr
THG	Treibhausgas
TWh	Terrawattstunden
u.a.	unter anderem
UBA	Umweltbundesamt
WE	Wohneinheit

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1	Elemente auf dem Weg zum Klimaschutzplan	8
Abbildung 2	Struktur der Vorstudie zum Klimaschutzplan	9
Abbildung 3	Relevante sozioökonomische Rahmenbedingungen in Hessen bis 2050	27
Abbildung 4	Treibhausgasemissionen nach Sektoren 1990 bis 2014 (Quellenbilanz)	29
Abbildung 5	Treibhausgasemissionen nach Gasen 1990 bis 2014 (Quellenbilanz)	30
Abbildung 6	Emissionen nach Gasen (CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O) und Sektoren 1990 und 2014 (Quellenbilanz)	31
Abbildung 7	Treibhausgasemissionen nach Sektoren inkl. Senken 1990 bis 2014 (Quellenbilanz)	34
Abbildung 8	Treibhausgasemissionen nach Sektoren inkl. Strombezug 1990 bis 2014 (Quellenbilanz)	35
Abbildung 9	Trendszenario: Treibhausgasemissionen nach Sektoren 1990 bis 2050 (Quellenbilanz)	38
Abbildung 10	Trendszenario: Treibhausgasemissionen nach Gasen 1990 bis 2050 (Quellenbilanz)	39
Abbildung 11	Trendszenario: Treibhausgasemissionen nach Sektoren inkl. Senken 1990 bis 2050 (Quellenbilanz)	40
Abbildung 12	Trendszenario: Treibhausgasemissionen nach Sektoren inkl. Strombezug 1990 bis 2050 (Quellenbilanz)	41
Abbildung 13	Zielszenario: Treibhausgasemissionen nach Sektoren 1990 bis 2050 (Quellenbilanz)	45
Abbildung 14	Zielszenario: Treibhausgasemissionen nach Gasen 1990 bis 2050 (Quellenbilanz)	46
Abbildung 15	Zielszenario: Treibhausgasemissionen nach Sektoren inkl. Senken 1990 bis 2050 (Quellenbilanz)	47
Abbildung 16	Zielszenario: Treibhausgasemissionen nach Sektoren (Quellenbilanz) inkl. Strombezug 1990 bis 2050	48
Abbildung 17	Sektor Energieumwandlung: Umwandlungseinsatz – Historie und Zielszenario	53

Abbildung 18	Sektor Energieumwandlung und –verteilung: THG-Emissionen – Historie sowie Trend und Ziel (Quellenbilanz)	56
Abbildung 19	Sektor Industrie: Endenergieverbrauch – Historie, Trend- und Zielszenario	60
Abbildung 20	Sektor Industrie: Energiebedingte THG-Emissionen – Historie, Trend- und Zielszenario (Quellenbilanz)	62
Abbildung 21	Sektor Industrie: Prozessbedingte THG-Emissionen – Historie, Trend- und Zielszenario (Quellenbilanz)	64
Abbildung 22	Sektor Industrie: THG-Emissionen – Historie, Trend- und Zielszenario (Quellenbilanz)	65
Abbildung 23	Sektor Verkehr (ohne intern. Flugverkehr): Endenergieverbrauch – Historie, Trend- und Zielszenario	69
Abbildung 24	Straßenverkehr: THG-Emissionen – Historie, Trend- und Zielszenario (Quellenbilanz)	72
Abbildung 25	Schienenverkehr: THG-Emissionen – Historie, Trend- und Zielszenario (Quellenbilanz)	73
Abbildung 26	Binnenschifffahrt: THG-Emissionen – Historie, Trend- und Zielszenario (Quellenbilanz)	74
Abbildung 27	Luftverkehr: THG-Emissionen – Historie, Trend- und Zielszenario (Quellenbilanz)	75
Abbildung 28	Sektor Verkehr: THG-Emissionen – Historie, Trend- und Zielszenario (Quellenbilanz)	76
Abbildung 29	Sektor GHD: Endenergieverbrauch – Historie, Trend- und Zielszenario	81
Abbildung 30	Sektor GHD: THG-Emissionen – Historie, Trend- und Zielszenario (Quellenbilanz)	83
Abbildung 31	Sektor Haushalte: Endenergieverbrauch – Historie, Trend- und Zielszenario	89
Abbildung 32	Sektor Haushalte: THG-Emissionen – Historie, Trend- und Zielszenario (Quellenbilanz)	92
Abbildung 33	Sektor Landwirtschaft: THG-Emissionen – Historie, Trend- und Zielszenario (Quellenbilanz)	97
Abbildung 34	Sektor Forstwirtschaft: THG-Emissionen – Historie, Trend- und Zielszenario	101

Abbildung 35	F-Gase: THG-Emissionen – Historie, Trend- und Zielszenario (Quellenbilanz)	104
Abbildung 36	Abfall und Abwasser: THG-Emissionen – Historie, Trend- und Zielszenario (Quellenbilanz)	108
Abbildung 37	Produktanwendungen: THG-Emissionen – Historie, Trend- und Zielszenario (Quellenbilanz)	109
Abbildung 38	Sektor Übrige Verbraucher – Historie, Trend- und Zielszenario (Quellenbilanz)	110
Abbildung 39	Überblick zu den direkten Wirkungszusammenhängen bei Energieverbrauch und Energiebereitstellung	114

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	Direkte Treibhausgase und deren Treibhausgaspotential (GWP) sowie Verweildauer in der Atmosphäre	12
Tabelle 2	THG-Bilanz: Sektoren und deren IPCC-Quellkategorien	23
Tabelle 3	Stromerzeugung, Stromverbrauch, Strombezug und Anteil der erneuerbaren Energien am Stromverbrauch – Historie und Zielszenario	50
Tabelle 4	Bruttostromerzeugung aus konventionellen und erneuerbaren Energien – Historie und Zielszenario	51
Tabelle 5	Anteile der konventionellen und erneuerbaren Energien an der Bruttostromerzeugung – Historie und Zielszenario	51
Tabelle 6	Fernwärmeezeugung und –verbrauch – Historie und Zielszenario	52
Tabelle 7	Sektor Energieumwandlung: Umwandlungseinsatz in PJ – Historie und Zielszenario	53
Tabelle 8	Sektor Energieumwandlung: Energieträgeranteile am Umwandlungseinsatz – Historie und Zielszenario	54
Tabelle 9	Empfohlene Handlungsfelder zur Minderung der Treibhausgasemissionen im Sektor Energieumwandlung und -verteilung	57
Tabelle 10	Sektor Industrie: Endenergieverbrauch in PJ – Historie und Zielszenario	60
Tabelle 11	Sektor Industrie: Anteil der Energieträger am Endenergieverbrauch – Historie und Zielszenario	61
Tabelle 12	empfohlene Handlungsfelder zur Minderung der Treibhausgasemissionen im Sektor Industrie (Verarbeitendes Gewerbe)	66
Tabelle 13	Sektor Verkehr (ohne intern. Flugverkehr): Personenverkehrsleistung – Historie und Zielszenario	68
Tabelle 14	Sektor Verkehr (ohne intern. Flugverkehr): Güterverkehrsleistung – Historie und Zielszenario	68
Tabelle 15	Sektor Verkehr (ohne intern. Flugverkehr): Endenergieverbrauch in PJ – Historie und Zielszenario	70
Tabelle 16	Sektor Verkehr (ohne intern. Flugverkehr): Anteil der Energieträger am Endenergieverbrauch – Historie und Zielszenario	70

Tabelle 17	Empfohlene Handlungsfelder zur Minderung der Treibhausgasemissionen im Sektor Verkehr (1)	77
Tabelle 18	Empfohlene Handlungsfelder zur Minderung der Treibhausgasemissionen im Sektor Verkehr (2)	78
Tabelle 19	Sektor GHD: Endenergieverbrauch in PJ – Historie und Zielszenario	81
Tabelle 20	Sektor GHD: Anteil der Energieträger am Endenergieverbrauch – Historie und Zielszenario	82
Tabelle 21	Empfohlene Handlungsfelder zur Minderung der Treibhausgasemissionen im Sektor Gewerbe, Handel und Dienstleistung	85
Tabelle 22	Sektor Haushalte: Endenergieverbrauch in PJ – Historie und Zielszenario	89
Tabelle 23	Sektor Haushalte: Anteil der Energieträger am Endenergieverbrauch – Historie und Zielszenario	90
Tabelle 24	Empfohlene Handlungsfelder zur Minderung der Treibhausgasemissionen im Sektor Haushalte	93
Tabelle 25	Empfohlene Handlungsfelder zur Minderung der Treibhausgasemissionen im Sektor Landwirtschaft	98
Tabelle 26	Empfohlene Handlungsfelder im Sektor Forstwirtschaft	101
Tabelle 27	Empfohlene Handlungsfelder zur Minderung der Treibhausgasemissionen im Sektor Übrige Verbraucher	111

Literaturverzeichnis

BAST 2012	Bundesanstalt für Straßenwesen: Straßenverkehrszählung 2010 Statistik 1- Jahresfahrleistungen und mittlere DTV-Werte Hessen, Bergisch Gladbach, 2012
BNetzA 2013	Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen: Genehmigungsbescheid der Bundesnetzagentur gemäß § 13c Abs. 1 Satz 6 über systemrelevante Gaskraftwerke, Bonn, 2015
BNetzA 2015	Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen: Genehmigungsbescheid der Bundesnetzagentur gemäß § 13a Abs. 2 EnWG zur Systemrelevanzausweisung von Kraftwerksblöcken in Vohburg und Großkotzenburg, Bonn, 2015
DepV 2009	Bundesministeriums der Justiz und für Verbraucherschutz: Verordnung über Deponien und Langzeitlager (DepV), Ausfertigungsdatum: 27.04.2009
destatis 2015a	Statistisches Bundesamt: Verkehr - Luftverkehr auf allen Flugplätzen 2002 bis 2014, Fachserie 8, Reihe 6.2, Wiesbaden, 2015
destatis 2015b	Statistisches Bundesamt - AK Erwerbstätigenrechnung des Bundes und der Länder: Erwerbstätige, Arbeitnehmer, Selbständige und mithelfende Familienangehörige (im Inland) nach Bundesländern 2000 bis 2014, Berechnungsstand August 2014 / Februar 2015, Wiesbaden, 2015
destatis 2015c	Statistisches Bundesamt: Verkehr – Verkehr aktuell, Berechnungsstand 07/2015, Wiesbaden, 2015
DIW ECON 2015	DIW Econ GmbH: Die Beschäftigungseffekte der Energiewende - Eine Expertise für den Bundesverband WindEnergie e.V. und die Deutsche Messe AG, Berlin, 2015
EuPD 2008	EuPD Research: Factsheets zu Photovoltaik in den Bundesländern, Bonn, 2008.
GWS 2013	Gesellschaft für Wirtschaftliche Strukturforchung (GWS) mbH: Gesamtwirtschaftliche Wirkungen von Klimaschutzmaßnahmen und -instrumenten - Ökonomische Analyse der Politiksznarien für den Klimaschutz VI, Osnabrück, 2013
GWS 2014	Gesellschaft für Wirtschaftliche Strukturforchung (GWS) mbH: Erneuerbar beschäftigt in den Bundesländern - Bericht zur aktualisierten Abschätzung der Bruttobeschäftigung 2013 in den Bundesländern, Osnabrück, 2014
HMUELV 2010	Hessisches Ministerium für Umwelt, Energie, Landwirtschaft und Verbraucherschutz: Hessischer Energiegipfel - Umsetzungskonzept der Hessischen Landesregierung, 2011.
HSL 2010	Hessisches Statistisches Landesamt: Bevölkerung in Hessen 2060 - Ergebnisse der regionalisierten Bevölkerungsvorausbe- rechnung bis 2030 auf der Basis 31.12.2008, August 2010, Wiesbaden, 2015

HSL 2015a	Hessisches Statistisches Landesamt: Hessische Energiebilanzen 1990 bis 2012, Wiesbaden, 2015
HSL 2015b	Hessisches Statistisches Landesamt: Hessische CO ₂ -Bilanzen nach Sektoren 1990 bis 2012, Wiesbaden, 2015
HSL 2015c	Hessisches Statistisches Landesamt: Ergebnisse der Umweltstatistiken für eine Vorstudie zum Klimaschutzplan- an Deponien angelieferte Abfälle (1996 – 2013), Siedlungsabfälle (1996 – 2013), in biologischen Behandlungsanlagen eingesetzte Abfälle (1996 – 2013), kompostierbarer Abfall (1996 - 2013), Garten- und Parkabfälle (1996 – 2013), Wohnbevölkerung mit Anschluss an Sammelkanalisation (1991, 1995, 1998, 2001, 2004, 2007, 2010, 2013), Wohnbevölkerung mit Anschluss an Kläranlagen (1991, 1995, 1998, 2001, 2004, 2007, 2010, 2013), Wiesbaden, 2015
HSL 2015d	Hessisches Statistisches Landesamt: CO ₂ -Emissionsfaktoren nach Energieträgern und Energiebilanzzeilen, 1991 bis 2012, Wiesbaden, 2015
HSL 2015e	Hessisches Statistisches Landesamt: Waldflächen, 1991 bis 2013, Wiesbaden, 2015
HSL 2015f	Hessisches Statistisches Landesamt: Bevölkerung Hessens nach Altersgruppen und Geschlecht - Fortschreibungsergebnisse auf Basis Zensus 2011, Wiesbaden, 2015
HSL 2015g	Hessisches Statistisches Landesamt: Bestand an Wohngebäuden und Wohnungen in Hessen Fortschreibungsergebnisse zum Stand 31. Dezember 2014 - Ergebnisse auf Grundlage der Gebäude- und Wohnungszählung 2011 (Stand 28. Mai 2014), Wiesbaden, 2015
HSL 2015h	Hessisches Statistisches Landesamt: Hessische THG-Bilanzen nach Sektoren 1995 bis 2011, Wiesbaden, 2015
IE 2015	Leipziger Institut für Energie GmbH: Schätzprognose zur Energiebilanz Hessen – Ableitung aktueller Zahlen zur Energieversorgung in Hessen für die Jahre 2013 und 2014, Leipzig, 2015
IÖW / ECOFYS 2014	Institut für ökologische Wirtschaftsforschung (IÖW) / Ecofys Germany GmbH: Kommunale Wertschöpfungseffekte durch energetische Gebäudesanierung (KoWeG), Berlin, 2014
IPCC 1996	Intergovernmental Panel on Climate Change: Climate Change 1995: The Science of Climate Change, Contribution of WGI to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [J.T. Houghton, L.G. Meira Filho, B.A. Callander, N. Harris, A. Kattenberg and K. Maskell] Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 588 pp.
IPCC 2007	Intergovernmental Panel on Climate Change: Climate Change 2007: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Con-

- tribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp.
- IPCC 2013 Intergovernmental Panel on Climate Change: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stock-er, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.
- ITP 2014 Intraplan Consult GmbH: Verkehrsverflechtungsprognose 2030, München, 2014
- IWES/BWE 2011 Fraunhofer Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik (Fraunhofer IWES) im Auftrag des Bundesverbandes Wind-Energie e.V. (BWE): Studie zum Potenzial der Windenergienutzung an Land, Kassel, 2011.
- KBA 2004 Kraftfahrt-Bundesamt: Statistische Mitteilungen des Kraftfahrt-Bundesamtes Reihe 1, Stand 1. September 2004, Flensburg, 2004
- KBA 2014 Kraftfahrt-Bundesamt: Fahrzeugzulassungen (FZ) - Bestand an Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern nach Zulassungsbezirken 2005 -2014, Flensburg, 2014
- KP 1997 Vereinte Nationen (UN): Protokoll von Kyoto zum Rahmenübereinkommen der Vereinten Nationen über Klimaänderungen, Kyoto, 1997
- LAK 2014 Länderarbeitskreis Energiebilanzen: Glossar zu den Energiebilanzen der Länder. Bremen, 2014
- LAK 2015a Länderarbeitskreis Energiebilanzen: Bruttostromerzeugung aus Erneuerbaren Energieträgern in GWh und Bruttostromerzeugung nach Energieträgern in GWh, Stand 24.08.2015, www.lak-energiebilanzen.de
- LAK 2015b Länderarbeitskreis Energiebilanzen: Prozessbedingte CO₂-Emissionen 1995 - 2012, CO₂-Emissionen aus dem Primärenergieverbrauch (Quellenbilanz) im Umwandlungsbereich nach Emittentensektoren 1990 - 2012, CO₂-Emissionen aus dem Primärenergieverbrauch (Quellenbilanz) ohne internationalen Luftverkehr 1990 - 2012, Stand 24.08.2015, www.lak-energiebilanzen.de,
- LWF 2012 Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft: Die Kohlenstoffbilanz der Bayerischen Forst- und Holzwirtschaft, Abschlussbericht 09/2012, Freising, 2012

Öko-I/Prognos 2009	Öko-Institut e.V. & Prognos AG: Modell Deutschland. Klimaschutz bis 2050: Vom Ziel her denken, Basel/Berlin, 2009
Thünen 2011	Johann Heinrich von Thünen-Institut (Hrsg.): Sonderheft 343, Special Issue, Inventurstudie 2008 und Treibhausgasinventar Wald, Braunschweig, 2011
Thünen 2013	Johann Heinrich von Thünen-Institut (Hrsg.): Szenarioanalysen zur Minde-rung von Treibhausgasemissionen der deutschen Landwirtschaft im Jahr 2050, Thünen Report 13, Braunschweig, 2013
Thünen 2015a	Johann Heinrich von Thünen-Institut (Hrsg.): Berechnung von gas- und partikelförmigen Emissionen aus der deutschen Landwirtschaft 1990 – 2013, Report zu Methoden und Daten (RMD) Berichterstattung 2015, Thünen Report 27, Braunschweig, 2015
Thünen 2015b	Johann Heinrich von Thünen-Institut, Umweltbundesamt, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft: Informationen über LULUCF-Aktionen, Berlin, Dessau und Braunschweig, 09.01.2015
UBA 2010b	Umweltbundesamt (Hrsg.): Aufwand und Nutzen einer optimierten Bioabfallverwertung hinsichtlich Energieeffizienz, Klima- und Ressourcenschutz, Texte 43/2010, Dessau-Roßlau, August 2010
UBA 2014a	Umweltbundesamt (Hrsg.): Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050, Climate Change 07/2014, Dessau-Roßlau, 2014
UBA 2014b	Umweltbundesamt (UBA): Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll 2014. Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990 – 2012. Dessau-Roßlau, 2014
UBA 2015a	Umweltbundesamt: Brennstoffbezogene Emissionsfaktoren 1990 bis 2013, Stand 15.04.2015, Dessau, 2015
UBA 2015b	Umweltbundesamt: Emissionsfaktoren Industrieprozesse 1990 bis 2013, Stand 15.04.2015, Dessau, 2015
UBA 2015c	Umweltbundesamt: Emissionsfaktoren für die Treibhausgase CH ₄ (Methan) und N ₂ O (Lachgas) aus der stationären Feuerung in Haushalten und mobilen Quellen der Haushalte 1990 bis 2013, Stand 08.09.2015, Dessau, 2015
UBA 2015d	Umweltbundesamt: Emissionsfaktoren für die Treibhausgase CH ₄ (Methan) und N ₂ O (Lachgas) aus dem Straßenverkehr 1990 bis 2013, Stand 30.07.2015, Dessau, 2015
UBA 2015e	Umweltbundesamt: Emissionsfaktoren für die Treibhausgase CH ₄ (Methan) und N ₂ O (Lachgas) aus dem Umwandlungseinsatz 1990 bis 2013, Stand 08.09.2015, Dessau, 2015

UBA 2015f	Umweltbundesamt (UBA): Maßnahmen zur Verbesserung der Marktdurchdringung klimafreundlicher Technologien ohne halogenierte Stoffe vor dem Hintergrund der Revision der Verordnung (EG) Nr. 842/2006. Dessau-Roßlau, 2015
UGRdL 2014	Umweltökonomische Gesamtrechnungen der Länder: Methan (CH ₄)- und Distickstoffoxid (N ₂ O)-Emissionen 1995 bis 2011 , Stuttgart 2014
USN 2015	Sächsisches Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft: Fluorierte Treibhausgase (F-Gase), http://www.umwelt.sachsen.de/umwelt/17037.htm ; Zugriff: 10/2015
VGRdL 2015	Arbeitskreis - Volkswirtschaftliche Gesamtrechnungen der Länder im Auftrag der Statistischen Ämter der 16 Bundesländer, des Statistischen Bundesamtes und des Bürgeramtes, Statistik und Wahlen, Frankfurt a. M.: Bruttoinlandsprodukt, Bruttowertschöpfung in den Ländern der Bundesrepublik Deutschland 2000 bis 2014 Reihe 1, Band 1, Berechnungsstand November 2014/Februar 2015, Stuttgart, 2015