



**Wuppertal
Institut**



WEGE ZUR KLIMANEUTRALITÄT

ENERGIERAHMENSTUDIE MANNHEIM



ÜBER DIE STUDIE

Analyse im Auftrag der MVV Energie AG

Autoren (Wuppertal Institut):

Dr. Karin Arnold, Alexander Scholz, Ansgar Taubitz,
Dietmar Schüwer, Ulrich Jansen, Sabine Nanning, Thomas Hanke

Projektkoordination Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH:

Dr.-Ing. Karin Arnold, Co-Leiterin Forschungsbereich Systeme und Infrastrukturen,
Karin.Arnold@wupperinst.org
Alexander Scholz, Wissenschaftlicher Mitarbeiter im Forschungsbereich Systeme
und Infrastrukturen, Alexander.Scholz@wupperinst.org

Projektkoordination MVV Energie AG/MVV Netze GmbH:

T. Engelhorn/Dr. M. Niemann

Ansprechperson Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH:

Prof. Dr. Stefan Lechtenböhrer, Abteilungsleiter Zukünftige Energie- und Industriesysteme
Stefan.Lechtenboehmer@wupperinst.org
Tel. +49 202 2492-216, Döppersberg 19, 42013 Wuppertal

Begleitkreis zur Studie:

Studienschwerpunkte, -inhalte und -fortschritt wurden unter Leitung der Projekt-
koordination mit der Stadt Mannheim und MVV in insgesamt fünf Treffen diskutiert.

Teilnehmende von Seiten der Stadt Mannheim:

S. Bremeier (Dezernat des Oberbürgermeisters, Beteiligungsmanagement),
A. Hofen-Stein (Dezernat I),
C. Hübel (Dezernat des Oberbürgermeisters, FB Demokratie & Strategie),
A. Schönfelder (Dezernat V, Abteilungsleitung Klimaschutz/Geschäftsführung Klimaschutzagentur),
C. Schöpe (Dezernat IV).

Teilnehmende von Seiten MVV:

Dr. C. Helle (Generalbevollmächtigter),
Dr. A. Kuhn (Geschäftsführer MVV Regioplan GmbH),
Dr. M. Onischka (Abteilungsleiter Nachhaltigkeit).

März 2021

Dieses Werk steht unter der Lizenz „Creative
Commons Attribution 4.0 International“ (CC BY 4.0).
Der Lizenztext ist abrufbar unter:
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



INHALTSVERZEICHNIS

Vorwort Dr. Georg Müller	4
Geleitwort Dr. Peter Kurz	7
Zusammenfassung	8
Motivation und Zielbild	14
Rahmen und Methodik	18
Wo steht Mannheim heute?	22
KliMa - so wird Mannheim klimaneutral	28
Was passiert, wenn ausgewählte Annahmen nicht eintreten?	46
Fortschreibung der Ambitionen verfehlt Klimaneutralität	52
Empfehlungen für konkrete Maßnahmen	56
Anhang	62

VORWORT VON DR. GEORG MÜLLER

Vorsitzender des Vorstands der MVV Energie AG

Klimaschutz ist für MVV seit langem unverzichtbarer Bestandteil unserer Strategie und gemeinsamer Nenner all unserer geschäftlichen Aktivitäten. Wir verfolgen einen klaren Kurs Richtung Klimaneutralität und bekennen uns zu den Zielen der Pariser Klimaschutzkonferenz. In der Unternehmensentwicklung orientieren wir uns dabei an einem 1,5-Grad-Pfad.

Drei Herausforderungen stehen für Unternehmen im Vordergrund: Erstens muss der Transformationsprozess so gestaltet werden, dass er von den relevanten Interessengruppen – Kunden, Mitarbeitern, Anteilseignern und der Öffentlichkeit – getragen werden kann. Er muss zweitens wirtschaftlich leistbar bleiben. Und drittens können wir nicht auf einen Masterplan warten, sondern müssen heute Entscheidungen zur Energieinfrastruktur der Zukunft treffen. Um in diesen Fragen Orientierung bekommen und geben zu können, haben wir das Wuppertal Institut mit der Energierahmenstudie für unsere Heimatstadt Mannheim beauftragt.

Aus Sicht der Energiewirtschaft gibt es allen Grund zu Zuversicht und Optimismus. Allein im Stromsektor stammen in Deutschland bereits 50 Prozent aus erneuerbaren Energien. Noch vor zwei bis drei Dekaden haben die Fachexperten das nicht für möglich gehalten. Bereits mit den heutigen Technologien ist Klimaneutralität im Energiesektor machbar und es werden in den kommenden Jahren weitere Innovationen hinzukommen. Vor diesem Hintergrund umreißt die Rahmenstudie die wesentlichen Handlungsfelder und die Optionen, mit denen in den kommenden Jahren weitreichende, und ja, auch mutige sowie nachhaltige Schritte zur CO₂-Reduktion möglich sind.

Die vorliegende Energierahmenstudie untersucht daher nicht, ob Klimaneutralität in Mannheim möglich ist, sondern wie das gehen kann: Mit welchen Schritten Mannheim über alle Sektoren klimaneutral werden kann, und welche Voraussetzungen dafür bei Strom und Wärme, im Verkehr und in der Industrie notwendig sind. Sie beleuchtet, welchen Beitrag



die bestehenden Energieinfrastrukturen zur Strom-, Wärme- und Verkehrswende leisten können und welche neuen Infrastrukturen wir dafür brauchen. Der Bezugspunkt 2050 ergibt sich aus den Verpflichtungen des Pariser Klimaschutzabkommens. Es spricht jedoch viel dafür, dass diese Zeitachse mit mehr Ambition auch noch verkürzt werden kann.

Denn die Ergebnisse der Studie sind eine gute Nachricht für alle, denen Mannheim und der Klimaschutz am Herzen liegen: Spätestens Mitte der 2030er Jahre liegen die auf Mannheimer Stadtgebiet entstehenden CO₂-Emissionen, vor allem im Zuge des Ausstiegs aus der kohlebasierten Energieerzeugung, auf einem deutlich niedrigeren Niveau als heute. Bereits bis 2040 kann ein Emissionsrückgang um rund 90 Prozent gegenüber heute erzielt werden. Das reicht freilich nicht aus, unser Weg darf und wird damit nicht zu Ende sein. Mit unserer Unternehmensstrategie zum weiteren Ausbau der erneuerbaren Energien, und damit verbunden zur Dekarbonisierung der Strom- und Wärmeversorgung, haben wir die Weichen dafür bereits gestellt.

Lassen Sie uns gemeinsam, auf allen dafür notwendigen Ebenen, an der Realisierung dieses Weges arbeiten. Ich wünsche Ihnen eine interessante Lektüre und uns allen eine breite gesellschaftliche Debatte.

GELEITWORT VON DR. PETER KURZ

Oberbürgermeister der Stadt Mannheim

Mannheim betreibt seit vielen Jahren aktiven Klimaschutz und engagiert sich auf vielfältige Weise im Bereich Nachhaltigkeit. Bereits im Jahr 1999 wurde ein Klimaschutzkonzept erarbeitet und im Jahr 2009 mit Blick auf die nächste Dekade weiterentwickelt. Die dort identifizierten Handlungsoptionen für eine nachhaltige Reduktion der CO₂-Emissionen haben wir in konkrete Aktionspläne überführt und über die Zeit erfolgreich umgesetzt. Eine wichtige Rolle in der operativen Umsetzung der kommunalen Klimaschutzaktivitäten hat die gemeinsam mit MVV Energie, GBG und Stadt Mannheim gegründete Klimaschutzagentur gespielt.

Zehn Jahre später, im Jahr 2019, haben wir drei weitere Meilensteine vor dem Hintergrund des weltweiten Temperaturanstiegs sowie einer zunehmenden Debatte um Klimawandel und Klimagerechtigkeit verabschiedet: Das Leitbild „Mannheim 2030“ beschreibt Mannheim als eine klimagerechte und perspektivisch klimaneutrale Stadt und orientiert sich an den 17 globalen Nachhaltigkeitszielen der Vereinten Nationen. Mit dem „Dringlichkeitsplan zur Beschleunigung der Klimaneutralität“ wurden die wichtigsten Aktionsfelder für prioritäres Handeln definiert. Das Klimaschutzkonzept wird aktuell mit Blick auf das Jahr 2030 als Klimaschutz-Aktionsplan weiterentwickelt. Das ebenfalls im Jahr 2019 vom Gemeinderat verabschiedete Konzept zur „Anpassung an den Klimawandel in Mannheim“ zeigt systematisch auf, wie unsere Stadt durch den Klimawandel betroffen ist, und definiert Handlungsfelder sowie rund 70 konkrete Maßnahmen. Die Umsetzung der Maßnahmen rüstet unsere Stadt für die Folgen des Klimawandels.

Im September 2020 hat Mannheim die Tradition als Vorreiterin nachhaltiger Entwicklung unter den internationalen Großstädten einmal mehr fortgeschrieben: Die europäischen Städte, die sich zur Nachhaltigkeit bekennen, haben sich unter dem Titel „Mannheim 2020“ zu ihrer neunten großen Konferenz versammelt. Ergebnis dieser europäischen Konferenz



zukunftsbeständiger Städte und Gemeinden ist die „Mannheim Message“. Mit ihr verpflichten sich BürgermeisterInnen und EntscheidungsträgerInnen europäischer Städte und Regionen, den Europäischen Green Deal aktiv zu unterstützen, indem sie gemeinsam mit ihren Kommunen lokale „Grüne Abkommen“ (Local Green Deals) entwickeln und umsetzen. Mannheim stellt sich als Pilotstadt an die Spitze der Bewegung Lokaler Grüner Deals und bekräftigt damit die strategische Ausrichtung der Stadt als nachhaltige, integrative Kommune mit dem Ziel der Klimaneutralität.

Die Zusammenarbeit mit dem kommunalen Energieunternehmen MVV für den Klimaschutz ist dabei eine tragende Konstante in der Stadt. Ich bin daher überzeugt, dass uns die Erkenntnisse aus der Energierahmenstudie für Mannheim wertvolle Impulse auf dem Weg zur Dekarbonisierung der Fernwärme, zum Ausbau Erneuerbarer Energien, der umweltfreundlichen Mobilität und damit zur Modellstadt der Klimaneutralität geben werden. Der von ihr gesetzte Rahmen sowie ihre Handlungsempfehlungen sind ein wichtiger Beitrag für die aktuell anstehende Konkretisierung und Definition der Handlungsfelder für eine klimaneutrale Stadt Mannheim.



ZUSAMMENFASSUNG

Die vorliegende Energierahmenstudie untersucht, wie die Stadt Mannheim unter Berücksichtigung ihrer spezifischen Standortbedingungen bis spätestens zum Jahr 2050 Klimaneutralität erreichen kann. Der zeitliche Horizont orientiert sich an den Beschlüssen der Bundesregierung und der Europäischen Union im Zusammenhang mit dem Klimaschutzabkommen von Paris. Im Mittelpunkt steht ein von den Autorinnen und Autoren entwickeltes Klimaschutzszenario, das die lokalen Potenziale, Bedarfe und Herausforderungen berücksichtigt. Ein zweites, weniger ambitioniertes Szenario flankiert das Klimaschutzszenario. Die folgenden Kernbotschaften spiegeln die zentralen Ergebnisse, Erkenntnisse und Empfehlungen der Studie wider.

Mannheim kann bis zum Jahr 2050 seine energiebedingten CO₂-Emissionen um 99 % gegenüber dem heutigen Stand reduzieren und damit die Ziele des Pariser Klimaabkommens auf kommunaler Ebene vollständig umsetzen.¹

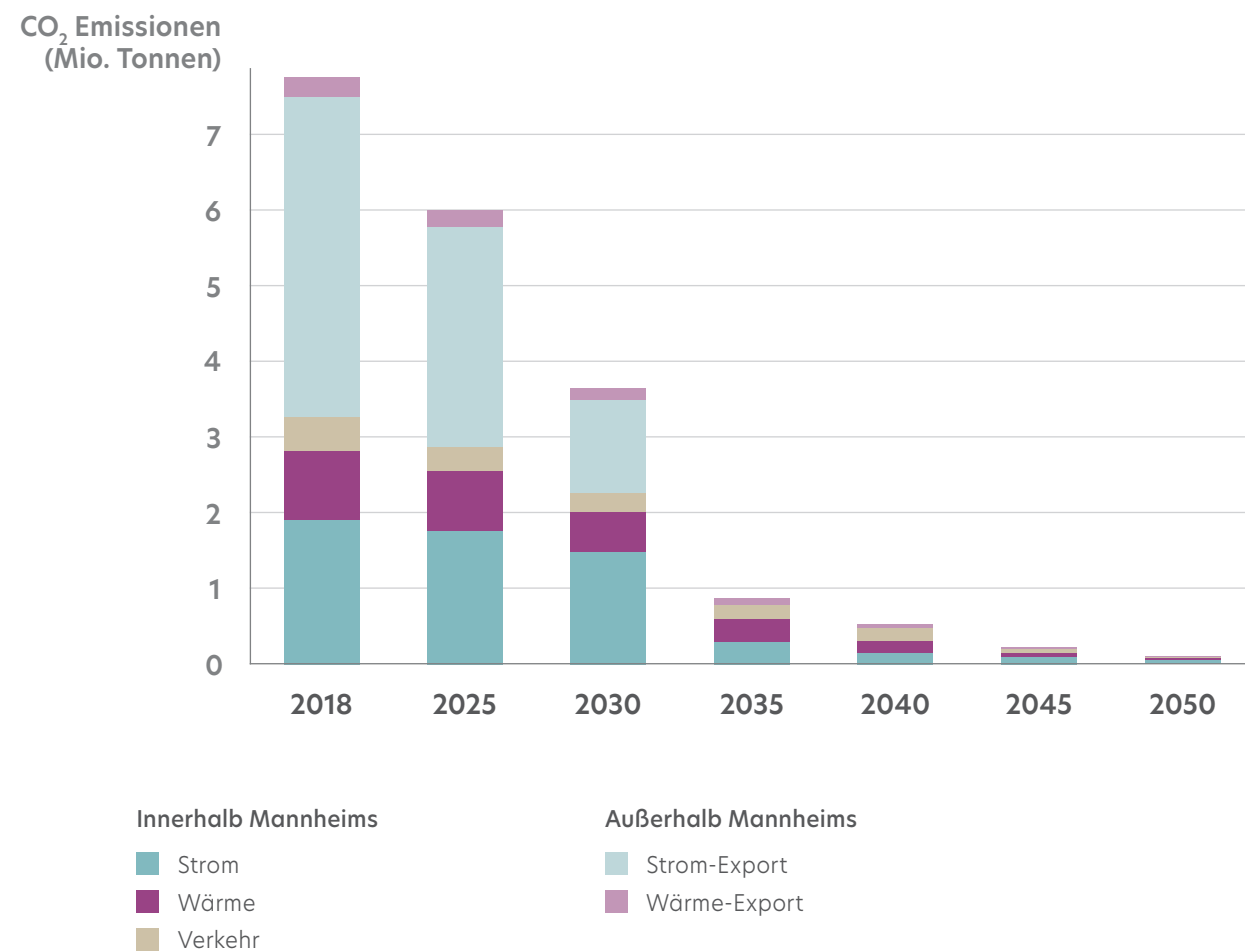
Der größte Anteil der Reduktion wird durch die Stilllegung des Großkraftwerks Mannheim (GKM) bis zum Jahr 2033 erreicht. Durch eine Bündelung von Maßnahmen in allen Sektoren ist bis zum Jahr 2050 eine CO₂-Reduktion von 92% gegenüber dem heutigen Emissionsniveau möglich. Verglichen mit dem Stand von 1990 entspricht dies einer CO₂-Reduktion um 94%. Durch die Abscheidung und Nutzung oder Speicherung von Kohlenstoff (CCUS) können auch die anderweitig nicht vermeidbaren Sockelemissionen aus der thermischen Abfallbehandlung adressiert und so eine CO₂-Reduktion von 99% erreicht werden.

Innerhalb der Stadtgrenzen Mannheims besteht ein realistisches Potenzial für knapp 1 TWh grüner Stromerzeugung. Tragende Kraft ist dabei die Photovoltaik, der Windkraft kommt eine ergänzende Rolle zu.

Langfristig können grüne Stromerzeugungspotenziale mobilisiert werden, die doppelt so hoch sind wie die heutige Stromnachfrage aus den Mannheimer Haushalten sowie in den Sektoren Gewerbe, Handel und Dienstleistungen (GHD). Dennoch reichen die gesamten Stromerzeugungspotenziale nicht aus, um insbesondere die industrielle Stromnachfrage vor Ort zu decken. Um die gesamte Nachfrage zu bedienen, wird langfristig etwas mehr als die Hälfte durch überregionale Strombezüge ergänzt, ohne dass die Versorgungssicherheit gefährdet wäre. ►

¹ Hier und im Weiteren der Studie sind immer CO₂-Äquivalente dargestellt. Aus Gründen der Lesbarkeit wird auf die explizite Angabe der Äquivalente verzichtet.

CO₂-Emissionspfad im Klimaschutzszenario „KliMa“



Für die Fernwärmeerzeugung ist über die thermische Abfallbehandlung, Biomasse, Flusswärmepumpe, Tiefengeothermie und industrielle Abwärme ausreichend grünes Potenzial vorhanden, um die Nachfrage zu decken.

Lediglich in Spitzenlastzeiten wird in geringem Umfang der ergänzende Einsatz von Gas erforderlich. Für das Ziel der Klimaneutralität muss dieses ab 2040 zunächst teilweise, ab 2050 dann vollständig aus klimaneutralem Gas bestehen. Dieses kann zum Teil aus lokalen und regionalen Biogasanlagen erzeugt und durch überregional erzeugte Grüngase (aus Biomethan bzw. synthetisch) ergänzt werden. Zentrale Voraussetzungen für die Realisierung der notwendigen Technologien in der Fernwärmeerzeugung sind jedoch geeignete politische Rahmenbedingungen und eine breite gesellschaftliche Akzeptanz, insbesondere beim Thema Tiefengeothermie. Von wesentlicher Bedeutung ist außerdem eine kontinuierlich sinkende Wärmenachfrage aufgrund hoher Effizienzsteigerungen im Industrie- und Gebäudesektor.

In der dezentralen Wärmeversorgung gewinnen elektrische Wärmepumpen, Solarthermie und die Mikro-Kraft-Wärme-Kopplung stark an Bedeutung.

Heizöl und Nachtspeicheröfen werden dadurch nahezu vollständig ersetzt. Die Bedeutung von Gas in der dezentralen

Wärmeversorgung geht insgesamt deutlich zurück. Das verbleibende Erdgas wird – analog zur Fernwärme – ab 2040 zunächst teilweise, ab 2050 dann vollständig durch klimaneutrales Gas ersetzt.

Wie die meisten deutschen Großstädte wird Mannheim zukünftig auch auf überregionale Energiebezüge angewiesen sein. Somit ist das Gelingen der bundesweiten Energiewende eine wesentliche Voraussetzung für die Klimaneutralität Mannheims.

Dies gilt insbesondere für den Stromsektor, wo die lokalen erneuerbaren Potenziale durch überregionale Bezüge gestützt werden müssen. Bei der Wärmeversorgung bleibt Mannheim insgesamt auch langfristig Exporteur mit einer Fernwärmeanbindung von Heidelberg, Speyer und Schwetzingen. Wie bereits heute werden auch künftig gasförmige Energieträger von außerhalb bezogen. Dies betrifft neben Biomethan auch grünen Wasserstoff und darauf basierende Derivate, die eine Komponente im Zielsystem darstellen, jedoch keine zentrale Rolle spielen. Mannheim hat das Ausmaß der „Importabhängigkeit“ zum Teil selbst in der Hand – mit einem starken Ausbau der erneuerbaren Potenziale und hohen Effizienzgewinnen bei der Energienachfrage können wichtige Teile der benötigten Energie auch langfristig vor Ort erzeugt werden. ▶

Umfassende energetische Sanierungen von Gebäuden, vor allem solche mit dezentraler Versorgung, sind eine wesentliche Voraussetzung für die Zielerreichung. Unerlässlich ist dabei die Modernisierung der älteren Gebäude in Mannheim, die sehr große Potenziale zur Wärmebedarfsenkung bieten.

Dezentrale Wärmelösungen wie elektrische Wärmepumpen setzen typischerweise hohe Dämmstandards voraus. Grundsätzlich gilt:

Je niedriger die jährlichen Sanierungsraten, desto größer die Herausforderungen in der erneuerbaren Wärmebereitstellung. So verringert eine hohe Sanierungsrate von 2% den Gesamt-Wärmebedarf um 12% gegenüber einer Sanierungsrate von 1,7%. Demgegenüber steigt der Wärmebedarf um 22%, wenn die Sanierungsrate lediglich 1,1% beträgt.

Mit seinem hohen geothermischen Potenzial in der Region kann Mannheim auf einen besonderen Standortvorteil gegenüber anderen Kommunen zurückgreifen und damit die Wärmebereitstellung aus der thermischen Abfallbehandlung ergänzen. Weniger ambitionierte Sanierungsstrategien können für den Teil der Gebäude, der an die Fernwär-

meversorgung angeschlossen ist, teilweise durch entsprechend höhere geothermische Leistungen ausgeglichen werden.

Die thermische Abfallbehandlung bleibt auch langfristig relevant. Die dort entstehenden CO₂-Emissionen können langfristig abgeschieden und in langlebige Produkte eingeschlossen oder gelagert (CCUS) werden.

Die thermische Abfallbehandlung ermöglicht eine klimaneutrale, langfristig verfügbare Grundlast für die Strom- und Wärmeerzeugung, während sie ihre Kernaufgabe, die Abfallbeseitigung, bedient. Gleichwohl bleibt sie mittelfristig eine CO₂-Quelle, die allerdings wegen des biogenen Anteils im Abfall und mithilfe von CCUS auch langfristig zur Reduzierung von CO₂ beiträgt.

Auf die Industrie wird trotz hoher Effizienzfortschritte auch langfristig etwa die Hälfte des Mannheimer Strom- und Wärmebedarfs entfallen.

Die Hebung dieser Effizienz-Potenziale ist jedoch kein Selbstläufer. Die verarbeitende Industrie in Mannheim ist somit ein zentraler Akteur bei der Nachfrageentwicklung und muss als starker Partner in die Transformation eingebunden sein.

Ohne Verkehrswende droht die Mobilität zum CO₂-intensivsten Sektor zu werden. Ein Wechsel von Verbrennern zu Batterieelektrischen und Brennstoffzellen-Antrieben stellt dabei den weitaus größten Hebel zur CO₂-Reduktion dar. Die bundesweite Technologieentwicklung ist auch hier eine wesentliche Voraussetzung für Mannheims Klimaneutralität.

Zudem sollte eine Verringerung vom motorisierten Individualverkehr durch Verkehrswegereduktion und Verlagerung zu Alternativen wie ÖPNV und Fahrrad forciert werden. Auf diese Weise lässt sich die Abhängigkeit von Energieimporten möglichst gering halten, und es werden positive Effekte auf Umwelt, Sicherheit und Lebensqualität, gerade in der Innenstadt, gehoben.

Das Ziel der Klimaneutralität bis 2050 ist nur erreichbar, wenn die in diesem Klimaschutzszenario entwickelten Pfade in den kommenden Jahren durch konkrete kommunale Maßnahmen unterfüttert werden.

Dazu gehören folgende Handlungsfelder:

- eine **PV-Offensive**, insbesondere auf Dach- und Freiflächen,
- das **Erschließen** der beträchtlichen **geothermischen Potenziale**,
- die **Forcierung der Gebäudesanierung**, vor allem des überalterten Bestands sowie in Quartieren, die nicht an die Fernwärme angeschlossen sind,
- die begleitende **Umsetzung der Verkehrswende** vor Ort durch Stärkung von ÖPNV und Radverkehr sowie durch Anreize zur **Forcierung der E-Mobilität**,
- die **Mitgestaltung von** adäquaten **Rahmenbedingungen** und einer breiten **gesellschaftlichen Akzeptanz** für grüne Wärme- und Stromerzeugungsanlagen vor Ort.



MOTIVATION UND ZIELBILD

Aktiver Klimaschutz ist seit vielen Jahren ein wichtiges strategisches Thema für die Stadt Mannheim und MVV Energie.

Bereits im Jahr 1997 startete MVV ihr erstes CO₂-Minderungsprogramm, heute zählt der Konzern zu den wenigen europäischen Unternehmen, die sich dem Ziel der „Business ambition 1.5 °C“ der Science Based Target-Initiative verpflichtet haben. Dies spiegelt sich auch in der Unternehmensstrategie wider, die auf Energiewende, erneuerbare Energien und Energieeffizienz ausgerichtet ist.

Seitens der Stadt Mannheim wurde im Jahr 1999 ein Klimaschutzkonzept erarbeitet und seither stetig weiterentwickelt. Im Jahr 2019 verabschiedete die Stadt nicht nur ihr „Leitbild 2030“, das Mannheim als eine langfristig klimagerechte und klimaneutrale Stadt beschreibt, sondern vor dem Hintergrund weltweit steigender Temperaturen auch ein Konzept zur Anpassung an den Klimawandel.

Aktuell wird das Klimaschutzkonzept der Stadt Mannheim weiterentwickelt, diesmal mit Blick auf das Jahr 2030. Auch wird die Stadt Mannheim in den nächsten Jahren die Langfristperspektive für einzelne Sektoren stärken, beispielhaft genannt sei der Masterplan Mobilität, der bis 2023 die mittel- und langfristigen Entwicklungen und Maßnahmen im Bereich Verkehr ableitet.

Die Anstrengungen Mannheims als zweitgrößter Stadt Baden-Württembergs stehen dabei im Kontext nationaler wie internationaler Klimaziele und Entwicklungen. So verpflichtete sich die internationale Gemeinschaft 2015 im Klimaschutzabkommen von Paris völkerrechtlich verbindlich, den Anstieg der durchschnittlichen Erdtemperatur auf deutlich unter 2 °C, besser 1,5 °C über dem vorindustriellen Niveau zu begrenzen. Ende 2016 verabschiedete auch die Bundesregierung den „Klimaschutzplan 2050“, nach dem Deutschland bis zum Jahr 2050 die Klimaneutralität anstrebt. Mit dem „European Green Deal“ hat die Europäische Union im Jahr 2020 die eigenen Klimaschutzziele noch einmal nachgeschärft. Der „Green Deal“ beschreibt, wie Europa bis 2050 zum ersten klimaneutralen Kontinent werden soll. Die vorliegende Studie greift diesen zeitlichen Horizont auf: einerseits, um die Einordnung in vorgenannte, übergeordnete Politikziele zu erleichtern, andererseits aus methodischen Gründen. An den Stellen, wo Mannheim mit Deutschland im Austausch steht, ist ein Rückgriff auf nationale „Energiewende-Szenarien“ notwendig. Die hierfür gewählte Referenzstudie sieht eine CO₂-Reduktion um mindestens 95% bis 2050 als ambitionierte Zielmarke für Deutschland und deckt damit alle ►

Wirtschaftszweige und Sektoren ab (siehe hierzu auch „Rahmen und Methodik“).

Das Ziel der Klimaneutralität stellt die zentrale gesellschaftliche Herausforderung des 21. Jahrhunderts dar und lässt sich nur durch einen vollständigen Ersatz von fossilen Energien erreichen. Der hierfür notwendige Strukturwandel betrifft uns alle: private Haushalte, Gewerbe und Industrie, Gebäudeeigentümer und Mieter sowie den Verkehr.

Vom Strukturwandel werden vor allem Großstädte, wie z. B. Mannheim, betroffen sein. Zum einen, weil im städtischen Raum der Handlungsbedarf aufgrund einer hohen Energienachfrage und entsprechenden CO₂-Emissionen besonders groß ist. Zum anderen, weil wegen dichter Besiedlung nur geringe Flächenpotenziale für die erneuerbare Energieerzeugung vorhanden sind. Außerdem bestehen hohe infrastrukturelle Pfadabhängigkeiten, welche in Klimaschutzplänen adäquat und ortspezifisch berücksichtigt werden müssen. Gerade weil strukturelle Veränderungen jedoch erhebliche Vorlaufzeiten benötigen, muss jetzt diskutiert und schnell entschieden werden, wie die Energie- und Verkehrsinfrastruktur langfristig auszuweisen hat, um Mannheim auf Kurs in die Klimaneutralität zu bringen.

Im Vergleich zu anderen Kommunen steht Mannheim dabei vor besonderen Herausforderungen: Allen voran ist die Stadt heute mit ihren Kraftwerken, insbesondere mit

dem Steinkohle-befeuerten Großkraftwerk, ein bedeutender überregionaler Stromversorger. Als starker Industriestandort ist Mannheim dabei nicht nur Arbeitsplatz für viele Beschäftigte, sondern auch ein großer Verbraucher von Energie. Als überregionaler Fernwärmeanbieter versorgt Mannheim neben der eigenen Bevölkerung auch die Städte Heidelberg, Speyer und Schwetzingen. Und mit einem der größten Binnenhäfen Deutschlands, dem zweitgrößten Bahnverkehrsknoten in Südwestdeutschland sowie dem Regionalflughafen liegen auch im Verkehrssektor wichtige Drehkreuze der Region im Stadtgebiet.

Kann Mannheim also überhaupt klimaneutral werden? Und wenn ja, wie kann Mannheim diese Transformation schaffen?

Die vorliegende Analyse zeigt auf, dass und wie dies möglich ist. Es handelt sich um eine *Energierahmenstudie*, d. h. sie entwirft die großen Entwicklungslinien und Handlungsfelder. MVV hat dabei in Abstimmung mit der Stadt Mannheim das Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie beauftragt, einen fachlich fundierten, faktenbasierten und Mannheim-spezifischen Entwicklungspfad zur Klimaneutralität zu entwickeln. Damit stellt diese Analyse einen wichtigen Diskussionsimpuls für die Stadtgesellschaft dar und ist eine der Planungsgrundlagen für die Ableitung kommunaler Entwicklungsschritte.

Der Klimaneutralitätspfad ist nicht als Prognose für die Zukunft zu lesen, sondern, unter

Zugrundelegung transparenter und faktenbasierter Annahmen, als eine Beschreibung einer möglichen Zukunft für Mannheim zu interpretieren. Bei der Erstellung wurde ferner darauf geachtet, dass die Kernergebnisse belastbar bleiben gegenüber moderaten Abweichungen von einzelnen Annahmen.

Ganz bewusst verzichtet diese Studie dabei auf eine Beschreibung auf Stadtteilebene sowie auf einen detaillierten Maßnahmen-

plan für Akteure vor Ort. Dies wäre der zweite Schritt vor dem ersten. Die benannten Voraussetzungen und die sich darunter entfaltenden Entwicklungen spannen einen Rahmen, durch den die Leserinnen und Leser auf einen Weg zur Klimaneutralität Mannheims blicken. Natürlich ist dies nicht der einzig mögliche, aber aus Sicht der Autorinnen und Autoren nicht nur ein realisierbarer, sondern auch ein empfohlener Weg.

RAHMEN UND METHODIK

Die Studie zeichnet in zwei Szenarien die großen Entwicklungslinien für Mannheim im Zeitraum bis 2050. Das Hauptszenario „Klimaneutrales Mannheim“ (kurz „KliMa“) zeigt, wie eine Klimawende in Mannheim erreicht werden kann. Das Vergleichsszenario „Fortschreibung“ macht sichtbar, dass weniger ambitionierte Klimaschutzmaßnahmen nicht ausreichen werden, um Klimaneutralität zu erreichen.

Zusätzlich runden mehrere Sensitivitäten das Szenario „KliMa“ ab. In den Sensitivitäten werden Effekte untersucht, die Klimaschutz sowohl bremsen als auch beschleunigen. Damit machen sie den Einfluss von Handlungsfeldern auf Mannheims CO₂-Minderungspfad sichtbar, tragen zu wichtigen Schlussfolgerungen bei und verleihen den Kernaussagen die notwendige Robustheit (siehe hierzu auch „Was passiert, wenn ausgewählte Annahmen nicht eintreten?“).

Im ersten Schritt untersucht die Studie die Entwicklung der Mannheim-spezifischen Energienachfrage und -bereitstellung in den Sektoren Strom, Wärme und Verkehr. Im zweiten Schritt werden die CO₂-Emissionen dieser Energiemengen für die Jahre 2030, 2040 und 2050 berechnet, ausgehend vom Startjahr 2018.

Die Untersuchung fußt dabei grundsätzlich auf der normativen Setzung, dass „neue“ lokale Erzeuger im Strom- und Wärmesektor aus erneuerbaren Energien kommen sollen, sofern realistische Potenziale in Mannheim vorhanden sind.

Die Ableitung dieser lokalen Potenziale erneuerbarer Energien erfolgte in ausführlichen Gesprächen mit Mannheimer Expertinnen und Experten und auf Basis von Sekundärstudien bzw. Statistiken. Diese sind explizit nicht als rein technische, sondern realisierbare Potentiale zu verstehen, wenngleich deren Ausschöpfung ein hohes Ambitionsniveau voraussetzt. Für den Wärmebedarf der Wohn- und Gewerbegebäude wurden eigene, spezifische Annahmen zur Sanierungsrate und -tiefe entwickelt.

Wenn lokale Potenziale nicht ausreichen, um die Energienachfrage zu decken, wird annehmegemäß Energie von außerhalb Mannheims bezogen. Im Stromsektor führt dies zu einem Austausch Mannheims mit dem bundesdeutschen Stromsystem. Ähnlich verhält es sich im Wärmesektor, wo ein Austausch z. B. über Erdgasleitungen stattfindet. Im Verkehrssektor erfolgt der Austausch über eine Tankstellen- bzw. Ladeinfrastruktur.

An den Stellen, wo keine Mannheim-Spezifika zu berücksichtigen sind, sondern die bundesdeutschen Entwicklungen auch Mannheim prägen, werden Aussagen aus der dena-Leitstudie (Deutsche Energie-Agentur GmbH, 2018) übernommen bzw. auf Mannheim übertragen, die (in „KliMa“) eine CO₂-Reduktion um 95% bis 2050 vorsehen.² So z. B. bei der Zusammensetzung des bundesdeutschen Strommixes, der für die Berechnung der Mannheimer CO₂-Emissionen relevant ist. Ebenso bei Annahmen zur Entwicklung der Energienachfrage ►

² Die dena-Leitstudie ist eine weithin anerkannte, energiewirtschaftliche Studie, die unter Einbezug eines breiten Teilnehmerkreises aus Wissenschaft und Wirtschaft entstand. <https://www.dena.de/newsroom/publikationsdetailsansicht/pub/dena-leitstudie-integrierte-energiewende/>.

sowie bei den zukünftig verfügbaren Antriebsarten im motorisierten Verkehr.

Die dargestellten Entwicklungen basieren auf fundierten Annahmen sowie Potenzial- und Experteneinschätzungen und sind nicht das Ergebnis einer mathematischen Modellierung, die einen optimalen Pfad unter technischen und wirtschaftlichen Vorgaben sucht. Darum enthält diese Analyse grundsätzlich auch keine Aussagen zu den mit diesen Entwicklungen verbundenen Kosten.

CO₂-Bilanz

Für die Beschreibung der CO₂-Bilanz im Startjahr 2018 wurden die jeweils jeweils (zum Zeitpunkt der Studienerstellung) jüngsten Statistiken zum Energieverbrauch in den Sektoren Strom, Wärme und Verkehr ausgewertet³ und die CO₂-Emissionen für diese Energiemengen berechnet. Die CO₂-Emissionen für alle Folgejahre fußen auf der Energiemengenentwicklung in den dargestellten Szenarien.

Für die Berechnung der CO₂-Bilanz sind diese vier Punkte maßgeblich:^{4,5}

1. Die Bilanzierungsmethodik, insbesondere der Umgang mit Export- und Importemissionen,
2. die verwendeten CO₂-Emissionsfaktoren,

3. der Umgang mit Vorketten-Emissionen,
4. die Aufteilung von CO₂-Emissionen auf Strom und Wärme, sofern diese CO₂-Emissionen in einem Kraftwärmekopplungsprozess entstehen.

Umgang mit Export- und Importemissionen

Auch wenn das Großkraftwerk Mannheim (GKM) und insbesondere Block 9 zu den modernsten und damit effizientesten Stromerzeugungsanlagen Deutschlands gehört, entsteht am GKM der weitaus größte Teil der CO₂-Emissionen im Stadtgebiet. Ein sehr großer Teil davon geht dabei auf eine Stromnachfrage außerhalb Mannheims zurück.

In dieser Analyse werden nur diejenigen CO₂-Emissionen in die Mannheimer CO₂-Bilanz eingerechnet, die aus der Deckung der Mannheimer Strom-, Wärme- und Verkehrsnachfrage resultieren (Verursacherprinzip bzw. Verbrauchersicht genannt). Dies schließt CO₂-Emissionen aus Energieimporten ein. Der Vollständigkeit und der Transparenz halber werden nachrichtlich auch die CO₂-Emissionen ausgewiesen, die am GKM zur Deckung von Strom- und Wärmenachfragen außerhalb Mannheims entstehen („Export“-bedingte CO₂-Emissionen).

Emissionsfaktoren

Für Anlagen, die in Mannheim Strom und Wärme erzeugen, werden brennstoffspezifische Emissionsfaktoren genutzt. Dies führt dazu, dass beispielsweise die Mannheimer Stromerzeugung für den Mannheimer Strombedarf wesentlich durch den CO₂-Emissionsfaktor für Steinkohle bestimmt wird, solange das GKM am Netz ist.⁶

Erst nach Stilllegung des GKM, also zwischen 2030 und 2040, wird (bilanziell) auch Strom aus dem Bundesgebiet nach Mannheim „importiert“. Dieser Importstrom wird mit den CO₂-Emissionsfaktoren des bundesdeutschen Strommixes belastet.

Vorketten-Emissionen

Unter Vorketten-Emissionen versteht man CO₂-Emissionen, die bei der Förderung bzw. dem Transport von fossilen Brennstoffen sowie bei der Errichtung von beispielsweise Windkraftanlagen oder bei der Produk-

tion von PV-Modulen entstehen. Vorketten-Emissionen werden in dieser Analyse sowohl für Stromerzeugungsanlagen auf Mannheimer Stadtgebiet als auch für Energieimporte berücksichtigt.

Aufteilung von CO₂-Emissionen

Bei der Kraftwärmekopplung werden Strom und Wärme gleichzeitig und aus einem Brennstoff gewonnen. Für die Frage, wie viel CO₂ der Strom- und wie viel der Wärmeproduktion angelastet werden soll, gibt es unterschiedliche methodische Ansätze, die in der Praxis für verschiedene Zwecke genutzt werden. In dieser Studie wurde die sogenannte Finnische Methode angewendet.⁷ Der Anhang zeigt neben der Finnischen Methode auch die CO₂-Emissionen Mannheims nach der Carnotmethode.⁸ Im Ergebnis ist die Summe der CO₂-Emissionen identisch, jedoch entfällt bei Carnot weniger auf Wärme, dafür mehr auf Strom.

³ Die jüngsten Daten stammen im Strom- und Wärmesektor aus dem Jahr 2018, im Verkehr waren teilweise aktuellere Daten verfügbar.

⁴ Die Punkte 1 bis 3 haben Einfluss auf die Höhe der CO₂-Emissionen, Punkt 4 auf die im Strom- und Wärmesektor ausgewiesenen Anteile.

⁵ Im wissenschaftlichen Kontext können hierfür auch andere Annahmen angesetzt werden, was zu abweichenden Ergebnissen führen kann.

⁶ Dieser Faktor liegt für Steinkohle bei rund 875 g CO₂/kWh, berechnet aus 394 g CO₂/kWh (Primärenergieeinsatz) und einem elektrischen Wirkungsgrad von 45%. Zum Vergleich: Der bundesdeutsche Strommix liegt bei rund 489 g CO₂/kWh (dena, 2018).

⁷ Bei der Finnischen Methode werden die CO₂-Emissionen anhand der Wirkungsgrade von Vergleichsanlagen, in denen ungekoppelt Wärme und Strom erzeugt wird, auf den KWK-Prozess übertragen.

⁸ Bei der Carnotmethode werden die CO₂-Emission unter Berücksichtigung des Energiegehaltes der Produkte Wärme und Strom auf eben diese aufgeteilt.



WO STEHT MANNHEIM HEUTE?

Strom

Im Jahr 2018 wird die CO₂-Bilanz Mannheims maßgeblich vom kohlebasierten Großkraftwerk Mannheim (GKM) dominiert. Im GKM werden in drei Kraftwerksblöcken rund 6,9 TWh Strom und 2,3 TWh Fernwärme produziert. Dadurch werden stromseitig ca. 2,5 Mio. Haushalte und wärmeseitig ca. 160.000 Haushalte versorgt. Mit dem GKM ist Mannheim also einer der größten Energieversorger für Südwestdeutschland bei Strom und in der Metropolregion Rhein-Neckar für Fernwärme.

Im Jahr 2018 werden im Stromsektor 1,9 Mio. Tonnen CO₂ emittiert, die durch Mannheimer Verbrauch verursacht werden. Rund 4,1 Mio. Tonnen CO₂ entstehen zusätzlich durch die Stromproduktion für außerhalb Mannheims. Folglich sind heute nur 32% der CO₂-Emissionen im Strom dem Mannheimer Stromverbrauch zuzurechnen.

Wärme

Mannheim verfügt über einen vergleichsweise alten Gebäudebestand. Wie der Wärmeetlas zeigt, wird rund ein Drittel der Wärme in Gebäuden benötigt, die vor 1960 gebaut worden sind (LUBW, 2018). Vom derzeitigen Bestand gehen rund 78% in unsanierte Gebäude, während Neubauten und sanierte Gebäude zusammen etwa 9% der Wärme verbrauchen.

Der Wärmesektor wird in zwei Segmente unterteilt. Erstens, in die zentral bereitgestellte Fernwärme, die im Startjahr 2018 allein aus dem GKM gespeist wird. Durch den im Jahr 2020 erfolgten Anschluss der thermischen Abfallbehandlung (TAB) an das Fernwärmenetz, wird die Fernwärme heute jedoch aus GKM und TAB gespeist. Zweitens in die dezentrale Wärmeerzeugung in einzelnen Gebäuden (z. B. mit Erdgas), also dort, wo keine Fernwärmeversorgung besteht. Mehr als 60% der Mannheimer Haushalte, aber auch Industrie und Gewerbe, werden über Fernwärme, weniger als 40% werden dezentral versorgt. Der Fernwärmeanteil in Mannheim liegt damit weit über dem Bundesdurchschnitt, der bei 13,9 % liegt.⁹

Innerhalb des dezentralen Segments bildet Erdgas mit 71% die häufigste Wärmeversorgung, gefolgt von Heizöl mit 19% und Nachtspeicherheizungen mit 5%. Alternative Heizoptionen wie elektrische Wärmepumpen, Pelletkessel, Solarthermie oder Mikro-KWK spielen mit jeweils unter 3 Prozentpunkten eine untergeordnete Rolle.

Fernwärme und dezentrale Versorgung verursachen zusammen 0,8 Mio. Tonnen CO₂, wobei davon auf die Fernwärme 73% und auf die dezentrale Wärme 27% entfallen. Weitere 0,2 Mio. Tonnen CO₂ entstehen durch die Fernwärmeversorgung außerhalb Mannheims (Heidelberg, Speyer, Schwetzingen). ▶

⁹ Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft (2019). Wie heizt Deutschland 2019? https://www.bdew.de/media/documents/Pub_20191031_Wie-heizt-Deutschland-2019.pdf.

Zusammensetzung der CO₂-Emissionen (Verbrauchersicht)

in Tonnen CO₂ | 2018

1.959.591

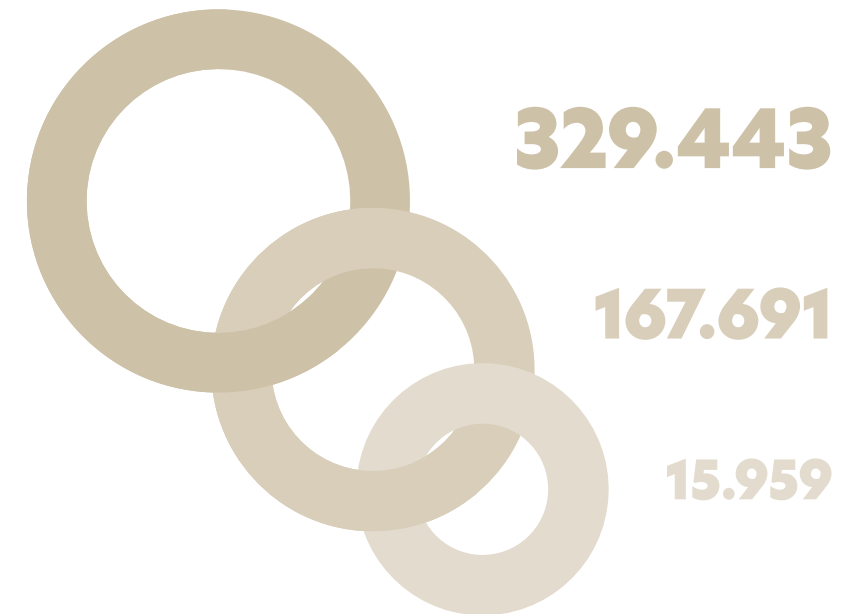
581.583

216.245

- Strom
- Fernwärme
- dezentrale Wärme

Verkehr:

- Motorisierter Individualverkehr
- Güterverkehr
- ÖPNV



Verkehr

Die regionale Bedeutung Mannheims und die hohe Konzentration von Arbeitsplätzen, Freizeit-, Dienstleistungs- und Einkaufsangeboten erzeugt viele Fahrten von, nach und in Mannheim. Über 119.000 Menschen pendeln von außerhalb nach Mannheim, über 50.000 Mannheimer und Mannheimerinnen pendeln in andere Städte.¹⁰ Zudem besuchen jährlich etwa 16 Mio. Menschen die Stadt, davon 1,6 Mio. Übernachtungsgäste.¹¹ Dies verdeutlicht nochmals die enorme Bedeutung des Handlungsfelds Mobilität, denn im Personenverkehr dominiert das Auto.

Im Wirtschafts- und Güterverkehr sind es hingegen die leichten und schweren Nutzfahrzeuge, mit denen die meisten Fahrten durchgeführt und die größten Distanzen zurückgelegt werden.

Insgesamt fallen im Verkehrssektor rund 0,5 Mio. Tonnen CO₂ an. Dies sind ca. 16% der gesamten, von der Mannheimer Bevölkerung verursachten CO₂-Emissionen. Der motorisierte Individualverkehr trägt dabei mit rund 64% der CO₂-Emissionen das Doppelte des Güterverkehrs bei (33%), während der innerstädtische öffentliche Personennahverkehr mit rund 3% der CO₂-Emissionen zu vernachlässigen ist.¹² ▶

¹⁰ Statistisches Landesamt Baden-Württemberg (2017). Pendlersaldo in Baden-Württemberg. <https://www.statistik-bw.de/Pendler/Ergebnisse/Pendlersaldo.jsp>.

¹¹ Stadtmarketing Mannheim (2020). <https://www.visit-mannheim.de/extension/portal-mannheim/var/storage/original/application/dc60d221009af8e27878b10b7e8d27dc.pdf>.

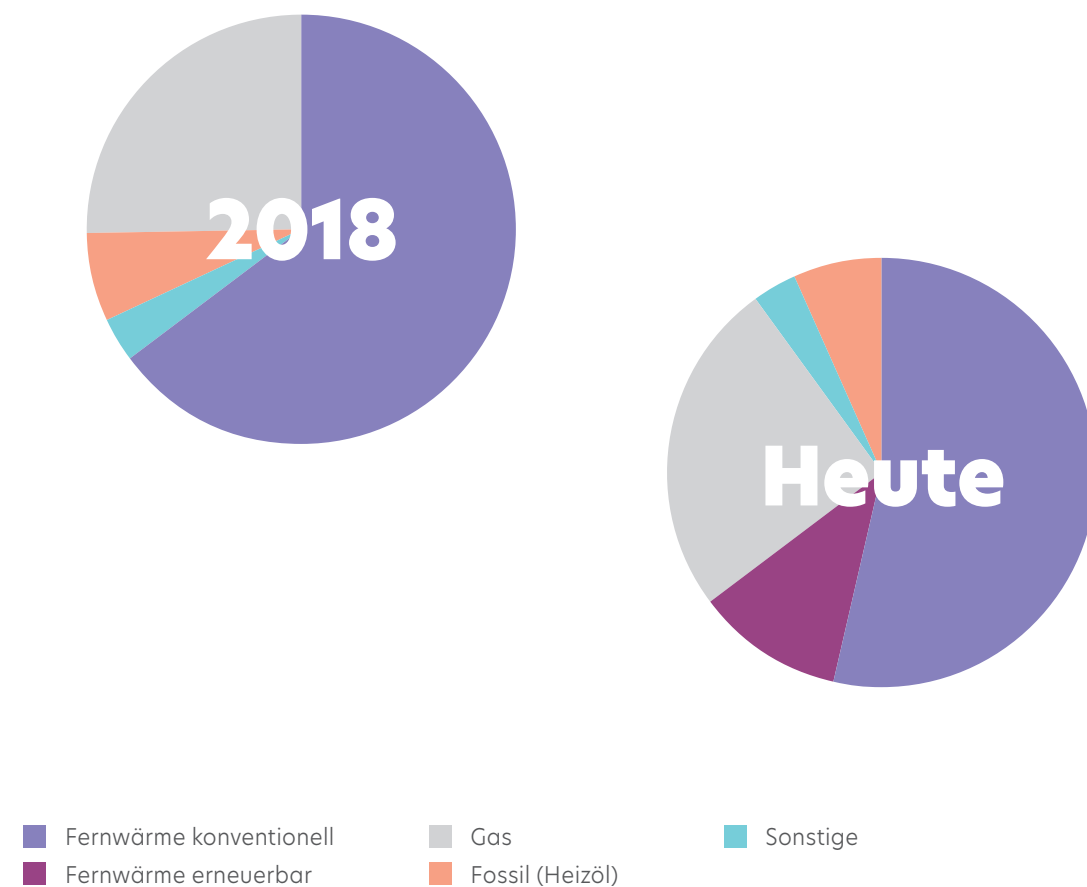
¹² Wenngleich der Strombezug des Mannheimer ÖPNV klimaneutral gestellt ist, werden die Primäremissionen in der vorliegenden Studie mitgezählt.

Summiert man die CO₂-Emissionen aus dem Verkehr sowie der Strom- und Wärmeversorgung der Mannheimer Bevölkerung, werden im Stadtgebiet heute 3,3 Mio. Tonnen CO₂ pro Jahr emittiert. Weitere 4,4 Mio. Tonnen CO₂ entstehen derzeit aus

der Strom- und Wärmeproduktion für Verbraucher außerhalb Mannheims. Das GKM steht dabei für 90% der CO₂-Emissionen. Dies legt bereits nahe, welchen Stellenwert dieser Kraftwerksstandort für den Mannheimer CO₂-Minderungspfad innehat.

Zusammensetzung der Wärmeversorgung (Verbrauchersicht)

GWh



Vergleich zum Klimaschutzkonzept 2009 und zur Mannheimer CO₂-Bilanz für 2018

Das Mannheimer Klimaschutzkonzept aus dem Jahr 2009 formuliert Ziele und Maßnahmen zur CO₂-Minderung bis zum Jahr 2020.¹³ In der Regel lassen sich Zahlen aus unterschiedlichen Studien wegen methodischer Abweichungen und jeweils spezifisch getroffener Annahmen nicht 1:1 miteinander vergleichen. So unterscheidet sich das Klimaschutzkonzept von 2009 zur vorliegenden Analyse u. a. in der Wahl der CO₂-Emissionsfaktoren, außerdem erfolgt die Bilanzierung auf Endenergiesektoren. Im Mannheimer Klimaschutzkonzept wurden zwei mögliche Klimapfade aufgezeichnet, mit denen die CO₂-Emissionen bis zum Jahr 2020 auf 3,6 Mio. Tonnen CO₂ („Trend-Szenario“) bzw. 2,6 Mio. Tonnen CO₂ („Klima-Szenario“) absinken. Vergleicht man dieses Niveau mit den CO₂-Emissionen für das Jahr 2018 aus der vorliegenden Studie, liegt man zwischen den beiden Szenarien. Somit wurde mehr erreicht, als im „Trend-Szenario“ vorgenommen, jedoch weniger als im „Klima-Szenario“ avisiert.

Parallel zur vorliegenden Analyse wird derzeit durch das ifeu eine CO₂-Bilanz der Stadt Mannheim für das Jahr 2018 erstellt.¹⁴ Diese basiert auf der sog. BSKO-Methodik¹⁵, welche die Vergleichbarkeit von Bilanzen unterschiedlicher Kommunen als ein wesentliches Ziel verfolgt. Hierfür wird ein bundeseinheitlicher Emissionsfaktor für die Stromproduktion vorgegeben, welcher die lokale Erzeugungsstruktur nicht berücksichtigt. Da die vorliegende Analyse jedoch auch für den Stromsektor brennstoffspezifische Emissionsfaktoren verwendet, weichen die Bilanzdaten geringfügig voneinander ab. So beziffert die Analyse von Ifeu die Mannheimer CO₂-Emissionen für das Jahr 2018 auf rund 3,1 Mio. Tonnen, während die vorliegende Studie knapp 3,3 Mio. Tonnen CO₂ bilanziert.

¹³ ifeu (2009). Klimaschutzkonzeption Mannheim 2020. Endbericht. Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg gGmbH.
¹⁴ ifeu (2020). Energie- und CO₂- Bilanz Mannheim 2018. Endbericht. Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg gGmbH.
¹⁵ Bilanzierungs-Systematik Kommunal, vgl. www.klimaschutz-planer.de.



KLIMA – SO WIRD MANNHEIM KLIMANEUTRAL

Im Hauptszenario Klimaneutrales Mannheim – kurz „KliMa“ – reduziert Mannheim seine energiebedingten CO₂-Emissionen bis zum Jahr 2050 um 94 bis 99%. Damit werden die Ziele des Pariser Klimaabkommens auf kommunaler Ebene vollständig umgesetzt. Um das zu erreichen, muss die Transformationsgeschwindigkeit sehr viel höher als in den letzten Jahren sein.

Bei „KliMa“ handelt es sich methodisch betrachtet um einen normativen „back-casting“-Ansatz. Das bedeutet, dass der Entwicklungspfad so angelegt ist, dass die vorgegebene Zielsetzung – Klimaneutralität für Mannheim bis spätestens 2050 – unter Einhaltung der Potenzialgrenzen erreicht wird. Hierfür wurden folgende zentrale Annahmen getroffen:

- **Kohleausstieg:** Auf Basis des beschlossenen Kohleausstiegs wurden folgende Zeitpunkte für die Blockstilllegungen am Großkraftwerk Mannheim (GKM) angenommen: Block 7 Anfang 2020, Block 6 Anfang 2026, Block 8 Anfang 2028, Block 9 Anfang 2033.
- **Stromerzeugung:** Die in Mannheim realisierbaren Potenziale für erneuerbare Energien werden vollständig und zügig ausgebaut.
- **Wärme:** Die Nachfrage in der Fernwärme sowie der dezentralen Objektversorgung wird bis 2050 weitgehend aus heimischen Potenzialen und CO₂-neutralen Technologien gedeckt.
- **Sanierung:** Im Gebäudesektor ist die Sanierungsrate mit 1,7%/Jahr hoch angesetzt.¹⁶ Auch die Sanierungstiefe ist ambitionierter als heute.

- **Grüngas:** Klimaneutrales Methan ersetzt den verbleibenden Erdgasbedarf im Wärme- und Verkehrssektor ab 2040 zunächst zu 30%, ab 2050 vollständig.
- Für **Entwicklungen auf nationaler Ebene** dient das Szenario „Technologie-Mix“ der dena-Leitstudie als Rahmen, in dem Deutschland bis 2050 eine CO₂-Minderung von 95% gegenüber 1990 erreicht.
- Im **Verkehrssektor** sieht der dena-Rahmen einen Antriebswechsel, weg von Diesel- und Benzinmotoren, hin zu Batterie-elektrischen und mit Wasserstoff betriebenen Fahrzeugen vor. Bezüglich des Mobilitätsverhaltens in Mannheim wurden spezifische Annahmen getroffen. Danach verdoppelt sich bis 2050 die Anzahl der Wege, die mit dem Fahrrad zurückgelegt werden, während sich der motorisierte Individualverkehr halbiert.¹⁷ Das gesamte Verkehrsaufkommen in Mannheim sinkt bis 2050 um 10%.
- Für die **Industrie** unterstellt die dena-Studie Effizienzsteigerungen, die trotz Produktionswachstum zu einem Rückgang des Endenergieverbrauchs um 27% bis 2050 führen. ▶

¹⁶ Heute liegt die Sanierungsrate bei 1,0%/Jahr (dena, 2018).

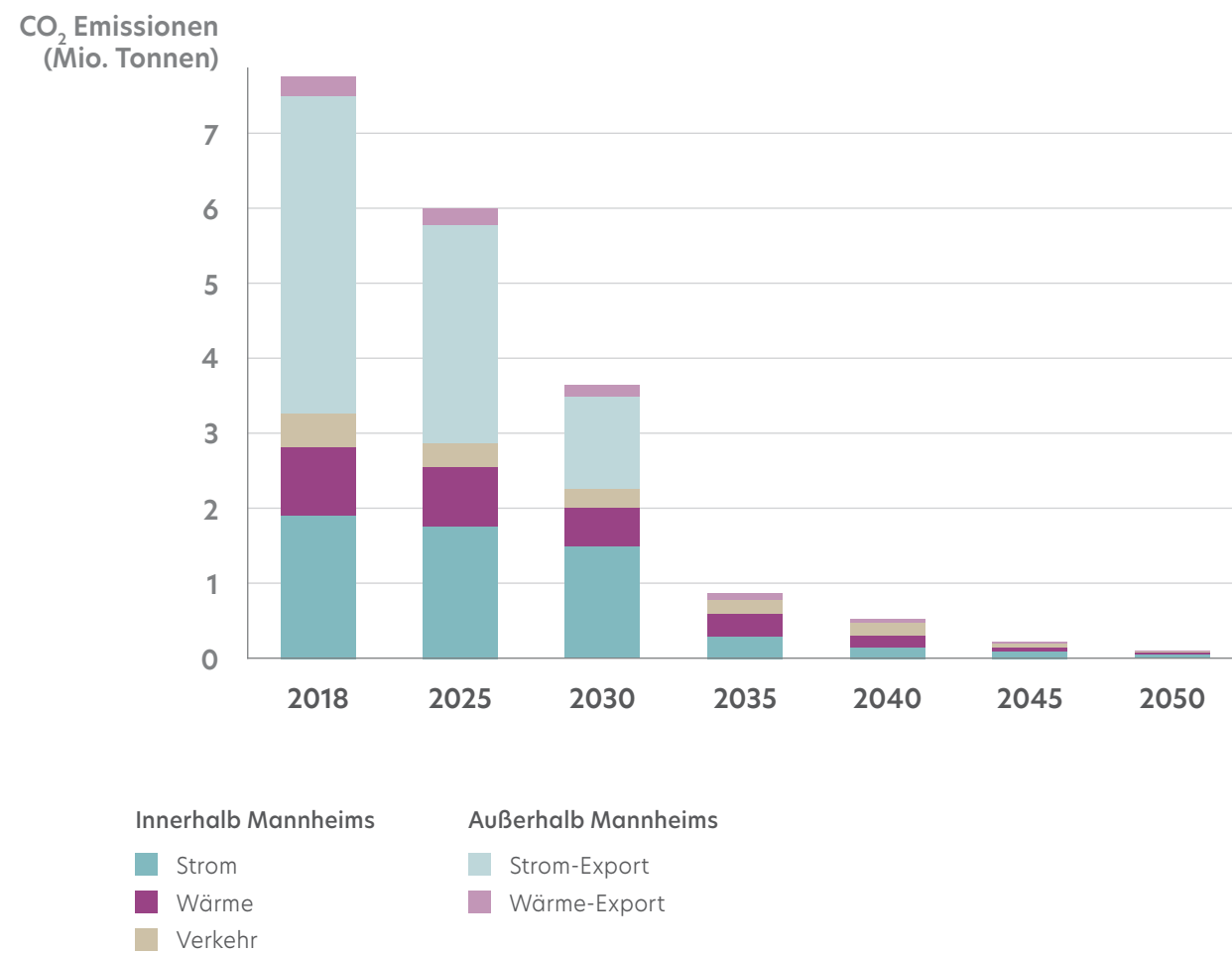
¹⁷ Autofahrten unter 5 Kilometern Strecke gehen um 64% zurück, Fahrten bis 10 Kilometer um 43% und Fahrten über 10 Kilometern um 34%.

CO₂-Emissionen

Mannheim schafft durch den Kohleausstieg und unter der Annahme, dass keine konventionelle Kraftwerksleistung an Stelle des GKM tritt, sehr früh eine sehr hohe CO₂-Minderung: Bis Mitte der 2030er Jahre sinken die CO₂-Emissionen signifikant. Mit dem Rückgang der CO₂-Emissionen in Strom

und Wärme gewinnt der Verkehrssektor relativ an Bedeutung. Ab dem Jahr 2035 sind die CO₂-Emissionen dort so hoch wie in den anderen Sektoren. Im Zieljahr 2050 werden sektorübergreifend und ohne CO₂-Abscheidung an der thermischen Abfallbehandlung (TAB) noch rund 0,3 Mio. Tonnen CO₂ pro Jahr emittiert. Dies entspricht einer CO₂-Reduktion von 92% gegenüber

CO₂-Emissionspfad



Industrielle Abscheidung von CO₂ (CCUS)

Unter CCUS (Carbon Capture, Utilization and Storage) wird die chemische Abscheidung von CO₂ zum Zwecke der Weiterverarbeitung (Utilization) oder dauerhaften Speicherung (Storage) verstanden, das bei der Strom- und Wärmeproduktion in Kraftwerken oder in Industrieanlagen (z. B. in Zementwerken oder bei der Stahlproduktion) entsteht.

CCUS kommt aus Klimaschutzgründen überall dort in Frage, wo Alternativen der CO₂-Vermeidung nicht möglich sind. In Bezug auf die Abfallwirtschaft sind somit die Abfallvermeidung, danach die Erhöhung der Recyclingquote und zuletzt – für die dann noch in der thermischen Abfallbehandlung (TAB) anfallenden Mengen – die CO₂-Abscheidung von Bedeutung. CCUS ist bereits heute weltweit im Einsatz, also eine prinzipiell ausgereifte und verfügbare Technologie, wenngleich viele Anwendungsfelder noch nicht vollumfänglich im großtechnischen Maßstab erprobt sind. Aktuelle Abscheidungsverfahren weisen einen Wirkungsgrad von (höchstens) 90 % auf. Das bedeutet, dass bei der Abscheidung immer noch (mindestens) 10 % der abzuscheidenden CO₂-Menge emittiert werden.

Ursache für die erst geringe Verbreitung sind u. a. die mit der Abscheidung verbundenen Kosten, regulatorische Rahmenbedingungen und komplexe Fragen bezüglich des Transports und der sicheren Lagerung. Der einmalige Einbau einer CO₂-Abscheidung ist teuer und erhöht die laufenden Betriebskosten (bis zu 30 % höherer Strom- und Prozesswärmebedarf). Wegen der hohen Kosten wird CCUS voraussichtlich erst bei sehr hohen CO₂-Preisen¹⁸ wirtschaftlich.

Für TAB kommen eigene CO₂-Speicher vor Ort schon allein aus Kostengründen nicht in Frage. Speziell in Mannheim wären die geologischen Bedingungen dafür auch nicht gegeben. Ferner ist die Lagerung in Deutschland aktuell verboten.

CO₂ kann in salinen Aquiferen und ausgeförderten Erdgasfeldern gelagert werden. Letztere gelten als sicherer bezüglich der Gefahr eines Wiederaustritts von CO₂ sowie in der Genauigkeit, wie viel CO₂ eingespeichert werden kann.¹⁹

In Mannheim ist die Mitnutzung von (neu zu errichtenden) CO₂-Pipelines anderer größerer CO₂-Quellen (z. B. Chemieparks) sowie der Transport über Binnenschiffe für die Zukunft denkbar. Eine Nutzung und Umwidmung von nicht mehr betriebenen Erdgasleitungen wäre hingegen mit erheblichen Effizienzverlusten verbunden, weil diese auf andere Drücke ausgelegt sind und somit deutlich weniger CO₂ transportiert werden könnten. Hinzu kommt die Konkurrenz zum Wasserstofftransport, wofür Erdgasleitungen besser nutzbar sind.

Bei der CO₂-Abscheidung aus den Rauchgasen von TAB können wegen des inhomogenen Brennstoffs auch andere Schadgase in den Speicher gelangen. Kritische Stoffe sind z. B. in Lacken oder Batterien enthalten. Diese Gasbestandteile können die Lagerungseigenschaften des CO₂ oder die geologischen Eigenschaften des Lagers selbst beeinflussen und erhöhen damit das Gefahrenpotenzial im Fall möglicher Leckagen.

Die Nutzung von CO₂ ist aus ökologischer Sicht nur dann sinnvoll, wenn der Kohlenstoff langfristig in dem Produkt verbleibt. Stand heute gibt es verschiedene Nutzungsmöglichkeiten für abgeschiedenes CO₂, wie die Verwendung als Kältemittel in z. B. Klimaanlage (deutlich geringeres Treibhausgaspotenzial als herkömmliche Kältemittel), das Einpressen in Erdgas- und Ölfelder zur verbesserten Förderung oder der Einsatz in der oxygenen Photosynthese zur Biomasse-Bildung. Perspektivisch könnten neue Anwendungsfelder an Relevanz gewinnen, welche das CO₂ langfristig binden, wie z. B. die Herstellung von Pflanzenkohle oder die Einlagerung in Baustoffen.

¹⁸ Damit sind die Preise gemeint, die im Europäischen Emissionshandelssystem bezahlt werden müssten, würde man CCUS nicht nutzen.

¹⁹ Die Bandbreite der effektiven Speicherkapazität liegt (je nach Bodenformation) bei 0,1-40 % (der ursprünglichen Kapazität) für saline Aquifere bzw. 75-100 % für Erdgasfelder.

dem Jahr 2018 bzw. 94 % gegenüber dem Jahr 1990 (wegen des höheren Ausgangsniveaus). Mit CO₂-Abscheidung an der TAB werden im Jahr 2050 lediglich 24.000 Tonnen CO₂ emittiert, was einer CO₂-Reduktion von 99 % entspricht. Dies bedeutet klimaneutral.

Dieser konvexe CO₂-Minderungspfad („früh passiert viel“) hat eine wichtige Bedeutung für die CO₂-Emissionen, die insgesamt bis 2050 emittiert werden: Sie sind geringer, als wenn Mannheims Pfad linear oder gar konkav verlief („spät passiert viel“). Insgesamt werden in „KliMa“ zwischen 2018 und 2050 ca. 45 Mio. Tonnen CO₂ emittiert. Einschließlich der „Export“-Emissionen sind es ca. 75 Mio. Tonnen CO₂.

Was passiert im Stromsektor?

Schlüsselfaktoren für das Erreichen der Klimaneutralität sind:

1. Das GKM wird nicht durch neue fossile Kraftwerkskapazitäten ersetzt.
2. Deutliche Beschleunigung des Photovoltaik-Ausbaus auf Dächern, Fassaden und in der Freifläche, Nutzung weiterer erneuerbarer Potenziale (Biomasse, Wind).
3. Bezug des Strombedarfs von außerhalb Mannheims durch langfristig vollständig erneuerbaren Strom.

Die Rolle Mannheims als Strom„exporteur“ ändert sich grundlegend

Mannheim wird mit Stilllegung des letzten Kraftwerksblock am GKM (Block 9 zum Jahresanfang 2033) vom Strom„exporteur“ der Region zum Strom„importeur“, um die lokale Stromnachfrage zu decken. Mit Vorschreiten der Energiewende auf nationaler Ebene und dem damit verbundenen Ausbau erneuerbarer Energien in der Stromerzeugung sinkt der CO₂-Emissionsfaktor des Mannheimer Strombezugs. Bis zum Jahr 2050 sinken dadurch Mannheims CO₂-Emissionen im Strom auf fast null.

Die Stromnachfrage nimmt bis 2050 leicht zu

Die Stromnachfrage steigt im Zeitverlauf um rund 10 %. Dies ist nur auf den ersten Blick ein Widerspruch zu vielen Studien, die angesichts von Energie- und Verkehrswende mit einem starken Anstieg der Stromnachfrage rechnen.²⁰

Der wichtigste Unterschied liegt in der Stromnachfrage der Industrie, die in Mannheim heute drei Viertel und im Jahr 2050 die Hälfte der Stromnachfrage ausmacht. In den sehr energieintensiven Grundstoffindustrien, wie z. B. in der Stahl-, Zement- und Chemiebranche, werden zukünftig viele Prozesse elektrifiziert, um CO₂ zu reduzieren. Dies treibt den Stromverbrauch stark.²¹ In Mannheim dominiert jedoch die

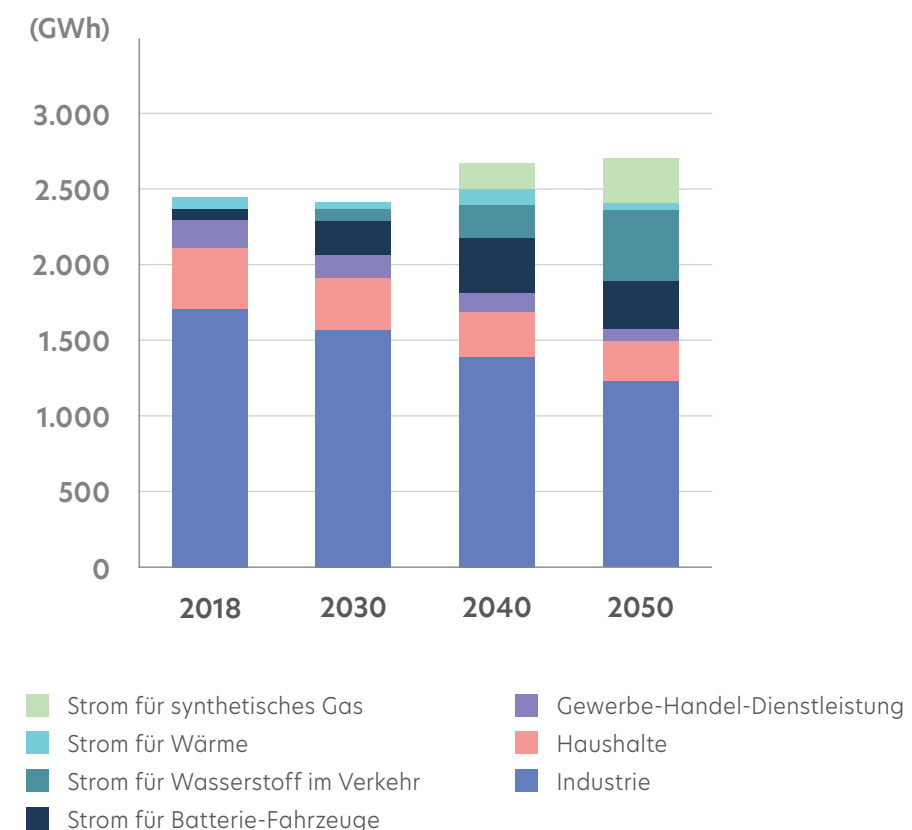
verarbeitende Industrie. Für diesen speziellen Sektor geht die dena-Leitstudie²² insgesamt von einem Rückgang im Energieverbrauch aus. Ursache hierfür ist ein stetiger technologischer Fortschritt, der sich auf alle Prozesse bezieht. In Summe sinkt der industrielle Endenergieverbrauch bis 2050 um 27 % gegenüber heute. Dabei ist bereits eine Ausweitung der Produktion durch ein Wirtschaftswachstum von 1%/Jahr eingerechnet.

Für den Sektor Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD) geht die dena-Leitstudie von starken Effizienzentwicklungen aus, welche sich bis 2050 in einem um 45 % reduzierten Endenergiebedarf widerspie-

geln. Für den Strombedarf der Haushalte wurde dieselbe Annahme hinterlegt. Zu beachten ist jedoch, dass die Nachfrage neuer Stromverbraucher bzw. Technologien in diesem Rückgang nicht enthalten sind; sie werden in der vorliegenden Studie separat abgeleitet und den jeweiligen Sektoren (Strom, Wärme, Verkehr) zugeordnet.

Neue Stromverbraucher kommen im Verkehrssektor durch den Ausbau der Elektromobilität hinzu. In der dezentralen Wärmeversorgung erhöhen elektrische Wärmepumpen den Bedarf. In der Fernwärme wird Strom für den Betrieb von Flusswärmepumpen und den Betrieb der ►

Stromnachfrage



²⁰ Deutsche Energie-Agentur GmbH (2018) sowie prognos, Öko-Institut, & Wuppertal Institut (2020). Klimaneutrales Deutschland. Studie im Auftrag von Agora Energiewende, Agora Verkehrswende und Stiftung Klimaneutralität. https://static.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Projekte/2020/KNDE2050/A-EW_195_KNDE_Langfassung_DE_WEB.pdf.

²¹ Deutsche Energie-Agentur GmbH (2018).

²² Die verarbeitende Industrie wird bei dena (2018) als „sonstige Industrie“ bezeichnet.

Tiefengeothermie benötigt. Der größte Bedarf entsteht jedoch durch die Produktion synthetischer Gase.

Die Erzeugung von erneuerbarem Strom im Stadtgebiet ist wichtig, um die Energiewende voranzubringen und Importabhängigkeiten zu reduzieren

Mannheim verfügt über erhebliches Ausbaupotenzial für erneuerbare Energien in der Stromerzeugung. Bis zum Jahr 2050 wird die lokale grüne Stromerzeugung auf rund 1 TWh ausgebaut. Damit lässt sich der Strombedarf der Mannheimer Haushalte und des Verkehrs rechnerisch vollständig durch erneuerbare Stromerzeugung in Mannheim decken.²³ Erst unter Einbezug des Strombedarfs der Industrie und der Wärmeversorgung ist ein Strom„import“ erforderlich. Gemessen an der gesamten Mannheimer Stromnachfrage steigt die lokale Grünstromquote auf 35%.

Photovoltaik-Potenziale heben

Mannheim steigert in „KliMa“ die Photovoltaik-Leistung von heute 43 MW auf 648 MW bzw. von 1.792 Anlagen auf ca. 27.000 Anlagen.²⁴ Der starke Ausbau beruht vor allem auf einem Zuwachs der Photovoltaik-Leistung auf privaten, gewerblichen und kommunalen Dachflächen (73% am

Zuwachs). Danach folgen die Freiflächen (23%) und die Anlagen an Häuserfassaden.²⁵ Photovoltaik ist damit die tragende Säule bei der lokalen Erzeugung von erneuerbarem Strom in Mannheim.

Damit dies gelingt, müssen auf Mannheims Dächern rechnerische (bei konstantem Zubau über 30 Jahre) 16 MW oder 667 Anlagen pro Jahr neu installiert werden. Mit anderen Worten: Das bisherige Ausbautempo bei den Dachflächen muss vervierfacht werden. Andere Städte wie Ulm haben im Durchschnitt der letzten 10 Jahre 5,2 MW pro Jahr ausgebaut, was rund 41 Watt pro Einwohner und Jahr entspricht.²⁶ Für die Erreichung der Ziele in „KliMa“ müsste Mannheim rund 52 Watt pro Einwohner und Jahr ausbauen.

Wind- und Bioenergie dienen als Ergänzung

Im Szenario „KliMa“ werden alle realistisch umsetzbaren Potenziale erneuerbarer Energien genutzt. Dazu gehört auch die Windenergie, wenngleich die Flächenpotenziale auf städtischem Gebiet überschaubar sind. Das bedeutet aber auch, dass der Hochlauf bis zum Maximum dessen, was realistisch umsetzbar ist, schneller erfolgt als bei der Photovoltaik.

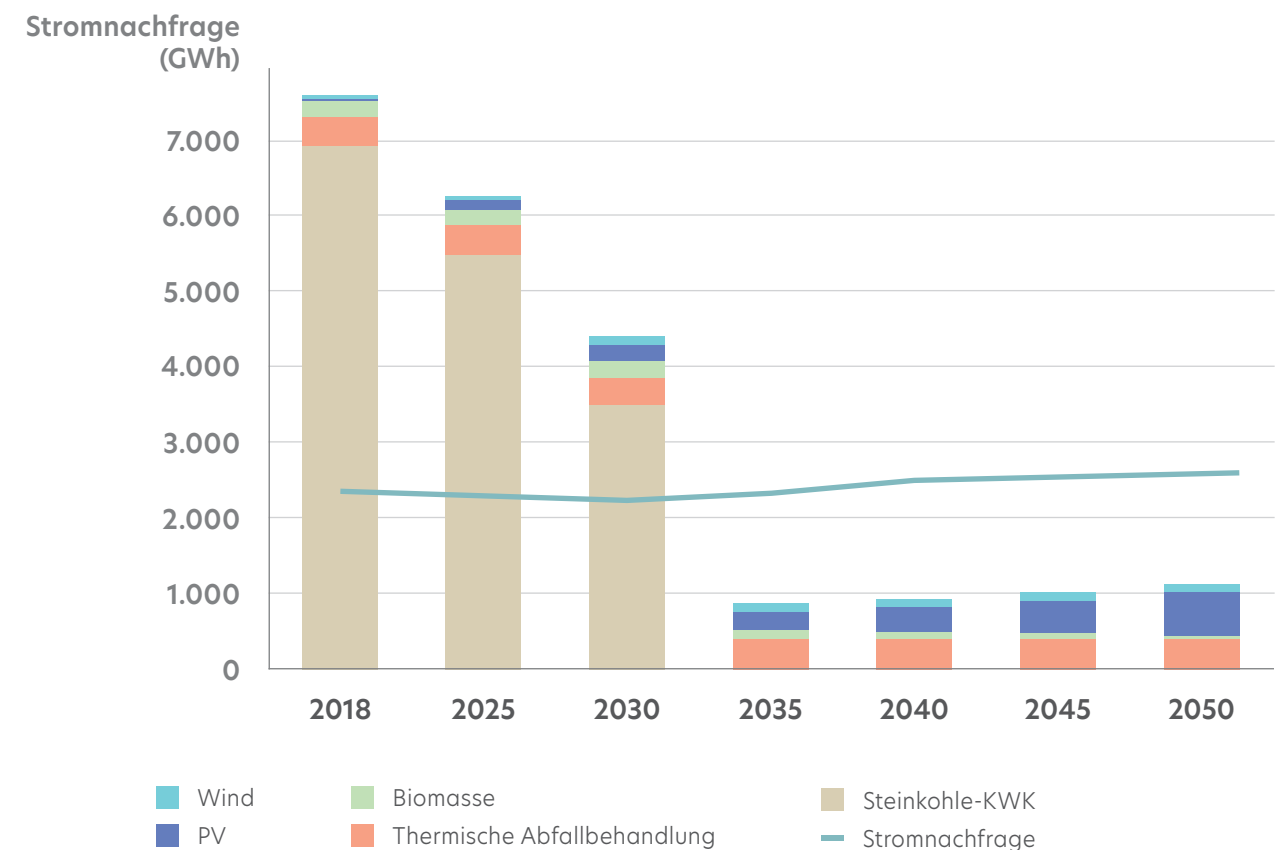
Bis zum Jahr 2050 werden insgesamt acht Windenergieanlagen der neuesten Generation²⁷ auf der Friesenheimer Insel sowie im Norden Mannheims errichtet.²⁸ Im Jahr 2050 tragen diese Anlagen 94 GWh oder 10% zur lokalen erneuerbaren Stromerzeugung bei.

Sofern weitergehende technische Maßnahmen zum Artenschutz erfolgen, könnten vier zusätzliche Windenergieanlagen in der Nähe der städtischen Kläranlage errichtet werden, wodurch die lokale Windstrompro-

duktion auf 142 GWh steigen würde. Dieses zusätzliche Windpotenzial wurde im Szenario „KliMa“ nicht angesetzt.

Wie in Deutschland insgesamt, so ist auch in Mannheim der Ausbau der Biomasse begrenzt. In „KliMa“ wird für die Fernwärmeversorgung ein weiteres Altholz-Heizkraftwerk errichtet, mit dem Ziel, den Anteil erneuerbarer Energie in der Fernwärme und teilweise auch im Strom zu erhöhen. ▶

Stromerzeugung und -nachfrage in Mannheim



²³ Ohne Strom für Wärmebereitstellung, jedoch inklusive Strom für Grüngaserzeugung im Verkehrssektor.

²⁴ Rechenbeispiel mit einer unterstellten Anlagengröße von 24 kWp. Bei Privatanlagen sind etwa 5 – 8 kWp und im gewerblichen Bereich 100-750 kWp üblich, Freiflächenanlagen können noch deutlich größer ausfallen.

²⁵ Die Potenziale beruhen auf einer Analyse der PV-Eignung Mannheimer Dächer mit Daten des Solarkatasters (LUBW, (2018). <https://www.energieatlas-bw.de>) in Verbindung mit Umsetzungsraten für die vorgefundenen Eignungsklassen. Hierbei wurden Restriktionen wie Fenster, Ränder, Statik und Verschattung berücksichtigt. Auf 10% der geeigneten Dachflächen wird eine Solarthermie-Nutzung unterstellt – das Energiepotenzial findet sich entsprechend im Wärmesektor. Für das Freiflächen-Potenzial sind nur die heute förderfähigen Mannheimer Freiflächen berücksichtigt (angrenzend an Autobahnen, Bahntrassen und anderen großen Straßen), und damit nur ein Teil des tatsächlich noch größeren Potenzials.

²⁶ Bundesnetzagentur (2020). <https://www.marktstammdatenregister.de/MaStR>.

²⁷ 5,6 MW Nennleistung, 162 Meter Rotordurchmesser, 155 Meter Nabenhöhe.

²⁸ Unter Berücksichtigung des Teilflächennutzungsplans Windenergie (Nachbarschaftsverband Heidelberg-Mannheim (2018). Sachlicher Teilflächennutzungsplan „Windenergie“-Beschluss zu Planungskriterien für den Bereich der Stadt Mannheim).

Was passiert in der Fernwärme?

Schlüsselfaktoren für das Erreichen der Klimaneutralität sind:

1. Zügiges Erschließen der lokalen geothermischen Potenziale.
2. Anschluss des Biomassekraftwerks an die Fernwärme und Neubau eines zweiten Biomasse-Heizkraftwerks in den 2020er Jahren.
3. Verzicht auf signifikanten Einsatz fossiler Brennstoffe, insbesondere Erdgas.
4. Weitere Verdichtung der Fernwärme.

Mannheim verfügt über vielfältige Optionen für die Fernwärme

Im Vergleich zu anderen Großstädten kann Mannheim auf spezifische Stärken bauen, die bei der Dekarbonisierung der Fernwärme einen Standortvorteil ausmachen.

Die geografische Lage von Mannheim an zwei großen Flüssen führt zu einem signifikanten Potenzial von **Flusswärme**, das über elektrische Großwärmepumpen erschlossen werden kann. Ein zweites Potenzial ist geologischer Natur: In Mannheim und in der Region sind hohe Potenziale für die Nutzung der **Tiefengeothermie** vorhanden, die nur wenige andere Großstädte in Deutschland haben (siehe hierzu auch „Nutzung von Tiefengeothermie“).

Auch die Mannheimer Infrastruktur macht einen Unterschied. Hinsichtlich der Energieinfrastruktur gibt es in oder in der Nähe von Mannheim überregionale bedeutende Strom- und Gasnetze. Zudem ist das Fernwärmenetz Mannheims mit Heidelberg, Schwetzingen und Speyer verbunden, so-

Nutzung von Tiefengeothermie

Klimaneutralität ist nur möglich, wenn auch die Wärmeversorgung dekarbonisiert wird. Grundsätzlich gibt es nur wenige Technologien, die in größerem Maßstab und ohne Schwankungen in der Verfügbarkeit CO₂-freie Wärme bereitstellen können. Hierzu zählt die Tiefengeothermie, bei der Erdwärme in mehreren hundert bis tausend Metern genutzt wird, um große Wärmenetze zu versorgen. Mannheim liegt in einem der für die Tiefengeothermie geeignetsten Gebiete Deutschlands.

Aktuell wird die Tiefengeothermie kaum genutzt. Dies hat auch damit zu tun, dass regionale seismische Erschütterungen mit Tiefenbohrungen von frühen Geothermie-Projekten in Verbindung gebracht werden. Die gesellschaftliche Akzeptanz ist darum regional sehr unterschiedlich ausgeprägt. Aus Demonstrations- und Forschungsanlagen wurden und werden seitdem neue Erkenntnisse zur Tiefengeothermie gewonnen. Inzwischen handelt es sich – anders als noch vor 10-20 Jahren – um eine ausgereifte, sichere Technologie. Die verstärkte Nutzung der Tiefengeothermie wird darum auch in dieser Studie empfohlen. Als eine der wenigen Großstädte in Deutschland hat die Stadt München bereits erfolgreich begonnen, die Tiefengeothermie strategisch und in großem Stil in das bestehende Fernwärmenetz zu integrieren.

Von der Tiefengeothermie strikt zu unterscheiden, ist die (sehr viel kleinteiligere) oberflächennahe Geothermie. Hierunter fallen elektrisch betriebene (Erd-) Wärmepumpen, die in der dezentralen Wärmeversorgung heute bereits viele Neubauten nutzen. Auch diese Versorgung ist CO₂-frei, wenn der für den Kreislauf notwendige Strom aus erneuerbaren Energien stammt. Allerdings sind bauliche Voraussetzungen notwendig, wie z. B. hohe Dämmstandards für eine Niedertemperaturheizung sowie Platz für die Verlegung von z. B. Erdsonden in unmittelbarer Nähe des Gebäudes.

dass auch Erzeugungspotenziale außerhalb der Stadtgrenzen nutzbar werden. Darüber hinaus ermöglichen die hervorragenden logistischen Infrastrukturen – Straße, Schiene und Hafen – die Nutzung von **grünen Brennstoffen**, die nicht in Mannheim erzeugt wurden (z. B. Altholz/Biomasse, grüne Gase).

Als industrielles Zentrum mit vielen verarbeitenden Unternehmen sind, wenngleich in begrenztem Umfang, **industrielle Abwärmepotenziale** vorhanden, die ganzjährig zur Verfügung stehen.

Hinsichtlich der Nutzung von **Biomasse** kann das auf der Friesenheimer Insel von MVV betriebene Biomassekraftwerk künftig für die Fernwärme genutzt werden. Darüber hinaus ist Potenzial für eine weitere, wärmegeführte Altholz-Anlage vorhanden. Zusätzlich zu einer bereits vor 2030 unterstellten Biogasanlage wird in „KliMa“ ab dem Jahr 2030 eine weitere Anlage errichtet, die ausschließlich auf Basis von kommunalen, feuchten Abfällen („Biotonne“) Biomethan produziert und damit bereits vor dem Jahr 2040 teilweise Erdgas in der Wärmeversorgung substituiert.

Mit der Anbindung der **thermischen Abfallbehandlung (TAB)**, deren Erzeugung zur Hälfte als erneuerbar gewertet wird, an die Fernwärme wurde das Potenzial einer weiteren Besonderheit Mannheims – die vorhandene TAB – sinnvoll genutzt. Unter dem Strich hat Mannheim substanzielle erneuerbare Potenziale, die ausreichend sind, um die Fernwärmeerzeugung klimaneutral umzubauen. Anders als in anderen großen Fernwärmenetzen kann als Zwischenschritt

auf einen umfassenden Einsatz von fossilem Erdgas verzichtet werden.

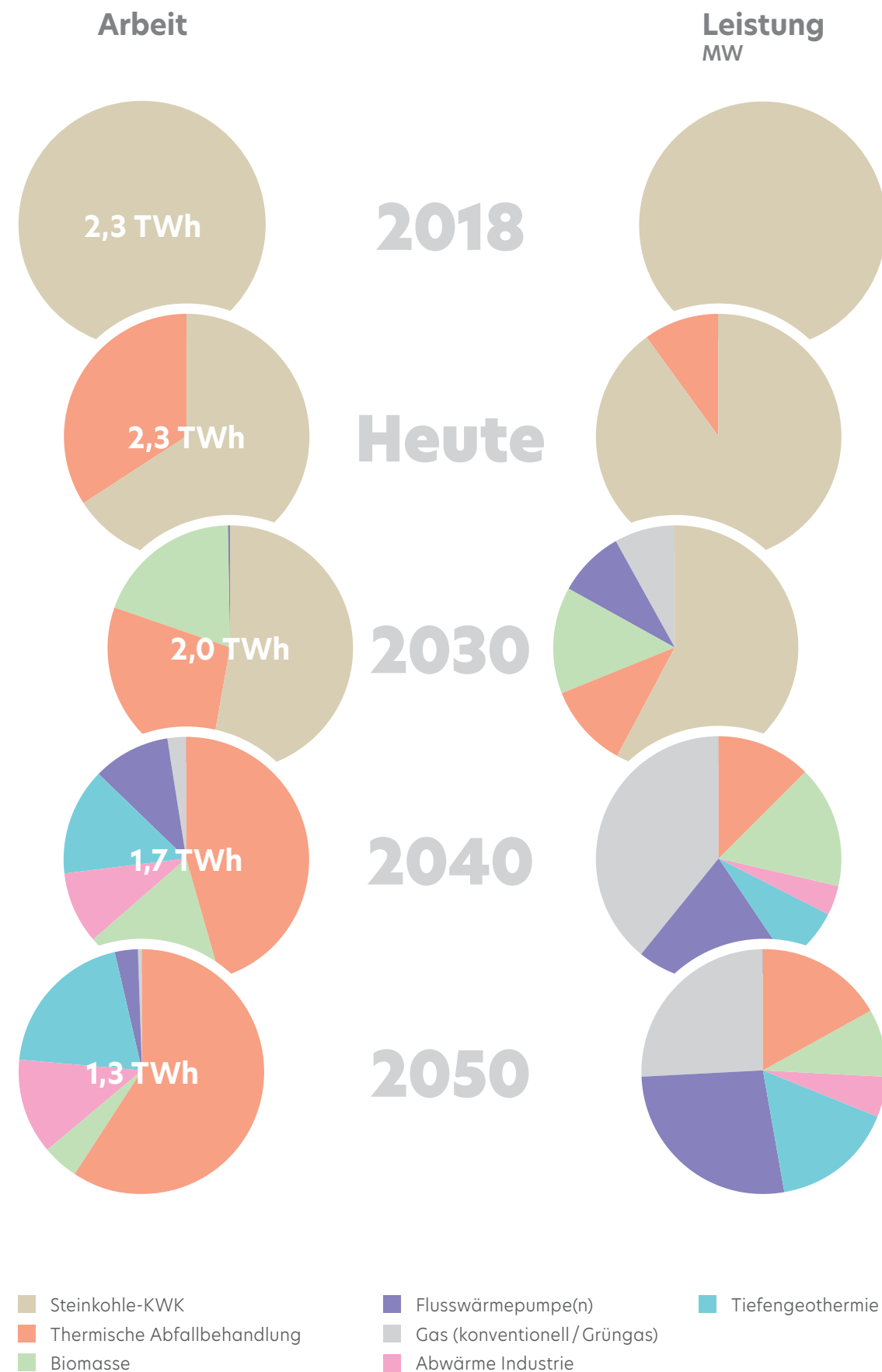
Die thermische Abfallbehandlung behält auch langfristig eine relevante Rolle

Im klimaneutralen Mannheim stammen im Jahr 2050 mehr als die Hälfte der Fernwärmemengen aus der lokalen TAB, also dem Heizkraftwerk auf der Friesenheimer Insel. Heute sind es hingegen rund ein Drittel. Dieser prozentual starke Anstieg liegt neben technologischen Effizienzsteigerungen in der Anlage auch am gleichzeitigen Rückgang der Fernwärmenachfrage um 43% – insgesamt bleibt die absolute Einspeiseleistung mit knapp 100 MW konstant (siehe hierzu auch „Perspektive der thermischen Abfallbehandlung“). Der Rückgang der Fernwärmenachfrage ist dabei insbesondere auf die angenommene, sehr hohe Sanierungsrate von Gebäuden von durchschnittlich 1,7% pro Jahr zurückzuführen.

Mit dem Kohleausstieg wird die TAB die Grundlastversorgung der Fernwärme übernehmen. Der Grund ist technisch begründet, da der Verbrennungsprozess der TAB im Dauerbetrieb erfolgen muss, mithin die Abwärme also rund um die Uhr anfällt und genutzt werden sollte.

Wollte man Klimaneutralität ohne die lokale TAB erreichen, müssten in Mannheim andere Wärmeerzeugungstechnologien, wie z. B. Geothermie oder Flusswärmepumpen signifikant stärker ausgebaut werden. Zudem bliebe dann die Abfallproblematik bestehen. Eine wesentliche Maßnahme im Szenario „KliMa“ ist daher die langfristige Abscheidung der CO₂-Emissionen in der ▶

Fernwärmeerzeugung



TAB (Carbon Capture, Utilization and Storage, CCUS). Da die Hälfte der Abfälle biogenen Ursprungs ist, wird – unter der wichtigen Voraussetzung einer dauerhaften Nutzung oder Speicherung des CO₂ – die TAB von einer CO₂-Emissionsquelle zu einer CO₂-Senke. Ohne die CO₂-Abscheidung wird eine vollständige Klimaneutralität der Fernwärme und in der Folge des Wärmesektors nicht möglich.

Fernwärme wird 2050 durch einen Erzeugungsmix gedeckt

Bis 2020 stammte die Fernwärme aus einer Quelle: dem Großkraftwerk Mannheim (GKM). Perspektivisch wird die Erzeugung zunehmend auf ein breites Technologieportfolio verteilt.

Für „KliMa“ wurden die bestehenden Erzeugungspotenziale identifiziert und mit Expertinnen und Experten diskutiert. Hierauf basierend wird ein schrittweiser Aufbau eines CO₂-freien Erzeugungsmixes mit folgenden Bausteinen angenommen:

- In der ersten Hälfte der 2020er Jahre wird das Biomasse-Kraftwerk auf der Friesenheimer Insel an die Fernwärme angeschlossen.
- Die Tiefengeothermie wird in und um Mannheim sukzessive erschlossen.
- Es werden große Flusswärmepumpen installiert, die durch erneuerbaren elektrischen Strom dem Rheinwasser Wärme entziehen und für die Fernwärme nutzbar machen.

- Eine zweite altholzgefeuerte Biomasse-Anlage wird Ende der 2020er Jahre in Betrieb genommen.
- Die industrielle Abwärme wird in wirtschaftlich begrenztem Umfang erschlossen und leistet damit einen Beitrag in der Grund- und Mittellast.
- An besonders kalten Heiztagen werden in geringem Umfang Erdgaskessel eingesetzt (Spitzenlast), die langfristig mit klimaneutralem Gas befeuert werden.

Der breite Mix an Erzeugungstechnologien verringert die Abhängigkeit von einzelnen Anlagen und sichert nicht nur die CO₂-Zielerreichung, sondern auch die Versorgungssicherheit. Sobald die vorgenannten Anlagen errichtet wurden, ist innerhalb dieses Erzeugungsmixes eine Optimierung möglich: Je nach Preis- und Marktentwicklung können die Anteile an der Wärmeerzeugung variieren.

Was passiert in der dezentralen Wärme?

Schlüsselfaktoren für das Erreichen der Klimaneutralität sind:

1. Erhöhung der Sanierungsquote der Gebäude auf 1,7%.
2. Ersatz von Heizöl und Nachtspeicherheizungen durch erneuerbare Heiztechnologien.
3. Reduktion der Erdgasnutzung und Ersatz der Restmengen durch klimaneutrales Gas (synthetische Gase oder Biomethan).

In der dezentralen Wärme ebnen Sanierung und Technologiewechsel den Weg

Sofern nicht an der Fernwärme angeschlossen, werden heute die Gebäude weitestgehend mit konventioneller Energie beheizt: fossiles Erdgas, Heizöl und für Nachtspeicherheizungen mit Strom. Der Anteil von alternativen Technologien bei dezentralen Heizungen ist heute mit 2% sehr gering. Es ist offensichtlich, dass Klimaneutralität nur dann erreicht wird, wenn im Jahr 2050 die Beheizung ausschließlich erneuerbar erfolgt.

Für die CO₂-Emissionsminderung gehen zwei Faktoren Hand in Hand. Erstens, die Energieeinsparung, zweitens der Technologiewechsel hin zu erneuerbaren Alternativen.

Gerade im dezentral versorgten Gebäudereich zeigt sich die Bedeutung der Sanierungsrate. Weniger Sanierung bedeutet, dass die Gebäude sowohl mit höheren Vorlauftemperaturen als auch mit höheren Wärmeleistungen beheizt werden. Beides wirkt sich hemmend auf die Wirtschaftlichkeit, die Potenziale und die Effizienz bei

der Nutzung erneuerbarer Niedertemperatur-Wärme aus, also bei Geothermie, Umgebungswärme/Wärmepumpen, Ab- und Solarwärme.

In „KliMa“ ist die Sanierungsrate mit durchschnittlich 1,7% sehr hoch angesetzt, wodurch sichergestellt wird, dass bis zum Jahr 2050 die Mannheimer Bestandsgebäude einen Sanierungsstand aufweisen, der den Verzicht auf fossile Heizungen ermöglicht.

Üblicherweise erfolgt ein Austausch von Heizungsanlagen nach Ende ihrer Lebensdauer sowie bei anstehenden Wartungs- und Erneuerungsintervallen. In „KliMa“ wird insbesondere bei den Heizölkesseln gezielt auf ihren Austausch hingewirkt. Stellen die Heizölkessel heute noch rund 7,7% des Wärmebedarfs, sind es 2040 nur noch 3,6%. Im Jahr 2050 wird im ambitionierten Szenario kein Heizöl mehr eingesetzt. Insgesamt ist der Heizungsmix im Jahr 2050 deutlich diversifizierter als heute: Neben der Fernwärmeversorgung kommen 15% Gas-Brennwertthermen, 9% Mikro-KWK, 7% Biomasse und 5% Wärmepumpen zum Einsatz.

Richtig ist aber auch, dass es auch im Jahr 2050 Gebäude geben wird, bei denen eine Tiefensanierung nicht oder nur sehr eingeschränkt möglich ist. Dies betrifft auch und vor allem denkmalgeschützte Gebäude, für welche der Einsatz von Mikro-KWK eine sinnvolle Alternative darstellen kann. Mikro-KWK sind gasbetriebene Motoren, die gleichzeitig Strom und Wärme erzeugen. Durch den Betrieb dieser Anlagen mit

Grüngas werden bis 2050 zwei Fliegen mit einer Klappe geschlagen: Erstens ist die Wärmeversorgung mit hohen Vorlauftemperaturen gesichert, zweitens wird die Klimabilanz entlastet.

Was passiert im Verkehrssektor?

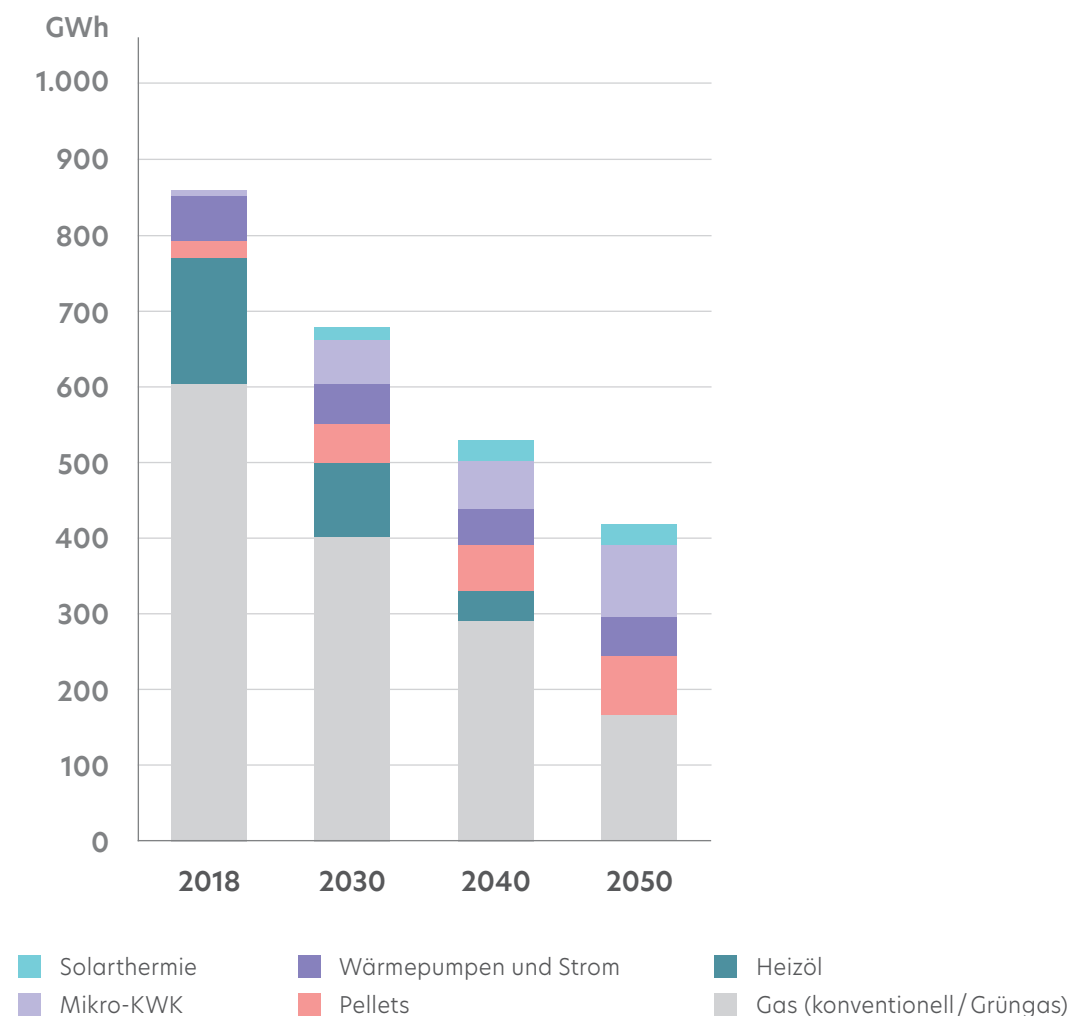
Schlüsselfaktoren für das Erreichen der Klimaneutralität sind:

1. Realisierung des Antriebswechsel: Weg vom fossilen Verbrennungsmotor.
2. Reduzierung von Verkehrswegeleistung mit dem Auto.

Verkehrsverbesserung: Der Antriebswechsel reduziert die CO₂-Emissionen der Mannheimer Mobilität bis 2050 nahezu vollständig

In „KliMa“ werden der motorisierte Individual-, aber auch der Güterverkehr auf alternative Antriebs- und Kraftstoffsysteme umgestellt. Die konventionellen Verbrennungsmotoren werden schrittweise ersetzt. Zum einen durch ihre jeweiligen Hybrid-Varianten, die im Jahr 2050 noch rund 37% der PKW-Flotte ausmachen. Hierbei wird der Anteil des Verbrennungsmotors jedoch sukzessive zugunsten des elektrischen Antriebs reduziert, verbleibendes Benzin und Diesel wird ab 2040 zunehmend, ab 2050 dann vollständig auf klimaneutrale Kraftstoffe umgestellt. Der größte Teil der PKW-Flotte (57%) wird jedoch vollständig durch Batterie-elektrische sowie durch Brennstoffzellen-Fahrzeuge ersetzt. Auch Methan wird als Kraftstoff eingesetzt: im ►

Dezentrale Wärmeversorgung: Arbeit



Jahr 2040 bereits zu 30 % und bis 2050 dann vollständig synthetisch und klimaneutral.

Der Güterverkehr in Mannheim findet auch im Jahr 2050 zu 90 % mit LKW und leichten Nutzfahrzeugen auf der Straße statt. Die Anteile von Binnenschiff und Schiene wachsen zwar im Ausblick, aber auf sehr geringem Niveau. Insgesamt wird der Güterverkehr bis 2050 sowohl reduziert als auch auf elektrifizierte Antriebe umgestellt und damit dekarbonisiert.

Trennt man auf, welche Anteile der CO₂-Minderung im Mannheimer Verkehrssektor allein auf den unterstellten Antriebswechsel zurückgehen und welche auf eine stärkere Nutzung von Rad und Fußverkehr, dominiert der Antriebswechsel. Auch ohne eine Verhaltensänderung bei der Verkehrsmittelwahl gingen die CO₂-Emissionen drastisch zurück. Dennoch bleiben

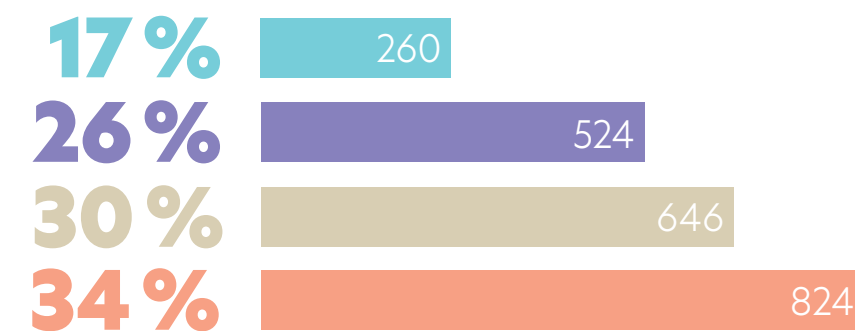
die drei sogenannten „Vs“ – Vermeiden, Verlagern, Verbessern – wichtig, weil nicht allein CO₂-Emissionen relevant sind. Sie stellen zugleich wesentliche Bausteine für eine nachhaltige Entwicklung dar, die auch im Leitbild 2030 der Stadt Mannheim verankert sind.

Verkehrsvermeidung und Verkehrsverlagerung als weitere wichtige Hebel

In den letzten Jahren ist die Verkehrsleistung, also die Wege, die pro Person zurückgelegt werden, im Durchschnitt konstant geblieben. Durch einen Rückgang der Präsenzkultur in Arbeitsverhältnissen, beschleunigt durch Homeoffice-Erfahrungen während der Corona-Pandemie, sowie durch die immer weiter voranschreitende Digitalisierung wird angenommen, dass das Pendelaufkommen langfristig sinkt. In Folge geht die Verkehrswegeleistung in „KliMa“ bis zum Jahr 2050

Modal Split (Aufteilung Verkehrsmittel) | zurückgelegte Wegstrecken

% | Pro Jahr in Mio. Kilometer

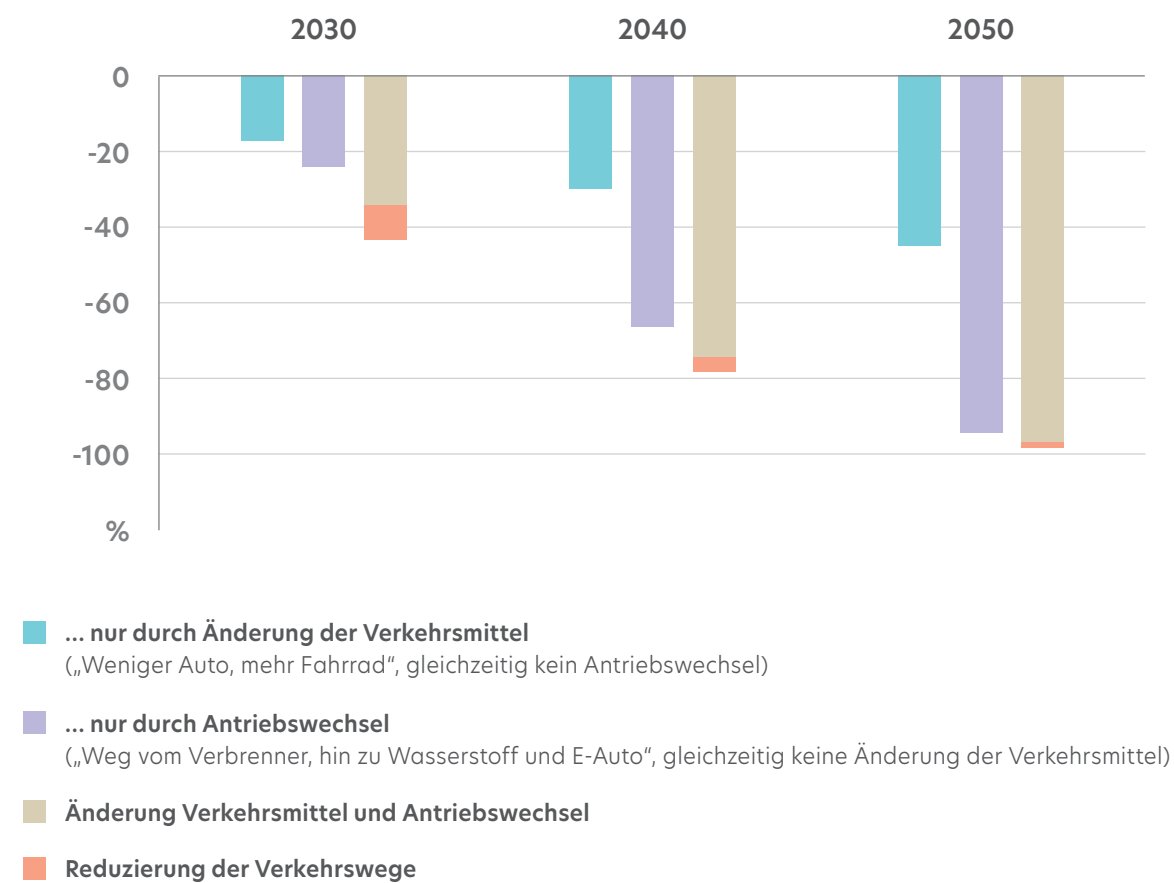


um 10 % zurück. Dies bewirkt bis zum Jahr 2050 eine CO₂-Minderung von 437.000 Tonnen CO₂.

Zusätzlich wird angenommen, dass die Mannheimer Bürgerinnen und Bürger ihre täglichen Wegstrecken zunehmend weg vom motorisierten Individualverkehr, hin zu den Alternativen Rad- und Fußverkehr sowie zum ÖPNV verlagern. Dies ist ein Hebel, um weniger motorisierten Verkehr und damit weniger Antriebsenergie auf-

wenden zu müssen, denn die Potentiale für erneuerbare Energien in Deutschland sind begrenzt. Gleichzeitig wird insbesondere in der Innenstadt ein Mehr an Lebensqualität durch den Verkehrsrückgang mit den bekannten positiven Nebeneffekten erzielt (bessere Luftqualität, weniger Lärm, mehr Sicherheit auf den Straßen, weniger Flächenbedarf für Parkplätze). Durch die Verlagerung weg vom motorisierten Individualverkehr werden bis zum Jahr 2050 660.000 Tonnen CO₂ eingespart.

Maßnahmen im Verkehr: Rückgang der CO₂-Emissionen gegenüber heute ...



Perspektive der thermischen Abfallbehandlung

Eine besondere Rolle in der Mannheimer Wärmeversorgung, insbesondere im Ausblick, spielt die thermische Abfallbehandlung (TAB), also das von MVV Energie betriebene Heizkraftwerk auf der Friesenheimer Insel.

Kernaufgabe der TAB ist die umweltgerechte thermische Behandlung desjenigen Abfalls, der nicht bereits vermieden wurde, stofflich nicht wiederverwertet werden kann und in Deutschland nicht deponiert werden darf. Diese Behandlung geschieht unter kontrollierten Bedingungen und hat einen doppelten Nutzen: Erstens erfolgt eine Hygienisierung, also die Vernichtung von Schadstoffen. Zweitens wird die in den Abfällen enthaltene Energie genutzt, um Wärme und Strom zu produzieren und Dampf für die Industrie bereit zu stellen.

Die vorliegende Analyse geht davon aus, dass die aktuelle Leistung der TAB und damit auch ihr Beitrag zur Mannheimer Fernwärmeversorgung (i. S. v. absolut gelieferten Wärmemengen) bis 2050 konstant bleibt. Dies beruht im Wesentlichen auf zwei gegenläufigen Effekten.

Einerseits geht das Abfallaufkommen bis 2050 mit einer Zunahme der Kreislaufwirtschaft leicht zurück, insbesondere in einem gesellschaftlichen Umfeld, das stärker auf Klimaschutz setzt. Dieser Effekt tritt jedoch stärker im Haushaltsabfall und weniger im Gewerbe- und Industrieabfall auf. In der Mannheimer TAB wird Stand heute zu 30% Industrie- und Gewerbeabfall entsorgt.

Andererseits sinken bereits mittelfristig deutschlandweit die Abfall-Verbrennungskapazitäten, z. B. durch die Stilllegung von Braunkohlekraftwerken, die heute Abfälle mitverbrennen. Im Ergebnis beider Effekte bleiben die an der Mannheimer TAB ankommenden Abfallmengen konstant.

Wegen der Kernaufgabe der Abfallentsorgung sind die dabei entstehenden CO₂-Emissionen als „unvermeidbar“ einzustufen. Die Abscheidung und Lagerung bzw. Nutzung (Carbon Capture, Utilization and Storage, CCUS) ist somit aus heutiger Sicht die einzige Option, die Freisetzung von CO₂ zu vermeiden. Um die Umsetzung dieser Option quantifizieren zu können, müssen viele anlagenspezifische Kenndaten erhoben werden, insbesondere die Zusammensetzung des Rauchgases hinsichtlich seiner CO₂-Konzentration und vorhandenen Inhaltsstoffen. Erst dann können die genaue Abscheiderate sowie der benötigte Strom- und Prozesswärmebedarf ermittelt werden. Die vorliegende Studie sieht davon ab.

Stattdessen wird mit einer unterstellten Abscheiderate von 70% eine konservative Annahme getroffen.²⁹ Da davon auszugehen ist, dass auch künftig etwa die Hälfte des Abfalls regenerativen Ursprungs und daher CO₂-neutral bleibt, entsteht so eine Netto-CO₂-Senke, die sich sowohl auf die CO₂-Emissionsfaktoren im Strom- als auch im Wärmesektor auswirkt. Wichtig ist, dass eine dauerhafte Senkenwirkung im Fall der CO₂-Nutzung nur bei einer Verwendung in besonders langlebigen Materialien, wie z. B. in Kunst- und Baustoffen, oder über eine geologische Einlagerung erzielt wird.

²⁹ Konservativ i. S. v. „mehr ist möglich“. Die Abscheideraten bei Kohlekraftwerken (post combustion) liegt bei 80-90%, allerdings bei deutlich höheren CO₂ Konzentrationen im Rauchgas.

WAS PASSIERT, WENN AUSGEWÄHLTE ANNAHMEN NICHT EINTRETEN?

Die Robustheit der Ergebnisse von „KliMa“ lässt sich am besten prüfen, indem relevante Annahmen (*ceteris paribus*, d. h. einzeln und alles andere unverändert) variiert und deren Auswirkung auf die CO₂-Bilanz analysiert werden. Insgesamt wurden sieben Sensitivitätsbetrachtungen durchgeführt, wobei außer den genannten Aspekten alle anderen Annahmen aus „KliMa“ bestehen bleiben.

Variation 1: Strommix in Deutschland

Der aus dem deutschen Strommix bezogene Strom ist mit höheren CO₂-Emissionen belastet. Methodisch wird dazu der Strommix aus dem Szenario „Referenz“ der dena-Leitstudie unterstellt. In diesem Szenario steigt der Anteil erneuerbarer Energien in Deutschland bis 2050 auf nur 72%; ferner verfehlt Deutschland seine Klimaziele.³⁰

Variation 2: Geringere Energieeffizienz

Geringere Erfolge bei der Stromeffizienz, v. a. in der Industrie, machen sich in einer höheren Nachfrage nach Strom bemerkbar. Der Endenergieverbrauch in Mannheims Industrie verbleibt somit auf vergleichbarem Niveau zu heute. Mannheims Stromnachfrage steigt dadurch um 34 % bis 2050.

Variation 3: Geringerer Ausbau erneuerbarer Energien

Der Zubau von erneuerbaren Energien in Mannheim fällt deutlich geringer aus. Methodisch wird jeweils nur die Hälfte des angenommenen Photovoltaik- und Wind-Potenzials erschlossen, zudem wird keine zweite Biomethananlage gebaut.

Variation 4: Geringere Sanierungsrate in Bestandsgebäuden

Die Sanierungsrate im Gebäudebestand steigt weniger stark als in „KliMa“. Methodisch wird eine Sanierungsrate von 1,1%/a unterstellt.

Variation 5: Höhere Sanierungsrate in Bestandsgebäuden

Die Sanierungsrate im Gebäudebestand steigt deutlich stärker als in „KliMa“. Methodisch wird eine Sanierungsrate von 2,0%/a unterstellt.

Variation 6: Keine Verkehrswende

Im Verkehrssektor finden weder eine Reduktion der Verkehrswege statt noch ein dynamischer Wechsel der Antriebstechnologie und damit des Kraftstoffmixes. Methodisch wird für die Flottenzusammensetzung die Entwicklung aus dem Szenario „Referenz“ der dena-Leitstudie unterstellt. Darin haben konventionelle Verbrenner noch einen Anteil von etwa 70% im PKW-Sektor, auch bei den schweren Nutzfahrzeugen dominieren weiterhin Diesel-LKW. Für den Modal Split in Mannheim wird ►

³⁰ Dieses Umfeld auf bundesdeutscher Ebene wurde auch für das Szenario „Fortschreibung“ (siehe Seite 52 ff.) angelegt.

eine moderate Entwicklung zugunsten des Umweltverbundes angenommen, welcher einer Trend-Fortschreibung der letzten 10 Jahre entspricht.

Variation 7: Neubau eines Gaskraftwerks

Nach dem Ausstieg aus der Kohleverstromung wird ein Gas-und-Dampf-Kraftwerk (GuD) auf der Basis von Erdgas betrieben und für die Wärme- und Stromerzeugung genutzt. Methodisch wird eine Anlage mit einer Leistung von 450 MWel bzw. 300 MWth als Einspeiser in das Fernwärme- und Stromnetz unterstellt.³¹

Die Wirkung der Maßnahmen und damit Aussagen zur Relevanz derselben lässt sich aus dem Vergleich der prozentualen CO₂-Minderungen für Mannheim erkennen.

Den größten Hebel weist die Variation „Keine Verkehrswende“ auf (Variation 6). Ohne Verkehrswende wird Klimaneutralität für Mannheim nicht erreichbar. In erster Linie ist dafür das unterstellte Ausbleiben eines vollumfänglichen Antriebswechsels („Verbessern“) verantwortlich, während unterstellte Misserfolge bei der lokalen Verkehrsvermeidung und -verlagerung für weitere CO₂-Emissionen sorgen.

Die Zusammensetzung des deutschen Strommix (Variante 1) stellt von allen Variationen den zweitgrößten Hebel dar. Eine Erhöhung der Stromnachfrage (Variante 2) sowie ein geringerer Ausbau erneuerbarer Energien in Mannheim (Variante 3) haben hingegen einen deutlich geringe-

ren Einfluss. Letzteres überrascht nicht, weil aufgrund des gleichzeitig unterstellten Umfelds – ein deutlicher Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland – über den höheren Strombezug die CO₂-Minderung „importiert“ wird: Der „Importstrom“ ist annahmegemäß im Jahr 2050 „grün“.

Es wäre jedoch falsch, daraus zu schlussfolgern, dass lokale Anstrengungen von geringer Bedeutung wären. Zum einen ist für den Erfolg der Energiewende insgesamt wichtig, dass Effizienzfortschritte erreicht werden. Zum anderen sind die Potenziale für erneuerbare Energien in Deutschland nicht unbegrenzt verfügbar. In jedem Fall reduziert der Ausbau erneuerbarer Energien in Mannheim den Strombezug – und sichert ab gegen das Risiko, dass Effizienzfortschritte sowie die Dekarbonisierung des deutschen Strommixes doch nicht oder verspätet kommen.

Die jährlichen Sanierungsraten (Variation 4 und 5) sind wesentlich für die Herausforderungen in der erneuerbaren Wärmebereitstellung. So verringert eine sehr hohe Sanierungsrate von 2% den Gesamt-Wärmebedarf um 12% gegenüber einer Sanierungsrate von 1,7%. Demgegenüber steigt der Wärmebedarf um 22%, wenn die Sanierungsrate lediglich 1,1% beträgt.

Doch nicht alle Merkmale werden in Zahlen ausgedrückt: eine hohe Sanierungsrate bedeutet nicht nur einen geringeren Wärmebedarf, sondern senkt in der Regel auch die benötigte Vorlauftemperatur der

Wärmebereitstellung, was wiederum den Einsatz von erneuerbaren Technologien zur Wärmebedarfsdeckung erleichtert bzw. in manchen Fällen erst ermöglicht. Daher ist eine Sanierungsoffensive ein wichtiger Bestandteil von Klimaschutzbemühungen. Vor allem wenn, wie im Fall von Mannheim, Teile des Gebäudebestands deutlich überaltert sind.

Die Errichtung einer GuD (Variation 7) erhöht die CO₂-Emissionen bis 2050 um in Summe 6,2 Mio. Tonnen CO₂.³² Selbst wenn das darin eingesetzte Gas ab dem Jahr 2040 schrittweise und ab dem Jahr 2050 vollständig durch klimaneutrales Gas ersetzt wird.³³ Diese Summe entspricht rund 80% dessen, was in Mannheims Verkehrssektor im Szenario „KliMa“ zwischen 2018 und 2050 insgesamt an CO₂ emittiert wird oder 12 Mal Mannheims Jahresverkehrsemissionen von heute.

Für die Herstellung von klimaneutralem bzw. synthetischem Gas ist ein hoher zusätzlicher Ausbau erneuerbarer Energien erforderlich. Konkret umfasst die Prozesskette die Herstellung von Strom aus erneuerbaren Energien, mit dem unter hohen Effizienzverlusten synthetisches Gas produziert und letztlich wieder in der GuD verstromt wird („Strom zu Gas zu Strom“). Im Jahr 2050 müssten allein für die Erzeugung der Gasmengen für den Einsatz in der unterstellten GuD rund 1.200 Gigawattstunden (GWh) erneuerbarer Strom produziert werden. Das ist mehr als das gesamte Mannheimer Stromerzeugungspotenzial für erneuerbare Energien (925 GWh).

Da die Produktion von synthetischem Gas also äußerst energieintensiv und zugleich dessen zukünftige Marktverfügbarkeit keineswegs sicher ist, ist die Errichtung einer GuD auf Gasbasis nicht zu empfehlen. ►

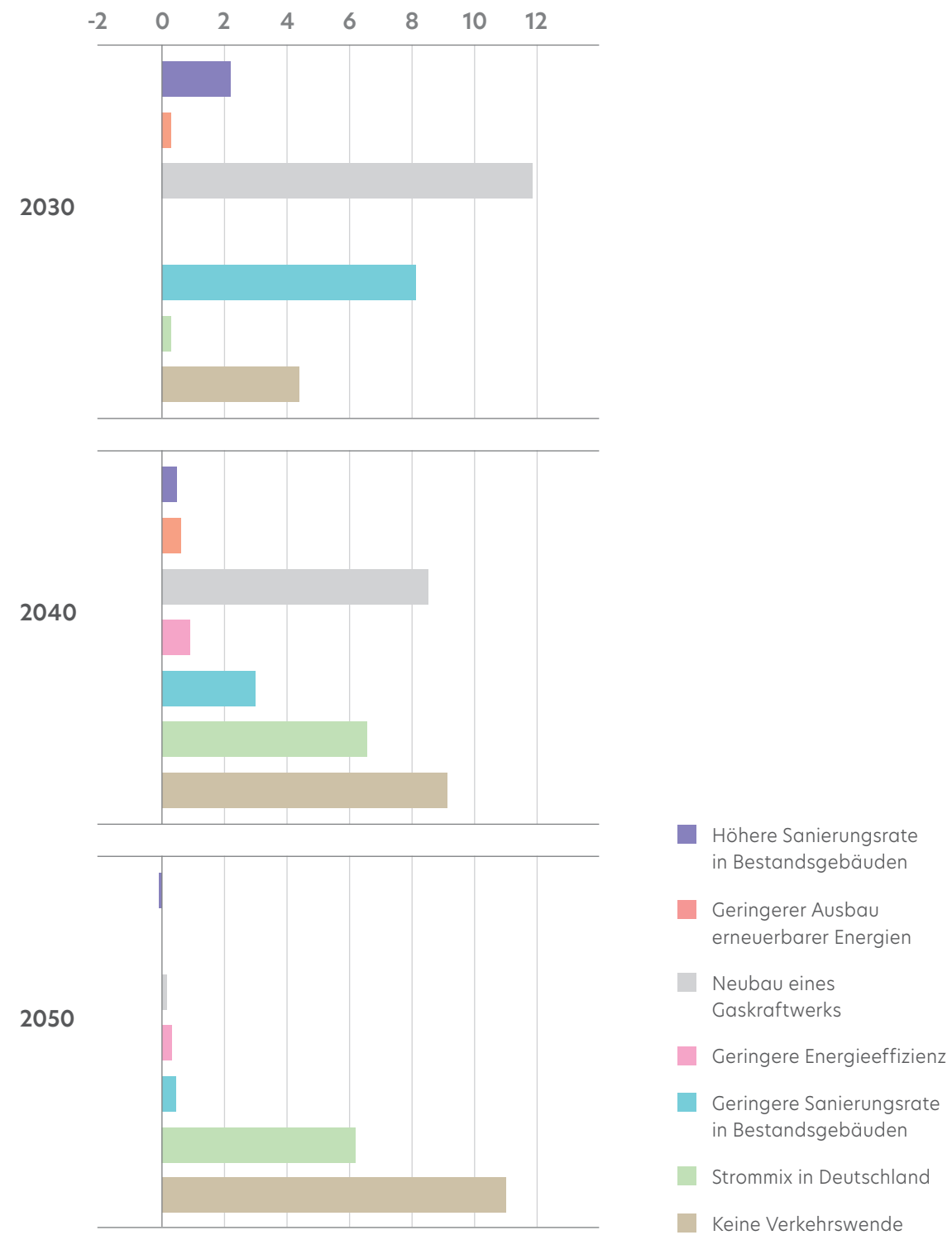
³¹ Unterstellte Inbetriebnahme: Jahresanfang 2026 im Tausch für Block 8 des Großkraftwerk Mannheim.

³² Wovon der überwiegende Anteil mit 95% aus dem bis 2040 eingesetzten fossilen Erdgas stammt.

³³ Aufgrund dieser Annahme sind die Emissionen im Jahr 2050 identisch mit dem Szenario „KliMa“.

Mehr-Emissionen der Sensitivitäten im Vergleich zum Szenario „KliMa“

%-Punkte



Zur Rolle von Erdgas

Neben Strom ist und bleibt Erdgas ein Energieträger, der vielfältig einsetzbar ist und auch im Ausblick von Bedeutung bleiben wird. Heute stammt Erdgas, genauer Methan, aus fossilen Quellen, im Wesentlichen aus der Nordsee bzw. russischen Gasfeldern.

Das sogenannte „Power-to-Gas“ Verfahren ermöglicht, synthetisches Methan herzustellen, das auf erneuerbaren Energien basiert und somit klimaneutral ist. Dabei wird zunächst aus erneuerbarem Strom mittels Elektrolyse Wasserstoff erzeugt. Danach wird der Wasserstoff unter Zugabe von CO_2 zu CH_4 methanisiert. Unter der Voraussetzung, dass dieser Prozess nur klimaneutrale Energie einsetzt und die benötigte Kohlenstoffquelle biogenen oder atmosphärischen Ursprungs ist, wird kein klimawirksames CO_2 emittiert. Das erzeugte Gas ist ein vollständiger Ersatz für fossiles Erdgas mit weitgehend identischen Eigenschaften.

Eine andere Option zur Substitution von Erdgas ist die Bereitstellung von Biomethan. Biomethan kann auf Basis von Substraten (wie z. B.

Energiemais und Ganzpflanzensilage) oder auf Basis von Abfall, genauer gesagt den feuchten Fraktionen des Bioabfalls, erzeugt werden. Hierbei werden die Einsatzstoffe zuerst zu Biogas umgewandelt und anschließend zu Biomethan aufbereitet. Auch hier werden dieselben Eigenschaften erzielt und damit dieselben Einsatzmöglichkeiten wie für Erdgas geschaffen. Ein Transport über das bestehende Erdgasnetz ist für beide Substitute möglich. Während das Biomethan innerhalb der Stadtgrenzen und Umgebung erzeugt werden kann, wird das synthetische Gas analog zum Strombezug aus dem deutschen Gasnetz bezogen und somit in die Stadt „importiert“.

In Mannheim ist derzeit eine Bioabfall-Vergärung in Betrieb sowie eine weitere Anlage in der Region in Planung. Gespeist werden könnten diese zum einen aus dem Pro-Kopf-Aufkommen an Bioabfall aus Mannheim sowie durch weitere Kapazitäten aus dem Umland. Damit kann im Jahr 2050 etwa ein Drittel der Gasnachfrage des Verkehrs und der Wärme gedeckt werden.



FORTSCHREIBUNG DER AMBITIONEN VERFEHLT KLIMANEUTRALITÄT

Im Vergleichsszenario „Fortschreibung“ ist die Transformationsgeschwindigkeit beim Klimaschutz deutlich geringer als im Hauptszenario „KliMa“. Gleichwohl finden Klimaschutzbemühungen statt – formuliert als Fortschreibung der Entwicklung der letzten Jahre und punktuellen, moderaten Intensivierungen. So werden der Ausbau erneuerbarer Energien in Strom und Wärme, die Hebung von Effizienzpotenzialen bei der Industrie und eine Umrüstung auf klimafreundliche Antriebe im Verkehr weiterverfolgt.

Bei „Fortschreibung“ handelt es sich methodisch betrachtet um einen explorativen Ansatz. Das bedeutet, der Entwicklungspfad ist ohne festes CO₂-Reduktionsziel angelegt. Vielmehr lautet das Ziel, den Verlauf und das Reduktionsniveau herauszufinden. Es gelten folgende zentrale Annahmen:

- **Kohleausstieg:** Umfang und Stilllegungszeitpunkte sind identisch mit „KliMa“, da der Kohleausstieg gesetzlich geregelt ist.
- **Stromerzeugung:** Die in Mannheim realisierbaren Potenziale auf Basis von erneuerbaren Energien werden nur zur Hälfte ausgeschöpft.
- **Fernwärme:** CO₂-arme Technologien wie Geothermie und Flusswärmepumpe werden eingesetzt, jedoch in geringerem Ausmaß als in „KliMa“. Der Einsatz von Gaskesseln zur Deckung der Spitzenlast ist entsprechend höher.

- **Dezentrale Wärme:** In der dezentralen Versorgung bleiben die Technologiewechselraten von bestehenden auf neue Wärmeerzeugungstechnologien auf einem vergleichbaren Niveau wie heute.
- **Sanierung:** Im Gebäudesektor steigt die Sanierungsrate auf 1,1%/Jahr an. Die Sanierungsbemühungen sind also etwas höher als heute, aber sehr viel niedriger als in „KliMa“.
- **Grüngas:** Klimaneutrales, synthetisches Methan ersetzt den verbleibenden Erdgasbedarf im Wärme- und Verkehrssektor ab 2040 anteilig zu 15%, ab 2050 zu 50%.
- Für **Entwicklungen auf nationaler Ebene** dient das Szenario „Referenz“ der dena-Leitstudie als Rahmen, in dem Deutschland bis 2050 eine CO₂-Minderung von 62% gegenüber 1990 erreicht.

- Der dena-Rahmen sieht im **Verkehrssektor** Effizienzfortschritte bei konventionellen und ein moderates Wachstum bei alternativen Antrieben. Verbrennungsmotoren haben im Jahr 2050 nach wie vor eine dominierende Stellung (70 % im PKW-Sektor, 90 % bei den schweren und 50 % bei den leichten Nutzfahrzeugen). Für den Modal Split in Mannheim wird eine moderate Entwicklung zugunsten des Umweltverbundes angenommen, welcher einer Trend-Fortschreibung der letzten 10 Jahre entspricht.
- Für die **Industrie** unterstellt die dena-Studie, dass sich Produktionszuwächse und Effizienzsteigerungen in etwa die Waage halten.

Auch im Szenario „Fortschreibung“ gehen die CO₂-Emissionen zwischen 2030 und 2040 stark zurück. Dies liegt annahmegoß an der Stilllegung des Block 9 am GKM im Rahmen des nationalen Kohleausstiegs. Allerdings bleiben die CO₂-Emissionen im weiteren Verlauf deutlich höher als in „KliMa“. Dies hat folgende Ursachen:

- Die lokalen Stromerzeugungspotenziale werden nur zu 50 % genutzt, wodurch

Mannheim „abhängiger“ von der CO₂-Bilanz des deutschen Strommixes ist. Zwar steigt bundesweit auch in „Fortschreibung“ der Grünstromanteil. Jedoch bleibt er im Jahr 2050 mit 72 % unterhalb des Grünstromanteils im Szenario „KliMa“. Dies hat zur Folge, dass mehr CO₂-Emissionen im Mannheimer Stromsektor verbleiben.

- In der Fernwärmeerzeugung sinken die CO₂-Emissionen wegen des erhöhten Gaseinsatzes weniger stark. Gleichzeitig werden weniger alternative, CO₂-freie Wärmeerzeugungstechnologien realisiert.
- Im Verkehr findet kein vollständiger Antriebswechsel statt. Wenngleich Batterie-elektrische sowie Brennstoffzellen-Antriebe eingesetzt werden und auch synthetische Kraftstoffe in Teilen zur Anwendung kommen, behalten fossile Kraftstoffe langfristig eine dominierende Rolle sowohl im motorisierten Individualverkehr als auch im Gütertransport. Folglich sinken die Gesamtemissionen in der Mobilität lediglich um ein Drittel und der Verkehrssektor wird im Jahr 2050 zum CO₂-intensivsten Mannheimer Sektor.

Letztlich werden im Szenario „Fortschreibung“ im Jahr 2050 jährlich noch rund 0,9 Mio. Tonnen CO₂ emittiert. Gegenüber dem Jahr 2018 bedeutet diese Entwicklung einen Rückgang um rund 72 %, gegenüber 1990 eine Reduktion um 80 %.³⁴ Dies ist zwar beachtlich, verfehlt aber klar das Ziel der Klimaneutralität. Zum Vergleich: in „KliMa“ sind es nur 24.000 Tonnen CO₂ und ein Rückgang um 99 % (mit CCUS; ohne CCUS werden 0,3 Mio. Tonnen CO₂ jährlich emittiert).

Rechnet man alle CO₂-Emissionen zusammen, werden bis zum Jahr 2050 61,5 Mio.

Tonnen CO₂ ausgestoßen (unter Mitberücksichtigung der Exportemissionen sind es 90,5 Mio. Tonnen). Gegenüber dem Szenario „KliMa“ ist das über ein Viertel mehr.

Das Szenario „Fortschreibung“ zeigt, dass selbst Anstrengungen und Maßnahmen, die über dem heutigen Niveau von Klimaschutzbemühungen liegen, nicht ausreichen, um Klimaneutralität in Mannheim zu erreichen.

³⁴ Bezogen auf die CO₂-Emissionen, die bei der Deckung des Mannheimer Energiebedarfs entstehen. Berücksichtigt man auch die sog. „Export“-Emissionen, entspricht die CO₂-Minderung 85 % gegenüber 2018.



EMPFEHLUNGEN FÜR KONKRETE MASSNAHMEN

Auf Basis der Studienergebnisse, den lokalen Spezifika sowie der Expertise zu Transformationsprozessen werden nachfolgend erfolgskritische Handlungsfelder und Maßnahmen benannt, die in Mannheim kurz- bis mittelfristig angegangen werden sollten.

Die Projektergebnisse zeigen, dass der Ausstieg aus der kohlebasierten Strom- und Wärmeerzeugung am Großkraftwerk Mannheim (GKM) die zentrale Stellschraube bei der Diskussion um wirksame Klimaschutzmaßnahmen ist. Prozentual als auch absolut gehen die CO₂-Emissionen mit Stilllegung des GKM im Rahmen des nationalen Kohleausstiegs sehr stark zurück.

Der Kohlausstieg ist eine notwendige, aber nicht hinreichende Bedingung, um die Klimaneutralität zu erreichen. Es braucht in Mannheim weitergehende Maßnahmen im Strom-, Wärme- und Verkehrssystem. Der im Szenario „FortSchreibung“ aufgezeigte Pfad unterstellt bereits Handlungen auf allen Ebenen, die über gegenwärtige Entwicklungen hinausgehen. Für die Erreichung von Klimaneutralität muss das Ambitionsniveau aber noch deutlicher steigen. Das Szenario „KliMa“ zeigt, wie das ambitioniert, aber realistisch gelingen kann.

Vom Wissen ins Handeln

Die hier vorgelegte Analyse ist bewusst als *Energierahmenstudie* angelegt, um die Leitplanken zu definieren, wie sich Mannheim in den kommenden Jahren und Jahrzehnten entwickeln muss. Insoweit ist dies

der Start- und Fixpunkt, an den sich konkretes kommunales Handeln anschließen sollte. Als nächster Schritt, um vom Wissen ins Handeln zu kommen, ist die Konkretisierung und Ausarbeitung eines ambitionierten und integrierten Maßnahmenprogramms sinnvoll.

Aus der Analyse lassen sich bereits wesentliche Stellhebel ableiten, die adressiert werden sollten. Die nachfolgend skizzierten Ansatzpunkte erheben keinen Anspruch auf Vollständigkeit, sondern sind beispielhaft zu verstehen:

- Eine **Photovoltaik-Offensive**, um insbesondere die PV-Potenziale auf Dach- und Freiflächen zu heben. Im Vergleich zum Durchschnitt der vergangenen 10 Jahre müssen sich die Ausbauraten etwa vervierfachen, um auf den „KliMa“-Pfad einzuschwenken. Konkrete Maßnahmen können sein:
 - Die offensive Ausweisung von PV-Freiflächen und eine schnelle Genehmigung derselben,
 - die Prüfung einer kommunalen Dachnutzungspflicht für alle Neubauten und Dachsanierungen im Gebäudebestand,³⁵

³⁵ Vgl. z. B. Hamburgisches Klimaschutzgesetz sowie Vorschläge in Kobiela et al. (2020. CO₂-neutral bis 2035: Eckpunkte eines deutschen Beitrags zur Einhaltung der 1,5-°C-Grenze. GLS Bank & Fridays for Future Deutschland. <https://wupperinst.org/p/wi/p/s/pd/924/>) und Fishedick et al. (2020. Konjunkturprogramm unter der Klimaschutzlupe: Viele gute Impulse, aber Nachbesserungen für nachhaltige Wirkung erforderlich?! Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie. www.wupperinst.org/a/wi/a/s/ad/5087/).

- eine Vorfahrt von PV-Dachanlagen vor Dachbegrünungen in Bebauungsplänen,
 - eine stärkere Bewerbung des Energieatlas und des Solarkatasters (LUBW, 2018), um Interessierten erste Informationen über ein mögliches PV-Potenzial zu bieten,
 - die Einrichtung eines städtischen Portals zur Prüfung und Bewerbung auf mögliche Förderung von PV-Dach-Anlagen,
 - die Förderung bzw. Zulassung von PV-Fassaden,
 - eine Ausweitung des bestehenden Contracting-Angebots für PV-Anlagen auf andere (nicht unternehmerische) Zielgruppen, sowie
 - die Initiierung weiterer Mieterstrom-Projekte auch im Bestand, z. B. in Kooperation mit der GBG Mannheim, dem Spar- und Bauverein Mannheim u. a.
- Das **Erschließen der geothermischen Potenziale**, welche insbesondere bei der Tiefengeothermie im Großraum Mannheim beträchtlich sind und einen wesentlichen Standortfaktor gegenüber anderen Kommunen darstellen. Konkrete Maßnahmen können sein:
- eine detaillierte Erhebung der nutzbaren geothermischen Potenziale in Mannheim sowie in Kooperation mit den angrenzenden Gemeinden,
 - die Planung und Umsetzung ergänzender Nahwärmekonzepte, z. B. im Rahmen einer Förderung durch Programme wie Energetische Stadtsanierung (KfW) oder Wärmenetzsysteme 4.0 (Bafa), sowie
 - eine Ausweitung des bestehenden Contracting-Angebots auf geothermische Anlagen.
- Eine **Forcierung der Gebäudesanierung**, vor allem des überalterten Bestands ohne Fernwärmeanbindung, der in Mannheim große Potenziale zur Wärmebedarfssenkung bietet. Konkrete Maßnahmen können sein:
- ein Auf- bzw. Ausbau der Beratungsstrukturen in Mannheim zu einem „One-Stop-Shop“ (vgl. ProRetro-Projekt³⁶). Gebäudebesitzerinnen und Gebäudebesitzer werden hierbei durch den gesamten Sanierungsprozess begleitet: von der Erstberatung über Vergabe von Handwerksleistungen, Hilfe bei Finanzierungsfragen bis hin zur Koordination der Umsetzung, Baubegleitung und Qualitätssicherung (z. B. in Kooperation mit der Klimaschutzagentur Mannheim).
 - Die Ausweitung bestehender Förder- und Contracting-Angebote zur Unterstützung größerer Sanierungsvorhaben, z. B. Prüfung von Energiespar-Contracting (inklusive Effizienz-

maßnahmen an der Gebäudehülle) im Bereich öffentlicher Gebäude oder größerer Wohngebäude und -siedlungen.

- Der Aufbau eines systematischen, hochgranularen Wärmekatasters, z. B. unter Einbezug von thermografischen Luftbilddaufnahmen. Darauf aufbauend eine Analyse, für welche Stadtteile und Straßenzüge künftig welche Technologien (Fernwärme, Erdgas, strombasiert) vorrangig oder nicht/künftig nicht mehr genutzt werden sollten.
- Die begleitende **Umsetzung der Verkehrswende** vor Ort. Neben der Weiterentwicklung von geeigneten Infrastrukturen für Elektromobilität sollte die Stärkung von Alternativen zum motorisierten Individualverkehr im Mittelpunkt stehen, um die Bedarfe an Stromimporten möglichst gering zu halten und positive Effekte auf Umwelt, Gesundheit, Sicherheit und Lebensqualität zu heben. Konkrete Maßnahmen können sein:
- eine konsequente Entwicklung des kommunalen Fuhrparks hin zur Klimaneutralität im Sinne des eigenen Beitrags und als Vorbildfunktion durch Umrüstung auf batterieelektrische und Brennstoffzellenfahrzeuge bis spätestens 2030,
 - Entwicklung eines städtischen Ladeinfrastrukturplans, der im Einklang

mit landes- und bundesweiten Ladeinfrastrukturplänen den konkreten Ausbau in Mannheim mit allen relevanten Stakeholdern koordiniert,

- die Förderung umweltfreundlicher Mobilität in der eigenen Belegschaft in allen Mannheimer Unternehmen und Organisationen,
- der Ausbau von Fahrrad-Schnellwegen, sowie
- die Entwicklung einer Mobilitäts-App mit der Vernetzung von Carsharing-Angeboten und ÖPNV.

Darüber hinaus sind die **Mitgestaltung von adäquaten Rahmenbedingungen** und Schaffung einer breiten **gesellschaftlichen Akzeptanz** für grüne Wärme- und Stromtechnologien zentrale Erfolgsfaktoren.³⁷ Möglichkeiten zur wirtschaftlichen und sozialen Partizipation von Bürgerinnen und Bürgern sowie Transparenz bei Planungs- und Entscheidungsprozessen können dabei helfen, die Akzeptanz für die Transformation zu erhöhen. Die **Einbindung der Zivilgesellschaft** kann durch ein **Beteiligungs- und Kommunikationskonzept** begleitet werden, das anschaulich vermittelt, dass die Zielerreichung kein Selbstläufer ist, aber Angst vor der Transformation ebenso unbegründet ist. ►

³⁶ Siehe unter: www.wupperinst.org/p/wi/p/s/pd/887.

³⁷ Die auf Bundesebene gesetzten Rahmenbedingungen für Power-to-Heat-Anlagen sind zentral, um auf lokaler Ebene auch eine wirtschaftliche Handlungsoption zu sein. Insbesondere bei Flusswärmepumpen käme es bei einer entsprechenden Förderung darauf an, ihre höheren Gestehungskosten zu berücksichtigen, die typischerweise aus einer geringen Einsatzdauer bei gleichzeitig hohen Strompreisen resultieren.

Klimaneutralität bis 2030?

Damit Klimaneutralität in Mannheim bis 2050 gelingt, müssen sowohl in Mannheim als auch (notwendigerweise) auf Bundesebene sehr ambitionierte, aber gleichwohl technisch machbare Maßnahmen umgesetzt werden. Wie stünde es damit, Klimaneutralität in Mannheim schneller zu erreichen, beispielsweise bereits in zehn Jahren?

Diese Variante ist in der Studie nicht im Detail berechnet worden. Allerdings können folgende Aussagen getroffen werden:

- Auf Bundesebene müssten diese Voraussetzungen bis 2030 geschaffen sein:
 - Der deutsche Strommix ist vollkommen emissionsfrei,
 - die deutsche Erdgasversorgung ist vollständig auf klimaneutrales Erdgas umgestellt,
 - auf den Straßen sind fast ausschließlich batterieelektrische oder mit Wasserstoff-betriebene Fahrzeuge zugelassen.
- Auf Ebene Mannheims müssten zusätzlich diese Voraussetzungen bis 2030 geschaffen sein:
 - Das Großkraftwerk Mannheim (GKM) ist bis 2030 stillgelegt und
 - die Fernwärmeversorgung im Gegenzug größtenteils auf grüne Wärmeerzeuger umgestellt. Dies schließt ein, dass eine große Anschlussleistung der Tiefengeothermie installiert ist, um die „Kohle-Lücke“ zu kompensieren. Zusätzlich würde vermutlich das zulässige Maximum an Flusswärmepumpen im Rhein notwendig.
 - An der thermischen Abfallbehandlungsanlage auf der Friesenheimer Insel ist eine CO₂-Abscheidungsanlage installiert.
 - In der dezentralen Wärmeversorgung muss ein schnellerer Technologiewechsel stattfinden, um alle noch vorhandenen Heizkessel auszutauschen.

Die Einschätzung, dass Mannheim für die Zielerreichung auf bundesdeutsche Entwicklungen zwingend angewiesen ist, überrascht nicht und ist typisch für (Groß-)Städte. Die technischen Voraussetzungen für diese Entwicklung sind in der Art gegeben, als dass die hierfür notwendigen Technologien heute bereits existieren. Insofern wird das Ziel zwar als technisch machbar eingeschätzt. Gleichwohl wären mit der Umsetzung erhebliche gesellschaftliche und ökonomische Herausforderungen verbunden, die in der vorliegenden Studie nicht beurteilt werden.

Die hier skizzierten Hebel sollten nicht losgelöst voneinander betrachtet, sondern vielmehr in einem **integrierten Maßnahmenplan** verknüpft werden, z. B. in einem Klimaschutzkonzept für die kommenden zehn Jahre.

Leuchtturmprojekte können dabei helfen, konkrete Perspektiven und Handlungsoptionen aufzuzeigen und so die gesellschaftliche Akzeptanz für notwendige Maßnahmen zu erhöhen. Für diese besteht ebenfalls die Möglichkeit der Durchführung als Förderprojekte im Rahmen unterschiedlicher Programme des Landes und des Bundes. Beispiele dafür können sein:

- die Tiefensanierung und Ausstattung sämtlicher kommunaler Gebäude mit Photovoltaik-Anlagen bis 2030,
- die stärkere Nutzung der Konversionsflächen als Reallabor für Klimaneutralität, um neue Technologien und Ansätze zu erproben, sowie
- strategische Investitionen in industrielle Effizienzmaßnahmen, die als Good-Practice-Beispiele dienen.

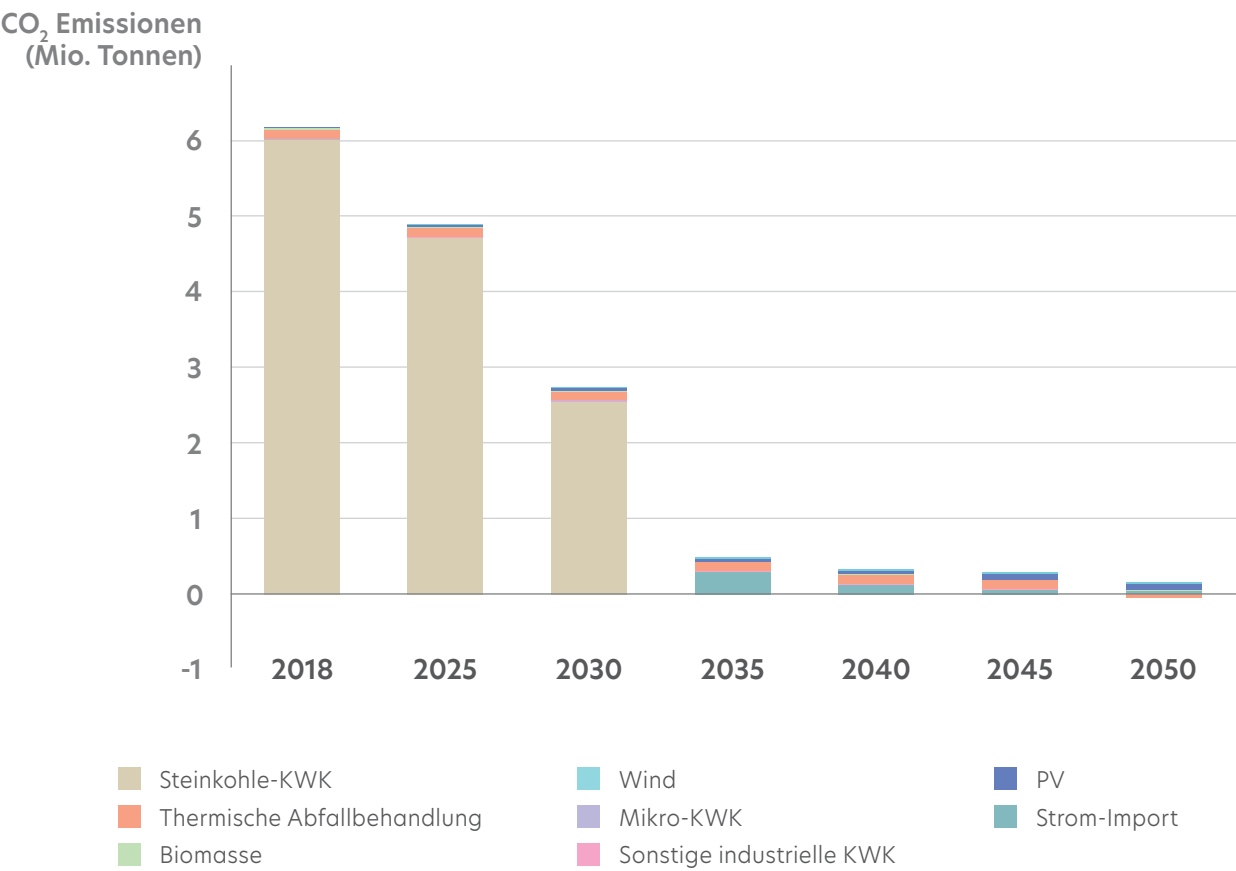
Gerade im Industriesektor, der auch langfristig für einen Großteil der Energienachfrage in Mannheim steht, sind kontinuierliche **Dialog- und Beteiligungsformate** (wie z. B. im bestehenden Format der Klimaschutzallianz) unerlässlich. So können die besonderen Herausforderungen und Notwendigkeiten des Handelns für die einzelnen Unternehmen diskutiert, Erfahrungen ausgetauscht und Hindernisse bei der Projektumsetzung, wie z. B. der Erschließung von Abwärmepotenzialen für die Fernwärme-Einspeisung, abgebaut werden.

ANHANG

	2018	2030	2040	2050
Bevölkerung Mannheim	327.000	338.750	339.500	339.500
Bevölkerung Deutschland [Mio]	82,0	80,9	78,9	76,1
Stromnachfrage Mannheim (mit Verkehr) [GWh]	2.387	2.348	2.560	2.616
Stromerzeugung Mannheim [GWh]				
PV	5	175	346	641
Wind	0	94	94	94
Bioenergie	150	151	79	16
konventionelle Stromerzeugung (Kohle und TAB)	7.111	3.627	175	175
Sonstige Erneuerbare Energien (biogener Anteil TAB)	179	170	174	175
Erneuerbare Energien in Deutschland				
Stromerzeugung aus Erneuerbare Energien [TWh]	264	431	559	769
Anteil Erneuerbarer Energien an Stromnachfrage [%]	41	73	88	91
Wärmenachfrage Mannheim [GWh]				
Fernwärme	2.290	2.007	1.665	1.287
<i>innerhalb Mannheims</i>	1.607	1.411	1.175	916
<i>außerhalb Mannheims</i>	683	596	489	371
Erdgas	621	458	348	253
Heizöl	164	103	50	0
Strom (Wärmepumpen)	53	46	42	51
Sonstiges (Biomasse, Solarthermie)	29	66	96	100
Fernwärmeerzeugung Mannheim [%]	2020	2030	2040	2050
GKM	66	35	0	0
TAB	34	37	46	59
Erneuerbare Energien (Biomasse, Geothermie, FWP)	0	28	42	28
sonstige (Abwärme, Gas)	0	0	12	13
Fernwärmeleistung Mannheim [%]	2020	2030	2040	2050
GKM	90	58	0	0
TAB	10	11	13	17
Erneuerbare Energien (Biomasse, Geothermie, FWP)	0	23	44	52
sonstige (Abwärme, Gas)	0	8	43	31
CO₂-Emissionen [Mio. Tonnen] - nur Mannheimer Verbrauch	2018	2030	2040	2050
Strom (ohne Verkehr)	1,96	1,51	0,16	0,02
Wärme	0,80	0,46	0,15	-0,01
<i>Fernwärme</i>	0,58	0,32	0,08	-0,02
<i>Gas</i>	0,14	0,09	0,06	0,01
<i>Öl</i>	0,05	0,03	0,02	0,00
<i>Sonstige dezentrale Wärmeerzeugung</i>	0,02	0,01	0,00	0,00
Verkehr	0,51	0,33	0,12	0,01
<i>Strom und Hybride</i>	0,03	0,05	0,02	0,00
<i>konventionelle Antriebe</i>	0,48	0,26	0,08	0,00
<i>Wasserstoff und Power-to-Liquid</i>	0,00	0,02	0,02	0,00
CO₂-Emissionen [Mio. Tonnen] - mit Exportemissionen				
Finnische Methode				
Strom (ohne Verkehr)	6,11	2,70	0,16	0,02
Wärme	1,05	0,60	0,19	-0,02
<i>Fernwärme</i>	0,83	0,46	0,11	-0,03
Verkehr	0,51	0,33	0,12	0,01
Carnot-Methode				
Strom (ohne Verkehr)	6,46	2,90	0,16	0,02
Wärme	0,70	0,40	0,19	-0,02
<i>Fernwärme</i>	0,48	0,26	0,11	-0,03
Verkehr	0,51	0,33	0,12	0,01

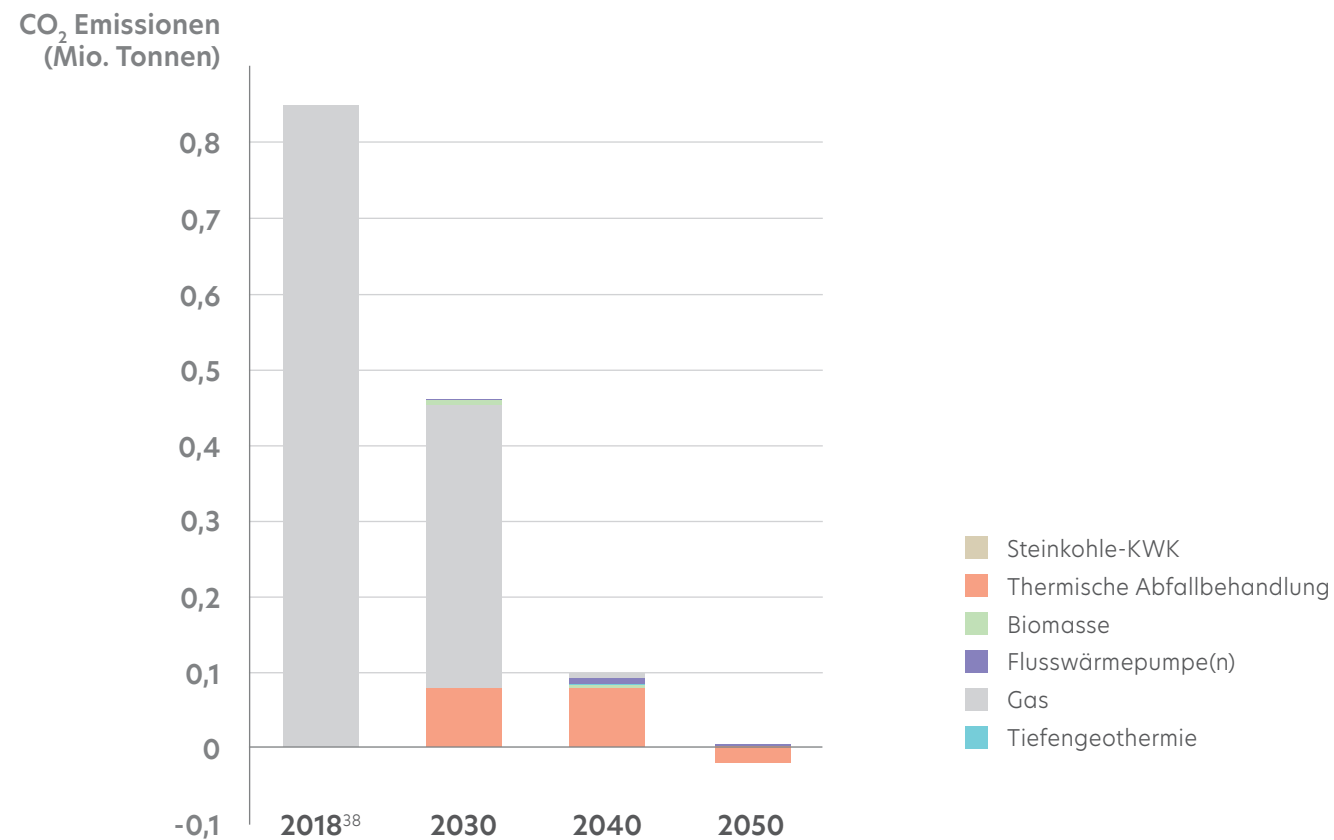
CO₂-Emissionspfad des Stromsektors

mit „Export“-Emissionen, Szenario KliMa



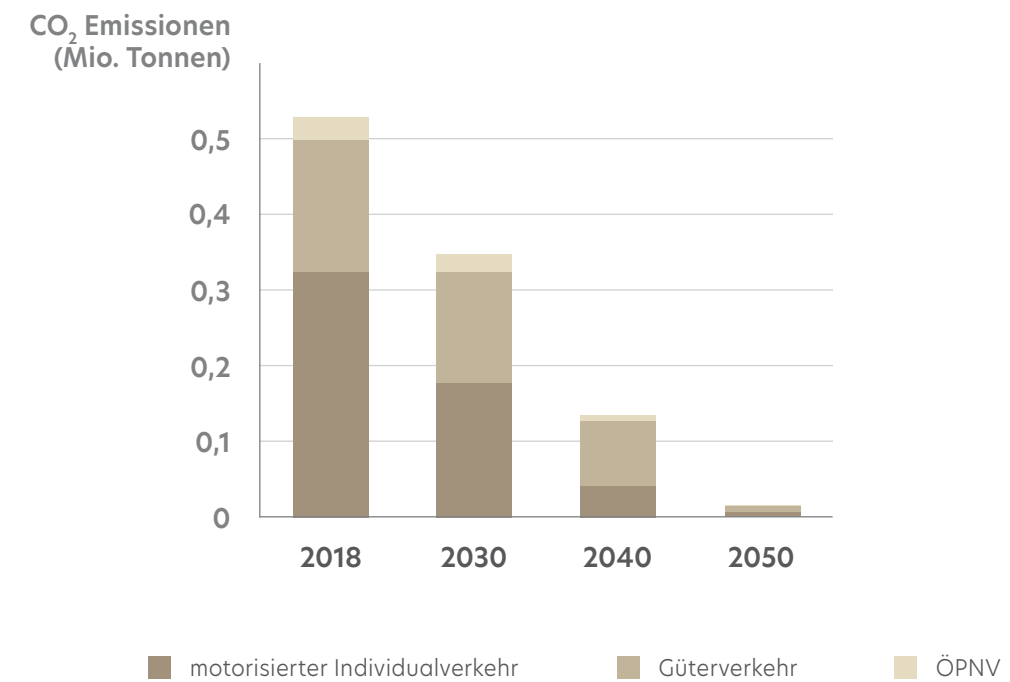
CO₂-Emissionspfad in der Fernwärmeversorgung

mit „Export“-Emissionen, Szenario KliMa



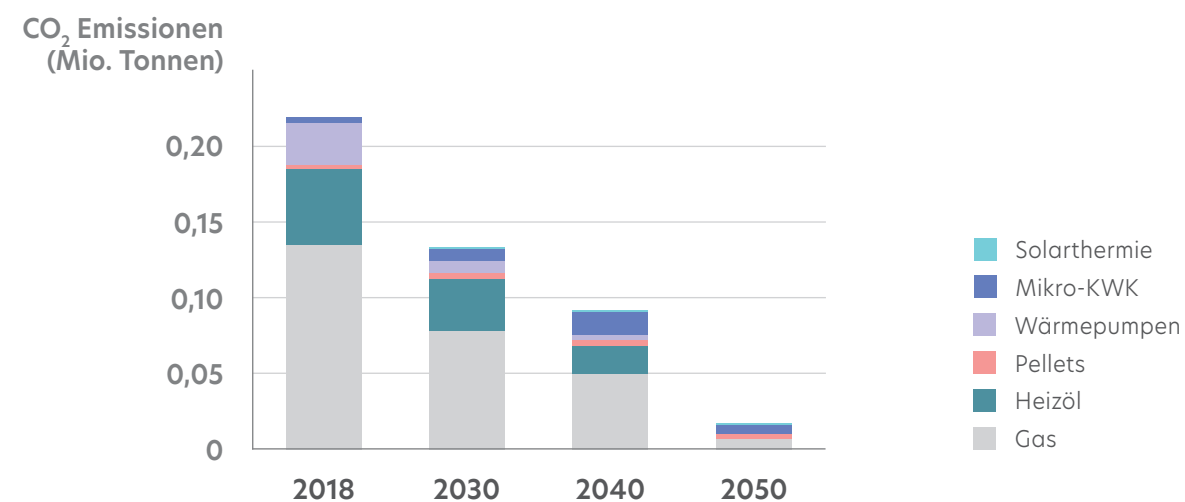
CO₂-Emissionspfad des Verkehrssektors

Szenario KliMa



CO₂-Emissionspfad in der dezentralen Wärmeversorgung

Szenario KliMa



³⁸ TAB noch nicht an Fernwärmenetz angeschlossen; Anschluss erfolgte 2020

Aufteilung des Energieverbrauchs der PKW-Flotte

Szenario KliMa

