

Klimaneutrales Erlangen

-

Erste Analysen

Langfassung

Erstellt von:

EVF Energievision Franken GmbH
Schwarzenbacher Str. 2
95237 Weißdorf

Im Auftrag von

Stadt Erlangen
Amt für Umweltschutz und Energiefragen
Schuhstraße 40
91052 Erlangen

März 2021

Impressum

Bearbeitungszeitraum: 10/2020 – 03/2021

Projekttitle: Klimaneutrales Erlangen – Erste Analysen

Auftraggeber: Stadt Erlangen
Amt für Umweltschutz und Energiefragen
Schuhstraße 40
91052 Erlangen

Tel.: 09131 – 86 2467
Fax: 09131 – 86 2956
Web: www.erlangen.de

Bearbeitung: EVF – Energievision Franken GmbH
Schwarzenbacher Str. 2
95237 Weißdorf

Tel.: 09251 – 85 99 99 0
Fax: 09251 – 85 99 99 8
E-Mail: mail@energievision-franken.de
Web: www.energievision-franken.de

Autoren: Dipl.-Ing. (FH) Jana Kraus
Dipl.-Geogr. Univ. Ralf Deuerling

Bildnachweis: Wenn nicht anders gekennzeichnet: EVF – Energievision Franken GmbH

Urheberrechtshinweis: Die vorliegende Studie unterliegt dem geltenden Urheberrecht. Ohne die ausdrückliche Zustimmung des oben genannten Auftraggebers darf diese oder Auszüge daraus insbesondere nicht veröffentlicht, vervielfältigt und/oder anderweitig an Dritte weitergegeben werden. Sollte einer derartigen Nutzung zugestimmt und der Inhalt an anderer Stelle wiedergegeben werden, sind die Autor*innen gemäß anerkannten wissenschaftlichen Arbeitsweisen zu nennen.

Darüber hinaus sind unbedingt die im Literatur- und Quellenverzeichnis genannten weiteren Urheberrechte und Lizenzen zu beachten!

Haftungsausschluss: Die vorliegende Studie wurde nach dem aktuellen Stand der Technik, nach den anerkannten Regeln der Wissenschaft sowie nach bestem Wissen und Gewissen der Autoren erstellt. Irrtümer vorbehalten.

Fremde Quellen wurden entsprechend gekennzeichnet. Die Ergebnisse basieren weiterhin im dargelegten Maß auf Aussagen und Daten von fachkundigen Dritten, die im Rahmen von Befragungen ermittelt wurden. Alle Angaben und Quellen wurden sorgfältig auf Plausibilität geprüft. Die Autoren können dahingehend jedoch keine Garantie für die Belastbarkeit der ausgewiesenen Ergebnisse geben.

Weiterhin basieren die Ergebnisse der Studie auf Rahmenbedingungen, die sich aus den dargelegten Gesetzen, Verordnungen und rechtlichen Normen ergeben. Diese, bzw. deren gerichtliche Auslegung, können sich ändern. Die Studie kann dahingehend nicht den Anspruch erheben, eine Rechtsberatung zu ersetzen und darf auch ausdrücklich nicht als solche verstanden werden.

Grußwort

Liebe Leser*innen,

was braucht es für ein klimaneutrales Erlangen? Dieser Frage geht der Bericht „Klimaneutrales Erlangen – Erste Analysen“ nach. Der Bericht zieht Bilanz und gibt Denkanstöße, wie die große Transformation im Energiebereich zu schaffen ist. Denn der Stadtrat hat nach breiter Diskussion klar und deutlich festgelegt, dass Erlangen bis 2030 klimaneutral sein soll. Das CO₂-Kontingent wurde auf 3,4 Megatonnen begrenzt.

Mit neuen Methoden wurde ermittelt, wie viel CO₂ in Erlangen von verschiedenen Verbrauchergruppen in den letzten Jahren ausgestoßen wurde. Positiv: Insgesamt gingen die stadtweiten CO₂-Emissionen im Zeitraum von 2015 bis 2019 zurück. Negativ: Wir emittieren weiterhin viel zu viel und die Zeit läuft uns davon. Machen wir weiter wie bisher, ist bald Schluss – unser CO₂-Kontingent ist dann bereits im Jahr 2024 aufgebraucht und wir verfehlen unser Ziel, konform mit dem 1,5°-Ziel von Paris zu sein. Schaffen wir es jedoch als Stadtgesellschaft, gemeinsam unsere CO₂-Emissionen jährlich um rund 12 % (11,7 %) zu senken, dann haben wir noch ein bisschen länger Zeit – bis zum Jahr 2029. Derzeit reduzieren wir unsere Treibhausgasemissionen jedoch nur jährlich um 1,25 % - wir müssen also zehnmal erfolgreicher sein als bisher. Die Herausforderung ist enorm. Das geht nur mit entschlossenem Handeln.

In einer so genannten „Transformationsrechnung“ stellt die Studie nach der Bilanzierung Überlegungen an, was für die Transformation – den Übergang zu einem klimaneutralen Erlangen ohne CO₂-Emissionen - in den Bereichen Wärme, Strom und Mobilität notwendig ist. Zuerst gilt es, Energie erst gar nicht zu verbrauchen, gerade auch unsere Mobilität anders zu organisieren. Alles, was wir dann noch an Energie brauchen, muss erneuerbar erzeugt werden – und das möglichst lokal und regional. Es ist eine Herkulesaufgabe, die nicht ohne einen sparsameren Umgang mit Strom und Wärme machbar ist.

Klar, unsere Bäume fungieren auch als natürliche CO₂-Speicher – eine Funktion neben vielen anderen ihrer elementaren Funktionen für Mensch und Artenvielfalt. Doch zeigen sich auch hier schon die Folgen des Klimawandels – unsere Bäume sterben und könnten sich zu CO₂-Emittenten entwickeln. Eine sehr besorgniserregende Entwicklung.

Mit der Studie hat die Stadt Erlangen wertvolle Erkenntnisse für ihren Weg zur Klimaneutralität gewonnen. Nun gilt es, diese Erkenntnisse umzusetzen. Helfen Sie uns dabei, es lohnt sich. Nur wenn wir das Klima schützen, schützen wir unsere Gegenwart und Zukunft. Seien Sie dabei! Vielen Dank.



Dr. Florian Janik
Oberbürgermeister



Sabine Bock
Referentin für Umwelt und Klimaschutz

1	EINLEITUNG	6
2	ENERGIE- UND THG-BILANZ	7
2.1	HINTERGRUND	7
2.1.1	<i>BISKO-Standard</i>	7
2.1.2	<i>Änderungen in der Bilanzierung</i>	9
2.2	ENDENERGIEVERBRAUCH	10
2.2.1	<i>Endenergieverbrauch nach Sektoren</i>	11
2.2.2	<i>Endenergieverbrauch nach Verbrauchergruppen</i>	12
2.3	THG- EMISSIONEN.....	13
2.3.1	<i>THG-Emissionen nach Sektoren</i>	13
2.3.2	<i>THG-Emissionen nach Verbrauchergruppen</i>	14
2.4	ZUSAMMENFASSUNG	15
2.5	NEBENBETRACHTUNG STROMBILANZ ESTW	16
2.5.1	<i>Auswirkungen des Ökostroms der ESTW</i>	16
2.5.2	<i>Deckungsgrad durch lokal erzeugten Strom</i>	17
3	CO₂- SENKEN	18
3.1	EXKURS ZUR KOHLENSTOFFSPEICHERUNG IN WÄLDERN	18
3.2	ERMITTLUNG DER KOHLENSTOFFSENKEN IM STADTGEBIET.....	18
3.2.1	<i>Vorgehensweise</i>	18
3.2.2	<i>Ergebnis</i>	19
3.2.3	<i>Interpretation der Ergebnisse vor dem Hintergrund Waldzustand und Waldnutzung</i>	20
4	RESTBUDGET	22
4.1	HINTERGRUND	22
4.2	ERFORDERLICHE REDUZIERUNG DER THG-EMISSIONEN	22
4.2.1	<i>Exkurs zu Kompensationen</i>	23
4.3	ZUSAMMENFASSUNG	23
5	TRANSFORMATION	25
5.1	MOBILITÄT	26
5.1.1	<i>Einsparpotenzial</i>	26
5.1.2	<i>Effizienzsteigerung</i>	27
5.2	WÄRME	29
5.2.1	<i>Einsparpotenziale</i>	29
5.2.2	<i>Potenziale für erneuerbare Energien</i>	30
5.2.3	<i>Transformationskonzept für nicht an das Fernwärmenetz angeschlossene dezentrale Heizungsanlagen</i>	30
5.2.4	<i>Transformationskonzept für das Fernwärmesystem</i>	31
5.3	STROM	34
5.3.1	<i>Einsparpotenzial</i>	34
5.3.2	<i>Transformationsbedingte neue Verbräuche</i>	35
5.3.3	<i>Potenziale für regenerative Energien</i>	35
5.3.4	<i>Bedarf für weitere Anlagen in der Region</i>	36
6	ABBILDUNGSVERZEICHNIS	41
7	TABELLENVERZEICHNIS	42
8	QUELLEN	43
9	ANHANG	45

1 Einleitung

Die Stadt Erlangen hat sich zum großen Ziel gesetzt unter Berücksichtigung des 1,5°C-Zieles und des Restbudgetansatzes bis ins Jahr 2030 **klimateutral** zu werden. Dies ist in Anbetracht der Klimakrise ein notwendiger und sehr wichtiger Schritt für eine lokale, regionale und globale zukunftsfähige Entwicklung.

In der vorliegenden Studie werden erste Analysen als Diskussions- und Arbeitsgrundlage für die notwendigen Veränderungen im Energiesektor dargestellt. Die vorliegenden Untersuchungen konzentrieren sich auf die energetischen Verbräuche und Emissionen des stationären Bereichs (Strom, Wärmeenergie) und der Mobilität. Nachhaltigkeits- und klimaschutzrelevante Verhaltensweisen wie Konsum und Ernährung wurden nicht betrachtet. Die hierbei entstehenden Emissionen in der Produktion der Güter sind, sofern sie auf Erlanger Stadtgebiet produziert werden, berücksichtigt. Werden die Konsumgüter von außerhalb angeliefert, sind die Verbräuche und Emissionen des Lieferverkehrs innerhalb des Stadtgebietes berücksichtigt. Auswirkungen und Veränderungen des Alltags- /Konsumverhaltens wurden in der vorliegenden Studie nicht berücksichtigt.

Unter dem Aspekt „Wo stehen wir und wohin gehen wir?“ wird ein erster Überblick gegeben, wie hoch der aktuelle energetische Fußabdruck Erlangens ist, was in Bezug auf die THG-Emissionen erreicht werden muss und welche Handlungsschritte hierfür auf Seiten der Energiebereitstellung und des Energieverbrauchs notwendig sind.

In einem ersten Schritt wird die Energie- und THG-Bilanz von Erlangen des IKS bis ins Jahr 2019 fortgeschrieben. Die aktuelle Entwicklung im Energiebereich sowohl in den Sektoren (Strom, Wärme und Kraftstoffe) als auch nach Verbrauchergruppen (private Haushalte, kommunale Einrichtungen, Gewerbe/Handel/Dienstleistungen, Industrie und Verkehr) werden untersucht und die dazugehörigen THG-Emissionen ermittelt. Die genaue Analyse der aktuellen Energieverbräuche und THG-Emissionen stellt die Grundlage für die Planung der zukünftigen notwendigen Einsparungen und Veränderungen im Energiesektor dar.

In einem zweiten Schritt wird die Reduzierung der THG-Emissionen genauer untersucht. Um das noch vorhandene Restbudget der Stadt Erlangen bis 2030 zu erhalten und die Klimaneutralität zu erreichen, muss eine große Reduktion der THG-Emissionen erreicht werden.

Der dritte Teil der Analysen widmet sich der Umstrukturierung der Energiebereitstellung. In einer ersten überschlägigen Transformationsrechnung werden die Größenordnungen des Umbaus der aktuellen Energieversorgung hin zu einer nachhaltigen, klimaneutralen Versorgung in den Bereichen Strom- und Wärmeverorgung sowie Mobilität aufgezeigt. Die Transformationsrechnung gibt einen Überblick über die wichtigen Stellschrauben zur Klimaneutralität in Erlangen und stellt eine erste Diskussionsgrundlage für die Maßnahmenentwicklung dar.

2 Energie- und THG-Bilanz

2.1 Hintergrund

Die Energie- und THG-Bilanz stellt die Grundlage für jede umfassende Klimaschutzarbeit dar. Über die Ermittlung des Statusquos der Energieverbräuche und der THG-Emissionen in den einzelnen Sektoren und Verbrauchergruppen wird deutlich, in welchen Bereichen Klimaschutzaktivitäten besonders zielführend und notwendig sind. Über die Analyse der bisherigen Verbrauchsentwicklung in den vergangenen Jahren wird deutlich, wo bereits Veränderungen stattgefunden haben und welche Auswirkungen ein „Weiter so“ des Energieverbrauchs und der THG-Emissionen hätte. Über eine regelmäßige Fortführung der Bilanz werden Auswirkungen der Klimaschutzarbeiten, wie z.B. die Umstellungen auf eine nachhaltige Energieversorgung, sichtbar.

Fortschreibung der Bilanz in Erlangen

2016 wurde die Energie- und Treibhausgasbilanz des Integrierten Klimaschutzkonzeptes (IKSK) mit dem damals gängigen Bilanzierungsprogramm ECO SPEED Region erstellt. Es erfolgt nun eine Fortschreibung der Bilanz bis ins Jahr 2019 und eine Übertragung der bisherigen Bilanz in das Bilanzierungsprogramm Klimaschutzplaner. Seit 2017 ist der Klimaschutzplaner in Deutschland etabliert. Mit der Entwicklung des Klimaschutzplaners wurde eine deutschlandweite Bilanzierungsmethodik, die Bilanzierungssystematik Kommunal, kurz BSKO, für kommunale Energie- und THG-Bilanzen festgeschrieben. Die aktuelle Bilanz folgt nun der Methodik nach BSKO-Standard, die Werte der Jahre 1990 und 2014 wurden der neuen Bilanzierungssystematik angepasst.

2.1.1 BSKO-Standard

Durch die Einführung des BSKO-Standards (Bilanzierungssystematik Kommunal) ergeben sich Änderungen in der Eingabe und Auswertung der Daten. Dies betrifft im Besonderen die Verkehrsdaten. Der Verkehr wird nun wie alle anderen Energiedaten nach dem Territorialprinzip berechnet. Die Daten hierfür werden primär durch das IFEU zur Verfügung gestellt (siehe 2.1.2.1). Bei der Berechnung des Primärenergiebedarfs und der CO_{2aq}-Emissionen wurden kleinere Anpassungen vorgenommen. So ergeben sich bei einer vergleichenden Betrachtung zwischen den Auswertungen im IKSK und der aktuellen Bilanzierung marginale Veränderungen der Energie- und CO₂-Bilanz auch außerhalb des Verkehrs.

Durch den neuen BSKO-Standard ist festgelegt, in welcher Art und Weise die Auswertung erfolgen muss um eine tatsächliche Vergleichbarkeit der Daten auf Bundesebene zu ermöglichen.

So wird die Energiebilanz grundsätzlich als **endenergiebasierte Territorialbilanz ohne Witterungsbereinigung** durchgeführt. 2016 diente die Witterungsbereinigung einer deutschlandweiten Vereinheitlichung der klimatischen Verhältnisse für einen besseren Vergleich der Energieverbräuche. Mit Entwicklung des BSKO-Standards wurde dieses Kriterium abgeschafft, da es die Realität verzerrt, ohne den tatsächlichen Effekt neutralisieren zu können (IFEU, 2014). Die CO₂-Emissionen sind als **CO₂-Äquivalente inklusive Vorkette (LCA)** zu berechnen. Im Folgenden wird die Bilanzierung der CO₂-Äquivalente auf Grund der vereinfachten Schreibweise als THG-Bilanz (Bilanz der Treibhausgas-Emissionen) benannt. Der Strom muss in der Basisbilanz nach **bundesdeutschem Mix** berechnet werden. Die erneuerbare Stromerzeugung vor-Ort ist bereits im bundesdeutschen Strommix enthalten. Eine gesonderte Anrechnung findet nicht statt, da somit eine Doppelbilanzierung bestehen würde. Durch die lokale nachhaltige Stromproduktion kann jedoch der regionale Deckungsgrad ausgewiesen werden. Für die stadtinterne Entwicklung wird der regionale Strommix gesondert dargestellt (siehe 2.5).

Eine direkte Vergleichbarkeit der Zahlen aus dem IKS 2016 mit der vorliegenden Aktualisierung ist somit nicht gegeben. Die gesamte Bilanz wurde für die Jahre 1990 und 2014 überarbeitet. Eine Darstellung der Verbrauchsentwicklung ab 1990 ist somit möglich.

Tab. 1: Vergleich der Bilanzierungskriterien IKS 2016 und Aktualisierung 2021

	IKS 2016	BSKO-Standard
Primärenergie (LCA)	ja	nein
Endenergie	teilweise	ja
THG-Emissionen (LCA)	ja	ja
Witterungskorrektur	ja	nein
Verkehr	Verursacherprinzip	Territorialprinzip

2.1.2 Änderungen in der Bilanzierung

2.1.2.1 Territorialer Ansatz im Mobilitätsbereich

Der Wechsel in der Bilanzierung des Verkehrs vom Verursacherprinzip zum Territorialprinzip bringt für eine Einpendlerstadt wie Erlangen große Veränderungen. Bei dem Verursacherprinzip wurden anhand der gemeldeten Fahrzeuge im Stadtgebiet mit durchschnittlicher Nutzung die Energie- und THG-Emissionen berechnet. Bei diesem Ansatz bleiben Pendlerströme und Durchgangsverkehr unberücksichtigt. Mit Erstellung des Klimaschutzplaners und der Einführung der BSKO-Methode wurde vom IFEU der territoriale Ansatz für den Verkehr entwickelt. Über diesen neuen Ansatz werden nun alle Fahrten auf Erlanger Stadtgebiet berücksichtigt. Das heißt, neben dem innerstädtischen Verkehr, finden auch Ein- und Auspendler sowie der Durchgangsverkehr (Autobahn) Berücksichtigung. Gleiches gilt für die Bahnstrecke. Anteilig der Schienen auf Erlanger Stadtgebiet wird der Zugverkehr für Erlangen berechnet. Die Ermittlung des Energieverbrauchs und der THG-Emissionen durch das Verkehrsaufkommen wird vom IFEU auf Basis des TREMOD Modelles (Transport Emission Model) berechnet und im Klimaschutzplaner zur Verfügung gestellt (BSKO 2019). Daten zum ÖPNV und der kommunalen Flotte werden gesondert eingetragen.

TREMOD:

Das Emissionsberechnungsmodell „TREMOD“ (Transport Emission Model) bildet den motorisierten Verkehr in Deutschland hinsichtlich seiner Verkehrs- und Fahrleistungen, Energieverbräuche und den zugehörigen Klimagas- und Luftschadstoffemissionen für den Zeitraum 1960 bis 2018 und in einem Trendszenario bis 2050 ab. (www.ifeu.de/methoden-tools/modelle/tremod)

- DETAILLIERTE DARLEGUNG: IFEU, 2017
- ÜBERSICHT: ANHANG 4

2.1.2.2 Kaminkehrerdaten

Neu berücksichtigt sind ab dem Jahr 2015 die Kaminkehrerdaten. Durch diese Detaillierung im Wärmesektor werden die leitungsungebundenen Energieträger stadtgebietstreu ermittelt. In der ursprünglichen Bilanzierung musste dabei auf statistische Hochrechnungen (ausgeführt durch ECO Region) zurückgegriffen werden. Durch die Angabe der vorhandenen Heizkessel nach Energieträger und Leistungsklasse kann nun eine genauere Abbildung der Energieverbräuche erfolgen. Deutlich wird das insbesondere beim Heizöl, dessen Verbrauch von 2014 auf 2015 sprunghaft abfällt. Dies basiert auf der nun detaillierteren Datengrundlage ab 2015.

2.1.2.3 Datengüte

Zur besseren Einordnung der Datengrundlagen und der Aussagekraft der Ergebnisse wurde die Bestimmung der Datengüte im Klimaschutzplaner eingeführt. Jede Dateneingabe wird nach ihrer Wertigkeit eingestuft. So wird deutlich wie regionalgetreu die Bilanz ist. Laut Klimaschutzplaner ist bei einer gesamten Datengüte unter 0,5 die Aussagekraft der Datenlage und der damit ermittelten Ergebnisse gering. Mit einer gesamten Datengüte von 0,5 bis 1,0 wird die regionale Bilanz gut bis sehr gut abgebildet. Ab einer Datengüte von 0,75 kann die gesamte Datengrundlage als sehr gut gewertet werden. Eine Datengüte von 1,0 ist für einzelne

Kriterien und Wertung der Datengüte nach Klimaschutzplaner:

0,00	Bundesdurchschnittsdaten
0,25	Regionale Daten von Landesebene runtergerechnet
0,50	Regionale Daten hochgerechnet
1,00	Pirmärstatistische lokale Daten

Energieträger und auch Sektoren möglich, jedoch für eine Gesamtbilanz aktuell nicht erreichbar (KSP 2021).

Für die Stadt Erlangen konnte durch die vorhandene Datengrundlage eine Datengüte von 0,76 -0,78 in den Jahren 2015 bis 2018 erreicht werden. Die Jahre 1990 und 2014 werden durch die Übernahme aus ECO REGION mit 0,5 angegeben. Das Jahr 2019 wird erst im Laufe des Jahres 2021 vollständig freigeschaltet, die ausgewerteten Daten sind vorläufig ermittelte Werte. Leichte Änderungen im Verkehr und bei den THG-Emissionen können durch Freigabe aller Daten durch den Klimaschutzplaner nachträglich entstehen. Eine Datengüte für 2019 konnte noch nicht ermittelt werden.

2.2 Endenergieverbrauch

In Abb. 1 wird die gesamte Endenergieverbrauchsentwicklung nach Energieträgern dargestellt. Die Übernahme der Bilanz des IKSK 2016 erfolgt in einer verkürzten Darstellung nur für die Jahre 1990 und 2014. Die Fortschreibung der Bilanz ab 2015 ist vollständig dargestellt. Die Werte für 2019 sind aufgrund der Datenlage und Freigabe durch den Klimaschutzplaner im Bereich der THG-Emissionen und Verkehr vorläufig ermittelte Werte.

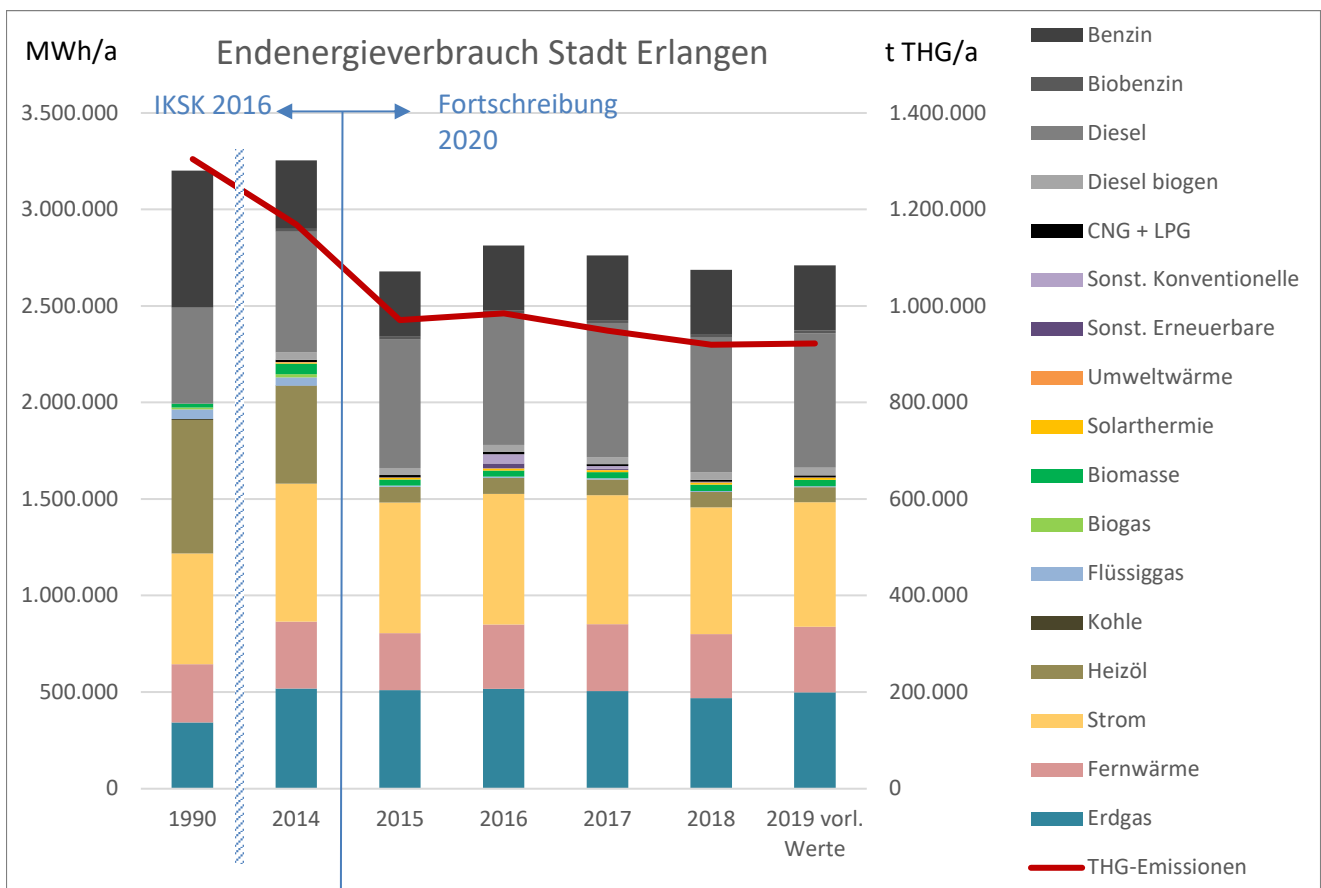


Abb. 1 Endenergieverbrauch 1990-2019 nach Energieträgern
(EIGENE DARSTELLUNG EVF NACH AUSWERTUNG KSP - KLIMASCHUTZPLANER)

Die Analyse in Erlangen zeigt aufgrund der verbesserten Datengrundlage ab 2015 (Berücksichtigung der Kaminkehrerdaten) einen deutlichen Rückgang des Endenergieverbrauchs von 2014 auf 2015, welcher primär dem Heizölverbrauch zuzuordnen ist. Im Folgenden werden bei den Analysen zwei Zeiträume in der Energieverbrauchsentwicklung berücksichtigt. Eine erste Betrachtung erfolgt für die gesamte Entwicklung von 1990 bis 2019. Aufgrund der oben beschriebenen unterschiedlichen Datengrundlagen wird der Zeitraum der letzten Jahre ab 2015 genauer betrachtet. Zum einen liegt hier die einheitliche Datenbasis vor, zum anderen zeigt sich in den letzten Jahren der notwendige Handlungsbedarf am deutlichsten. Für die Analysen der zukünftigen Entwicklung werden die Jahre ab 2015 herangezogen.

Die Verbrauchsentwicklung von 1990 bis 2019 zeigt eine Abnahme des Endenergieverbrauchs um 15 % von rund 3.200 GWh auf 2.710 GWh. Im Zeitraum von 2015 bis 2019 (einheitliche Datengrundlage) ist von kleinen Abweichungen abgesehen eine Stagnation im Endenergieverbrauch zu verzeichnen. In diesem Zeitraum ist die Einwohnerzahl in Erlangen von 108.336 EW 2015 auf 112.528 EW 2019 gestiegen. Trotz der Zunahme der Bevölkerung um 3,4 % ist der Energieverbrauch um nur 1 % gestiegen. Der pro-Kopf-Verbrauch an Endenergie ist mit - 3 % somit leicht rückläufig.

Eine Übersicht der Verbrauchszahlen nach Energieträgern und Jahren befindet sich im Anhang.

2.2.1 Endenergieverbrauch nach Sektoren

Der Endenergieverbrauch wird in die drei Sektoren Strom, Wärme und Kraftstoffe unterteilt.

Im IKSK 2016 wurde der Verkehr noch nach dem Verursacherprinzip berechnet (Ermittlung über die in Erlangen gemeldeten Fahrzeuge, Einpendler wurden nicht berücksichtigt). Der Sektor des Verkehrs (Kraftstoffe) am Endenergieverbrauch lag bei 25 % (IKSK 2016). Über den neuen Ansatz des Territorialprinzips werden alle Fahrten auf Erlanger Stadtgebiet berücksichtigt (innerstädtischer Verkehr, Ein- und Auspendler, Durchgangsverkehr). Der Anteil des Sektors Kraftstoffe hat sich dadurch auf 40 % erhöht und trägt damit den Hauptanteil des Endenergieverbrauchs in Erlangen.

Interessant ist die unterschiedliche Entwicklung innerhalb der Sektoren in den beiden Zeiträumen 1990 bis 2019 und 2015 bis 2019. Langfristig hat der Stromverbrauch um 12 % zugenommen. In den letzten fünf Jahren ist jedoch ein deutlicher Rückgang von insgesamt 5 % zu verzeichnen. Der Sektor Wärme verzeichnet einen deutlichen Rückgang seit 1990. Dies ist jedoch, wie oben beschrieben, primär der unterschiedlichen Datenlage geschuldet

Wichtigste Ergebnisse:

Endenergie 1990-2019: -15 %

Endenergie 2015-2019: 1 %

Pro-Kopf 2015-2019: -3,4 %

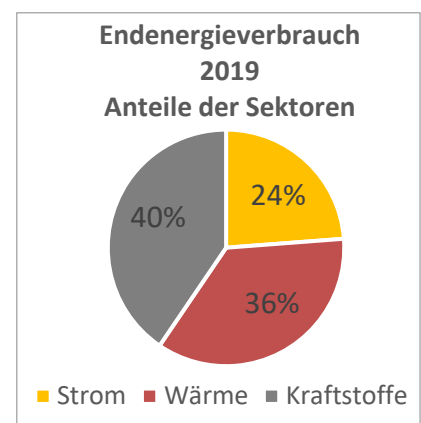


Abb. 2 Anteile der Sektoren am Endenergieverbrauch 2019
(EIGENE DARSTELLUNG EVF)

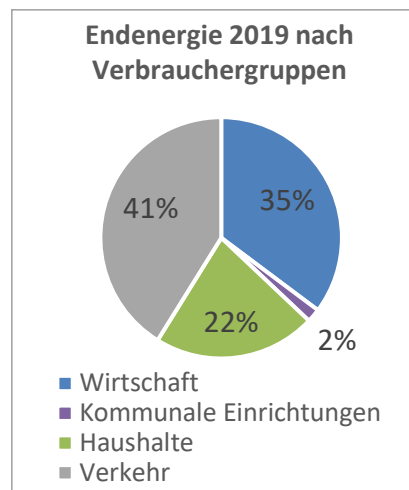
(siehe 2.1.2). In den letzten Jahren hat der Verbrauch in den Sektoren Wärme und Kraftstoffe wieder zugenommen.

Tab. 2 Endenergieverbrauch nach Sektoren

Sektoren:	1990	2015	2019*	Entwicklung	
	[MWh]	[MWh]	[MWh]	1990-2019	2015-2019
Strom	574.152	677.603	645.000	12%	-5%
Wärme	1.419.992	934.983	968.136	-32%	4%
Kraftstoffe	1.207.905	1.067.190	1.097.605	-9%	3%
Summe	3.202.050	2.679.775	2.710.741	-15%	1%
pro-Kopf-Verbrauch	31,2	24,7	24,0	-23,1%	-3,0%

* 2019 vorläufig ermittelte Werte

2.2.2 Endenergieverbrauch nach Verbraucherguppen



Bei der Aufteilung nach Verbraucherguppen entfällt auf den Verkehr zusätzlich zu den Kraftstoffen auch ein Anteil des Stroms für Elektromobilität, primär im Schienenverkehr. Hierdurch erhöht sich der Anteil des Verkehrs auf 41 % gegenüber 40 % der Kraftstoffe zu Strom und Wärme.

Bei der Betrachtung der Entwicklung in den letzten Jahren verzeichnet die Wirtschaft seit 1990 die größten Einsparungen (unter Berücksichtigung der Datenlage s. 2.1.2) mit 27 %. In den Jahren ab 2015 sind in den kommunalen Einrichtungen (städtische Liegenschaften, Verwaltung, städtische soziale Einrichtungen und Stadtwerke) Einsparungen von 11 %, primär durch Sanierungsmaßnahmen, zu verzeichnen.

Abb. 3 Anteile der Verbrauchergruppen am Endenergieverbrauch (eigene Darstellung EVF)

Tab. 3 Endenergieverbrauch nach Verbraucherguppen

Verbraucherguppen	1990	2015	2019*	Entwicklung	
	[MWh]	[MWh]	[MWh]	1990 - 2019	2015 - 2019
Wirtschaft	1.309.261	955.031	954.607	-27%	-0,04%
Kommunale Einrichtungen	61.743	55.794	49.593	-20%	-11%
Haushalte	616.629	594.289	590.925	-4%	-1%
Verkehr	1.214.417	1.074.662	1.115.616	-8%	4%
Gesamt	3.202.050	2.679.775	2.710.741	-15%	1%

* 2019 vorläufig ermittelte Werte

2.3 THG- Emissionen

Die THG-Emissionen sind an die verwendeten Energieträger gekoppelt. So schlägt sich die Substitution fossiler durch erneuerbare Energieträger deutlich in der THG-Bilanz nieder. Eine verstärkte Reduktion der Emissionen gegenüber der Entwicklung des Endenergieverbrauchs ist die Folge.

Die THG-Emissionen nehmen von 1990 – 2019 um 29 % ab (Reduktion von 1.304.709 t im Jahr 1990 auf 922.146 t im Jahr 2019, auch hier hat die veränderte Datenlage ab 2015 großen Einfluss). Im Zeitraum von 2015 - 2019 ist eine Reduktion um 5 % zu verzeichnen, bei einer gleichzeitigen geringen Zunahme des Endenergieverbrauchs um 1 %. Die THG-Emissionen pro-Kopf verzeichnen in diesem Zeitraum einen Rückgang von 8 %.

Wichtigste Ergebnisse:

THG-Emissionen 1990-2019:	-29 %
THG-Emissionen 2015-2019:	-5 %
Pro-Kopf 2015-2019:	-8 %

2.3.1 THG-Emissionen nach Sektoren

Die Aufteilung der THG-Emissionen nach Sektoren verdeutlicht bereits die große Bedeutung des Stroms für die THG-Bilanz einer Region auf Grund der hohen Emissionswerte (dt. Strommix 2015 600 g/kWh, 2018 544 g/kWh (KSP 2020)). Nach BSKO werden die Emissionen des Stroms nach Bundesmix berechnet, um eine Vergleichbarkeit zwischen den Kommunen herzustellen. In der Betrachtung der Endenergie hält der Sektor Strom mit 24 % den kleinsten Anteil. In der Analyse der THG-Emissionen liegt er mit 38 % sogar knapp vor den Anteilen der Kraftstoffe (dem größten Sektor des Endenergieverbrauchs).

Durch den verstärkten Einsatz erneuerbarer Energien im bundesdeutschen Strommix wird das große Potenzial der nachhaltigen Stromerzeugung bereits erkennbar. In der Entwicklung der THG-Emissionen werden im Sektor Strom die größten Einsparungen erzielt. Alleine in den letzten fünf Jahren ist eine Reduzierung der strombedingten THG-Emissionen von 14 % zu verzeichnen. Was ein verstärkter Einsatz erneuerbar erzeugten Stroms in der Reduzierung der THG-Emissionen bewirkt, wird in Kapitel 2.5 in der Betrachtung des Ökostroms durch die ESTW verdeutlicht.

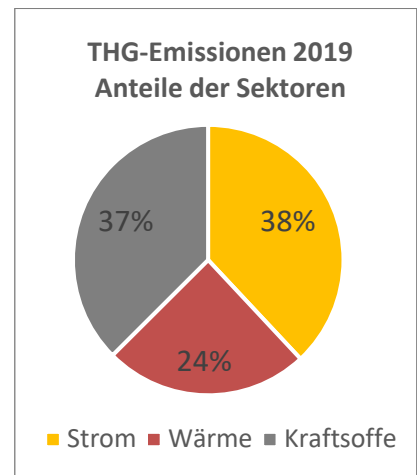


Abb. 4 Anteile der Sektoren an den THG Emissionen 2019 (EIGENE DARSTELLUNG EVF)

Tab. 4 THG-Emissionen nach Sektoren

Sektoren	1990	2015	2019	Entwicklung	
	[t]	[t]	[t]	1990 - 2019	2015 - 2019
Strom	500.661	406.562	350.880	-30%	-14%
Wärme	414.360	226.491	225.804	-46%	-0,3%
Kraftstoffe	389.689	337.397	345.462	-11%	2%
Summe	1.304.710	970.450	922.146	-29%	-5%
Pro-Kopf-Verbrauch	12,7	9,0	8,2	-35%	-8%

Im Sektor Wärme wird durch den Einbezug der Kaminkehrerdaten der Anteil des Heizölverbrauchs deutlich reduziert, was primär zu der starken Einsparung von 46 % seit 1990 führt. In den letzten Jahren hingegen stagniert die Einsparung im Sektor Wärme. Ab 2020 ist mit einer Reduktion der Emissionen zu rechnen, da der Kohleanteil der Fernwärmeerzeugung entfällt.

Der Kraftstoffverbrauch und die damit verbundenen THG-Emissionen haben seit 1990 abgenommen. In den letzten Jahren ist jedoch wieder eine leichte Zunahme zu verzeichnen: 2 % in den Jahren 2015-2019.

Insgesamt reduzieren sich die pro-Kopf-Emissionen seit 2015 um 8 %.

2.3.2 THG-Emissionen nach Verbrauchergruppen

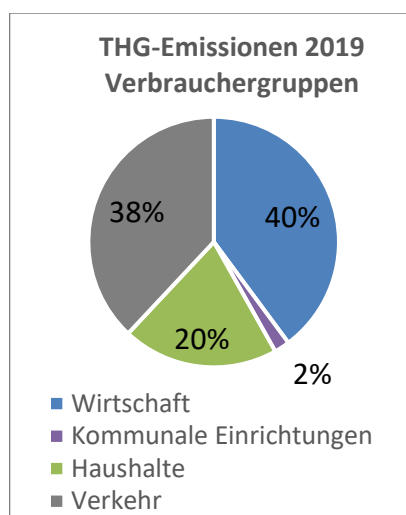


Abb. 5 Anteile der THG-Emissionen nach Verbrauchergruppen (EIGENE DARSTELLUNG EVF)

Bei der Verteilung der THG-Emissionen nach Verbrauchergruppen zeigen die Anteile ein ähnliches Bild wie bei der Verteilung des Endenergieverbrauchs. Grund hierfür ist die ausgewogene Verteilung des Stromverbrauches, da keine stromaffin produzierende Industrie in Erlangen angesiedelt ist.

Im Bereich der Wirtschaft ist in den Jahren von 1990 bis 2019 ein Rückgang von 41 % zu verzeichnen. Auch die weiteren stationären Verbrauchergruppen verzeichnen hohe Einsparungen. Diese sind primär dem verstärkten Einsatz erneuerbarer emissionsarmer Energien in allen Verbrauchergruppen (ausgenommen Verkehr) zuzuschreiben. Ebenfalls zu berücksichtigen ist hierbei der oben genannte Wechsel in der Datengrundlage.

Die kommunalen Einrichtungen verzeichnen allein in den Jahren 2015 bis 2019 einen Rückgang um 20 %. Der Verkehr verbucht die einzige Zunahme von 3 %.

Tab. 5 THG-Emissionen nach Verbrauchergruppen

Sektoren:	1990	2015	2019	Entwicklung	
	[t]	[t]	[t]	1990-2019	2015-2019
Wirtschaft	621.827	404.108	367.429	-41%	-9%
Kommunale Einrichtungen	28.644	22.948	18.388	-36%	-20%
Haushalte	258.870	201.513	185.755	-28%	-8%
Verkehr	395.368	341.880	350.574	-11%	3%
Gesamt	1.304.710	970.450	922.146	-29%	-5%

2.4 Zusammenfassung

Die Gesamtentwicklung der Energie- und THG-Bilanz zeigt in den Jahren 2015 bis 2019 im Energieverbrauch eine Stagnation auf, die THG-Emissionen sind leicht rückläufig. Da die Erlanger Einwohnerzahl jährlich deutlich wächst, reduzieren sich die pro-Kopf-Werte im selben Zeitraum: Endenergieverbrauch pro-Kopf – 3,4 %, THG-Emissionen pro-Kopf – 8 %.

Für einen Vergleich zu den pro-Kopf-Verbräuchen für ganz Deutschland werden die Zahlen des Jahres 2018 herangezogen (für 2019 existieren noch keine Vergleichszahlen). Erlangen weist hierbei einen deutlich geringeren Endenergieverbrauch pro-Kopf auf (75 % des bundesdeutschen Durchschnittes). Bei den THG-Emissionen liegt der Erlanger pro-Kopf-Wert nur knapp unter dem bundesdeutschen Durchschnitt (8,2 t zu 8,5 t).

Pro-Kopf-Verbräuche 2018:

Erlangen	24,0 MWh/a
Deutschland	30,1 MWh/a
Erlangen	8,2 t THG/a
Deutschland	8,5 t THG/a

Die pro-Kopf-Verbrauchszahlen liegen 2018 in Erlangen unter dem Bundesdurchschnitt. Für eine Erreichung der Klimaneutralität sind diese jedoch ebenfalls viel zu hoch. Die erforderliche Reduktion wird in Kapitel 4 Restbudget näher betrachtet.

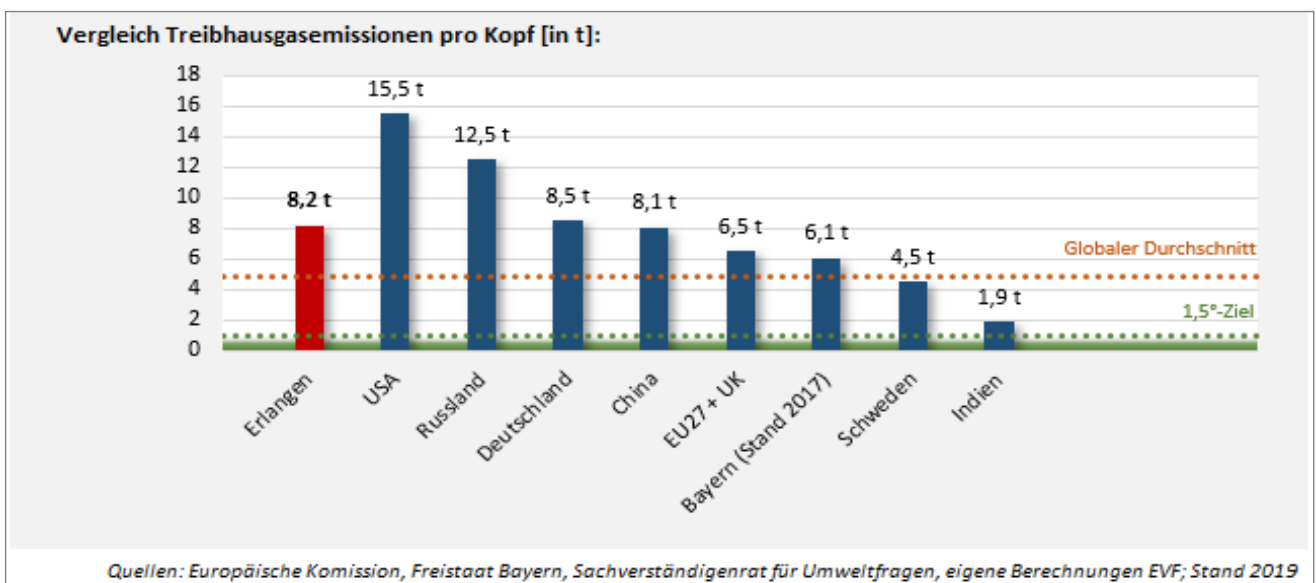


Abb. 6 Pro-Kopf Treibhausgasemissionen Vergleich weltweit

Bei der Betrachtung der THG-Emissionen wird deutlich, dass Strom einen anteilig größeren Einfluss auf die THG-Bilanz hat als die Wärmeenergieträger. Der Einsatz erneuerbarer Energien zur Stromerzeugung stellt somit einen wichtigen Baustein für die Erreichung der Klimaneutralität dar. Welche Auswirkungen der Einsatz von Ökostrom bereits aktuell hat, wird in der nachfolgenden Untersuchung dargestellt.

2.5 Nebenbetrachtung Strombilanz ESTW

Nach BSKO-Standard wird der Stromverbrauch einer Kommune anhand des bundesdeutschen Strommixes berechnet. Regional vorhandene Anlagen zur Stromerzeugung sind bereits in den bundesdeutschen Strommix integriert. Der externe Einkauf von Ökostrom bleibt jedoch unberücksichtigt. Exemplarisch werden nun die THG-Emissionen des Stromverbrauches unter Berücksichtigung des durch die ESTW gehandelten Ökostroms berechnet.

2.5.1 Auswirkungen des Ökostroms der ESTW

2019 lag der Anteil des Ökostroms am Gesamtstrom der Stadtwerke Erlangen bei 71,7 % (ESTW 2021). Hierdurch verringern sich die THG-Emissionswerte auf 0,129 t/MWh für ESTW-Strom im Vergleich zum bundesdeutschen Strommix mit 0,544 (KSP 2020).

In Abb. 7 sind die THG-Emissionswerte für den Stromverbrauch in Erlangen nach unterschiedlichen Berechnungsansätzen dargestellt. Die BSKO-konforme Berechnung anhand des bundesdeutschen Strommixes ist mit der orangenen Linie dargestellt. 2019 lagen die THG-Emissionen bei 350.880 t. Unter Berücksichtigung des Verbrauchs durch ESTW-Kunden (gelbe Linie) mit dem hohen Anteil an Ökostrom und den dadurch eingesparten THG-Emissionen sinkt der Wert um 67 % auf 114.730 t 2019. Der Anteil der Nicht-ESTW-Kunden wird dabei weiter mit dem bundesdeutschen Strommix berechnet, da keine Aussagen über die weiteren Stromanbieter und Tarife möglich sind. Eine 100 %-Versorgung aller Stromkunden Erlangens durch die ESTW würde theoretisch zu einer Einsparung von 81 % der strombedingten THG-Emissionen führen.

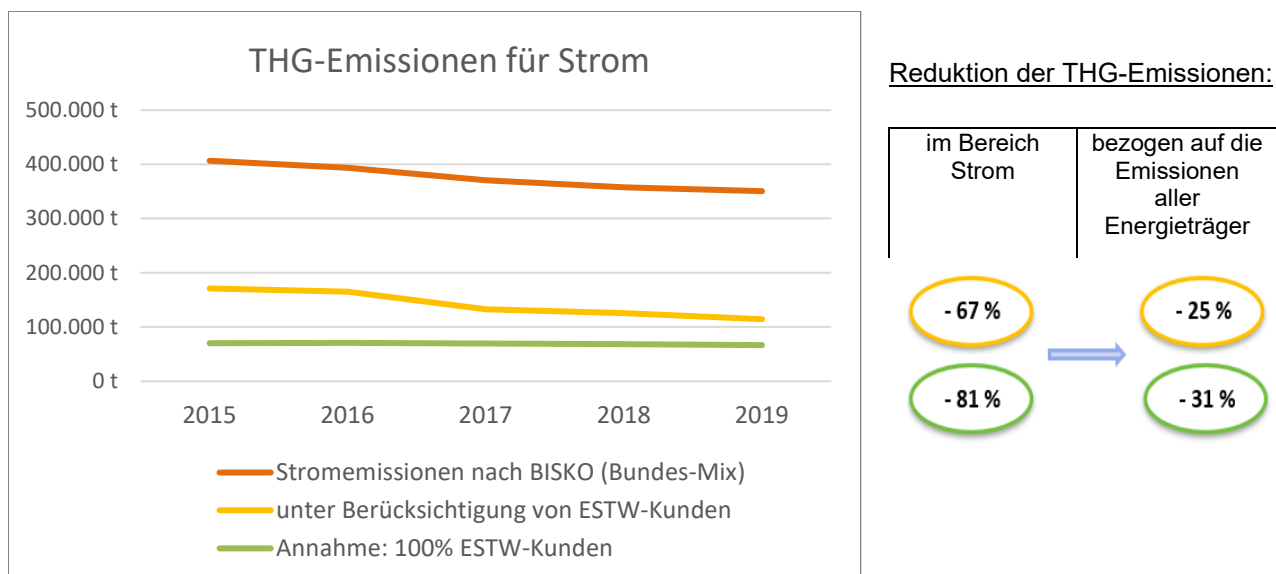


Abb. 7 THG-Emissionen für Strom im Stadtgebiet Erlangen (EIGENE DARSTELLUNG EVF)

Bezogen auf die gesamten Emissionen aller Sektoren in Erlangen führt der beschriebene Berechnungsansatz zu einer Reduktion der gesamten THG-Emissionen um 25 % und bei einer vollständigen Versorgung durch die ESTW um 31 %.

In jeder Hinsicht wichtig ist der Ausbau erneuerbarer Energien im Stadtgebiet und die Ausweitung des Ökostroms bei den ESTW auf 100 %.

2.5.2 Deckungsgrad durch lokal erzeugten Strom

Der Anteil der eigenen Stromerzeugung im Stadtgebiet steigt langsam aber kontinuierlich an. Nach den Auswertungen im Zuge der Erstellung der Energiebilanz durch den Klimaschutzplaner lag der Deckungsgrad 2018 bei 34 % (Daten 2019 Stand Februar 2021 noch nicht abrufbar). 2015 lag der Deckungsgrad noch bei 27 %. Neben den erneuerbaren Energien (Photovoltaik, Wasserkraft und Biomasse) ist hier auch der durch Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) entstehende Strom einbezogen. Der bei der Fernwärmeproduktion entstehende Strom hält mit rund 88,5 % des lokal erzeugten Stroms dabei den größten Anteil. Mit rund 18.400 MWh (2019) entfallen auf die Photovoltaik 8,2 %. Wasserkraft (2,2 %) und Biomasse (1,1 %) bilden die kleinsten Anteile der regionalen Stromversorgung ab.

Der Deckungsgrad allein durch erneuerbare Energieanlagen erzeugte Strom liegt 2019 bei 5 %. Der bei der Fernwärmeproduktion entstehende Strom ist dabei nicht berücksichtigt, da die Fernwärme aktuell noch durch fossile Energieträger (Kohle, Erdgas) erzeugt wird.

Stromkennzeichnung:

Abweichend zur BSKO-Methode wird der Ökostrom in der Stromkennzeichnung von Stadtwerken mit 0,00 g/kWh angesetzt und die Produktionsemissionen (LCA) nicht berücksichtigt. Auch bei der Stromerzeugung durch erneuerbare Energien werden geringfügig Emissionen durch die Herstellung der Anlagen verursacht. So sind nach Gemis z.B. 0,0105 t/MWh für Windenergie und 0,0027 t/MWh für Wasserkraft angesetzt (UBA 2019). Diese sind in der Nebenbetrachtung nicht berücksichtigt.

3 CO₂- Senken

3.1 Exkurs zur Kohlenstoffspeicherung in deutschen Wäldern

„Bis zum Jahr 2017 sind die Kohlenstoffvorräte mit 113,7 Tonnen pro Hektar in unseren Wäldern auf einen neuen Rekord gestiegen. Zwischen 2012 und 2017 wurden pro Hektar und Jahr in der lebenden Biomasse 1,1 Tonnen Kohlenstoff (C) zusätzlich akkumuliert. Auch der Kohlenstoffvorrat im Totholz stieg jährlich um 0,08 Tonnen auf 3,1 Tonnen pro Hektar. Welchen Einfluss die aktuellen Ereignisse Sturm, Dürre und Insekten haben, wird erst die Bundeswaldinventur 2022 aufzeigen können“ (AFZ 14/2019, S.14).

„Da Aufforstungs- und Entwaldungsflächen insgesamt in Deutschland eine untergeordnete Rolle spielen, ist damit die Waldbewirtschaftung auf der Schnittmenge des Holzbodens von 10,7 Mio. Hektar der entscheidende Motor bei der Kohlenstoffbindung mit 1,15 t C pro Hektar und Jahr in unseren Wäldern. Bei einer vergleichenden Betrachtung nach Eigentumsarten fällt die jährliche Kohlenstoffbindungsrate im Kleinprivatwald bis 20 ha Größe mit 1,5 t pro Hektar und Jahr derzeit am höchsten aus. Zurückzuführen ist dies auf die vergleichsweise geringe Nutzungsrate gegenüber anderen Eigentumsarten“ (AFZ 14/2019, S.17). „Da summarisch die Speicherleistung aller Pools höher als der Verlust ist, können nach gegenwärtigem Stand durchschnittlich pro Jahr 1,25 Mio. t C als Speicher angerechnet werden“ (AFZ 14/2019, S.18).

„Bezieht man zusätzlich die aktuellsten Bindungsraten für den Boden und die Streu ein, so entlasten die deutschen Wälder die Atmosphäre um 62 Mio. t CO₂ jährlich. Sie kompensieren damit die nationalen Treibhausgasemissionen insgesamt um 7 % (AFZ 14/2019, S.17).

3.2 Ermittlung der Kohlenstoffsinken im Stadtgebiet

3.2.1 Vorgehensweise

Für eine überschlägige Berechnung der Kohlenstoffsinken auf dem Erlanger Stadtgebiet werden die Durchschnittszahlen der bundesdeutschen Kohlenstoffinventur von 2017 (nach AZF 14/2019) und der bayerischen Kohlenstoffbilanz (LWF 2012) herangezogen.

Eine Ermittlung der ortsgenauen Kohlenstoffsinken durch die tatsächlichen Waldbestände anhand Baumartenzusammensetzung und Altersstruktur im Stadtgebiet Erlangen auf Basis des Klimarechners des DFWR gestaltet sich aufgrund der notwendigen detaillierten Datenlage (insbesondere Zuwachs je Baumart) im vorgegebenen Projektrahmen als nicht möglich.

DLWR: Klimarechner zur Quantifizierung der Klimaschutzleistung von Forstbetrieben auf Grundlage von Forsteinrichtungsdaten (SCHLUHE ET AL 2018) „Der Klimarechner ermöglicht es, die Kohlenstoffvorräte in der lebenden oberirdischen Derbholz-Baumbiomasse sowie die Kohlenstoffsinken und -quellen eines Forstbetriebes zu identifizieren, die Effekte der geplanten Bewirtschaftung zu quantifizieren und auf dieser Basis die Klimaschutzleistung vereinfachend zu kommunizieren“.

Für eine erste Einschätzung der Größenordnung der vorhandenen CO₂-Senken durch Wald- und Forstflächen im Stadtgebiet ist eine überschlägige Grobschätzung anhand der Waldflächen ausreichend.

Ermittelt wird der Speicher von Kohlenstoff (C) durch den jährlichen Zuwachs. Hierfür gibt die deutschlandweite Kohlenstoffinventur unterschiedliche Werte für Wald- und Forstflächen (1,15 t C/ha*a) und kleine Privatwälder (1,5 t C/ha*a) aufgrund der unterschiedlichen Intensität der Nutzung an (AFZ 14/2019). Die bayerische Kohlenstoffbilanz der bay. Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF) bezieht sich auf die staatlichen Forstflächen und ermittelt hierfür einen jährlichen Kohlenstoffspeicher von 1,5 t C/ha. Für die Ermittlung im Stadtgebiet Erlangen wurden sowohl für die staatlichen, die kommunalen Wälder wie auch für die Privatwälder der durchschnittliche Speicher von 1,5 t C/ha*a angenommen.

Zusätzlich werden die Straßen- und Stadtbäume der Stadt Erlangen berücksichtigt. Grundlage hierfür bildet das städtische Baumkataster. Pro Baum wird mit einer jährlichen Speicherkapazität von 0,01 t C gerechnet (vgl. FVA 2011).

Die Umrechnung von Kohlenstoff [C] in Kohlenstoffdioxid [CO₂] erfolgt anhand des Faktors 3,67 (nach LWF 2012).

3.2.2 Ergebnis

Tab. 6 CO₂-Senken durch Wald- und Forstflächen im Stadtgebiet Erlangen

CO ₂ -Senken Wald	ha	t C /a	t THG /a
Staatsforst	880	1.320	4.844
Kommunalwald	335	503	1.846
Privatwald	364	546	2.004
Gesamt	1.579	2.369	8.695

CO ₂ -Senken Stadtbäume	Stück	t C /a	t THG /a
Stadtbäume (Baumkataster)	21.887	219	803

aktuelle CO₂-Senke gerundet	2.600	9.500
Speicherung von THG-Emissionen 2020		1,3%

Über die durchschnittliche Bindungsrate von 1,5 t C pro Hektar und Jahr werden im Stadtgebiet Erlangen auf den Wald- und Forstflächen rund 2.600 t Kohlenstoff gespeichert. Das entspricht einer jährlichen Bindung von 9.500 t CO₂ und somit 1,3 % der jährlichen CO₂-Emissionen im gesamten Stadtgebiet.

Kriterien für eine Spezifizierung der CO₂-Senken:

- Baumartenzusammensetzung
- Je Baumart und Altersklasse:
 - Vorrat
 - Zuwachs
 - Nutzung

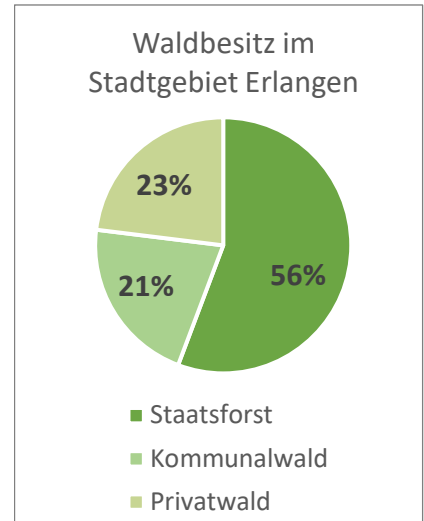


Abb. 8 Waldbesitz im Stadtgebiet Erlangen

(NACH BAY.STATISTIK, BAY. STAATSFORSTE)

Experimenteller Exkurs:

Für die Verdeutlichung der Dimensionierung von CO₂-Senken im städtischen Raum wird ein gedankliches Experiment durchgeführt: Würde eine vollständige Umnutzung der aktuell landwirtschaftlich genutzten Flächen zu Wald- und Forstflächen stattfinden, würde sich der Anteil der Kohlenstoffspeicherung um ca. 3.460 t C im Jahr erhöhen. Hierdurch wäre jedoch insgesamt auch nur eine Bindung von 2 % der aktuellen CO₂-Emissionen zu erreichen. Gleichzeitig entfällt die Fläche für die stadtnahe Lebensmittelversorgung, wodurch wiederum vermehrte Transportwege, inkl. THG-Emissionen, anfallen würden.

3.2.3 Interpretation der Ergebnisse vor dem Hintergrund Waldzustand und Waldnutzung

Es wird deutlich, dass die Wald- und Forstflächen auf Grund der Flächenverhältnisse im Stadtgebiet nur einen geringen Beitrag bei der Bindung von CO₂-Emissionen leisten können. Bei der überschlägigen Berechnung wurden nicht die Baumartenzusammensetzung und der aktuelle Waldzustand sowie die Bewirtschaftungsweise und Folgenutzung des entnommenen Holzes berücksichtigt. Gerade in der nachhaltigen Holznutzung in langlebigen Produkten (Hausbau, Möbelherstellung) liegt jedoch das große Potenzial der Wälder als CO₂-Senke.

Kurzzusammenfassung der Bedeutung des Waldbestandes und dessen Zustand und Nutzung:

Die Spanne der CO₂-Speicherkapazität der verschiedenen Baumarten reicht von 7,2 t (Eiche) bis 13,6 t (Fichte) auf optimalen Böden und unter Berücksichtigung aller Gesamt-Klimaschutzeffekte (LWF 2012, S.2). Für den geringen Anteil Wald- und Forstflächen im Erlanger Stadtgebiet sind jedoch keine gravierenden Änderungen der CO₂-Speicherkapazität im Verhältnis zu den THG-Emissionen durch Detaillierung zu erwarten.

Der aktuelle Waldzustand ist von den letzten Trockenjahren, Sturmschäden und Kalamitäten geprägt. Die Auswirkungen dadurch sind noch nicht genau untersucht. Die nächste Waldinventur 2021/22 wird hierzu neue Erkenntnisse bringen. Durch die Schädigung des Waldes wird vorerst Holz zersetzt, was zur Freisetzung von Kohlenstoff führt. Im Extremfall kann sich hierdurch ein Waldbestand von einer CO₂-Senke zu einer CO₂-Quelle entwickeln. Gleichzeitig wird Raum für die Verjüngung im Wald geschaffen, ein Waldumbau zu einem nachhaltigen, klimawandelresistenten Wald kann stattfinden und in den folgenden Jahren zu einer verstärkten Kohlenstoffbindung führen, da in der aktiven Wachstumsphase des Waldes der meiste Holzzuwachs und somit die größte Kohlenstoffbindung erfolgt.

Dies gilt auch für eine aktive Waldwirtschaft, welche durch den stärkeren Holzzuwachs zu einem verstärkten Kohlenstoffspeicher führt. Demgegenüber befinden sich in einem unbewirtschafteten Wald größere Vorräte, die jährliche Zuwachsrate ist jedoch geringer und somit auch die Neubindung von Kohlenstoff (LWF 2012).

Für eine nachhaltige Speicherung des Kohlenstoffes ist die Nutzung des Holzes im Nachgang von großer Bedeutung:

- Brennholz bedeutet Substitution fossiler Energieträger, jedoch keine anhaltende Kohlenstoffspeicherung
- Durch die Nutzung des Holzes für Gebäudebau und Möbelherstellung wird der gebundene Kohlenstoff für weitere 40-60 Jahre oder länger gespeichert.

Fazit:

Erst über eine aktive nachhaltige Forstwirtschaft mit einer anschließenden Holznutzung für langlebige Holzprodukte wird die CO₂-Senke durch Wälder und Forste optimal ausgeschöpft.

Die Übernahme der Wälder als CO₂-Senke in Energiebilanzen zeigt nur eine Momentaufnahme des aktiven Kohlestoffspeichers, berücksichtigt jedoch nicht die weitere Nutzung des Holzes und die damit verbundene Freisetzung des CO₂. Für einen aktiven Klimaschutz und Reduzierung der THG-Emissionen ist zukünftig auf eine langlebige Verwendung von Holzprodukten zu achten. Durch einen verstärkten Einsatz von Holz gerade auch im Gebäudebereich können THG-emissionsstarke Materialien wie Stahl und Beton ersetzt werden. Durch die Verwendung von regionalem Holz (Umkreis bis 100 km) wird die lokale und regionale Holzwirtschaft gestärkt, THG-Emissionen für Transport gering gehalten, klimaschädliche Materialien substituiert und die lokalen Wälder als CO₂-Senken durch eine nachhaltige Bewirtschaftung optimiert.

4 Restbudget

4.1 Hintergrund

Die Stadt Erlangen ist sich der Bedeutung des Klimawandels bewusst. Sie hat den Klimanotstand ausgerufen und sich das Ziel der Klimaneutralität vor 2030 gesetzt. Die Grundlagenstudie Klimanotstand (KLIMAKOM 2020) bildet hierfür die Basis. Über den Restbudgetansatz ist dort genau erläutert wieviel THG-Emissionen noch emittiert werden dürfen, bevor die Erreichung des 1,5°C-Zieles nicht mehr möglich ist. Nach Ermittlungen des SRU (Sachverständigen Rat für Umweltfragen) stehen für Erlangen noch 3,4 Millionen Tonnen ab 2020 zur Verfügung (KLIMAKOM 2020, S.28). Ein gutes Viertel wird durch die aktuellen Emissionen bereits jährlich verbraucht. Schnelles Handeln ist notwendig!

4.2 Erforderliche Reduzierung der THG-Emissionen

In den vergangenen Jahren fand eine Reduzierung der THG-Emissionen von jährlich 1,25 % statt. (Berücksichtigt wurde hier die Reduktionsrate der Jahre 2015-‘18, da die Emissionswerte für 2019 nur als vorläufig ermittelte Werte vorliegen). Bei einer gleichbleibenden Entwicklung der THG-Emissionen ist das Erlanger Restbudget bereits im Jahre 2024 aufgebraucht (Abb. 9).

Für eine Klimaneutralität bis 2030 muss eine deutlich verstärkte Reduzierung der jährlichen THG-Emissionen erreicht werden. Anhand der linearen Berechnung für die erforderliche THG-Emissionsminderung wird deutlich, dass eine Einsparung von 11,7 % jährlich notwendig ist, um das Restbudget nicht vor 2030 aufzubrechen. Durch die lineare Reduktion der THG-Emissionen in allen Bereichen (Verkehr, Landwirtschaft, Strom und Wärme) flacht die Kurve des verbleibenden Restbudgets ab (gestrichelte hellblaue Kurve, Abb. 10). Es verbleibt ein minimales Restbudget von knapp 300 t. In diesem rechnerischen Ansatz wird mit einer vollständigen Erreichung eines Null-THG-Emissionen-Ausstoßes vor 2030 gerechnet. Hierfür ist die jährliche Reduktion von 11,7 % notwendig, nahezu eine Verzehnfachung der aktuellen Reduktionsrate.

Bei der Betrachtung der THG-Emissionen können auch Kompensationen (Ausgleichsmaßnahmen) berücksichtigt werden. Die erfassten Emissionen in der THG-Bilanzierung würden sich deutlich reduzieren, wenn die aktuelle und bereits für 2021 geplante Kompensation der ESTW außerhalb des Stadtgebietes berücksichtigt wird. Diese geschieht durch die „Finanzierung von zertifizierten CO₂-Minderungsprojekten“ sowie durch Erneuerbare-Energieanlagen der ESTW außerhalb des Stadtgebietes (Windräder und Wasserkraft). Durch diese Kompensationen werden die jährlichen THG-Emissionen deutlich reduziert und die

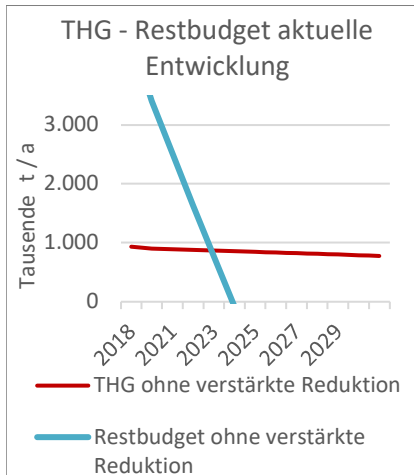


Abb. 9 Restbudget aktuelle Entwicklung

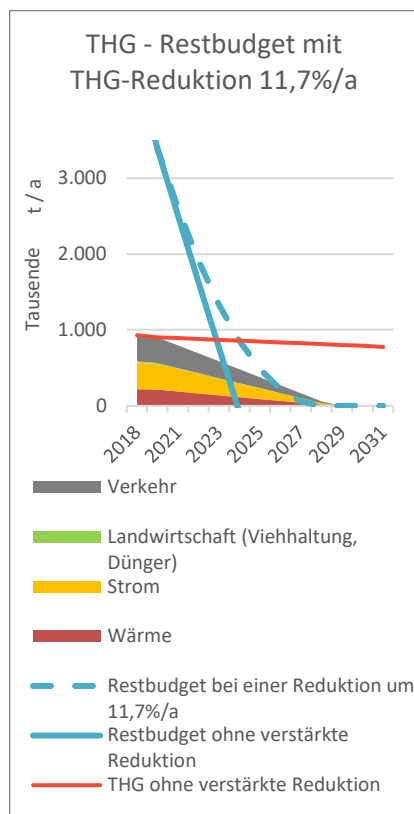


Abb. 10 Restbudget bei einer THG-Reduktion von 11,7 %/a

„Reichweite“ des Restbudgets verlängert. Für die Erreichung der Klimaneutralität vor 2030 ist dann eine zusätzliche jährliche Reduktionsrate von 7,3 % notwendig. Ohne verstärkte Reduktion ist das Restbudget auch unter Berücksichtigung der aktuellen und geplanten Kompensationen bereits Anfang 2026 aufgebraucht.

In Abb. 11 sind alle bisher beschriebenen Szenarien des Restbudgets sichtbar. Die rot gestrichelte Linie zeigt die Entwicklung der THG-Emissionen unter Berücksichtigung der aktuellen und geplanten Kompensationen durch die ESTW. Durch die auch hier angenommene lineare Reduktion flacht die Kurve des Restbudgets deutlich ab. Mit der Erreichung der Null-Emissionen vor 2030 verbleibt in diesem Falle ein deutlich größerer Anteil des Restbudgets von gut 500.000 t.

4.2.1 Exkurs zu Kompensationen

Die Inanspruchnahme von Kompensationsleistungen ist ein viel diskutiertes Thema, in welches Fragestellungen der Verantwortung und Fairness gegenüber anderen Ländern und Regionen mit hineinspielt. Ein „Freikaufen“ aus der Eigenverantwortung vor Ort ist nicht möglich, denn an erster Stelle steht stets die lokale Einsparung und Vermeidung von Energieverbräuchen und THG-Emissionen. Für die Substitution fossiler Energieträger gilt ebenfalls die Prämisse der Regionalität. Primär muss die Nutzung aller regional vorhandenen Potenziale ermöglicht werden. In einem zweiten Schritt, da eine Energieversorgung auch bei großen Einsparungen nicht über das eigene Stadtgebiet möglich ist (siehe Transformation), gilt es regionale Potenziale zu heben. Hier ist die Kooperation innerhalb der Metropolregion Nürnberg ein wichtiger Bestandteil. Erst im Anschluss daran kann eine schrittweise Erweiterung des Kompensationsradius erfolgen: bayernweit, deutschlandweit, europaweit.

Wie bei vielen Themen der Nachhaltigkeit gilt auch im Falle von notwendigen Kompensationen der Leitgedanke:

„so wenig wie möglich und das Notwendige so regional wie möglich!“

4.3 Zusammenfassung

Die Entwicklung bzw. der Verbrauch des Restbudgets für die Stadt Erlangen weist nur noch einen sehr kurzen Zeitrahmen auf. Ist das Budget weltweit aufgebraucht, ist die Einhaltung des 1,5° C-Zieles nicht mehr erreichbar.

- Für Erlangen ist bei einer gleichbleibenden Entwicklung der THG-Emissionen das Restbudget bereits Mitte/Ende 2024 aufgebraucht.
- Unter der Berücksichtigung der aktuellen und geplanten Kompensationen UND bei einer deutlich verstärkten Reduktion um 7,3 %/a ist eine Verlängerung des Restbudgets bis Ende 2029 möglich.
- Ohne Berücksichtigung der Kompensationen ist eine Reduktion von 11,74 %/a erforderlich.

Erforderliche Reduktion der jährlichen THG-Emissionen von

11,74 %

für eine Klimaneutralität bis 2030

Unter Berücksichtigung von aktuellen und geplanten Kompensationen ist eine Reduktion von 7,3 %/a erforderlich.

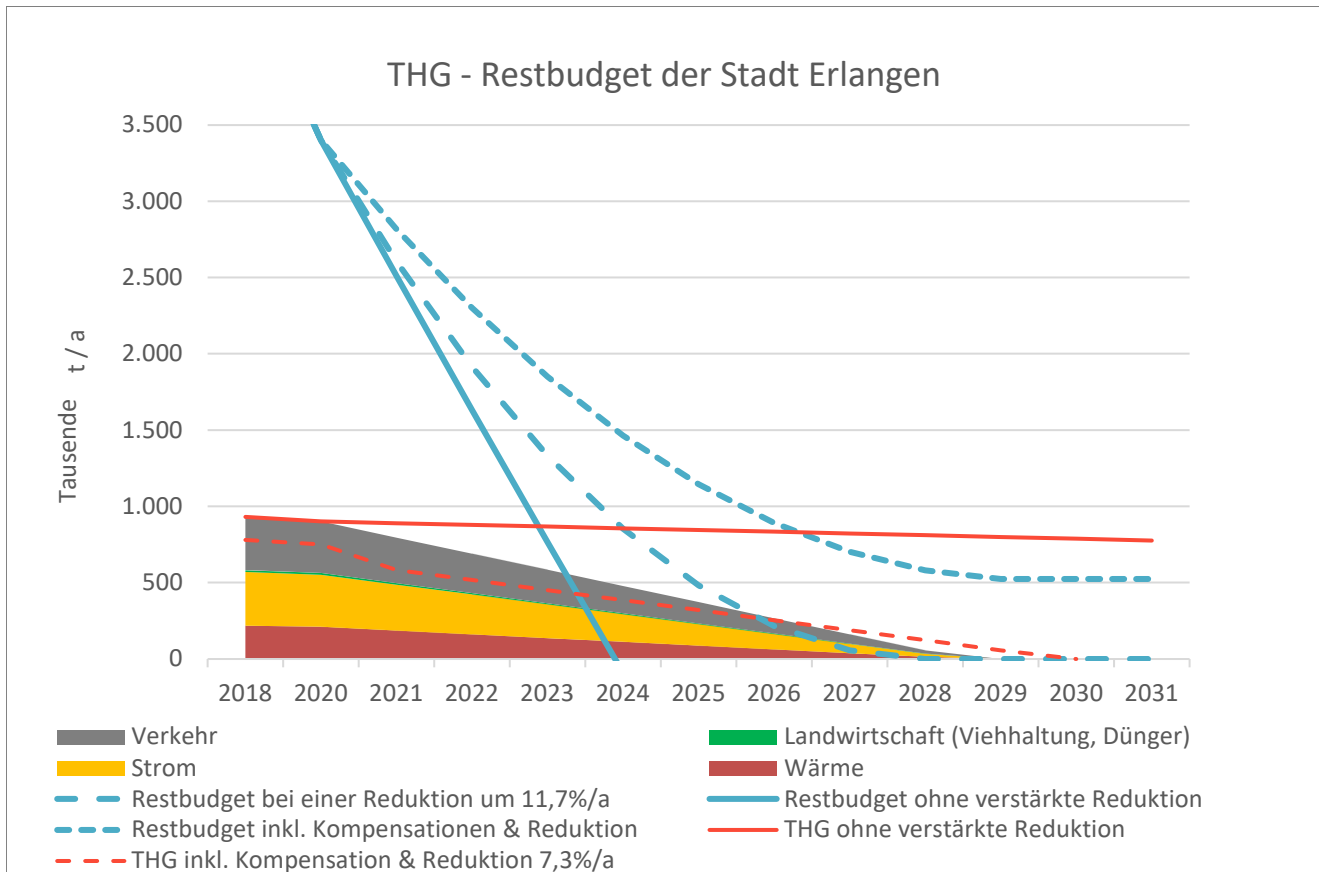


Abb. 11 Entwicklung des THG-Restbudgets der Stadt Erlangen
(EIGENE DARSTELLUNG EVF)

Tab. 7 Entwicklung des THG-Restbudgets der Stadt Erlangen

Zusammenfassung	[t THG]					
	2018	2020	2024	2026	2028	2030
Verkehr	349.849	338.304	179.436	100.003	20.569	0
Strom	353.004	341.355	181.055	100.905	20.754	0
Wärme	217.385	210.212	111.496	62.139	12.781	0
Landwirtschaft *	11.425	11.048	5.860	3.266	672	0
THG Emissionen Red. 11,7 %/a	931.663	900.919	477.847	266.312	54.776	0
Restbudget bei einer Reduktion um 11,7%/a	k.A.	3.400.000	854.004	215.613	294	294
Restbudget ohne verstärkte Reduktion	k.A.	3.400.000	-91.059			
THG ohne verstärkte Reduktion	931.663	900.918	855.872	833.349	810.826	788.303
Restbudget inkl. Kompensationen & Reduktion 7,3%/a	k.A.	3.400.000	1.464.153	890.832	580.579	524.103
THG inkl. Kompensation & Reduktion 7,3%/a	781.124	749.379	385.311	253.777	122.243	0

* Landwirtschaft enthält statistische Emissionswerte anhand der Tierzahlen (Verdauung, Weidegang, Wirtschaftsdünger) und der vorhandenen Ackerflächen (Mineraldünger, Kalkung, Ernterückstände...),

5 Transformation

In den vorangegangenen Kapiteln wird der aktuelle Handlungsbedarf dargestellt, der sich aus dem CO₂-Restbudget und den weltweiten Klimaschutzzielen ergibt. Im Folgenden sollen erste Überlegungen angestellt werden, wie die THG-Emissionen in Zukunft weitgehend reduziert werden können.

Die Transformationsrechnung gibt in diesem Zusammenhang Auskunft darüber, wie zum einen nicht-regenerative durch regenerative Energieträger ersetzt werden und zum anderen welche neuen Technologien aus heutiger Perspektive zum Einsatz kommen könnten. Vorhandene Einspar- und Effizienzsteigerungspotenziale sowie die Potenziale für den Ausbau regenerativer Energieträger sollen dabei berücksichtigt werden, soweit diese im notwendigen Zeithorizont sowohl technisch als auch gesellschaftlich tragfähig und nach Möglichkeit wirtschaftlich umsetzbar sind.

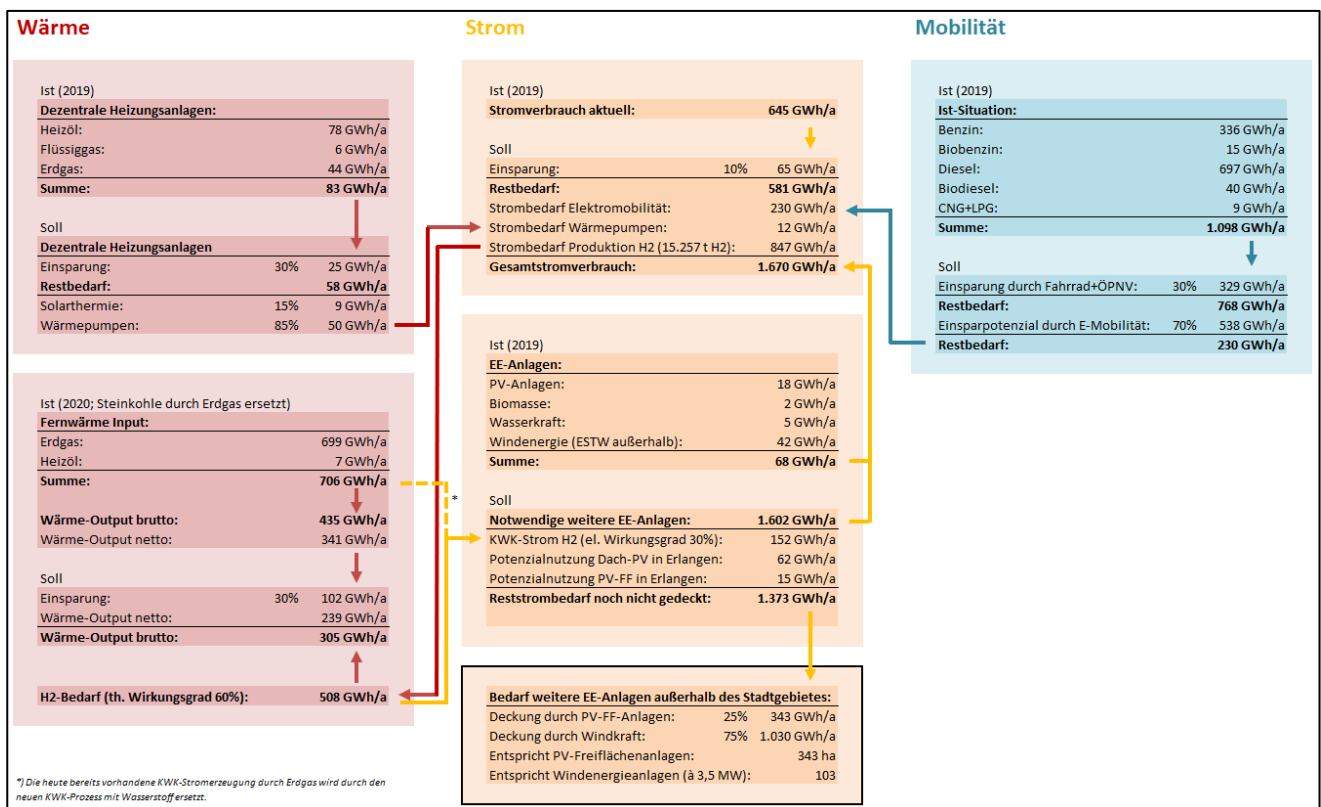


Abb. 12 Transformationsrechnung
(eigene Berechnungen EVF 2021, Darstellung in DIN A4 Anhang 3)

Die Transformationsrechnung ist als Beispielrechnung zu verstehen, die die aktuellen Möglichkeiten für eine weitgehend THG-neutrale Energieversorgung darstellt. Sie zeigt außerdem auf, welche zusätzlichen Ressourcen im Bereich erneuerbarer Energien erschlossen werden müssten, um den Energiebedarf der Stadt Erlangen in Zukunft decken zu können.

5.1 Mobilität

Bei dem Sektor Mobilität handelt es sich zunächst um einen Sonderfall, da sich der Energiebedarf für Mobilität aus den Sektoren Wärme (Verbrennungsmotor; Energieträger werden verbrannt und in mechanische Energie umgewandelt) und Strom (Elektromotor; Strom als Energieträger) zusammensetzt und „Mobilität“ immer das Ergebnis der Umwandlung der beiden vorgenannten Energieformen ist. Auf Grund der Eigenheiten und der besonderen Anwendungsform soll der Bereich Mobilität aber trotzdem gesondert betrachtet werden.

5.1.1 Einsparpotenzial

Zunächst werden in Erlangen aktuell ca. 1.098 GWh Endenergie für Mobilität verbraucht. Unabhängig von der Art der eingesetzten Energie gilt es hier als Erstes Einsparpotenziale zu erschließen. So kann die Stadt Erlangen durch vielfältige Maßnahmen versuchen, den Mobilitätsbedarf auf andere umweltfreundlichere Formen zu verlagern. Um größere Einsparpotenziale erschließen zu können, sind aber auch umfangreiche Maßnahmen notwendig. Praxisbeispiele in anderen Städten haben gezeigt, dass hier Einsparpotenziale von ca. 30% oder mehr erschließbar sind. Dass dies gelingen kann, zeigen die Beispiele Oslo, Kopenhagen und Barcelona (vgl. FGSV 2016, DW 2019, ARD 2020, HAMBURGER ABENDBLATT 2017, ENERGIELEBEN 2016, BUSINESSINSIDER 2018). Sie zeigen aber auch, welche Maßnahmen hierfür umgesetzt werden müssen. Entweder müssen die Innenstädte durch entsprechend harte Restriktionen künstlich komplett autofrei gehalten oder durch andere Maßnahmen für Autos so unattraktiv gemacht werden, dass andere Verkehrsmittel am Ende attraktiver sind als ein motorisierter Individualverkehr (MIV). Flankiert werden müssen solche Maßnahmen durch eine massive Attraktivitätssteigerung und der Schaffung eines entsprechenden Angebots in den Bereichen ÖPNV, Radverkehr und anderen Mobilitätsformen. Genauso zeigt das Beispiel Barcelona aber auch, dass solche umfangreichen Vorhaben schnell an die Grenzen der gesellschaftlichen Akzeptanz stoßen (vgl. HANDELSBLATT 2019). Analog der vorgenannten Beispiele sehen die Autor*innen der vorliegenden Studie bei einem entsprechend behutsamen Vorgehen und guter Kommunikation ein Einsparpotenzial von mindestens ca. 30% durch Verlagerung des MIV auf den ÖPNV, das Verkehrsmittel Fahrrad und andere innovative Alternativen. Dies würde bereits ähnliche Maßnahmen voraussetzen, wie sie oben beschrieben wurden. Der Endenergiebedarf für den Sektor Mobilität würde sich hierdurch rechnerisch auf dann noch etwa 768 GWh pro Jahr reduzieren.

5.1.2 Effizienzsteigerung

Weiterhin ist bezüglich einer möglichst hohen Energieeffizienz zu berücksichtigen, dass Verbrennungsmotoren sehr ineffizient sind. Nur etwas mehr oder weniger als 40% der eingesetzten Energie werden tatsächlich in kinetische Energie umgewandelt und dienen der Fortbewegung. Außerdem werden hierfür aktuell fast ausschließlich nicht-regenerative Energieträger wie Benzin oder Diesel eingesetzt. Theoretisch könnten zwar Biokraftstoffe verwendet werden, jedoch sind die weltweiten Ausbaupotenziale stark begrenzt und könnten den Energiebedarf bei weitem nicht decken. Außerdem befindet sich die Nutzung stets in einer Konkurrenzsituation zu Nahrungsmittelproduktion und Umweltschutz (vgl. WWF 2007).

Darüber hinaus werden aktuell Methoden („Power-to-X“) diskutiert, um künstliche bzw. „synthetische“ Kraftstoffe für Verbrennungsmotoren herzustellen, sogenannte „E-Fuels“. Theoretisch könnten hierfür regenerative Energien genutzt werden. In diesem Zusammenhang besteht die Problematik, dass die synthetischen Kraftstoffe zum einen mit hohen Wirkungsgradverlusten hergestellt werden müssen und zum anderen mit einem sehr ineffizienten Verbrennungsmotor genutzt werden, der am Ende nur ca. 40% der wertvollen regenerativen Energien nutzen könnte. Der Gesamtwirkungsgrad (η) der benötigten Energie zum Erzeugen der synthetischen Kraftstoffe bis zur dann tatsächlich genutzten kinetischen Energie liegt bei nur max. ca. 12-20%.

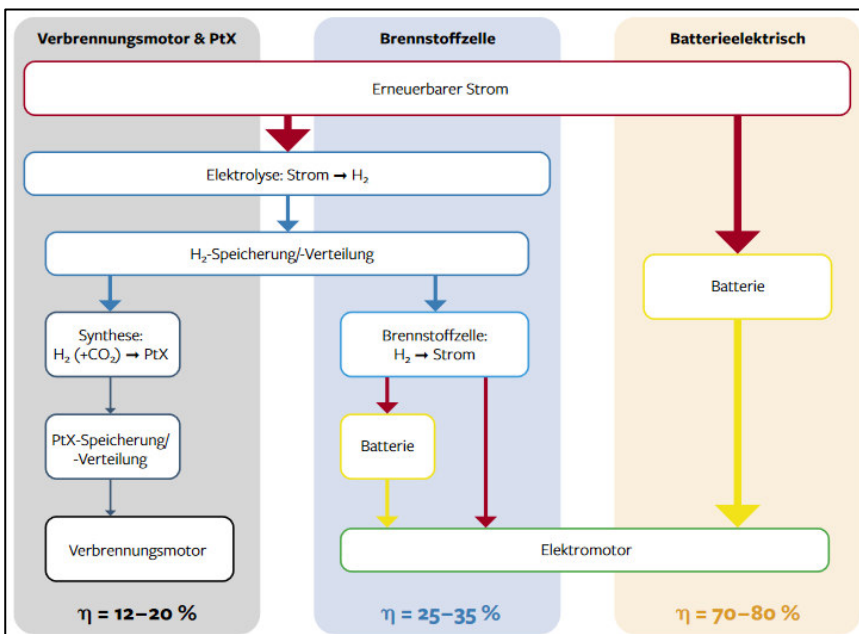


Abb. 13 Energetischer Gesamtwirkungsgrad verschiedener Antriebsoptionen
(Quelle: SRU 2017)

Dem gegenüber steht der sehr effiziente Elektromotor. Dieser wandelt die eingesetzte Energie inkl. Wirkungsgradverluste der benötigten vorgeschalteten Fahrzeug-Batterie zu etwa 85-90% in kinetische Energie um. Damit ist der Elektromotor bezüglich Energieeffizienz deutlich besser als der Verbrennungsmotor. Der Mobilitätsbedarf sollte hinsichtlich der Energieeffizienz und der nur begrenzt zur Verfügung stehenden regenerativen Energien in Zukunft also durch den Elektromotor bereitgestellt werden.

Bezüglich des Elektromotors bieten sich aus heutiger Perspektive zwei Varianten an:

1. Auf der einen Seite können regenerative Energien unmittelbar in die Batterie des Elektrofahrzeugs gespeichert werden. Werden hier auch Transportverluste im Stromnetz und weitere Speicherverluste für zeitversetztes und bedarfsgerechtes Laden berücksichtigt (der zur Verfügung stehende regenerative Strom kann vielleicht nicht immer genau dann in die Elektrofahrzeuge gespeichert werden, wenn er anfällt), weisen reine Elektrofahrzeuge einen Gesamtwirkungsgrad von ca. 70 % bis 80 % auf.
2. Auf der anderen Seite können die regenerativen Energien im Vorfeld mittels Elektrolyse in reinen Wasserstoff (H_2) umgewandelt werden. In diesem Konzept dient der Wasserstoff als universeller Energiespeicher, der in dem konventionellen System der Kraftstoffdistribution verteilt werden kann. Der Wasserstoff kann dann in einer Brennstoffzelle wieder in Strom für den Elektromotor umgewandelt werden. Der Wirkungsgrad der Brennstoffzelle in Höhe von 60% ist hier zwar deutlich besser als beim Verbrennungsmotor, jedoch bereits schlechter als der Gesamtwirkungsgrad des reinen batterieelektrischen Fahrzeugs. Darüber hinaus muss auch der Strom der Brennstoffzelle zunächst in einer Batterie gepuffert werden, wodurch hier dieselben Verluste wie im reinen batterieelektrischen Fahrzeug entstehen. Hinzu kommen zusätzliche 30 % Verluste bei der Elektrolyse. Inklusive Transport und Lagerung weist das Brennstoffzellen-Elektrofahrzeug einen Gesamtwirkungsgrad von nur ca. 25 % bis 35 % auf.

Die beiden Varianten für Elektromotoren mögen für viele Anwendungszwecke unterschiedliche Vor- und Nachteile haben. Das Thema wird sehr kontrovers und vor allem im „Autoland Deutschland“ teils auch sehr emotional diskutiert und dabei beidseits viel Kritik hinsichtlich der technischen Umsetzung und der Ressourceneffizienz geäußert.

In Anbetracht der begrenzten vorhandenen Potenziale und im Hinblick auf eine möglichst hohe Energieeffizienz bieten reine batterieelektrische Fahrzeuge das höchste erschließbare Effizienzsteigerungspotenzial. Auch das hat der Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU) bereits festgestellt (vgl. SRU 2017). Gegenüber dem aktuell vorhandenen Kraftfahrzeugpark kann ein Einsparpotenzial in Höhe von ca. 70 % erschlossen werden. Der Energiebedarf für Mobilität liegt dann noch bei ca. 230 GWh Strom pro Jahr. Das gesamte Einsparpotenzial im Sektor Mobilität also bei ca. 80 %.

5.2 Wärme

Auch im Wärmebereich werden heute noch viele nicht-regenerative Energieträger genutzt. Dabei handelt es sich vor allem um flüssige und gasförmige Energieträger wie Heizöl, Erdgas oder Flüssiggas, die in Heizungsanlagen verbrannt und hierdurch in nutzbare Wärmeenergie umgewandelt werden.

5.2.1 Einsparpotenziale

Zunächst ist es ratsam, den Energiebedarf durch die Nutzung von Einsparpotenzialen zu mindern. Trotz bereits vorhandener und umfangreicher Förderungen durch Bundes- und Landesinitiativen konnte in den vergangenen Jahren deutschlandweit eine Sanierungsrate von nur ca. 1 % bis ca. 1,5 % pro Jahr festgestellt werden (vgl. DENA 2019). Bundesweite Förderprogramme für die energetische Sanierung wurden in Anbetracht der Klimaschutzziele deshalb in der Vergangenheit immer weiter ausgebaut. Immobilienbesitzer*innen sollte dies als Anreiz dienen, die Gebäude energetisch zu sanieren (vgl. BEG 2020). Gerade durch die letzten Novellierungen der einschlägigen Förderprogramme mit erneut höheren Förderquoten konnte in Fachkreisen ein etwas erhöhtes Interesse an der energetischen Sanierung privater und gewerblicher Bauherren beobachtet werden.

Dennoch bewegt sich die aktuelle Sanierungsrate (1 % bis 1,5 %) in Anbetracht der notwendigen THG-Einsparungen im Restbudget-Ansatz (>11 % pro Jahr) auf einem relativ niedrigen Niveau. Mit einem Einsparpotenzial von 30 % wird in der Transformationsrechnung angenommen, dass hinsichtlich des zeitlichen Horizonts des Restbudget-Ansatzes (Null Emissionen im Jahr 2030) die Sanierungsrate auf ca. 3 % bis 4 % pro Jahr angehoben werden und sich damit mehr als verdoppeln müsste. Dies wäre beispielsweise durch umfangreiche Aufklärung und beherrzte zusätzliche finanzielle Zuschüsse durch die Stadt Erlangen theoretisch möglich. Jährliche Sanierungsaktivitäten bewegen sich in diesem Zusammenhang aber auch innerhalb der Grenzen der Kapazitäten ausführender Unternehmen und Handwerker*innen. Diese sind bereits heute stark ausgelastet.

Ist (2019)	
Ist-Situation:	
Benzin:	336 GWh/a
Biobenzin:	15 GWh/a
Diesel:	697 GWh/a
Biodiesel:	40 GWh/a
CNG+LPG:	9 GWh/a
Summe:	1.098 GWh/a
↓	
Soll	
Einsparung durch Fahrrad+ÖPNV:	30% 329 GWh/a
Restbedarf:	768 GWh/a
Einsparpotenzial durch E-Mobilität:	70% 538 GWh/a
Restbedarf:	230 GWh/a

Abb. 14 Transformation im Bereich Mobilität

(Eigene Darstellung EVF 2021)

Es wurde angenommen, dass die Sanierungsrate der Stadt Erlangen genauso hoch ist, wie die bundesweite Sanierungsrate. Konkrete Daten lagen für die vorliegende Studie nicht vor. Eine tatsächliche Sanierungsrate für die Stadt Erlangen müsste erst noch erhoben werden.

Gelingt es, die 30% Einsparpotenzial zu erschließen, würde sich der Energiebedarf für Wärme um ca. 127 GWh pro Jahr reduzieren (25 GWh bei den dezentralen Heizungsanlagen und 102 GWh bei den an das Fernwärmesystem angeschlossenen Gebäuden).

5.2.2 Potenziale für erneuerbare Energien

Darüber hinaus wurden und werden nicht-regenerative Energieträger durch regenerative Energien ersetzt. Die wichtigsten Energieträger sind in diesem Zusammenhang auf der einen Seite energetisch nutzbares Holz in diversen Formen wie Pellets, Presslingen, Hackschnitzel oder Stückholz, und andererseits zunehmend auch solarthermische Anwendungen, bei denen die einstrahlende Sonnenergie direkt in Wärme umgesetzt wird. Vielerorts werden zudem bereits Wärmepumpen genutzt, die die Umweltwärme nutzbar machen.

Die Potenziale für Energieholz sind im Stadtgebiet sehr begrenzt (Territorialprinzip). Aber auch außerhalb des Stadtgebiets existieren im unmittelbaren regionalen Umfeld nicht ausreichend Potenziale, um den gesamten Wärmebedarf der Stadt decken zu können. Denn die vorhandenen Potenziale werden in erster Linie zur eigenen Bedarfsdeckung benötigt. Zusätzliche Potenziale zur Deckung des vorhandenen Energiebedarfs für Wärme aus Energieholz werden deshalb für das Stadtgebiet in der Gesamtrechnung nicht gesehen (vgl. IKSK 2016).

Sehr wohl können aber solarthermische Anlagen und Wärmepumpen, sowie innovative Technologien genutzt werden.

5.2.3 Transformationskonzept für nicht an das Fernwärmenetz angeschlossene dezentrale Heizungsanlagen

Ist (2019)		
Dezentrale Heizungsanlagen:		
Heizöl:		78 GWh/a
Flüssiggas:		6 GWh/a
Erdgas:		44 GWh/a
Summe:		83 GWh/a
↓		
Soll		
Dezentrale Heizungsanlagen		
Einsparung:	30%	25 GWh/a
Restbedarf:		58 GWh/a
Solarthermie:	15%	9 GWh/a
Wärmepumpen:	85%	50 GWh/a

Abb. 15 Ausschnitt dezentrale Heizungsanlagen
(Eigene Darstellung EVF 2021)

Bei den dezentralen Heizungsanlagen kann prinzipiell genauso wie im Bereich Mobilität auf die hochwertige Energieform der elektrischen Energie (Strom) ausgewichen werden. Während konventionelle Heizungsanlagen einen Wirkungsgrad von „nur“ ca. 90 % (Niedertemperaturkessel) bis ca. 96 % (Brennwertkessel) aufweisen, können in Wärmepumpen mit Hilfe von Umweltwärme bezüglich der eingesetzten elektrischen Antriebsenergie und der erzeugten Nutzenergie Wirkungsgrade in Höhe von 400 % bis 500 % erzielt werden. Die Wärmepumpen können darüber hinaus durch solarthermische Anlagen ergänzt werden. Letztere können über das Jahr hinweg ca. 20 % bis 30 % der benötigten Wärmeenergie erzeugen. Diesbezüglich ist jedoch nicht bekannt, ob die entsprechend relevanten Bestandsgebäude bereits solche Anlagen aufweisen und damit schon ein Teil des Potenzials genutzt wird. Es wird deshalb pauschal angenommen, dass nur noch die Hälfte des solarthermischen Potenzials vorhanden ist. Der übrige

Energiebedarf müsste durch die Wärmepumpen bereitgestellt werden. Durch den hohen Wirkungsgrad wird hierfür statt den 50 GWh Wärme nur noch ca. 12 GWh Antriebsstrom benötigt.

5.2.4 Transformationskonzept für das Fernwärmesystem

Die Berechnungen zum Restbudgetansatz beziehen sich auf das Jahr 2019. Zu diesem Zeitpunkt nutzte das Fernwärmesystem in Erlangen 245 GWh Steinkohle, knapp 7 GWh Heizöl und ca. 454 GWh Erdgas (ESTW 2020). Die Stadtwerke haben in der Zwischenzeit die Steinkohle bereits durch Erdgas ersetzt, was in der vorliegenden Berechnung berücksichtigt wurde. Die THG-Emissionen konnten hierdurch bereits etwas reduziert werden, weil mit dem Verbrennen von Erdgas geringere THG-Emissionen verbunden sind, als bei dem Einsatz von Kohle.

Insgesamt werden also ungefähr 707 GWh Endenergie benötigt. Dabei basiert das Fernwärmesystem auf einem Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) -Prozess, bei dem aus den 707 GWh Endenergie sowohl Wärme als auch Strom erzeugt werden. Der wichtigste Energieträger ist hier jedoch Erdgas. In diesem Zusammenhang ist es wichtig zu verstehen, dass Erdgas zwar im Vergleich zu Kohle mit sehr hohen THG-Emissionen als nachhaltiger Energieträger gilt, bei der Nutzung dieses fossilen Energieträgers jedoch nach wie vor große Mengen THG-Emissionen entstehen. So entstehen gemäß einschlägiger konservativer Literatur pro Kilowattstunde Erdgas ca. 230 g THG-Emissionen (vgl. GEMIS 2021). Neuere Untersuchungen stellen aufgrund bisher nicht berücksichtigten teils enormen Leckageverlusten in der Förderung und beim Transport teilweise sogar deutlich höhere THG-Emissionen fest (vgl. HOWARTH 2014). Bei einem Verbrauch von knapp 700 GWh (also 700.000.000 kWh) handelt es sich dann insgesamt um mindestens 161.000 Tonnen THG-Emissionen pro Jahr.

Theoretisch könnte das fossile Erdgas, welches zum Großteil aus Methan besteht, durch sogenanntes „Biomethan“ ersetzt werden. Entsprechendes wird bereits vielerorts in Biogasanlagen praktiziert. Die Erlanger Stadtwerke erzeugen beispielsweise in einer Gemeinschaft mit anderen Betreibern Biomethan in einer Biogasanlage. Das Biogas mit einem geringeren Methan-Anteil kann so aufbereitet und konditioniert werden, dass sich die Methan-Konzentration erhöht und es in das Erdgasnetz eingespeist werden kann und dort fossiles Erdgas ersetzt. Die Potenziale sind heute aber bereits weitgehend ausgeschöpft.

Auch in diesem Bereich werden deshalb ähnlich wie bei den zuvor bereits beschriebenen „E-Fuels“ bzw. „Power-to-X“ Überlegungen angestellt, das fossile Erdgas durch synthetisches Methan, welches mit Hilfe von regenerativen Energieträgern erzeugt wurde, zu ersetzen. Dabei wird zunächst mittels Elektrolyse Wasserstoff

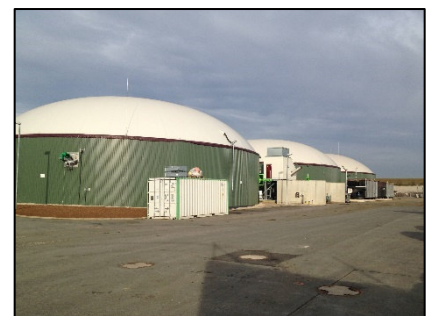


Abb. 16 Biogasanlage in Eggolsheim
(Quelle: Bioerdgas Eggolsheim GmbH)

erzeugt, der in einem weiteren Verfahren zu Methan umgewandelt werden kann. Der zweite Schritt (Umwandlung zu Methan) ist jedoch nur dann notwendig, wenn das erzeugte Gas dem bestehenden Erdgasnetz beigemischt werden soll, es also sukzessive immer mehr Erdgas im bestehenden System ersetzt. Da sich in der zusätzlichen Umwandlung des Wasserstoffs zu Methan weitere Wirkungsgradverluste verstecken, wäre es in Anbetracht der begrenzten Ressourcen effizienter, den Wasserstoff direkt und ohne weitere Umwandlungsverluste in einer Brennstoffzelle zu nutzen. Geeignete Brennstoffzellen für solche Anwendungen sind technisch bereits erprobt.

Darüber hinaus hängt der Energiebedarf für Wärme maßgeblich auch von der Jahreszeit ab. Es sind deshalb saisonale Speicher notwendig, die die Energie z.B. aus Photovoltaikanlagen vom Sommer in den Winter transferieren können. Hierfür eignen sich vor allem Energieträger, die im flüssigen oder gasförmigen Zustand gespeichert werden können. Auch Überkapazitäten aus der Windkraft können zunächst in einen saisonalen Speicher befördert und dann bedarfsgerecht genutzt werden.

Potenziale alternativer Konzepte für einen saisonalen Speicher sind für Erlangen sehr limitiert. Andernorts werden Konzepte geothermischer Wärme- und/oder Kältespeicher oder sogar Lageenergiespeicher diskutiert, die aber auch noch weit von einer praktischen Umsetzung entfernt sind (vgl. ITG 2013). Außerdem sind solche Konzepte auf geologische Gunstregionen beschränkt, welche sich in Erlangen nicht finden. Batterien eignen sich nur als Kurzzeitspeicher über einige Tage oder Wochen hinweg, weniger aber als saisonaler Speicher.

Für die Transformationsrechnung wird deshalb angenommen, dass der Input-Energieträger Erdgas des Fernwärmesystems an zentraler Stelle direkt durch regenerativ erzeugten Wasserstoff ersetzt werden kann. Die Nutzung erfolgt auch wieder in einem KWK-Prozess, bei dem neben der Wärme auch Strom erzeugt wird. Entsprechende Brennstoffzellen sind vorhanden und eine Umsetzung ist damit technisch machbar (vgl. FRAUNHOFER IEE 2020). Abzüglich der Einsparpotenziale und Verteilverluste werden für das Fernwärmesystem ca. 305 GWh Wärme benötigt. In der Transformationsrechnung wurde angenommen, dass die Brennstoffzelle einen thermischen Wirkungsgrad von 60 % erreicht. Damit müssten ca. 508 GWh_{Ho} Wasserstoff erzeugt werden. Wegen des physikalischen Wirkungsgrades bei der Elektrolyse von ca. 70 % und unter Berücksichtigung weiterer Speicher- und Distributionsverluste werden insgesamt ca. 847 GWh Strom für die Produktion der etwas mehr als insgesamt 15.000 Tonnen Wasserstoff benötigt. Im genannten KWK-Prozess der

Ist (2020; Steinkohle durch Erdgas ersetzt)	
Fernwärme Input:	
Erdgas:	699 GWh/a
Heizöl:	7 GWh/a
Summe:	706 GWh/a
Wärme-Output brutto: 435 GWh/a	
Wärme-Output netto:	341 GWh/a
Soll	
Einsparung: 30%	102 GWh/a
Wärme-Output netto:	239 GWh/a
Wärme-Output brutto:	305 GWh/a
H2-Bedarf (th. Wirkungsgrad 60%):	508 GWh/a

Abb. 17 Ausschnitt Transformation Fernwärmesystem
(Eigene Darstellung EVF 2021)

Brennstoffzelle mit einem elektrischen Wirkungsgrad von 30 % werden aber auch wieder 152 GWh Strom erzeugt.

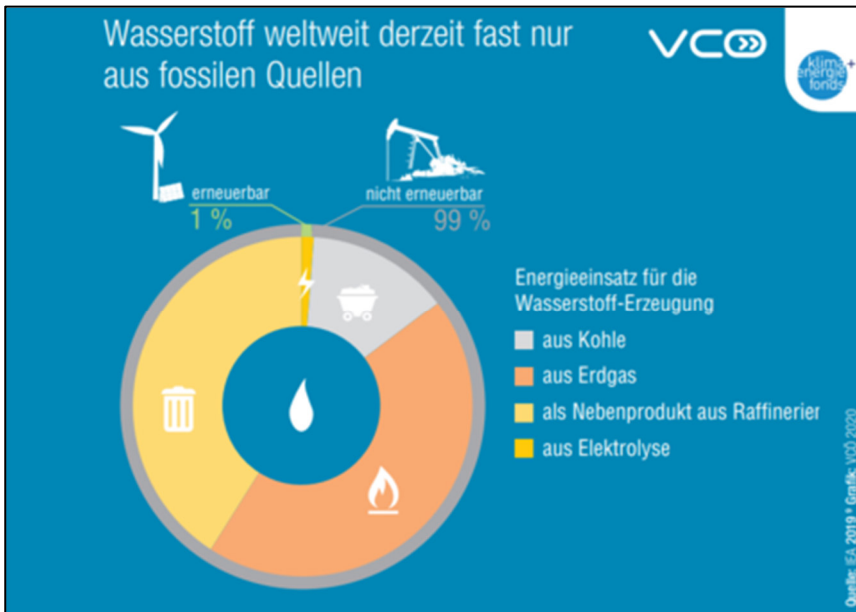


Abb. 18 Herkunft des industriell hergestellten Wasserstoffs
 (Quelle: VCO 2020)

An dieser Stelle ist es wichtig, dass der Wasserstoff aus regenerativen Energien gewonnen wird. Die heute noch in der industriellen Praxis angewandte Methode ist die Wasserstoffproduktion im Verfahren der sog. „Dampfreformierung“, bei dem Wasserstoff aus Erdgas hergestellt wird. Andernorts wird Wasserstoff auch mit Kohle in einem Verfahren der „Vergasung“ hergestellt. Dabei entstehen in beiden Fällen sogar noch mehr THG-Emissionen, als bei einer direkten Verbrennung der fossilen Energieträger Erdgas und Kohle, weil sowohl der Umwandlungsprozess, als auch die nachträgliche Distribution des Wasserstoffs zusätzliche Energie benötigt. Der Grund, weshalb heute Wasserstoff noch kaum im industriellen großmaßstäblichen Verfahren aus erneuerbaren Energien und durch Elektrolyse erzeugt wird, liegt in den bereits geschilderten Wirkungsgradverlusten und den deshalb vergleichsweise hohen Gestehungskosten für den Wasserstoff. Dabei unterliegen die technischen Verfahren bezüglich des Wirkungsgrads physikalischen Grenzen, die auch in Zukunft keine große Kostenminderung durch technischen Fortschritt erwarten lassen. Gleichwohl kann staatliche Regulierung, z.B. durch Einführung eines hinreichend hohen Preises für die Emission von Treibhausgasen und den damit verbundenen Umweltschäden für nicht-regenerative Energieträger oder sogar durch ein entsprechendes Verbot dazu führen, dass die Elektrolyse von Wasserstoff aus regenerativen Energien entweder marktwirtschaftlich wettbewerbsfähig oder alternativlos wird.

5.3 Strom

Strom ist der hochwertigste Energieträger, der für nahezu alle Einsatzzwecke unmittelbar eingesetzt werden kann. Während er in der Vergangenheit fast ausschließlich aus nicht-regenerativen Quellen erzeugt wurde, hat der technische Fortschritt der vergangenen beiden Dekaden dazu geführt, dass er auf viele unterschiedliche Arten und mittlerweile sogar deutlich günstiger und klimafreundlicher durch regenerative Energien bereitgestellt werden kann.

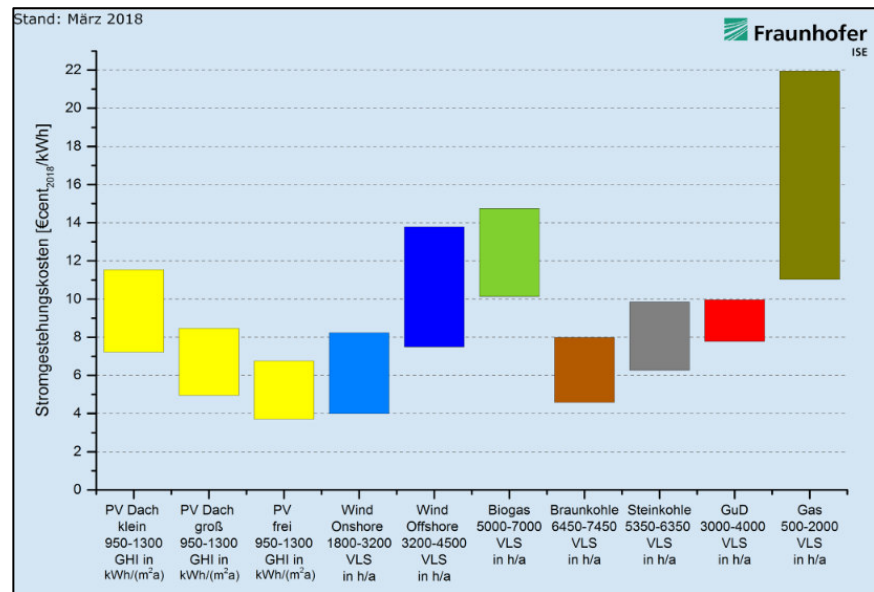


Abb. 19 Vergleich Stromgestehungskosten
(Quelle: Fraunhofer ISE 2018)

Insgesamt werden in der Stadt Erlangen aktuell ca. 645 GWh Strom pro Jahr verbraucht. Der Anteil erneuerbarer Energien im Stadtgebiet liegt derzeit bei ca. 5 %. Wird das Engagement der Erlanger Stadtwerke außerhalb des Stadtgebietes in diese Berechnung mit einbezogen, beträgt der Anteil selbst erzeugter erneuerbarer Energien etwa 12 %. Ca. 88 % des Strombedarfs werden also noch nicht durch eigene Anlagen zur Nutzung regenerativer Energien bereitgestellt. Darüber hinaus haben die vorangegangenen Ausführungen für die Sektoren Mobilität und Wärme aber auch gezeigt, dass zukünftig weitere Stromverbräuche hinzukommen werden. Die folgende Transformationsrechnung soll hierüber genauere Auskunft geben und den zukünftigen Ausbaubedarf für regenerative Energien darstellen.

5.3.1 Einsparpotenzial

Das Einsparpotenzial für Strom in Erlangen wird insgesamt als eher gering angesehen. Das Integrierte Klimaschutzkonzept sah in Abhängigkeit der Verbrauchergruppen ein Einsparpotenzial in Höhe von 20 % bis 27 % für den Zeitraum von 2014 bis 2030 (IKSK 2016). Einige der Einsparpotenziale dürften in den letzten Jahren mit den

gestiegenen Strompreisen bereits umgesetzt worden sein. Darüber hinaus ist Erlangen ein wirtschaftsstarker Standort im Bereich Verwaltung, Forschung und Entwicklung. Einsparpotenziale durch effizientere Technik werden in diesem Zusammenhang häufig durch das Wirtschafts- und Bevölkerungswachstum kompensiert. Stromintensive Industrien mit größerem Einsparpotenzial sind nicht vorhanden. Insgesamt wird deshalb im Rahmen der Transformationsrechnung und im zeitlichen Horizont des Restbudgets von einem noch erschließbaren weiteren Einsparpotenzial in Höhe von ca. 10 % ausgegangen. Der aktuelle Stromverbrauch würde sich hierdurch von 645 GWh auf 581 GWh pro Jahr reduzieren.

5.3.2 Transformationsbedingte neue Verbräuche

Die vorangegangenen Ausführungen der Transformationsrechnung haben gezeigt, dass zukünftig weitere Stromverbräuche hinzukommen werden. Um den Energiebedarf für Mobilität zu decken, müssen in Zukunft weitere 230 GWh Strom erzeugt werden. Der Strombedarf für Wärmepumpen für dezentrale Heizungsanlagen fällt mit zusätzlichen ca. 12 GWh pro Jahr kaum ins Gewicht. Weiterhin werden für die Wasserstoffproduktion ca. 847 GWh pro Jahr benötigt. Soweit die Annahmen der Transformationsrechnung in Zukunft eintreten werden, wird sich der Stromverbrauch in Zukunft fast verdreifachen. Statt 645 GWh werden selbst unter Berücksichtigung der noch vorhandenen Einsparpotenziale zukünftig ca. 1.670 GWh Strom pro Jahr benötigt.

Ist (2019)	
Stromverbrauch aktuell:	645 GWh/a
↓	
Soll	
Einsparung:	10% 65 GWh/a
Restbedarf:	581 GWh/a
Strombedarf Elektromobilität:	230 GWh/a
Strombedarf Wärmepumpen:	12 GWh/a
Strombedarf Produktion H2 (15.257 t H2):	847 GWh/a
Gesamtstromverbrauch:	1.670 GWh/a

Abb. 20 Ausschnitt Transformation Stromverbrauch
(Eigene Darstellung EVF 2021)

5.3.3 Potenziale für regenerative Energien

Während im Stadtgebiet bereits ca. 26 GWh regenerativer Strom vor allem mit Wasserkraft-, Biomasse- und Photovoltaikanlagen erzeugt wird, besteht weiteres Ausbaupotenzial eigentlich nur im Bereich Photovoltaik.

Die Analysen des Klimaschutzkonzepts haben bereits gezeigt, dass auf den Dächern ein Gesamtpotenzial von ca. 80 GWh pro Jahr besteht (IKSK 2016). Davon werden bereits 18 GWh genutzt. Insgesamt können also noch ca. 62 GWh pro Jahr ausgebaut werden.

Neben dem Potenzial für Photovoltaikanlagen auf Dachflächen wurde im Klimaschutzkonzept auch das Potenzial für entsprechende Anlagen auf Freiflächen untersucht. Durch den Ausbau der Bundesautobahn A3 und der Anschlussstelle zur A73 hat sich in der Zwischenzeit in diesem Bereich bzgl. des Angebots geeigneter Flächen aber vieles geändert. Die heute tatsächlich geeigneten Flächen wurden für die hier vorliegende Transformationsrechnung zusammen mit dem Klimaschutz-

management der Stadt Erlangen neu eruiert. Demnach ergibt sich für Photovoltaikanlagen auf Freiflächen ein weiteres Potenzial in Höhe von ca. 15 GWh pro Jahr.¹

Außerdem wird in der Transformationsrechnung zuvor auf der Wärmeseite die für das Fernwärmesystem benötigte Wärme in einem KWK-Prozess bereitgestellt, bei dem neben Wärme auch Strom erzeugt wird. In diesem Rahmen werden 152 GWh Strom aus erneuerbarem Wasserstoff bereitgestellt, die ebenfalls der Strombedarfsdeckung zur Verfügung stehen.

Insgesamt können auf Erlanger Stadtgebiet zukünftig also ca. 255 GWh regenerativer Strom erzeugt werden. Werden alle Potenziale genutzt, könnten von den insgesamt 1.670 GWh ca. 15 % selbst erzeugt werden. Es ist aber unrealistisch, anzunehmen, dass ein städtischer Verdichtungsraum die gesamte benötigte Energie auf dem eigenen sehr begrenzten Territorium bereitstellen kann. Städte werden in diesem Zusammenhang stets auf regionale Ressourcen angewiesen sein. Selbst wenn das aktuelle Engagement der Erlanger Stadtwerke außerhalb des Stadtgebiets berücksichtigt wird (die ESTW sind beispielsweise an einigen Windkraftprojekten in der Region beteiligt), stehen nur 297 GWh regenerative Energien pro Jahr zur Verfügung. Dies entspricht dann einem Deckungsgrad in Höhe von knapp 18 %. Es fehlen dann immer noch 1.373 GWh Strom, der regenerativ mit möglichst wenigen THG-Emissionen bereitgestellt werden muss.

Ist (2019)	
EE-Anlagen:	
PV-Anlagen:	18 GWh/a
Biomasse:	2 GWh/a
Wasserkraft:	5 GWh/a
Windenergie (ESTW außerhalb):	42 GWh/a
Summe:	68 GWh/a
Soll	
Notwendige weitere EE-Anlagen:	1.602 GWh/a
KWK-Strom H2 (el. Wirkungsgrad 30%):	152 GWh/a
Potenzialnutzung Dach-PV in Erlangen:	62 GWh/a
Potenzialnutzung PV-FF in Erlangen:	15 GWh/a
Reststrombedarf noch nicht gedeckt:	1.373 GWh/a

Abb. 21 Ausschnitt Strombedarfsdeckung durch regenerative Energien
(Eigene Darstellung EVF 2021)

5.3.4 Bedarf für weitere Anlagen erneuerbarer Energien in der Region

Die vorangegangenen Analysen haben gezeigt, dass ein enormer Ausbaubedarf für regenerative Energien besteht. Die Potenziale innerhalb der Stadtgrenze Erlangens sind leider auch limitiert, weshalb weitere Quellen erschlossen werden müssen.

Theoretisch ist es im europäischen Verbundnetz möglich, Strom über große Distanzen hinweg zu handeln. Gunstregionen profitieren davon aktuell. So bietet es sich in Skandinavien oder in den Alpen und anderen Gebirgen an, Höhenunterschiede im großen Maßstab zu nutzen, um Strom aus Wasserkraft herzustellen. Treffen solche Potenziale auf dünn besiedelte Gebiete ist die gesellschaftliche Akzeptanz auch stets höher als in dicht besiedelten Gebieten. Diesen Vorteil können beispielsweise auch große Offshore-Windparks an den Küsten nutzen, obwohl die Gestehungskosten durch die schwierige infrastrukturelle Erschließung deutlich teurer sind, als an einfach zugänglichen Onshore-Standorten (vgl. Abb.

¹ Zwischenzeitlich hat eine Überprüfung der Flächen für PV-Anlagen ergeben, dass diese aus Gründen des Naturschutzrechtes, der Eigentumsverhältnisse, technischer und stadtplanerischer Vorbehalte nicht zur Verfügung stehen.

19). Die gesamtökologischen Folgewirkungen sind im Entscheidungsprozess von Beginn an mit einzubeziehen.

Die Herausforderung in diesem Zusammenhang ist, dass hierdurch wiederum große Stromtrassen erforderlich werden, um den Strom zu den Verbraucher*innen zu transportieren. Außerdem müssen wiederum relativ hohe Transportverluste in Kauf genommen werden. Darüber hinaus ist es in vielen Fällen ohne einen massiven Umbau der vorhandenen lokalen Netzinfrastruktur gar nicht möglich, ausschließlich Strom von weit entfernten Quellen zu nutzen. Weiterhin besteht auch immer die Gefahr, die Verantwortung für den erforderlichen Ausbau von Anlagen zur Nutzung regenerativer Energien und für den Erfolg der Energiewende an weit entfernte Regionen abzugeben.

Aus diesen Gründen sollte der Ausbau regenerativer Energien soweit es die technischen Potenziale lokal zulassen in der Region stattfinden. Auch in diesem Zusammenhang spielt die gesellschaftliche Akzeptanz aber eine nicht zu unterschätzende Rolle. In bevölkerungsreichen Gebieten sind die Nutzer*innen direkt mit den infrastrukturellen Erfordernissen des eigenen energetischen Konsums konfrontiert. In der Vergangenheit wurde der Ausbau regenerativer Energien deshalb zunehmend durch subjektive und weniger durch objektive Kriterien eingeschränkt. Einschränkende baurechtliche Regelungen wie die bekannte „10H“-Regelung, bei der Windräder einen Mindestabstand von pauschal 10x der Gesamthöhe zur nächstgelegenen Wohnbebauung einhalten müssen, halten sich nicht mehr an objektive Kriterien, die sich zum Beispiel aus dem Bundes-Immissionsschutzgesetz und der zugehörigen technischen Anleitung Lärm und vielen weiteren objektiven Kriterien ergeben und bemessen haben. Sie wurden insbesondere aus Gründen der gesellschaftlichen Akzeptanz geschaffen. Andernorts werden aus Gründen eines subjektiven ästhetischen Empfindens in ganzen Innenstadtbereichen Photovoltaikanlagen verboten.

Dabei liegen die Vorteile einer regionalen Nutzung regenerativer Energien auf der Hand:

- Verringerung des Mittelabflusses in andere Regionen
- Stärkung der lokalen und regionalen Unternehmen und Handwerksbetriebe
- Möglichkeit der direkten Partizipation von Bürger*innen
- Stromerzeugung in Verbrauchernähe
- Energetische Unabhängigkeit von anderen Regionen, Ländern und teils fragwürdigen Regimen
- Deutliche Kostenersparnis durch Eigenstromnutzung
- Günstigere Strompreise durch regionale Direktvermarktung
- Geringerer Bedarf an Speichern

- Weniger Übertragungs- und Transportnetzausbau notwendig
- Weniger Übertragungs- und Transportverluste
- Höhere Versorgungssicherheit in einer dezentralen Versorgungsstruktur

Aus diesen Gründen sollte die Energiewende vor Ort, lokal und in der Region stattfinden. Photovoltaikanlagen können im privaten Bereich einen Großteil des Energiebedarfs decken. Durch den Einsatz von Speichern wird dieser Anteil nochmals deutlich erhöht. Größere Anlagen in der Region können theoretisch den erforderlichen saisonalen Energiespeicher Wasserstoff erzeugen. Dies kann durch größere Photovoltaikanlagen auf Freiflächen und durch Windräder geschehen. Sowohl Photovoltaikanlagen, als auch Windräder können im regionalen Umfeld Erlangens günstigen Strom erzeugen. Sowohl die Solarerträge, als auch die Windenergieerträge sind für einen wirtschaftlichen Betrieb mehr als ausreichend. Die beiden Technologien ergänzen sich dabei sehr gut. Großmaßstäbliche Speichertechnologien wie Redox-Flow Batterien können kurzzeitige Fluktuationen des Angebots der vorgenannten regenerativen Energien ausgleichen und saisonale Speicher wie Wasserstoff und Brennstoffzellentechnologien können als saisonale Langzeitspeicher genutzt werden.

Bedarf weitere EE-Anlagen außerhalb des Stadtgebietes:		
Deckung durch PV-FF-Anlagen:	25%	343 GWh/a
Deckung durch Windkraft:	75%	1.030 GWh/a
Entspricht PV-Freiflächenanlagen:		343 ha
Entspricht Windenergieanlagen (à 3,5 MW):		103

Abb. 22 Ausschnitt weiterer Bedarf erneuerbarer Energien Anlagen außerhalb des Stadtgebietes
(Eigene Darstellung EVF 2021)

Der Ausbaubedarf ist nicht zu unterschätzen. Insgesamt müssten für Erlangen noch ca. 1.373 GWh zusätzlicher Strom erzeugt werden. Dies entspricht beispielsweise einem Bedarf von ca. 343 ha Photovoltaikanlagen auf Freiflächen und ca. 103 großen modernen Windrädern der Multimegawatt-Klasse.

In dieser Hinsicht dürften sich die Potenziale in der Region zukünftig auch weiter einschränken. Erlangen steht hier perspektivisch mit dem nahen Verdichtungsraum Nürnberg/Fürth in direkter Flächenkonkurrenz. Auch diese Städte werden in Zukunft damit konfrontiert sein, Potenziale in der Region verstärkt in Anspruch nehmen zu müssen. Werden die in der Region vorhandene Potenziale knapp, sollten aus den vorgenannten Gründen aber erst in einem zweiten Schritt Potenziale andernorts genutzt werden. Andere Städte gehen hier bereits mit gutem Beispiel voran. Die Stadt München versucht mit den eigenen Stadtwerken beispielsweise den gesamten Strombedarf durch eigene Anlagen decken zu können. Neben vielen Anlagen im Stadtgebiet und im direkten Umfeld erfordert der sehr hohe Bedarf dieser Metropole aber auch Beteiligungen an vielen weiteren Anlagen in Deutschland und an anderen europäischen Standorten (vgl. STADTWERKE MÜNCHEN 2021).

5.4 Fazit Transformationsrechnung

Eine Transformation hin zu einer weitgehend regenerativen Energieversorgung mit deutlich geringeren THG-Emissionen ist theoretisch möglich. In manchen Fällen wie im Beispiel des Effizienzsteigerungspotenzials durch Elektrofahrzeuge hat der technische Fortschritt der vergangenen Jahre bereits dafür gesorgt, dass sich die Potenziale heute schon wirtschaftlich erschließen lassen. Der noch nicht ausreichend hohe Preis für schädliche Umweltauswirkungen bei den nicht-regenerativen Energieträgern lässt in vielen anderen Fällen (wie z.B. bei der Nutzung des Wasserstoffs als Saisonspeicher) die dringend notwendige Transformation leider noch nicht wirtschaftlich erscheinen, obwohl diese technisch durchaus möglich ist.

Die umfassende Transformationsrechnung basiert darüber hinaus auf vielen Annahmen. Insbesondere steht sie mit Hinblick auf eine möglichst hohe Ressourceneffizienz stets im Lichte eines möglichst hohen Wirkungsgrades. In vielen Fällen berücksichtigt die Transformationsrechnung deshalb nur die effizientesten Technologien. Die Vergangenheit zeigt jedoch, dass nicht immer ausschließlich die effizientesten Technologien zum Einsatz kommen. Die Autor*innen der vorliegenden Studie gehen davon aus, dass in Zukunft unterschiedliche Technologien zum Einsatz kommen werden. Dabei sollte jedoch stets berücksichtigt werden, dass bei dem Einsatz von Technologien mit geringeren Wirkungsgraden auch der zukünftige Bedarf für regenerative Energien entsprechend steigen wird. Es werden dann mehr regenerative Anlagen benötigt, als die bereits geschilderten 343 ha Photovoltaikanlagen und 103 Windkraftanlagen.

Nichtsdestotrotz soll an dieser Stelle noch einmal der ausdrückliche Hinweis erfolgen, dass es sich bei der Transformationsrechnung in diesem Zusammenhang um eine stark vereinfachte Betrachtung eines äußerst komplexen Systems aus der Bereitstellung von Energie auf der einen Seite und Energieverbrauch auf der anderen Seite handelt. Bei einer konkreten Umsetzung lassen sich gegenüber der überschlägigen Transformationsrechnung trotzdem auch noch viele Effizienzsteigerungspotenziale erschließen. Die Möglichkeiten der Umsetzung individueller Projekte sind zu prüfen. Beispielsweise müsste nicht der gesamte Wärmeenergiebedarf des Fernwärmenetzes durch den relativ ineffizienten Energieträger Wasserstoff bereitgestellt werden. Die benötigte Energie könnte theoretisch zu bestimmten Zeiten auch direkt – ohne den Umweg Wasserstoff – in Wärmepumpen oder durch Direktheizung genutzt werden. Dennoch wird der Wasserstoff zukünftig als Saisonspeicher dringend benötigt werden. Eine konkrete Umsetzung wird in der Realität also deutlich komplexer ablaufen und es werden in vielen Teilbereichen ggf. auch andere

Technologien zum Einsatz kommen, als die, die hier im großen Maßstab verallgemeinernd angenommen werden.

Die Darstellungen in der Transformationsrechnung sollen darüber hinaus nicht den Eindruck erwecken, dass die Transformation mit einfachen Mitteln oder in allen Teilbereichen mit den heute gültigen wirtschaftlichen Maßstäben stattfinden kann. Ganz im Gegenteil handelt es sich um eine schwierige und umfassende Transformation eines bestehenden Systems auf Basis nicht-regenerativer Energieträger hin zu regenerativen Energieträgern mit möglichst wenig THG-Emissionen. Die beiden Seiten stehen in diesem Zusammenhang heute noch nicht in einem fairen Wettbewerb. Aus energie- und umweltökonomischer Sicht werden im aktuellen System die Kosten für Umweltschäden durch THG-Emissionen noch nicht oder erst in ungenügendem Maßstab eingepreist. So befinden wir uns im Jahr 2021 in einer ersten vorsichtigen Einführungsphase eines allgemein gültigen CO₂-Preises für bestimmte Energieträger mit höheren THG-Emissionen. Manche zentralen Annahmen in der Transformationsrechnung sind aus diesem Grund aus heutiger Perspektive noch nicht unbedingt wirtschaftlich umsetzbar. Es wurden Maßnahmen angenommen, die das geringste Konfliktpotenzial aufweisen und aus heutiger Sicht am wahrscheinlichsten umgesetzt werden können.

Außerdem erhebt die Transformationsrechnung nicht den Anspruch, solche nach heutigen Maßstäben wirtschaftliche Gesichtspunkte hinreichend zu würdigen. Ein Blick zurück zum Restbudget und den weltweiten Klimaschutzziele und den dramatischen Auswirkungen bei einem Verfehlen dieser Ziele zeigt den Handlungsbedarf und die Tatsache, dass eigentlich auch ein egal wie hoch gestalteter Preis für CO₂-Emissionen nicht weit genug führt. Denn wenn das weltweite Restbudget aufgebraucht ist, dürfen keine weiteren THG-Emissionen stattfinden. Die ansonsten eintretenden Wirkfolgen durch den nicht eingedämmten Klimawandel wären fatal (vgl. KLIMAKOM 2020)! Überlegungen zu einem wirtschaftlichen Wettbewerb zwischen einem System aus nicht regenerativen Energieträgern mit THG-Emissionen und regenerativen Energieträgern mit nahezu keinen THG-Emissionen sind in diesem Zusammen nicht zielführend. Es gibt unabhängig von wirtschaftlichen Maßstäben keine andere Handlungsoption, als auf weitgehend THG-neutrale Energieträger umzusteigen! Das vorhandene Restbudget zeigt, dass dies sehr rasch und innerhalb weniger noch verbleibender Jahre geschehen muss. Es muss deshalb eine Diskussion über die hierfür notwendigen politischen Handlungen geführt werden.

6 Abbildungsverzeichnis

Abb. 1 Endenergieverbrauch 1990-2019 nach Energieträgern ..	10
Abb. 2 Anteile der Sektoren am Endenergieverbrauch 2019.....	11
Abb. 3 Anteile der Verbraucher-gruppen am Endenergieverbrauch	12
Abb. 4 Anteile der Sektoren an den THG Emissionen 2019	13
Abb. 5 Anteile der THG-Emissionen nach Verbrauchergruppen..	14
Abb. 6 Pro-Kopf Treibhausgasemissionen Vergleich weltweit.....	15
Abb. 7 THG-Emissionen für Strom im Stadtgebiet Erlangen	16
Abb. 8 Waldbesitz im Stadtgebiet Erlangen	19
Abb. 9 Restbudget aktuelle Entwicklung	22
Abb. 10 Restbudget bei einer THG-Reduktion von 11,7 %/a.....	22
Abb. 11 Entwicklung des THG-Restbudgets der Stadt Erlangen .	24
Abb. 12 Transformationsrechnung	25
Abb. 13 Energetischer Gesamtwirkungsgrad verschiedener Antriebsoptionen.....	27
Abb. 14 Transformation im Bereich Mobilität.....	29
Abb. 15 Ausschnitt dezentrale Heizungsanlagen	30
Abb. 16 Biogasanlage in Eggolsheim.....	31
Abb. 17 Ausschnitt Transformation Fernwärmesystem	32
Abb. 18 Herkunft des industriell hergestellten Wasserstoffs.....	33
Abb. 19 Vergleich Stromgestehungskosten.....	34
Abb. 20 Ausschnitt Transformation Stromverbrauch	35
Abb. 21 Ausschnitt Strombedarfsdeckung durch regenerative Energien	36
Abb. 22 Ausschnitt weiterer Bedarf erneuerbarer Energien Anlagen außerhalb des Stadtgebietes	38

7 Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Vergleich der Bilanzierungskriterien IKSK 2016 und Aktualisierung 2021	8
Tab. 2 Endenergieverbrauch nach Sektoren	12
Tab. 3 Endenergieverbrauch nach Verbrauchergruppen.....	12
Tab. 4 THG-Emissionen nach Sektoren.....	13
Tab. 5 THG-Emissionen nach Verbrauchergruppen.....	14
Tab. 6 CO ₂ -Senken durch Wald- und Forstflächen im Stadtgebiet Erlangen	19
Tab. 7 Entwicklung des THG-Restbudgets der Stadt Erlangen ...	24

8 Quellen

- AFZ 14/2019 AFZ-DerWald: Kohlenstoffinventur 2017, Riedel et al, Ausgabe 14/2019, Deutscher Landwirtschaftsverlag GmbH, Redaktion forstpraxis.de
- ARD 2020: Eine Welt ohne Autos (S01/E01). Dokumentation
<https://www.ardmediathek.de/daserste/video/eine-welt-ohne/eine-welt-ohne-autos-s01-e01/daserste/Y3JpZDovL2Rhc2Vyc3RILmRIL2VpbmVXZWx0T2huZS9jNmIzNjZkMCM1hMDhiLTQwYTctYjI3My1mOWI3ZmM1YmYxZDA/>
- BEG 2020: Richtlinie für die Bundesförderung für effiziente Gebäude – Wohngebäude (BEG WG)
<https://www.bundesanzeiger.de/pub/publication/XSftSZUPZT679EPY5iS/content/XSftSZUPZT679EPY5iS/BAanz%20AT%2001.02.2021%20B1.pdf?inline>
- BISKO 2019 BISKO – Bilanzierungs-Systematik Kommunal, Empfehlungen zur Methodik der kommunalen Treibhausgasbilanzierung für den Energie- und V, Verkehrssektor in Deutschland, Kurzfassung, H.Hertle et al, Heidelberg, November 2019
- BUSINESSINSIDER 2018: Barcelona verbannt Autos mit einem genialen Konzept aus der Innenstadt
<https://www.businessinsider.de/wirtschaft/barcelona-verbannt-autos-mit-einem-genialen-konzept-aus-der-innenstadt-das-ist-auch-in-deutschland-moeglich-sagt-ein-experte/>
- DENA 2019: dena-Gebäudereport: Wärmewende kommt seit 2010 nicht voran
<https://www.dena.de/newsroom/meldungen/2019/dena-gebaeudereport-waermewende-kommt-seit-2010-nicht-voran/>
- DLFR 2018 Deutscher Forstwirtschaftsrat e.V.: Klimarechner, www.dfwr.de/index.php/about/fachausschuesse-dfwr/afb-dfwr/284-klimarechner-afb [letzter Zugriff: 17.02.2021]
- DW 2019: Oslo startet 2019 als Umwelthauptstadt Europas durch, Zeitungsartikel, Deutsche Welle,
<https://www.dw.com/de/oslo-startet-2019-als-umwelthauptstadt-europas-durch/a-46831773>
- ENERGIELEBEN 2016: Mobilitätsplan soll Barcelona grüner machen
<https://www.energieleben.at/mobilitaetsplan-soll-barcelona-gruener-machen/>
- ESTW 2020 ESTW, Erlanger Stadtwerke, Energieverbrauchsdaten für die Fortschreibung der Energie- und THG-Bilanz. per Mail, 2020.
- ESTW 2021 Stromkennzeichnung der ESTW für das Bezugsjahr 2019
<https://www.estw.de/stromkennzeichnung> [Letzter Aufruf 08.03.2021]
- FGSV 2016: Übergänge in den postfossilen Verkehr. Forschungsgesellschaft Für Strassen- und Verkehrswesen (FGSV)
https://www.fgsv.de/fileadmin/pdf/Ergebnisbericht_FGSV_006_12_Postfossile_Mobilitaet.pdf
- FRAUNHOFER IEE 2021: Wasserstoff im zukünftigen Energiesystem: Fokus Gebäudewärme. Studie zum Einsatz von H2 im zukünftigen Energiesystem unter besonderer Berücksichtigung der Gebäudewärmeversorgung
https://www.iee.fraunhofer.de/content/dam/iee/energiesystemtechnik/de/Dokumente/Studien-Reports/FraunhoferIEE_Kurzstudie_H2_Gebaeudewaerme_Final_20200529.pdf
- FRAUNHOFER ISE 2018: Stromgestehungskosten Erneuerbare Energien, Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE,
https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/DE2018_ISE

- FVA 2011 Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg: Wie viel Kohlenstoff speichern Stadtbäume? – Eine Fallstudie am Beispiel der Stadt Karlsruhe. Kändler G., Adler P., Hellbach A., FVA-einblick 2/2011. S.7-10.
- GEMIS 2021: Globales Emissionsmodell Integrierter Systeme (GEMIS). Internationales Institut für Nachhaltigkeitsanalysen und -Strategien (IINAS)
<http://iinas.org/gemis-de.html>
- HAMBURGER ABENDBLATT 2017: Wie Kopenhagen die Hälfte seiner Pendler aufs Rad setzte.
<https://www.abendblatt.de/vermishtes/article212359045/Wie-Kopenhagen-die-Haelfte-seiner-Pendler-aufs-Rad-setzte.html>
- HANDELSBLATT 2019: Madrid schafft autofreie Innenstadtzone wieder ab.
<https://www.handelsblatt.com/politik/international/weltgeschichten/louven/spanien-madrid-schafft-autofreie-innenstadtzone-wieder-ab/25113384.html>
- HOWARTH 2014: A bridge to nowhere: methane emissions and the greenhouse gas footprint of natural gas. Robert W. Howarth (Autor). Abrufbar auf Wiley Online Library
<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/ese3.35>
- IFEU 2017 Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg, Bereitstellung von Eingangsdaten für den Bereich Verkehr zur BSKO-konformen kommunalen Treibhausgasbilanzierung mit dem Klimaschutz-Planer, Heidelberg, März 2017
- IFEU 2020 Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg, Systematische Erfassung des Verkehrs in kommunalen Treibhausgasbilanzen, Fabian Bergk, Online-Seminar 8.3.2021
- IKSK 2016 Integriertes Klimaschutzkonzept Stadt Erlangen, Amt für Umweltschutz und Energiefragen Stadt Erlangen, Mai 2016
- ITG 2013: BMW Group will unterirdischen Wärmespeicher einsetzen
<https://www.tiefengeothermie.de/top-themen/bmw-group-will-unterirdischen-waermespeicher-einsetzen>
- KLIMAKOM 2020 KlimaKom gemeinnützige eG, Grundlagenstudie Klimanotstand im Auftrag der Stadt Erlangen, August 2020
- KSP 2020 Klimaschutz-Planer – Internetbasierte Software zum Monitoring des kommunalen Klimaschutzes, THG-Emissionswerte nach Gemis, Auslese aus der Bearbeitung und Auswertung für die Energie- und THG-Bilanz der Stadt Erlangen.
- KSP 2021 Klimaschutz-Planer, Multiplikatoren-schulung März 2021, mündl. Auskunft Hr. Schwarz, KSP-Team
- LWF 2012 Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft: Die Kohlenstoffbilanz der Bayerischen Forst- und Holzwirtschaft, D. Klein, CH. Schulz, Abschlussbericht 09/2012, Freising
- SRU 2017: Sachverständigenrat für Umweltfragen. Umsteuern erforderlich: Klimaschutz im Verkehrssektor.
https://www.umweltrat.de/SharedDocs/Downloads/DE/02_Sondergutachten/2016_2020/2017_1_1_SG_Klimaschutz_im_Verkehrssektor.pdf?__blob=publicationFile&v=13
- SCHLUHE ET AL 2018: M. Schluhe, H. Englert, R. Wördehoff, C. Schulz, M. Dieter, B. Möhring, Klimarechner zur Quantifizierung der Klimaschutzleistung von Forstbetrieben auf Grundlage von Forsteinrichtungsdaten, Landbauforsch., Appl Agric Forestry Res · 3/4 2018 (68)67-86
 DOI:10.3220/LBF1543210832000

STADTWERKE MÜNCHEN 2021: Stadtwerke München, Energiewende – Ausbau erneuerbarer Energien.

<https://www.swm.de/energiewende>

UBA 2019 Umweltbundesamt, Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger, Bestimmungen der vermiedenen Emissionen im Jahr 2018, Climate Change 37/2019, Dessau-Roßlau, Nov. 2019

VCÖ 2020: VCÖ-Factsheet 2020-01 Grünen Wasserstoff sinnvoll im Verkehr einsetzen.

<https://www.vcoe.at/publikationen/vcoe-factsheets/detail/vcoe-factsheet-2020-02-gruenen-wasserstoff-sinnvoll-im-verkehr-einsetzen>

WWF 2007: Regenwald für Biodiesel? Ökologische Auswirkungen der energetischen Nutzung von Palmöl

https://www.wwf.de/fileadmin/fm-wwf/Publikationen-PDF/wwf_palmoelstudie_deutsch.pdf

9 Anhang

- Anhang 1: Tabelle Endenergieverbrauch
- Anhang 2: Tabelle THG-Emissionen
- Anhang 3: Transformationsrechnung
- Anhang 4: Eingangswerte des Verkehrs in die Energie- und THG-Bilanz nach BSKO

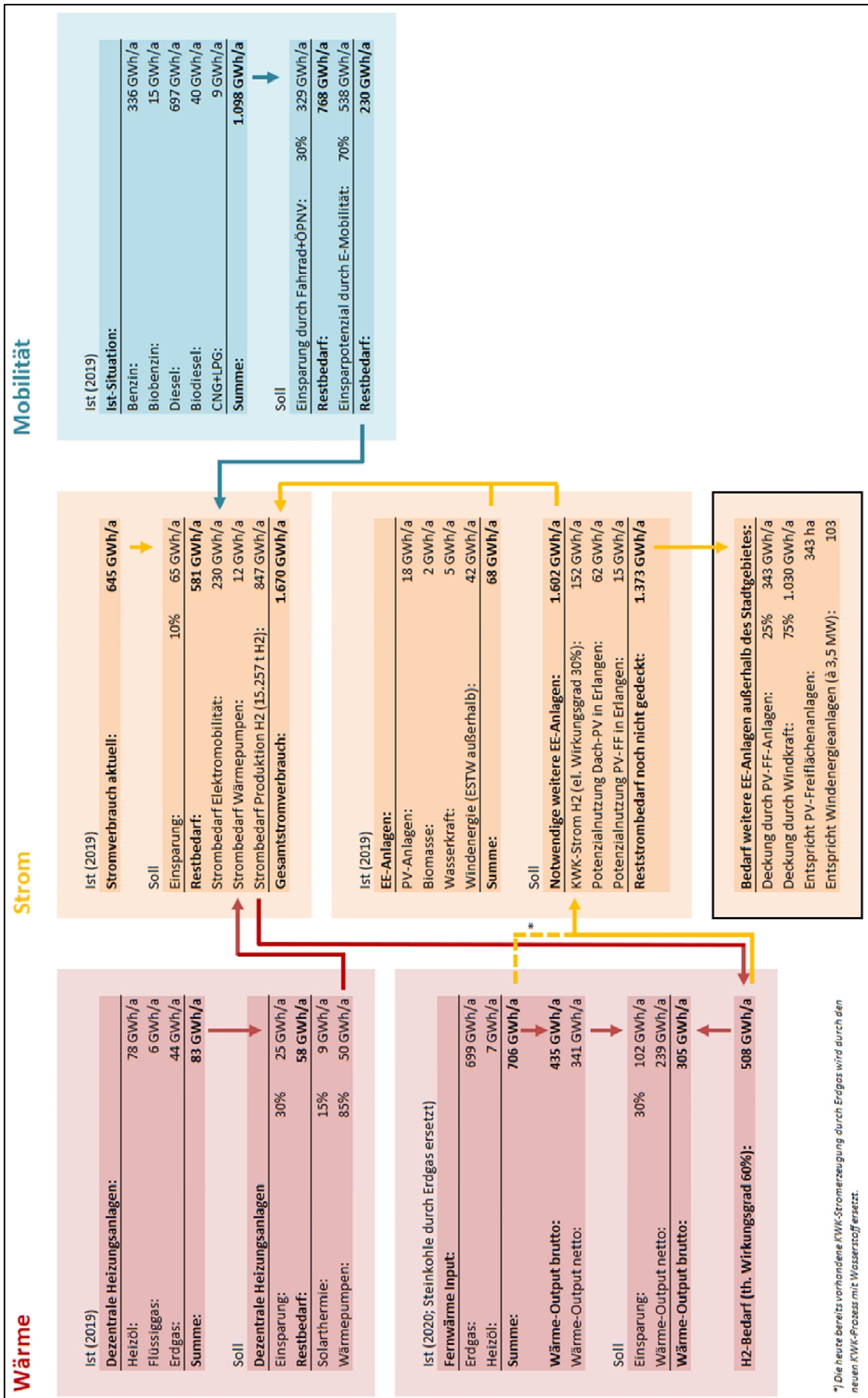
Anhang 1: Endenergieverbrauch nach Energieträgern (AUSLESE AUS KLIMASCHUTZPLANER 2021)

Endenergieverbrauch		1990	2014	2015	2016	2017	2018	2019 vorl. Werte
MWH								
Benzin	710.059	354.539	339.367	335.452	335.438	336.167	336.167	336.167
Biobenzin	0	15.418	14.719	14.571	14.142	15.115	15.115	15.115
Biogas	10.216	16.575	0	0	0	0	0	0
Biomasse	20.342	55.171	32.429	32.429	32.429	32.429	32.429	32.429
Kohle	4.110	1.140	0	0	0	0	0	0
CNG + LPG	0	11.591	11.875	11.249	10.543	9.971	9.971	9.392
Diesel	497.847	625.574	665.369	683.253	695.047	696.862	696.862	696.862
Diesel biogen	0	37.826	35.859	35.774	36.673	40.069	40.069	40.069
Erdgas	342.627	517.728	509.290	516.236	505.143	468.715	468.715	497.640
Fernwärme	301.100	347.712	295.359	333.518	346.684	330.600	330.600	340.761
Flüssiggas	49.522	42.611	5.976	5.976	5.976	5.976	5.976	5.976
Heizöl	692.075	506.511	81.079	82.768	80.682	79.584	79.584	77.500
Solarthermie	0	4.934	9.951	9.904	9.961	11.265	11.265	11.350
Sonst. Erneuerbare	0	0	102	25.880	6.982	928	928	430
Sonst. Konventionelle	0	0	191	48.456	13.072	1.737	1.737	800
Strom	574.152	714.652	677.603	676.955	668.341	656.660	656.660	645.000
Umweltwärme	0	2.420	606	726	1.056	1.152	1.152	1.250
THG-Emissionen	1.304.710	1.169.254	970.450	984.694	949.037	920.239	920.239	922.146
Gesamt	3.202.050	3.254.400	2.679.775	2.813.147	2.762.169	2.687.230	2.687.230	2.710.741

Anhang 2 THG-Emissionen nach Energieträgern (AUSLESE AUS KLIMASCHUTZPLANER 2021)

THG-Emissionen [t]	1990	2014	2015	2016	2017	2018	2019 vorl. Werte
Benzin	234.491	111.493	109.439	108.192	108.206	108.113	108.113
Biobenzin	0	2.875	2.932	2.852	3.034	2.729	2.729
Biogas	1.236	2.006	0	0	0	0	0
Biomasse	725	1.472	865	713	713	713	713
Braunkohle	1.009	40	0	0	0	0	0
CNG bio	0	13	12	16	18	138	138
CNG fossil	0	391	547	494	440	465	465
Diesel	155.199	203.498	216.625	222.640	226.680	227.456	227.456
Diesel biogen	0	5.181	5.127	4.346	4.287	4.499	4.499
Erdgas	88.055	129.432	127.323	127.510	124.770	115.773	122.917
Fernwärme	87.319	92.491	70.338	77.069	76.005	72.869	75.108
Flüssiggas	13.703	11.362	1.594	1.649	1.649	1.649	1.649
Heizöl	221.464	162.084	25.945	26.320	25.657	25.308	24.645
LPG	0	2.775	2.715	2.564	2.395	2.230	2.062
Solarthermie	0	123	247	248	249	282	284
Sonstige Erneuerbare	0	0	3	647	175	23	11
Sonstige Konventionelle	0	0	63	15.991	4.314	573	264
Steinkohle	848	466	0	0	0	0	0
Strom	500.661	443.084	406.562	393.311	370.261	357.223	350.880
Umweltwärme	0	469	114	132	183	196	213
Gesamt	1.304.710	1.169.254	970.450	984.694	949.037	920.239	922.146

Anhang 3: Transformationsrechnung (EIGENE BERECHNUNGEN EVF 2021)



*Die hier bereits vorhandene KWK-Stromerzeugung durch Erdgas wird durch den neuen KWK-Prozess mit Wasserstoff ersetzt.

Anhang 4: Eingangswerte des Verkehrs in die Energie- und THG-Bilanz nach BSKO (IFEU 2020)

Jährliche Bereitstellung kommunenspezifischer deutschlandweiter BSKO-Defaultwerte für den Verkehr



Verkehrsträger	Welche Daten	Kommunenbezug	Datenquellen
Straßenverkehr	Fahrleistungen - MZR, Pkw, LNF, Lkw, Bus - innerorts, außerorts, Autobahn	Kommunenspezifisch	ifeu auf Basis von TREMOD + UBA-Software GRETA
	Spezifische Energieverbräuche und Treibhausgas-Emissionsfaktoren - MZR, Pkw, LNF, Lkw, Linienbus, Reisebus - innerorts, außerorts, Autobahn	Nationale Durchschnittswerte	TREMOD
Schienenverkehr	Endenergieverbräuche & THG-Emissionen - Nahverkehr, Fernverkehr, Güterverkehr - Elektro, Diesel	Kommunenspezifisch	ifeu auf Basis von TREMOD + DB AG
Binnenschiff	Endenergieverbräuche	Kommunenspezifisch	TREMOD NA
Flugverkehr	Endenergieverbräuche	Kommunenspezifisch	TREMOD AV
Alle	THG-Emissionsfaktoren Kraftstoffe & Strom	Nationale Durchschnittswerte	TREMOD, ifeu-Strommaster