



# KLIMASCHUTZ- UND ENERGIEKONZEPT

Daniel Knoll  
Aktionsbündnis Energiewende Heilbronn  
Mitglied im Rat für Bürgerenergie des BBE

HEILBRONN, DEZEMBER 2019

STAND: 12.12.2019

## EXECUTIVE SUMMARY

Im Pariser Klimaschutzabkommen hat sich Deutschland verpflichtet Anstrengungen zu unternehmen, um den Temperaturanstieg auf 1,5 °C über dem vorindustriellen Niveau zu begrenzen. Hierfür ist laut IPCC eine Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen bis spätestens 2040 auf Netto-Null notwendig.

Rund 85% der CO<sub>2</sub>-Emissionen in Deutschland sind energiebedingt. Diese Arbeit fokussiert sich daher auf diesen Bereich. In Deutschland wird Energie in den Sektoren Mechanische Energie (39%), Raumwärme (27%), Prozesswärme (24%), Warmwasser (5%), Beleuchtung (3%) und IKT (Information- und Kommunikationstechnik, 2%) benötigt.

Dieses Konzept geht nicht von einer Verhaltensänderung der Menschen in Heilbronn aus. Bislang ist nur bei einer kleinen Minderheit erkennbar dass diese dazu bereit wäre. Die Lösung ist daher den Energieverbrauch in allen Verbrauchs-Sektoren bei gleichbleibendem Nutzen zu senken und klimaneutral durch erneuerbare Energien zu decken.

Für den Sektor Raumwärme wird als schnell und wirtschaftlich umsetzbare Lösung die Umstellung auf Elektrowärmepumpen ermittelt. Im Sektor Prozesswärme wird bereits heute ein großer Teil des Bedarfs mit Strom gedeckt, dies muss komplett auf Strom umgestellt werden.

Im Verkehrs-Sektor muss möglichst weitgehend auf Akku-Elektromobilität und leistungsgebundene Mobilitätslösungen umgestellt werden. Wasserstoff und synthetische Kraftstoffe sollten aufgrund der geringen Effizienz nur dort eingesetzt werden, wo andere technische Lösungen nicht verfügbar sind, beispielsweise im Straßengüter- und Luftverkehr sowie der Binnenschifffahrt. Andernfalls ist eine erheblich höhere Stromproduktion notwendig. Der Anbau von Pflanzen für die Gewinnung von Biotreibstoffen kann in Deutschland nicht wesentlich gesteigert werden. Die heute verfügbare Menge sollte im Bereich Luftverkehr und Binnenschifffahrt eingesetzt werden.

Der durch die beschriebenen Maßnahmen stark zunehmende Stromverbrauch muss zu 100% aus erneuerbaren Energien gewonnen werden. Es wird vorgeschlagen je ein Drittel aus Photovoltaik, Wind an Land und Wind offshore zu erzeugen.

Hierfür sind alle rund 15.000 geeigneten Dachflächen in der Stadt Heilbronn vollständig mit Photovoltaik-Anlagen zu belegen. Zusätzlich sind Solarparks mit einer Fläche von 2,87 km<sup>2</sup> notwendig (entsprechend mehr bei Kombinations-Nutzung der Flächen z.B. Agro-Photovoltaik). Strom aus Windkraft an Land trägt 554 GWh bei, dies entspricht 6-mal dem Windpark Harthäuser Wald. Um weitere 554 GWh aus Windkraft offshore zu erzeugen sind rund 38 durchschnittliche Offshore-Anlagen nötig. Für die Erzeugung von Wasserkraft in Heilbronn besteht kein Ausbau-Potential. Die vorhandene Wasserkraft hat einen Anteil von weniger als 2% am berechneten künftigen Strombedarf.

Die notwendigen Stromspeicher wurden anhand einer 15-Minuten scharfen Modellierung des künftigen Strombedarfs und der dargestellten Energieerzeugung berechnet.

Die modellierte Energieversorgung ergibt Stromkosten von rund 11 Cent pro kWh. Der aktuelle Strompreis für Haushalte liegt aktuell inklusive aller Netzgebühren, Abgaben, Steuern und Umlagen bei rund 0,30€ pro kWh. In der Zusammensetzung des Strompreises macht der Strompreis etwa 0,05 € und die EEG-Umlage aktuell 0,064€ aus. In den berechneten 0,11 € sind sämtliche Kosten für die Erneuerbaren Energien und deren Speicherung bereits enthalten. Der Strompreis bliebe also gleich.

Aufgrund der momentan beginnenden Umstellung des Verkehrssektors auf Elektromobilität, realistischen Zubaugeschwindigkeiten und Wachstumsraten bei den Erneuerbaren Energien sowie dem bestehenden Erneuerungsraten der Heizungsanlagen wurden mögliche Umsetzungsfade berechnet. Innerhalb von 10 Jahren kann der energiebedingte CO<sub>2</sub>-Ausstoß um 60% reduziert werden, innerhalb von 15 Jahren um 90% und nach 20 Jahren komplett vermieden werden. Angesichts eines Anteils der energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen von 85% an den anthropogenen CO<sub>2</sub>-Emissionen in Deutschland ist dies ein wesentlicher Beitrag zur Erreichung der Pariser Klimaziele.

## INHALT

Executive Summary .....	2
Klimakrise: Wissenschaftlicher Konsens.....	5
Klimakrise: CO <sub>2</sub> -Quellen in Deutschland .....	9
Die Lösung.....	11
Sektoren: Raumwärme und Prozesswärme .....	12
Sektor: Verkehr .....	14
Sektor: Strom .....	18
Verbrauch.....	19
Erzeugung.....	19
Photovoltaik Dachflächen .....	19
Photovoltaik Solarparks .....	20
Windkraft an Land (Onshore).....	21
Windkraft auf See .....	22
Wasserkraft .....	22
Erzeugungs-Summen .....	22
Speicherung.....	22
Energiekosten, Strompreis und Investitionen .....	24
Umsetzungsdauer.....	26
Schlussbemerkung.....	32
Literaturverzeichnis .....	33

## KLIMAKRISE: WISSENSCHAFTLICHER KONSENS

(Leopoldina, 2019)

Der Einfluss des Menschen auf das Klimasystem ist klar und die jüngsten anthropogenen Emissionen von Treibhausgasen sind die höchsten in der Geschichte. Die jüngsten Klimaänderungen hatten weitverbreitete Folgen für natürliche Systeme und solche des Menschen.

Die Erwärmung des Klimasystems ist eindeutig und viele der seit den 1950er Jahren beobachteten Veränderungen waren vorher über Jahrzehnte bis Jahrtausende nie aufgetreten. Die Atmosphäre und der Ozean haben sich erwärmt, die Schnee- und Eismengen sind zurückgegangen und der Meeresspiegel ist angestiegen.

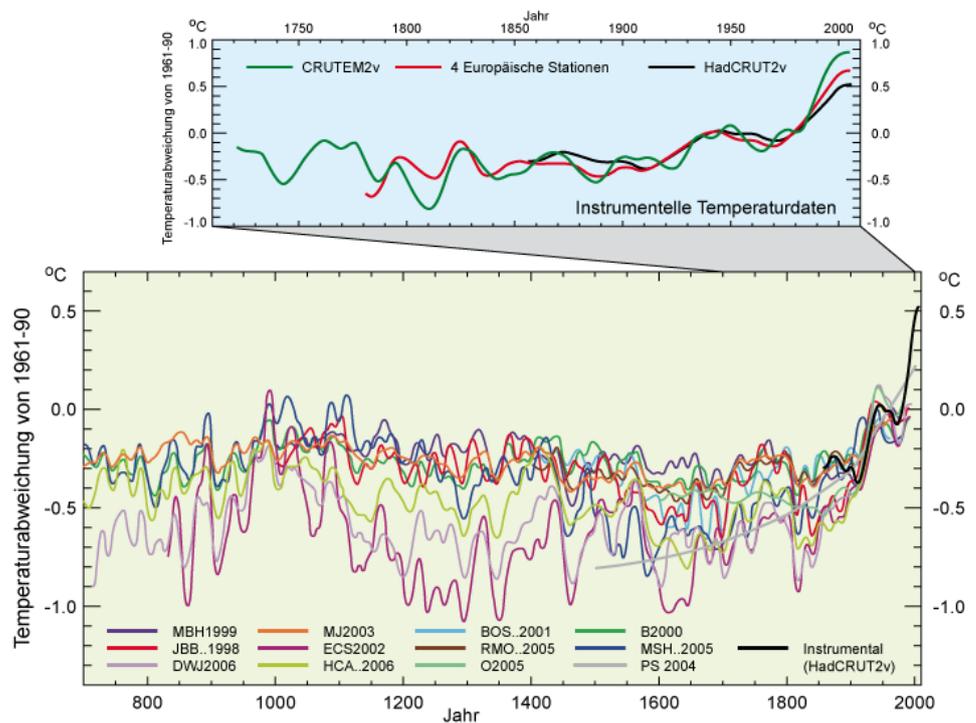


ABBILDUNG 1 (IPCC, 2007)

(IPCC, 2014)

Die anthropogenen Treibhausgasemissionen sind seit der vorindustriellen Zeit angestiegen, hauptsächlich angetrieben durch Wirtschafts- und Bevölkerungswachstum, und sind nun höher als jemals zuvor. Dies hat zu atmosphärischen Konzentrationen von Kohlendioxid, Methan und Lachgas geführt, wie sie seit mindestens 800000 Jahren noch nie vorgekommen sind. Ihre Auswirkungen wurden, in Kombination mit denen anderer anthropogener Treiber, im gesamten Klimasystem nachgewiesen und es ist äußerst wahrscheinlich, dass sie die Hauptursache der beobachteten Erwärmung seit Mitte des 20. Jahrhunderts sind.

Fortgesetzte Emissionen von Treibhausgasen werden eine weitere Erwärmung und langanhaltende Änderungen aller Komponenten des Klimasystems verursachen und damit die Wahrscheinlichkeit von schwerwiegenden, weitverbreiteten und irreversiblen Folgen für Menschen und Ökosysteme erhöhen. Eine Begrenzung des Klimawandels würde erhebliche und anhaltende Minderungen der Treibhausgasemissionen erfordern, wodurch – verbunden mit Anpassung – die Risiken des Klimawandels begrenzt werden können.

Die kumulativen CO<sub>2</sub>-Emissionen bestimmen weitgehend die mittlere globale Erwärmung der Erdoberfläche bis zum späten 21. Jahrhundert und darüber hinaus. Projektionen von Treibhausgasemissionen unterscheiden sich erheblich, abhängig sowohl von sozioökonomischer Entwicklung als auch von Klimapolitik.

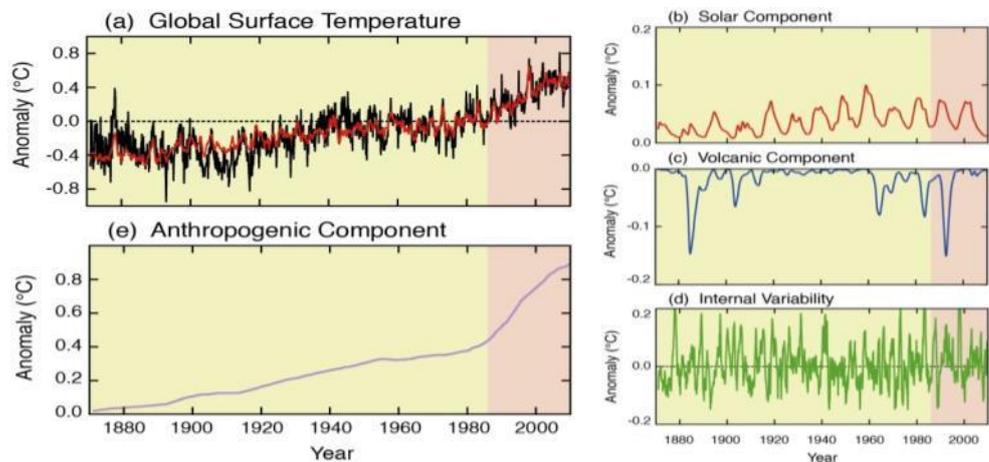


ABBILDUNG 2 (IPCC, 2013)

Im Wortlaut des Pariser Klimaabkommens heißt es:

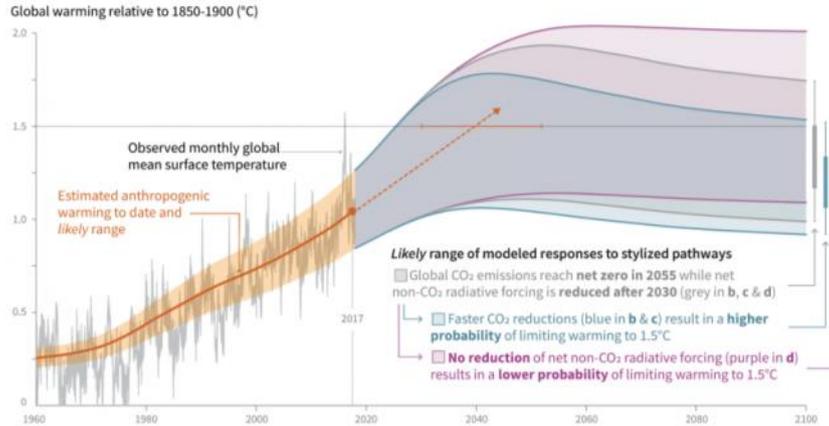
(Übereinkommen von Paris)

Dieses Übereinkommen zielt darauf ab [... den] Anstieg der durchschnittlichen Erdoberflächentemperatur deutlich unter 2 °C über dem vorindustriellen Niveau gehalten wird und Anstrengungen unternommen werden, um den Temperaturanstieg auf 1,5 °C über dem vorindustriellen Niveau zu begrenzen, da erkannt wurde, dass dies die Risiken und Auswirkungen der Klimaänderungen erheblich verringern würde;

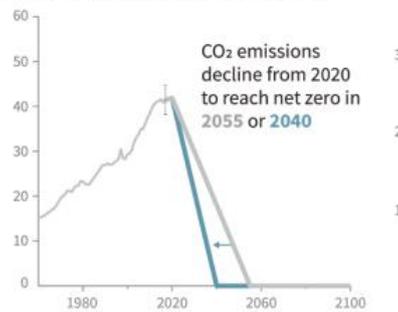
Das IPCC hat dazu in einer aktuellen Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger die notwendigen Emissions-Minderungspfade dargestellt. Selbst bei einer Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen bis 2040 auf Netto-Null ist die Erreichung des 1,5°C-Ziels in den nächsten Jahrzehnten nicht sicher möglich.

**Cumulative emissions of CO<sub>2</sub> and future non-CO<sub>2</sub> radiative forcing determine the probability of limiting warming to 1.5°C**

**a) Observed global temperature change and modeled responses to stylized anthropogenic emission and forcing pathways**

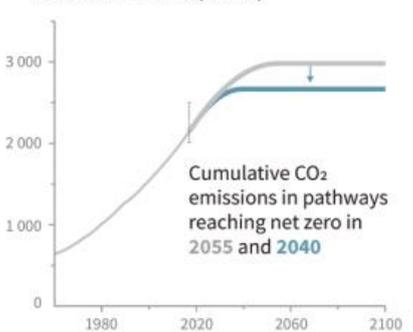


**b) Stylized net global CO<sub>2</sub> emission pathways**  
Billion tonnes CO<sub>2</sub> per year (GtCO<sub>2</sub>/yr)

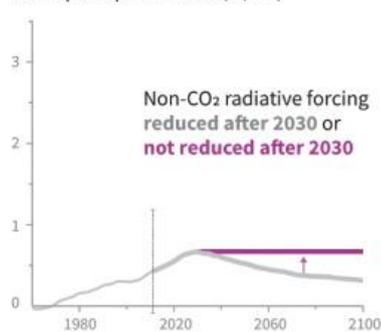


Faster immediate CO<sub>2</sub> emission reductions limit cumulative CO<sub>2</sub> emissions shown in panel (c).

**c) Cumulative net CO<sub>2</sub> emissions**  
Billion tonnes CO<sub>2</sub> (GtCO<sub>2</sub>)



**d) Non-CO<sub>2</sub> radiative forcing pathways**  
Watts per square metre (W/m<sup>2</sup>)



Maximum temperature rise is determined by cumulative net CO<sub>2</sub> emissions and net non-CO<sub>2</sub> radiative forcing due to methane, nitrous oxide, aerosols and other anthropogenic forcing agents.

ABBILDUNG 3 (IPCC, 2018)

Die Nationale Akademie der Wissenschaften hat aktuell erklärt:

(Leopoldina, 2019)

Im Pariser Klimaabkommen von 2015 hat die Weltgemeinschaft vereinbart, die vom Menschen verursachte globale Erwärmung der Erde auf weniger als 2°C zu beschränken, um die daraus entstehenden Schä-

den für Menschheit und Natur abzumildern. Dieses Ziel ist nur noch zu erreichen, wenn sofort sowohl nationale wie auch internationale Vereinbarungen eingehalten werden. Schäden durch Abschmelzen von Schnee und Eis, Anstieg des Meeresspiegels, Ausweitung von Trocken-zonen, Extremwetter und steigender Verlust von Artenvielfalt und Lebensräumen an Land und im Meer können nur noch durch erhebliche und bereits in den kommenden zehn Jahren wirksame Anstrengungen begrenzt werden. Ansonsten werden große Regionen der Erde nicht mehr bewohnbar sein, selbst wenn sich einzelne Regionen als „Klimagewinner“ verstehen. Bei uns und weltweit wächst zudem der Generationenkonflikt darüber, dass wir heute die Lebensgrundlagen unserer Kinder und Kindeskindern aufbrauchen. Nicht zuletzt werden die Kosten des Klimawandels weiter dramatisch ansteigen. Nur mit einer entschlossenen und zügig umgesetzten Klimapolitik – national, mit den zentralen europäischen Partnern und durch weltweite Kooperation kann es gelingen, die sich bereits abzeichnenden katastrophalen Auswirkungen des Klimawandels zu mindern.

Über 26.800 Wissenschaftler haben eine Stellungnahme der „Scientists for Future“ unterzeichnet. Darin werden unter anderen folgende Fakten genannt:

(Scientists for Future)  
[Quellenangaben aus dem Original]

Falls die Weltgemeinschaft die vom Pariser Abkommen angestrebte Beschränkung der Erwärmung auf 1,5 °C verfehlt, ist in vielen Regionen der Welt mit erheblich verstärkten Klimafolgen für Mensch und Natur zu rechnen (IPCC 2018)

Um mit hoher Wahrscheinlichkeit eine Erwärmung von 1,5 °C nicht zu überschreiten, müssen die Nettoemissionen von Treibhausgasen (insbesondere CO<sub>2</sub>) sehr rasch sinken und in den nächsten 20 bis 30 Jahren weltweit auf null reduziert werden (IPCC 2013, 2018).

Stark sinkende Kosten und steigende Produktionskapazitäten für bereits eingeführte klimafreundliche Technologien machen eine Abkehr von fossilen Brennstoffen hin zu einem vollständig auf erneuerbaren Energien basierenden Energiesystem bezahlbar und schaffen neue ökonomische Chancen (Nykqvist and Nilsson, 2015; Creutzig et al., 2017; Jacobson et al., 2018; Teske et al., 2018; Breyer et al., 2018; Löffler et al., 2017; Pursiheimo et al., 2019)

Das Pariser Klimaschutzabkommen räumt den Entwicklungsländern ein, dass diese später mit der CO<sub>2</sub>-Minderung beginnen. Begründet wird dies mit ihrem historisch geringeren Beitrag zum Klimawandel und aufgrund ihrer wirtschaftlichen Situation. Daher sind die Industrieländer in der besonderen Verpflichtung die Netto-Null früher zu erreichen. Deutschland hat dieses Abkommen unterzeichnet und damit alle politischen Akteure in Deutschland zum Handeln verpflichtet. Die Städte, als kleinste politische Einheit sind daher mit in der Pflicht diese Ziele in Ihrem Verantwortungsbe-

reich umzusetzen. Heilbronn als außergewöhnlich wirtschaftlich erfolgreiche und wohlhabende Stadt sollte hierbei eine Vorbildfunktion übernehmen. Zumindest die globale Gerechtigkeit und die Verantwortung für die kommenden Generationen für die von UNICEF als Kinderstadt ausgezeichnete Großstadt einen besonderen Stellenwert hat.

## KLIMAKRISE: CO<sub>2</sub>-QUELLEN IN DEUTSCHLAND

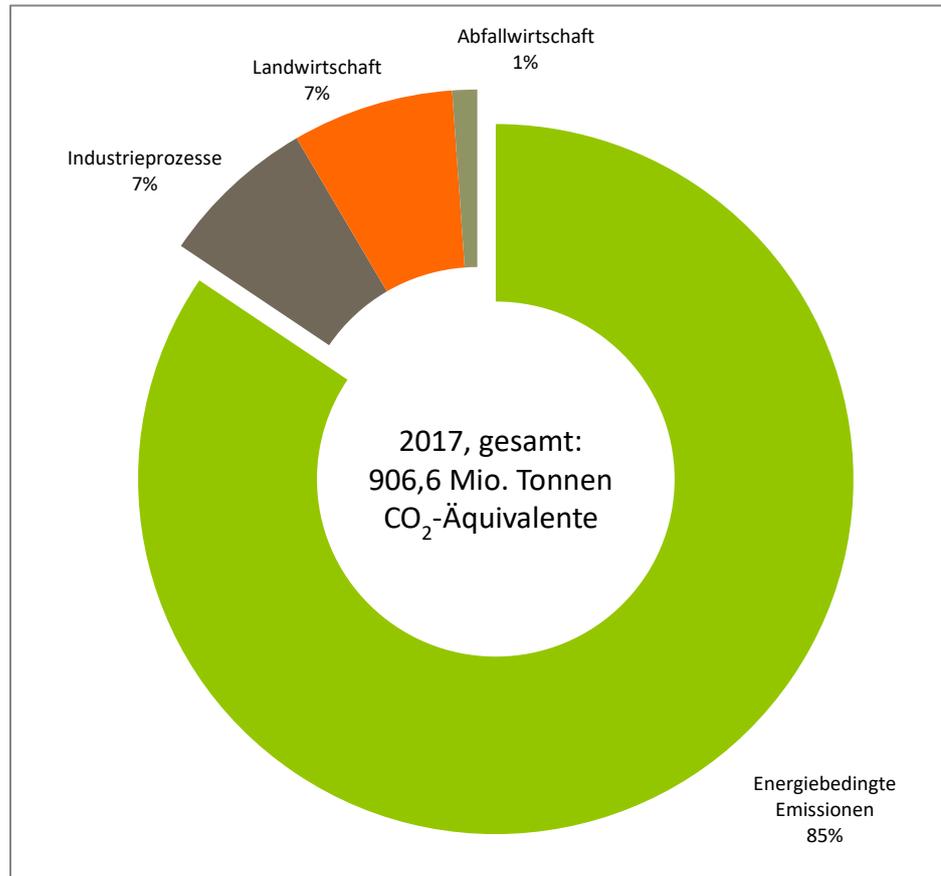
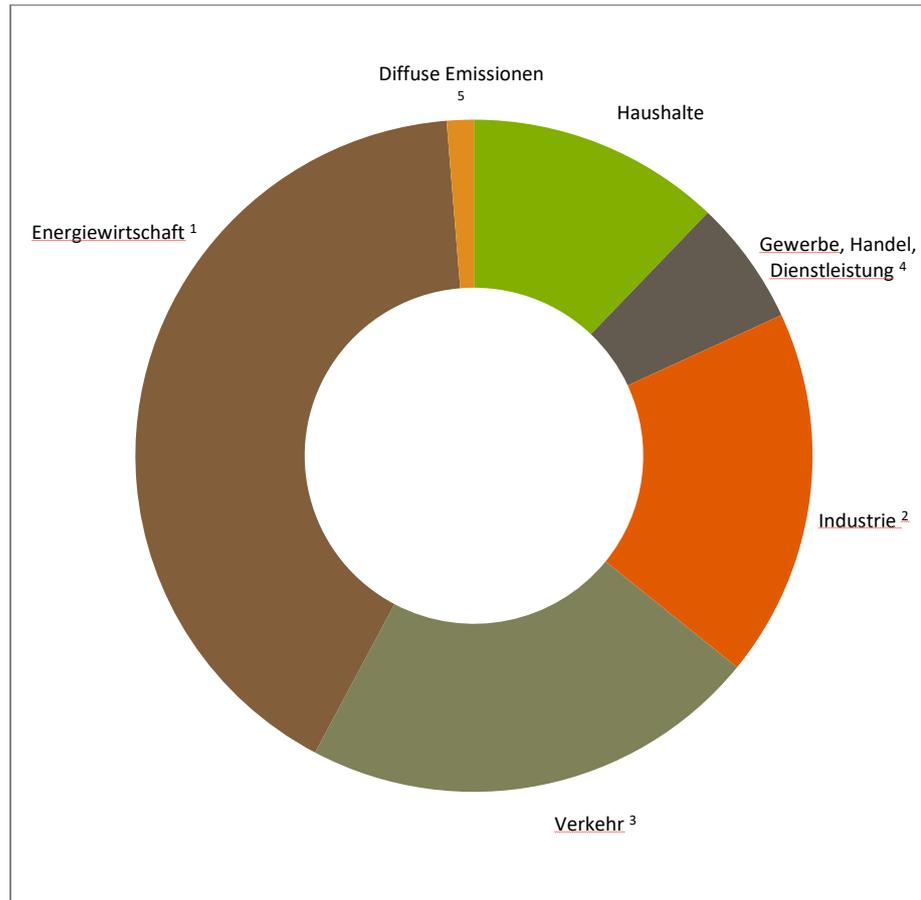


ABBILDUNG 4 (UMWELTBUNDESAMT, 2019)

Rund 85% der CO<sub>2</sub>-Emissionen in Deutschland sind energiebedingt. Für Heilbronn gibt es keine lokalen Daten hierfür, es kann aber davon ausgegangen werden, dass dieser Anteil in städtischen Gebieten noch höher ist. Diese Arbeit fokussiert sich daher auf diesen Bereich.

Die energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen verteilen sich auf folgende Verursacher.



<sup>1</sup> Öffentliche Elektrizitäts- und Wärmeversorgung, Fernheizwerke sowie Industrief Feuerungen und Industriekraftwerke der Mineralölverarbeitung, der Gewinnung und Herstellung von festen Brennstoffen und sonstiger Energieindustrien

<sup>2</sup> verarbeitendes Gewerbe; ohne prozessbedingte Emissionen

<sup>3</sup> einschl. Schienenverkehr, nationale Luftfahrt, Küsten- und Binnenschifffahrt

<sup>4</sup> Gewerbe, Handel, Dienstleistungen und Militär, zusätzlich land- u. forstwirtschaftlicher Verkehr sowie militärischer Boden- und Luftverkehr

<sup>5</sup> diffuse Emissionen durch Gewinnung, Umwandlung und Verteilung von Brennstoffen

**ABBILDUNG 5 (UMWELTBUNDESAMT , 2019)**

All diese Verursacher nutzen Energie für unterschiedliche Einsatzzwecke. Um nun konkrete Handlungsoptionen herauszuarbeiten wird im folgenden die Energie-Verwendung auf die verschiedenen Sektoren aufgeteilt dargestellt.

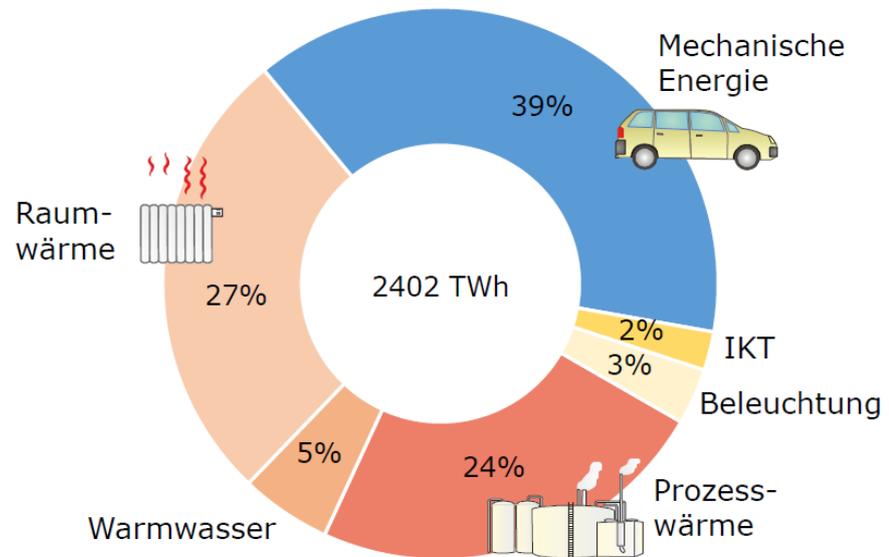


ABBILDUNG 6 DATEN:(BMWi, FASSUNG VOM 12.01.2016) DARSTELLUNG: (QUASCHNING, 2016)

## DIE LÖSUNG

Der Energieverbrauch muss in allen Sektoren gesenkt und klimaneutral durch erneuerbare Energien gedeckt werden.

Zunächst werden in den nächsten Kapiteln Lösungsvorschläge für die einzelnen Sektoren aufgezeigt. Dabei wird ein hoher Fokus auf möglichst effiziente Energienutzung gelegt. Dabei wird gezeigt, dass in allen Sektoren der effizienteste Weg über die starke Verwendung von elektrischem Strom führt. Dies führt zu einer starken Zunahme des Stromverbrauchs. Auf dieser Erkenntnis aufbauend wird im Kapitel „Erzeugung“ eine Stromversorgung Heilbronn mit 100% erneuerbaren Energien untersucht.

## SEKTOREN: RAUMWÄRME UND PROZESSWÄRME

Bedarf Heilbronn (Quelle: Energielenker, Entwurf, ca.)	1.470 GWh/a
Aktuell aus Erneuerbaren Energien (Quelle: EEB ENERKO Energiewirtschaftliche Beratung GmbH, abgebildet bei Energielenker, ca.)	37 GWh/a
Aktuell Netzgebundene Wärme (inkl. fossilem Anteil) (Quelle: Energielenker, Entwurf, ca.)	190 GWh/a
<b>Verbleibender Wärmebedarf</b>	<b>1.244 GWh/a</b>

**TABELLE 1**

Die Verluste aus Power to Gas-Anlagen können in bestehende Fernwärmenetze eingespeist werden, hierfür sind thermische Langzeitspeicher notwendig. Ein weiterer Ausbau der Fernwärmenetze wird nicht angenommen.

Wie kann der verbleibende Wärmebedarf CO<sub>2</sub>-neutral gedeckt werden?

Die Nutzung von Biomasse (Biogas, Holz) ist im dicht besiedelten Deutschland kaum ausbaubar. Die heute genutzte Biomasse wird in anderen Sektoren benötigt. In der dicht besiedelten Stadt Heilbronn ist außerdem aus lufthygienischen Gründen die Verbrennung von Holz häufig problematisch (Feinstaub).

Den Lösungsoptionen Solarthermie und Tiefengeothermie stehen ökonomische Rahmenbedingungen einem schnellen Ausbau im Weg. Bei Solarthermie bestehen zusätzlich die Problem der Flächenkonkurrenz und die jahreszeitliche Verfügbarkeit. Diese Einschätzung bedarf aber noch weitergehender Prüfung.

Daher wird eine schnelle Umstellung der Wärmeversorgung mit strombasierten Systemen erfolgen müssen. Quaschnig stellt in seiner Sektorkopplungs-Studie verschiedene Systeme gegenüber und untersucht deren jeweiligen Strombedarf zur Deckung des Bedarfs eines beispielhaften Gebäudes.

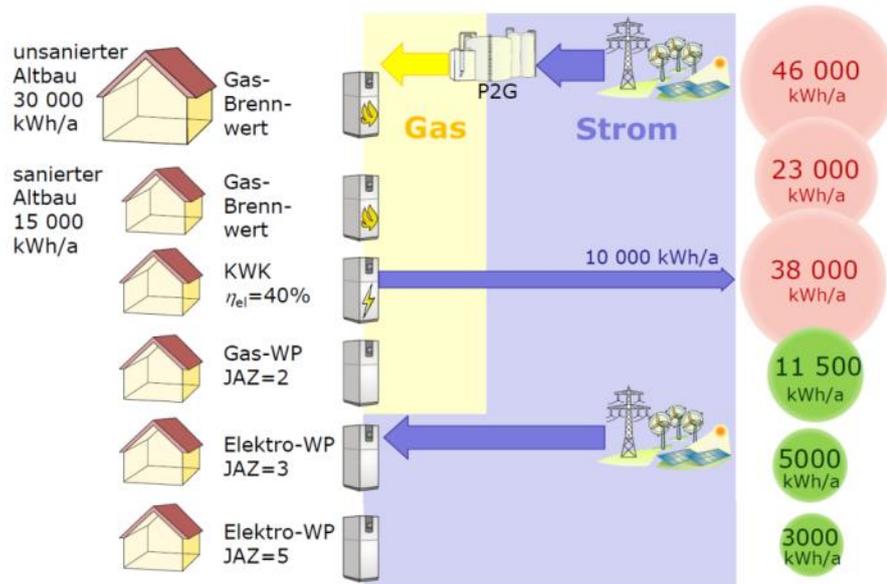


ABBILDUNG 7 (QUASCHNING, 2016)

Auf dieser Basis lassen sich jeweils Effizienz-Faktoren nutzen um den zusätzlichen Strombedarfs Heilbronn auf die jeweiligen Technologien zu berechnen.

Maßnahme	Effizienzfaktor	Zusätzlicher Strombedarf
ohne Verringerung des Wärmebedarfs (zu ersetzender fossiler Wärmebedarf 1.244 GWh/a)		
Gasbrennwertkessel, mit P2G-Gas betrieben	0,65	1.913,8 GWh/a
Gas-Wärmepumpen (JAZ=2) mit P2G-Gas betrieben	1,3	956,9 GWh/a
Elektrowärmepumpen (JAZ=3)	3	414,7 GWh/a
Elektrowärmepumpen (JAZ=5)	5	248,8 GWh/a
mit Verringerung des Wärmebedarfs um 75% (zu ersetzender fossiler Wärmebedarf 311 GWh/a)		
Gasbrennwertkessel, mit P2G-Gas betrieben	0,65	478,5
Gas-Wärmepumpen (JAZ=2) mit P2G-Gas betrieben	1,3	239,2
Elektrowärmepumpen (JAZ=3)	3	103,7
Elektrowärmepumpen (JAZ=5)	5	62,2

TABELLE 2

Im Sektor Raumwärme gibt es sehr große Potentiale zur Bedarfsreduktion durch die Sanierung der Gebäude. Momentan liegt die Sanierungsquote bei jährlich rund 2%. Innerhalb eines Zeithorizonts von 10 Jahren sind also nur weitere rund 20% der Gebäude saniert.

Es ist anzunehmen dass nicht alle dieser Gebäude auf die jeweils energieeffizienteste Wärmeversorgung umgestellt werden.

Im Sektor Prozesswärme wird bereits heute ein großer Teil des Bedarfs mit Strom gedeckt. Hier sind kaum Effizienz-Gewinne realisierbar, da Wärmepumpen bei dem häufig notwendigen hohen Temperatur-Niveau nicht eingesetzt werden können. Im dargestellten Bedarf sind diese Verbraucher allerdings nicht enthalten, da diese im heutigen Strombedarf enthalten sind. Effizienz-Gewinne bei der Prozesswärme werden außerdem häufig durch das Wirtschaftswachstum aufgewogen.

Zusätzliche Effizienz-Gewinne durch die Kopplung beispielsweise mit Power to X-Anlagen sind aber denkbar.

Es wird für den Sektor Raumwärme ein zusätzlicher Strombedarf von 415 GWh/a angenommen.

## SEKTOR: VERKEHR

Im Folgenden wird die Effizienz strombasierter Verkehrskonzepte im Vergleich zu herkömmlichen Fahrzeugen im Individualverkehr mit Verbrennungsmotor dargestellt.

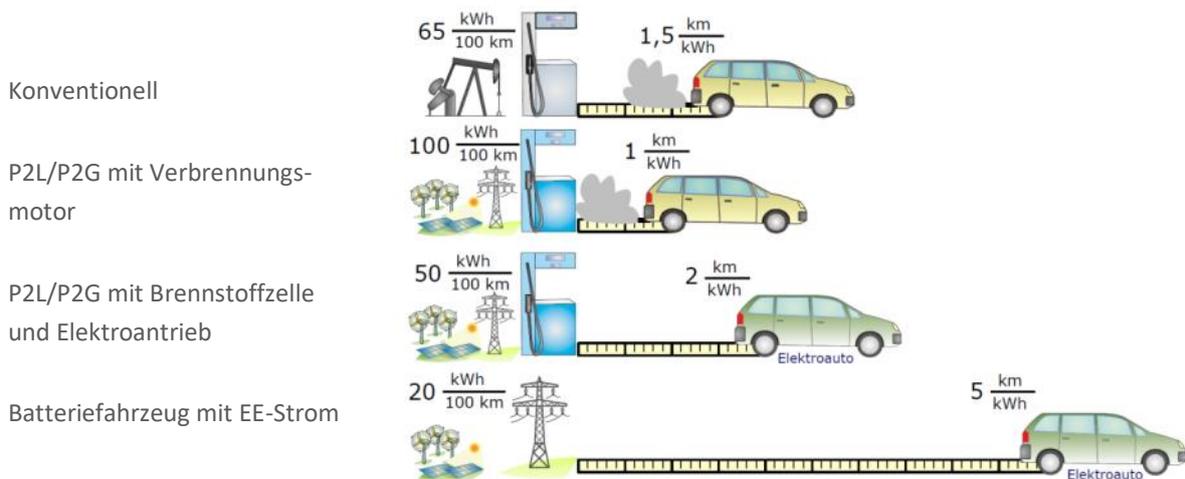


ABBILDUNG 8

Wie im Sektor Raumwärme kann auch hier mit Effizienz-Faktoren für verschiedene Annahmen des künftigen Einsatzes der Antriebskonzepte der zusätzliche Strombedarf berechnet werden. Quaschnig hat dies für Deutschland in zwei Varianten berechnet.

Zusätzlicher Strombedarf im Verkehrsbereich durch die Substitution der fossilen Energieträger ohne Effizienzmaßnahmen

Bereiche ohne Effizienzmaßnahmen	Anteil	Effizienzfaktor	zusätzlicher Strombedarf
<b>Individualverkehr 410 TWh</b>			
davon E-Mobilität mit Batterie	10 %	3,25	13 TWh
davon Power-to-Liquid-Treibstoffe, P2L	90 %	0,65	568 TWh
<b>Straßengüter und Omnibus-Verkehr 201 TWh</b>			
davon Power-to-Liquid-Treibstoffe, P2L	100 %	0,65	309 TWh
<b>Luftverkehr und Binnenschifffahrt 104 TWh</b>			
davon Biotreibstoffe	30 %	1	---
davon Power-to-Liquid-Treibstoffe, P2L	70 %	0,65	112 TWh
Summe			1002 TWh
davon Import von P2G/P2L			302 TWh
davon Erzeugung im Inland			700 TWh

TABELLE 3 (QUASCHNING, 2016)

(Quaschnig, 2016)

Ein Aufbau einer regenerativen Stromversorgung erscheint im nötigen Umfang für die Werte aus [Tabelle 3] in den nächsten 25 Jahren wenig realistisch. Darum wird in [Tabelle 4] ein weiterer Weg skizziert, bei dem durch Effizienzgewinne im Straßenverkehr der Strombedarf erheblich reduziert wird. Der Strombedarf sinkt dabei von 1002 TWh auf 337 TWh.

Bereiche mit Effizienzmaßnahmen	Anteil	Effizienzfaktor	zusätzlicher Strombedarf
<b>Individualverkehr 410 TWh</b>			
davon E-Mobilität mit Batterie	95 %	3,25	120 TWh
davon E-Mobilität mit Power-to-Gas (P2G)	5 %	1,3	16 TWh
<b>Straßengüter und Omnibus-Verkehr 201 TWh</b>			
davon E-Mobilität, leitungsgebunden	70 %	3,25	43 TWh
davon E-Mobilität mit Power-to-Gas (P2G)	30 %	1,3	46 TWh
<b>Luftverkehr und Binnenschifffahrt 104 TWh</b>			
davon Biotreibstoffe	30 %	1	---
davon Power-to-Liquid-Treibstoffe, P2L	70 %	0,65	112 TWh
Summe			337 TWh
davon Import von P2G/P2L			137 TWh
davon Erzeugung im Inland			200 TWh

TABELLE 4 (QUASCHNING, 2016)

(Quaschnig, 2016)

Hierbei wird davon ausgegangen, dass der Individualverkehr künftig fast ausschließlich durch batteriebetriebene Elektrofahrzeuge bedient wird. Der LKW und Busverkehr muss ebenfalls elektrifiziert werden. Da aufgrund der größeren Strecken hier Batteriefahrzeuge nur eingeschränkt möglich sind, ist eine Elektrifizierung wichtiger Fernstraßen mit Oberleitungen anzustreben. Ein Teil der Transportleistung im Schwerlastbereich kann auch mit Treibstoffen auf Basis von Power-to-Liquid erbracht werden. Auch eine deutliche Erhöhung des Schienengüterverkehrs erleichtert die Elektrifizierung.

Bei Straßenfahrzeugen kann von Produktzyklen von 10 bis 15 Jahren ausgegangen werden. Daher wird empfohlen ab dem Jahr 2025, spätestens aber ab dem Jahr 2030, nur noch Neufahrzeuge im Straßenverkehr mit rein elektrischen Antrieben zuzulassen.

Im Flug- und Schiffverkehr sind die Produktzyklen deutlich länger und technische Lösungen zur Elektrifizierung erheblich aufwändiger. Darum wird in diesem Bereich im Wesentlichen der Einsatz von Power-To-Liquid- und Biomassetreibstoffen vorgesehen. Bei Berücksichtigung von Importen eines Teils der PtL-Treibstoffe beträgt der Inlandsstrombedarf für den gesamten Verkehrssektor bei Umsetzung der genannten Effizienzmaßnahmen 200 TWh.

Auch die Autoren der aktuellen Studie „Rechtliche Rahmenbedingungen für ein integriertes Energiekonzept 2050 und die Einbindung von EE-Kraftstoffen“ im Auftrag des Bundesverkehrsministeriums erwarten bei der Umstellung des Verkehrs dass sich effiziente Technologien durchsetzen.

(Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, 2018)

Sicher ist zudem, dass der Verkehrssektor in weiten Teilen direkt elektrifiziert werden wird. Dies betrifft neben dem PKW- auch weite Teile des Lieferverkehrs ggf. bis hin zum Schwerlastverkehr

Für den Straßengüterverkehr sieht auch diese Studie mehrere Optionen, von Wasserstoff über synthetische Kraftstoffe bis hin zu Oberleitungs-LKW. Die Autoren empfehlen grundsätzlich eine möglichst umfassende Verlagerung des Straßengüterverkehrs auf die (elektrifizierte) Schiene. (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, 2018)

(Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, 2018)

Wie die anderen Sektoren auch, wird der Verkehrssektor zunehmend und möglichst weitgehend elektrifiziert. Dabei ist die direkte Nutzung des Stroms in PKW, Zügen und ggf. LKW der grundsätzlich effizienteste Weg, wenn der Strom möglichst schnell defossilisiert ist.

Der zusätzliche Strombedarfs Heilbronn wird im Folgenden aus den Berechnungen von Quaschnig über den Anteil der Einwohner Heilbronn an der gesamten Bevölkerung Deutschland hergeleitet. Dies kann nur ein grober Anhaltspunkt sein, eine

genaue Zuordnung und Abgrenzung der insgesamt oder für die verschiedenen Einsatzzwecke gefahrenen Kilometer auf Heilbronn erscheint aber schwierig realisierbar.

Deutschland	82,79	Millionen Einwohner
Heilbronn	0,122567	Millionen Einwohner
Anteil an Bevölkerung	0,148	Prozent
Zusätzlicher Strombedarf DE Annahme Quaschning	200.000	GWh
<b>Zusätzlicher Strombedarf Heilbronn</b>	<b>296</b>	<b>GWh</b>
davon Akku-Ladung	105	GWh
davon leitungsgebunden	38	GWh
davon P2G/P2L Strombedarf	153	GWh

TABELLE 5

Bei dieser Berechnung wird von keiner Veränderung des Modal-Split ausgegangen. Im Mobilitätssektor hat die städtische Politik und Verwaltung mit den größten direkten Einfluss auf den künftigen Energiebedarf.

(Leopoldina, 2019)

**Verkehr vermeiden:** [...] Der urbane Lieferverkehr verursacht zunehmend Emissionen in den Städten. Durch optimierte Logistikkonzepte, polyzentrale Einkaufsgebiete und über den öffentlichen Nahverkehr und verbesserte Fahrradinfrastrukturen angebundene Handels- und Dienstleistungen kann der Verkehr reduziert werden. Die Stadtentwicklung muss an die veränderten Lebens- und Mobilitätsgewohnheiten der Menschen angepasst werden, um mittel- bis langfristig insbesondere den individuellen Kurzstreckenverkehr zu reduzieren, ohne gleichzeitig die Mobilitätsansprüche einzuschränken. Eine fahrrad- und fußgängerfreundliche Infrastruktur ist immer noch das beste Mittel gegen klimaschädliche Emissionen, gesundheitsschädliche Feinstaub- und Stickstoffoxidbelastungen sowie den städtischen Flächenverbrauch.

**Verkehr verlagern:** Grundsätzlich ist eine Verlagerung des Verkehrs von der Straße auf die Schiene und im urbanen Nahraum auf den ÖPNV und das Fahrrad geboten. Der öffentliche Personennahverkehr, der Schienenfernverkehr und der Gütertransport auf der Schiene müssen dafür erheblich ausgebaut und qualitativ verbessert werden. Durch massive Anstrengungen muss der geringe Anteil an umweltfreundlicheren Verkehrsmitteln am gesamten Verkehrsaufkommen, besonders der heute geringe Anteil der Schiene an der Gesamtverkehrsleistung, erhöht werden. Diese Veränderungen erfordern neben einem Ausbau öffentlicher Infrastruktur insbesondere wirksame Anreize, um das Ver-

halten der Nutzerinnen und Nutzer nachhaltig zu verändern. Da Bahn und ÖPNV vorwiegend im Eigentum der öffentlichen Hand sind, könnte diese politische Entscheidung schnell umgesetzt werden. Eine Priorisierung von ÖPNV, Fahrrad- und Fußverkehr in den Städten hat zudem direkte positive Auswirkungen auf Gesundheit, Flächenverbrauch und allgemeine Lebensqualität.

## SEKTOR: STROM

Eine Verlagerung des Energieverbrauchs auf den Stromsektor ist nur dann sinnvoll wenn der Strom zu 100% aus erneuerbaren Energien gewonnen wird.

Für das vorliegende Konzept wurde eine Simulation auf 15-Minuten Basis des Heilbronner Stromverbrauchs nach Umsetzung der zuvor beschriebenen Maßnahmen vorgenommen. Für die Deckung dieses Bedarfs wurde dann ein künftiger Produktionsmix aus Sonne und Wind definiert. Die Ist-Verteilung der Produktion 2018 aus Sonne und Wind in Baden-Württemberg sowie Wind Offshore wurde auf diesen angenommenen Anlagenpark interpoliert. Im nächsten Schritt wurde die Speicherung in Akkus und nachgelagert Power to Gas bzw. entsprechende Einspeisung aus diesen Speichern simuliert.

Dabei wird von einem relativ einfachen Modell ausgegangen, das auf die Simulation der notwendigen Energiemengen und deren Verteilung im Jahresverlauf ausgerichtet ist.

Über die Auslastung einzelner Netzbestandteile wie bspw. Stromleitungen und Trafos macht das Modell keine Aussage. Das Modell nimmt keine konkrete Verortung der Erzeugungsanlagen vor.

Das Modell berücksichtigt keine Effizienz-Potentiale durch Lastverschiebung. Hierfür sind entsprechende regulatorische Anreize notwendig. Neben der Reduktion des notwendigen Netzausbaus ließe sich damit auch der Speicher-Bedarf reduzieren, was zu geringeren Speicher-Verlusten und damit geringerem Erzeugungs-Bedarf führen würde.

Detaillierte Lösungsvorschläge enthält der VDE-Fachbeitrag „Zellulares Energiesystem“.

(VDE Verband der  
Elektrotechnik Elektro-  
nik Informationstechnik  
VDE 00000)

Im zellular geprägten Energiesystem wird nach dem Subsidiaritätsprinzip die physikalische Balance zwischen Energieangebot und -nachfrage soweit wie möglich bereits auf regionaler, lokaler Ebene hergestellt (Abbildung 1-1). So kann der Ausbau der erneuerbaren Energien zügig weiter vorangetrieben werden und dabei das elektrische Übertragungsnetz wesentlich von Maßnahmen zur Netzstabilisierung entlastet werden.

## VERBRAUCH

Wie in den vorherigen Kapiteln hergeleitet ergeben sich zusätzlich zum bisherigen Stromverbrauch zusätzliche Verbraucher aus den Sektoren Raumwärme und Mobilität. Aus dem Simulations-Modell ergeben sich zusätzlich Speicher-Verluste und eine geringfügige Abregelung der Energie-Erzeugung. Die Abregelung in der Größenordnung von 2% der Erzeugung ist wirtschaftlich und ökologisch wesentlich günstiger als für die Speicherung dieser Erzeugungsspitzen wesentlich größere Speicherkapazitäten für wenige Stunden im Jahr bereit zu halten.

Sektoren	GWh
Ist-Stromverbrauch Heilbronn	701
Raumwärme	415
Mobilität	296
Speicher-Verluste und Abregelung (ohne P2G-Verluste Raumwärme und Mobilität)	294
<b>Stromverbrauch</b>	<b>1.706</b>

TABELLE 6

## ERZEUGUNG

### PHOTOVOLTAIK DACHFLÄCHEN

Der Weinstadt Heilbronn ist ihr größtes Energie-Potential sehr bewusst: Die Sonne.

Für die direkte Nutzung der Sonne mittels Photovoltaik sind große Flächen notwendig. Im urbanen Raum stehen dafür zunächst die Dachflächen zur Verfügung. Die Flächen-Konkurrenz besteht hier in Begrünung, Dachterrassen, Satellitenschüsseln, Dachfenstern, Klima- und Lüftungsgeräten sowie weiteren Objekten auf Dachflächen. Hemmnisse sind Eigentümergemeinschaften, statische Bedenken (technisch weitgehend unbegründet), Sanierungsbedarf, Alter der Eigentümer und individuelle Ablehnung der Technik.

Mit der technischen Entwicklung und Kosten-Reduktion sind heute auch Ost-West und teilweise nach Norden geneigte Dachflächen wirtschaftlich nutzbar.

Aus dem Datenbestand der LUBW Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg zum Energieatlas lassen sich die in Heilbronn vorhandenen Potentialflächen ermitteln (Stand 2000-2005).



ABBILDUNG 9 (LUBW LANDESANSTALT FÜR UMWELT BADEN-WÜRTTEMBERG)

Die automatisiert erstellte Datengrundlage liefert nur näherungsweise die tatsächlich mit Photovoltaik nutzbare Fläche. Stichprobenartige Kontrollen der Daten bestätigen dies. Beispielsweise werden teilweise auch Norddächer der Eignungsklasse „sehr gut“ zugeordnet, Hindernisse wie Dachfenster werden nicht berücksichtigt. Durch das Alter der Daten fehlen aber auch Gebäude. Daher wird über eine Nutzungsquote die tatsächliche Modulfläche reduziert. In der Praxis entspricht die hohe Nutzungsquote dem Ziel „Auf jedes Dach muss eine Photovoltaik-Anlage“.

Eignungsklasse*	Mögliche Modulfläche m <sup>2</sup> *	Nutzungsquote	Modulfläche	MWp	Spezifischer Ertrag kWh/kWp	GWh
Sehr gut	968.626	75%	726.470	143	960	138
Gut	1.452.077	50%	726.039	143	850	122
bedingt	135.315	30%	40.595	8	850	7

TABELLE 7 EIGENE BERECHNUNG \*MIT DATEN DER LUBW (LUBW LANDESANSTALT FÜR UMWELT BADEN-WÜRTTEMBERG)

## PHOTOVOLTAIK SOLARPARKS

Die Erzeugung von Photovoltaik und Windkraft verteilt sich im Jahresverlauf gegenläufig. Während im Sommer mehr Sonneneinstrahlung zur Verfügung steht, ist es im Winter durchschnittlich windiger. Die Aufteilung zwischen Photovoltaik und Windkraft ist für das Ziel 100% Erneuerbare Energie zunächst nicht entscheidend. Jedoch führt eine Schiefelage zugunsten einer der beiden Technologien zu einem stark steigenden Speicherbedarf. Daher wurde als Ziel eine Erzeugung von einem Drittel des Strombedarfs durch Photovoltaik definiert. Hierfür sind zusätzlich zu den Dachflächen auch Solarparks notwendig.

Ziel	GWh pro ha	Fläche	Fläche HN	Anteil
288 GWh	1 GWh/ha	2,87 km <sup>2</sup>	99,88 km <sup>2</sup>	2,9 %

**TABELLE 8**

Diese große notwendige Fläche kann entweder innerhalb der Gemarkung der Stadt Heilbronn bereitgestellt werden oder außerhalb. Marktakteure aus der Stadt Heilbronn sind bereits heute in ostdeutschen Bundesländern aktiv.

Um der Flächenkonkurrenz zu begegnen sind auch Modelle zur Doppelnutzung mit der Landwirtschaft technisch umsetzbar (Agro-Photovoltaik). Dabei werden die Photovoltaik-Module entweder so hoch aufgeständert, dass landwirtschaftliche Maschinen darunter durchfahren können, die Module senkrecht in Form von Wänden in Nord-Süd-Verlauf aufgestellt oder die Fläche innerhalb des Solarparks zwischen und unter den klassischen Modultischen beweidet. Das aktuelle regulatorische Umfeld ermöglicht diese Modelle jedoch nur sehr eingeschränkt.

Auch Doppelnutzungen mit Verkehrsflächen sind umsetzbar. Beispielsweise auf Lärmschutzwänden und -wällen, über Parkplätzen und Plätzen. Die Verschattungssituation muss dabei jeweils individuell berücksichtigt werden.

Auch auf Wasserflächen lassen sich Photovoltaik-Module auf schwimmenden Pontons betreiben. Durch die dabei meist optimale Verschattungsfreiheit und die kühlere Umgebung auf der Wasseroberfläche sind solche Anlagen besonders effizient.

Die in Tabelle 8 berechnete Fläche bezieht sich auf eine hinsichtlich des Stromertrags optimal ausgenutzte Solarparkfläche (Ost-West-Ausrichtung der Module) ohne externe Verschattung. Sobald weniger optimale Rahmenbedingungen vorliegen erhöht sich die notwendige Gesamtfläche entsprechend.

## WINDKRAFT AN LAND (ONSHORE)

Die verbleibenden zwei Dritten sollen im Modell durch Windkraft bereitgestellt werden. Davon jeweils hälftig Onshore und Offshore in Nord- und Ostsee. Die Erzeugungs-Verteilung von On- und Offshore-Windkraft verringert den Speicherbedarf vermutlich etwas.

Somit müssen 554 GWh Windenergie onshore erzeugt werden.

Zum Vergleich: Die 16 Windkraftanlagen im Harthäuser Wald erzeugen ca. 92 GWh Strom pro Jahr (Stuttgarter Zeitung). Für dieses Ziel wären also 6 Windparks dieser Größe notwendig.

## WINDKRAFT AUF SEE

Auch offshore müssen im Modell weitere 554 GWh Strom erzeugt werden.

Zum Vergleich: Deutsche Offshore-Windparks haben 2018 zusammen 18.000 GWh Strom produziert. Dafür waren rund 1.250 Anlagen notwendig. Für die Ziel-Erzeugung des Modells wären also rund 38 durchschnittliche Offshore-Anlagen notwendig.

## WASSERKRAFT

Für die Erzeugung aus Wasserkraft in Heilbronn besteht kein Ausbau-Potential. Im Jahr 2018 wurden 30 GWh mit Wasserkraft erzeugt.

Für die Wasserkraft-Produktion wurden keine 15-Minuten-Erzeugungsdaten gefunden. Da die Wasserkraft mit weniger als 2% am berechneten künftigen Strombedarf nur einen sehr geringen Anteil hat wurde diese Menge nicht mit in die Simulation einbezogen. Als eine von vielen Unschärfen des Modells wird dies in Kauf genommen.

## ERZEUGUNGS-SUMMEN

	Leistung	Erzeugung
Photovoltaik: Dach	295 MWp	283 GWh
Photovoltaik: Park	300 MWp	288 GWh
Windkraft: Onshore		554 GWh
Windkraft: Offshore		554 GWh
Summe		1.679 GWh

TABELLE 9

Für Windkraft wird keine Anlagenleistung angegeben, da diese sehr stark vom Anlagenstandort abhängig ist.

## SPEICHERUNG

(Thielmann, et al., 2015)

Das Portfolio an Energiespeichertechnologien ist durchaus diversifiziert und existierende sowie neue Technologien mit hohem Entwicklungspotenzial weisen unterschiedliche Vorteile je nach Speicherklasse und Anwendungszweck auf.

Das breite Portfolio stationärer Energiespeichertechnologien wird typischerweise anhand der Energiespeichergröße (in Wh) und -leistung (in W) sowie der typischen Lade-/Entladedauer (in Zeit) klassifiziert. Für stationäre Energiespeicher ist eine große Breite relevanter Speichergrößenklassen zu unterscheiden, welche von kleinen (z. B. dezentralen)

Energiespeichern unterhalb 10 kWh bis zu sehr großen (und zentralen) Energiespeichern jenseits 1 GWh reichen können. Darüber hinaus sind sie nach ihrer Lade-/Entladedauer z. B. im Stunden-Bereich als Pufferlösungen (für den Stand-by-Betrieb) bis hin zu Langzeitspeichern weit jenseits von einer Woche zu unterscheiden

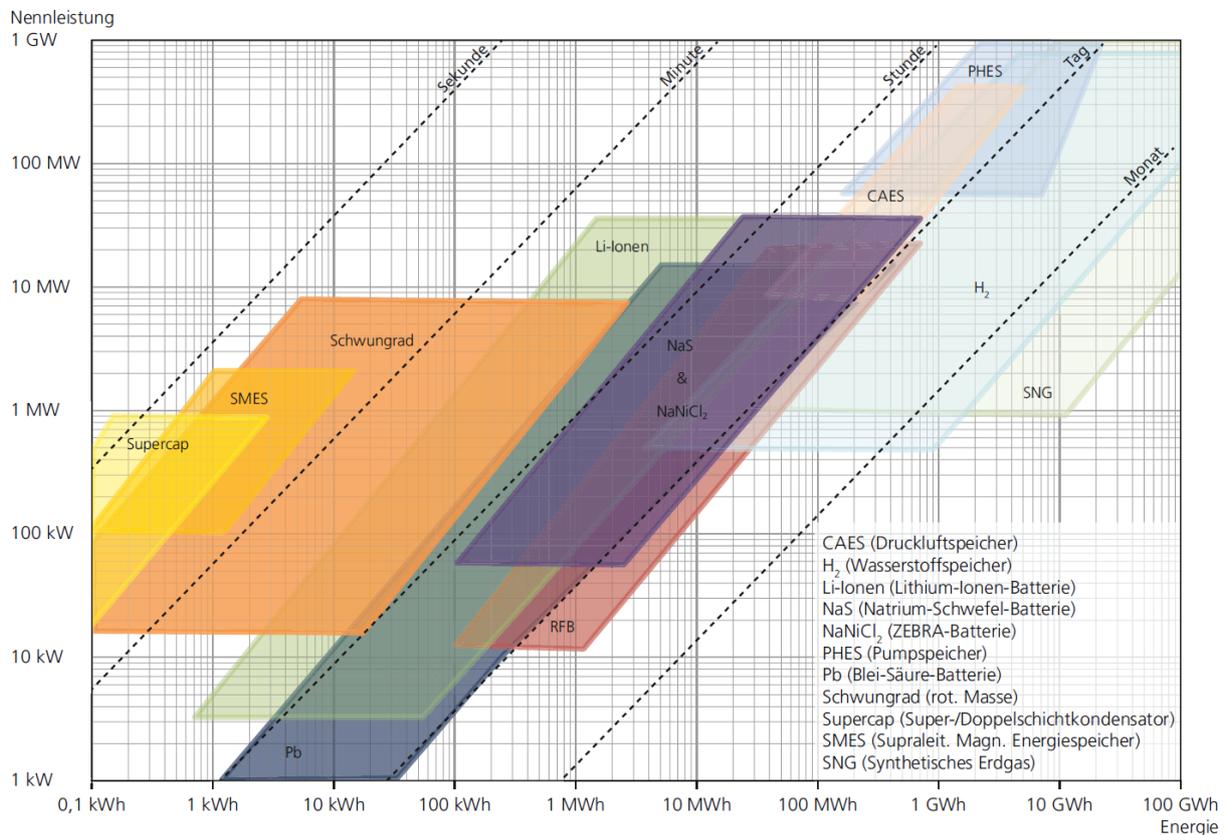


ABBILDUNG 10 (THIELMANN, ET AL., 2015)

Für dieses Modell wurde lediglich in zwei Speicher-Typen unterschieden: Speicher für eher kurzfristige Speicherung mit geringerer Speicherkapazität und Nennleistung (Akku-Speicher, in Abbildung 10 in der Mitte dargestellt) sowie Speicherung mit hoher Speicherkapazität und Nennleistung (Gasförmige oder flüssige langfristige Speichertechnologien, in Abbildung 10 oben rechts dargestellt). Das System für die langfristige Speicherung hat somit zwei Bestandteile, die Herstellung des Mediums (gasförmig oder flüssig) und die Rückverstromung des Mediums. Beide Schritte sind mit viel höheren Verlusten im Vergleich zur kurzfristigen Akku-Speicherung verbunden, Leistung und Kapazität ist aber wesentlich günstiger bereitzustellen als bei Akku-Speichern.

Die Strom-Erzeugung wird im Modell in drei Stufen verwendet:

- Direkter Stromverbrauch
- In Akku-Speicher geladen (bei verfügbarer Leistung und freier Kapazität)
- Für die Erzeugung von synthetischem Gas in der P2G-Anlage verwendet
- Für die Erzeugung von Synthetischem Gas oder Treibstoff in der P2G/P2L-Anlage für den Mobilitätssektor.

- Abregelung der Erzeugung (oder Export)

Wenn der Verbrauch die Erzeugung übersteigt wird gespeicherte Energie in zwei Stufen abgerufen:

- Aus dem Akku-Speicher
- Durch ein Gaskraftwerk aus dem zuvor synthetisch erzeugten Gas

	<b>Leistung</b>	<b>Kapazität</b>	<b>Nutzung</b>
Akku-Speicher	20 MW	50 MWh Strom	293 Zyklen
P2G Gas-Erzeugung und-Speicherung	145 MW	98 GWh Gas	474 GWh Gas-Erzeugung 3.270 Vollaststunden
P2G Gaskraftwerk	258 MW		213 GWh Strom-Produktion 825 Vollaststunden
P2G/P2L für Mobilität*	180 MW		153 GWh Stromverb. 850 Vollaststunden
Abregelung / Überschuss Erzeugung		1%	9 GWh

TABELLE 10

## ENERGIEKOSTEN, STROMPREIS UND INVESTITIONEN

Zunächst werden im Folgenden überschlägig für die im Modell verwendeten Erzeugungsanlagen und Speicher die Betriebskosten, Investitionen und ROI-Zeiten (Return on Invest) dargestellt.

	GWh p.a.	Euro pro kWh Strom	Kosten Mio. Euro p.a.	Investition Mio. Euro	ROI*
<b>ERZEUGUNG:</b>					
PV Dach	283	0,10	28	354	12,5
PV Park	288	0,05	14	150	10,4
Wind	1.108	0,06	66	488	7,3
<b>SPEICHER (Erzeugungskosten ohne Brennstoffkosten, vgl. Berechnung Strompreis):</b>					
P2G-Anlage	474	0,05	24	258	10,9
Gaskraftwerk	213	0,04	9	116	13,6
Akku	15	0,17	2,5	25	10,0
<b>Summe</b>			<b>143</b>	<b>1.392</b>	<b>9,7</b>

**TABELLE 11**

Der ROI wird hier ohne Betriebs- und Kapitalkosten ausgewiesen. Bei Gesamtkapitalkosten von momentan deutlich unter 5% und einer Anlagennutzungszeit von 30 und mehr Jahren erscheinen die Anlagen für Investoren sehr lohnenswert.

Diese Kosten müssen nun auf den Teil des Stromverbrauchs verteilt werden, der von Verbrauchern genutzt wird. Daher sind bei den Speichern keine Brennstoffkosten enthalten, da diese den Verbrauchern entsprechend ihres Stromverbrauchs zugerechnet werden.

	GWh p.a.	Euro pro kWh	Kosten Mio. Euro p.a.
<b>Stromverbrauch IST</b>	698	0,11	80
<b>Strom für Mobilität</b>	143	0,11	16
<b>Strom für Wärme</b>	415	0,11*	48
<b>Summe</b>	<b>1.256</b>	<b>0,11</b>	<b>143</b>

**TABELLE 12**

Hinweise:

- Strompreis: Der Aktuelle Strompreis für Haushalte liegt aktuell inklusive aller Netzgebühren, Abgaben, Steuern und Umlagen bei rund 0,30€ pro kWh. In der Zusammensetzung des Strompreises macht der Strompreis etwa 0,05 € und die EEG-Umlage aktuell 0,064€ aus. In den berechneten 0,11 € sind sämtliche Kosten für die Erneuerbaren Energien und deren Speicherung bereits enthalten. Der Strompreis bliebe also gleich. Nicht berücksichtigt ist

darin der Netzausbau, da über dessen Ausmaß mit der vorliegenden Simulation keine Aussage getroffen werden kann.

- Wärmepreis: Bei einer JAZ (Jahresarbeitszahl) von drei entspricht dies einem Wärmepreis von 0,038 € pro kWh Wärme. Aktuell liegt der Preis pro kWh Gas bei rund 4,5 Cent. Auf den Strom für die Bereitstellung von Wärme sollten also nur sehr wenige Netzgebühren, Abgaben, Steuern und Umlagen erhoben werden um keinen höheren Wärmepreis zu erhalten.
- Synthetische Kraftstoffe für den Sektor Mobilität: In der Simulation wird die P2G/P2L Anlage als letzter Verbraucher zugeschaltet. Dadurch muss diese Anlage innerhalb von relativ wenigen Vollaststunden die notwendige Menge synthetischer Kraftstoffe erzeugen. Im Gegenzug wird hier unterstellt dass diese nur zum Einsatz kommt wenn der Strompreis an einem entsprechenden Markt bei Null oder weniger liegt. Dieser Teil des Mobilitäts-Sektor beteiligt sich also nicht an den Kosten für die Erzeugung der verbrauchten Energie. Für eine solche Anlage mit einer Leistung von 180 MW ist nach unterschiedlichen Angaben mit Investitionen von rund 180 Millionen Euro zu rechnen. Bei einem Ziel-ROI von 10 Jahren ergibt sich ein Preis von 1,15 € pro Liter synthetischem Diesel (ohne Steuern, Logistik, Betriebs- und Kapitalkosten). Dies zeigt dass es aus wirtschaftlichen Gründen sinnvoll ist wo immer möglich auf Mobilitätslösungen mit Akku oder Leitungen zu setzen.

## UMSETZUNGSDAUER

In diesem Kapitel wird untersucht innerhalb welcher Zeit eine CO<sub>2</sub>-freie Energieversorgung Heilbronn umgesetzt werden kann.

### Sektoren Raumwärme und Prozesswärme

Die Lebensdauer einer Heizungsanlage (Gasheiztherme, Ölheizkessel) liegt bei 15 bis 20 Jahren (Bund Technischer Experten e.V., 2015). Wärmepumpen-Systeme sind am Markt verfügbar. Somit kann dieser Sektor ohne zusätzliche Investitionen innerhalb von **20 Jahren** umgestellt werden.

### Sektor Verkehr

Über 80% der in Deutschland zugelassenen PKW sind jünger als 15 Jahre, 92,7% jünger als 20 Jahre. LKW sind im Schnitt weniger alt: 87% sind hier jünger als 15 Jahre, 93% jünger als 20 Jahre. (Kraftfahrt-Bundesamt, 2019)

Für PKW gibt es ab 2020 von vielen Herstellern eine stark steigende Vielfalt elektrischer Fahrzeugmodelle. In diesem Bereich hat die Umstellung bereits begonnen.

(Stadt Heilbronn, 2019)

Deutlich nach oben geschossen ist zuletzt die Zahl der Autos mit Elektroantrieb. „Deren Zahl ist von 108 Stück auf jetzt 200 angestiegen“, sagt Gollhofer. Das sind 92 E-Autos mehr als vor einem Jahr, das entspricht fast einer Verdopplung.

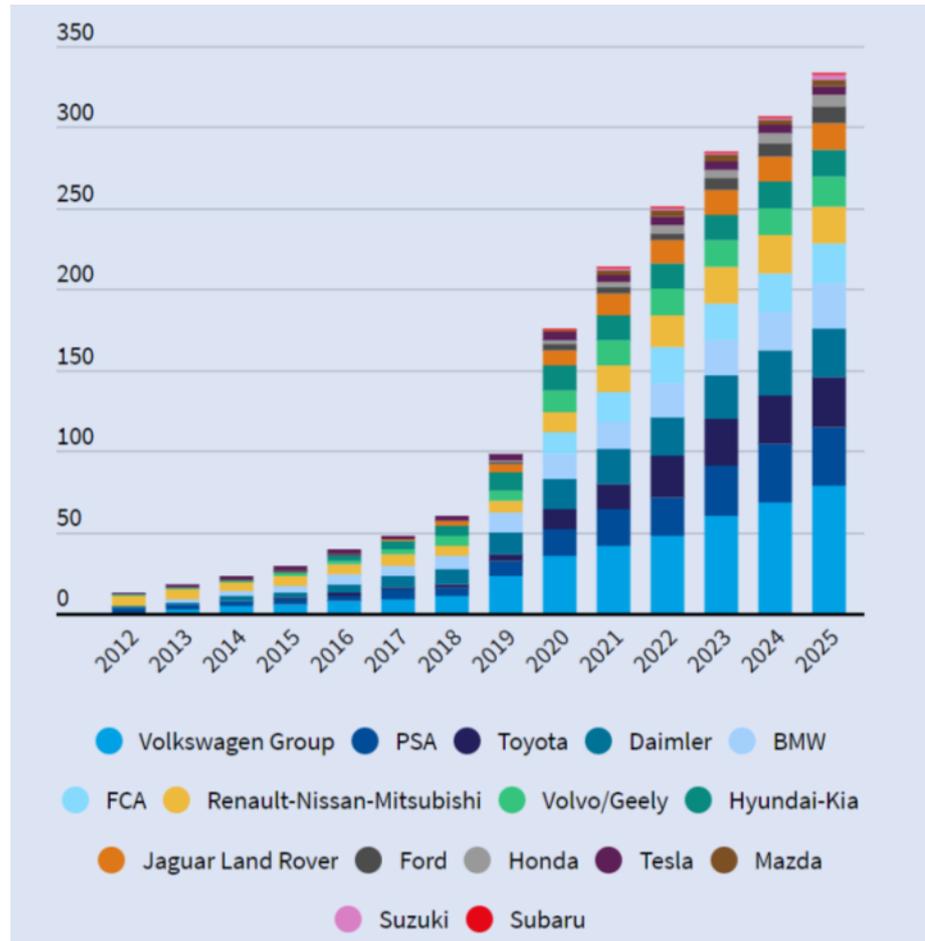


ABBILDUNG 11 (EUROPEAN FEDERATION FOR TRANSPORT AND ENVIRONMENT AISBL, 2019)

(Seba, 2014)

Ab 2025 wird es in keinem Markt mehr wirtschaftlich einen Sinn ergeben, ein neues Benzin-Auto zu kaufen. [...] Im Wesentlichen wird man jedoch 2030 keine Autos mit Verbrennungsmotor mehr bauen. [...] Trotzdem wird mit dem im Jahr 2025 beginnenden Zusammenbruch der Benzin-Auto-Industrie auch der Sekundärmarkt für Autos mit Verbrennungsmotoren kollabieren. Es wird weniger Tankstellen, Werkstätten und Ersatzteihändler geben, um die Besitzer von Autos mit Verbrennungsmotor zu bedienen.

Dies kann den Fahrzeugtausch im Vergleich zur momentanen Bestandsverteilung noch beschleunigen. Die Absatzzahlen neuer Produkte folgen einer S-Kurve. Die zunächst sehr geringen Mengen steigen dabei exponentiell, dies zeigt sich auch an der enormen Steigerung des E-Auto-Fahrzeugbestands in Heilbronn. Daher wird dieser Bereich innerhalb der nächsten **10 bis 15 Jahre** weitgehend umgestellt sein.

Für den LKW-Bereich ist eine Prognose aufgrund des noch nicht begonnenen Markthochlaufs von Elektro-LKW schwierig. Aus der momentanen Entwicklungsgeschwindigkeit der Leistungsdichte der Akkutechnik lässt sich dies nicht vorhersagen, da neue technische Ansätze auch ein sprunghaftes Ansteigen ermöglichen könnten.

Da Elektro-LKW im Vergleich zu Diesel-LKW aufgrund der wesentlich geringeren Treibstoffkosten große wirtschaftliche Vorteile für den Logistiksektor erwarten lassen wird es mit Verfügbarkeit entsprechender Modelle einen sehr schnellen Tausch der Fahrzeuge geben. Die Logistikunternehmen sind andernfalls nicht mehr wettbewerbsfähig. Tritt die Durchsetzung der Elektro-PKW wie beschrieben ein ist es auch fraglich ob nur für die LKW-Flotte ein ausreichend dichtes Tankstellennetz mit der vorgelagerten Prozesskette wirtschaftlich weiter tragfähig wäre.

Für die Durchsetzung synthetischer Kraftstoffe aus erneuerbarem Strom bedarf es entsprechender regulatorischer Rahmenbedingungen (CO<sub>2</sub>-Kosten sowie Entgelte, Umlagen und Steuern auf den Stromverbrauch der P2G/P2L-Anlagen).

P2G/P2L-Anlagen lassen sich innerhalb wenigen Jahren errichten.

Für die Erreichung der Pariser Klimaziele ist ein Markthochlauf und Umstellung des LKW-Bereichs mit einer Verzögerung von etwa 5 Jahren im Vergleich zur unterstellten Entwicklung im PKW-Bereich möglich. Dann jedoch mit einer steileren Wachstumskurve.

Leitungsgebundene Systeme mit Oberleitungen über Autobahnen lassen sich technisch schnell umsetzen. Zu prüfen ist ob dies gesamtwirtschaftlich gegenüber Akku-Elektrischen LKW vorteilhaft ist. Unter Effizienz-Gesichtspunkten hinsichtlich des Stromverbrauchs sind beide Systeme ähnlich.

Eine Verlagerung von wesentlichen Transportvolumen auf die Schiene innerhalb der für die Klimaschutz-Zielerreichung notwendigen Zeit erscheint momentan fraglich. Hinsichtlich des Energieverbrauchs wäre dies effizienter als hier angenommen.

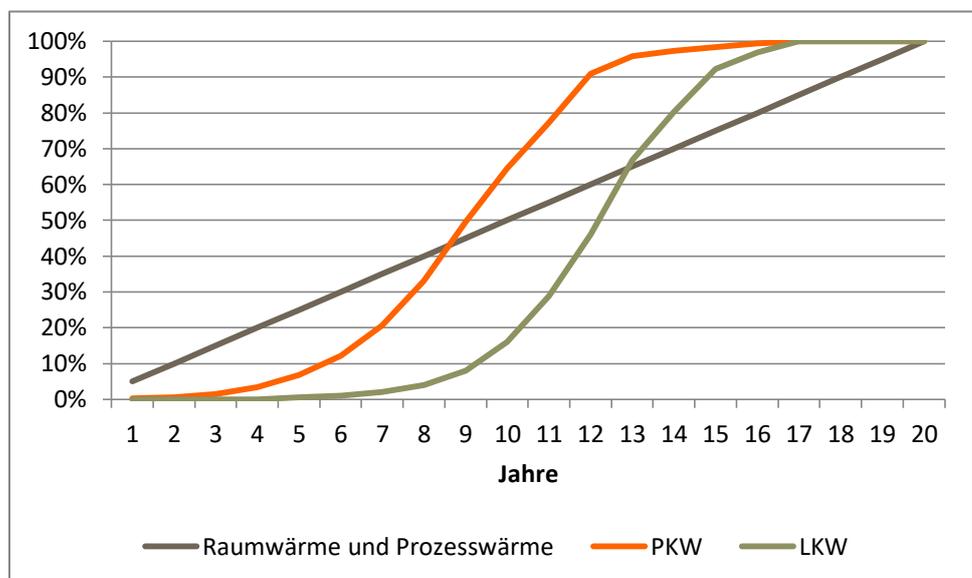


ABBILDUNG 12

## Sektor Strom

- Photovoltaik-Dachflächen  
Die Montage einer Photovoltaik-Dachanlage erfolgt innerhalb von **wenigen Tagen bis zu maximal einem Monat**. Herausforderung für eine schnelle Umsetzung sind die Verfügbarkeit entsprechender Fachbetriebe sowie die Vielzahl der Besitzer der rund 15.000 geeigneten Dachflächen. In den 10 Jahren 2009 bis 2018 wurden in Heilbronn 1.049 Photovoltaik-Anlagen gebaut. Im Spitzen-Jahr 2010 wurden 234 neue Anlagen zugebaut. Dieses Tempo könnte von den Fachbetrieben innerhalb kurzer Zeit wieder erreicht und dann jährlich um 25% gesteigert werden. Es sind Wege zu finden wie die Nachfrage entsprechend gesteigert werden kann.
- Photovoltaik-Solarparks  
Die Montage eines oder mehrerer Solarparks mit 2,87 km<sup>2</sup> ist innerhalb von rund zwei bis drei Monaten möglich. Ein 3,5 Mal größerer Solarpark in Südindien mit 10 Quadratkilometer Größe wurde innerhalb von 8 Monaten errichtet (Newsgreen). Die Genehmigungsphase für Solarparks in Deutschland beträgt 6 bis 9 Monate. Die Umsetzung der Solarparks ist also innerhalb von **einem Jahr** möglich, sofern die notwendigen Flächen zur Verfügung gestellt werden.
- Windkraft an Land  
Von Projektbeginn bis Inbetriebnahme vergehen hier insbesondere aufgrund der komplizierten Genehmigungsphase häufig drei Jahre. Die Errichtung der Anlagen erfolgt dann in deutlich weniger als einem Jahr.
- Windkraft auf See  
Vergleichbar mit Windkraft an Land
- Speicherung  
Große Speicher werden in Containerbauweise in sehr kurzer Zeit aufgestellt. Mit dem Zeitbedarf für die Baugenehmigung ist dies in weniger als einem Jahr realisierbar. Dezentrale Speicher können beispielsweise im Zuge der Installation von Photovoltaik-Anlagen mit aufgestellt werden. Die Speicherung stellt keinen zeitlichen Engpass dar und wird problemlos mit dem Wachstumstempo der Stromerzeugung schritthalten können. (On the economics of electrical storage for variable renewable energy sources, 2018)
- Stromnetze  
Anpassungsbedarf besteht insbesondere im Verteilnetz. Einerseits um die zusätzlich Einspeisung aus Photovoltaik-Dach-Anlagen aufzunehmen, andererseits um die steigende Nachfrage durch Elektroautos und Wärmepumpen zu decken. Da es sich um ein reguliertes Monopol mit Abnahme- und Versorgungszwang handelt sind die Netzbetreiber dazu verpflichtet. Für einzelne Projekte kann dies zu einer Verzögerung von einigen Monaten führen. Insgesamt stellt dies jedoch keinen Engpass da.  
Durch eine Kombination von Photovoltaik-Dach-Anlagen, dezentralen Speichern und intelligenter Ladesteuerung lässt sich der Ausbaubedarf noch deutlich reduzieren oder sogar vermeiden. (Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (BDEW), 2019), (Bundesverband Solarwirtschaft (BSW), 2019)

Der Ausbaubedarf der Übertragungsnetze, inklusive der vieldiskutierten Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragungs-Trassen hängt wesentlich von der regulatorischen Ausgestaltung des Strom-Markt-Designs ab. Momentane Engpässe im Übertragungsnetz sind hauptsächlich darin begründet.

„Speichertechnologien stellen für die Stromwende auf absehbare Zeit keinen Engpass dar; in Zukunft werden zunehmend Herausforderungen und Potenziale der Sektorkopplung analysiert werden müssen.

Die empirische Evidenz legt nahe, dass der Ausbau erneuerbarer Energien auf absehbare Zeit weder vom Netzausbau noch von der Verfügbarkeit von Speichertechnologien eingeschränkt wird. Im Gegenteil ist zu beobachten, dass sich die Rahmenbedingungen für die Erneuerbaren in den vergangenen Jahren so verbessert haben, dass technische Fragen für ein auf 80-100% erneuerbare Energien basierten Stromsystems als gelöst gelten. (Jacobson et al., 2015) “ (Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung (DIW), 2016)

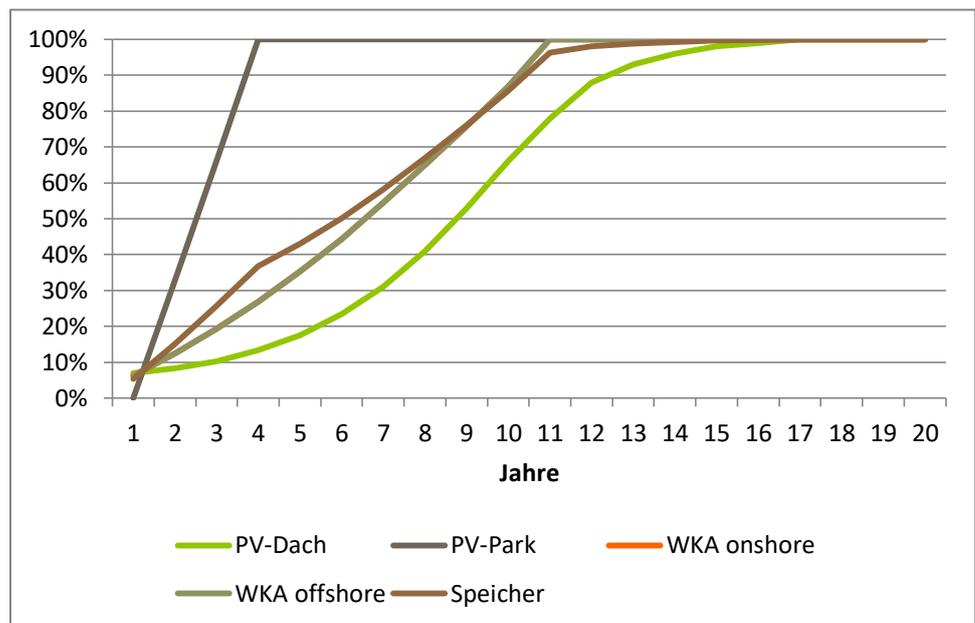


ABBILDUNG 13

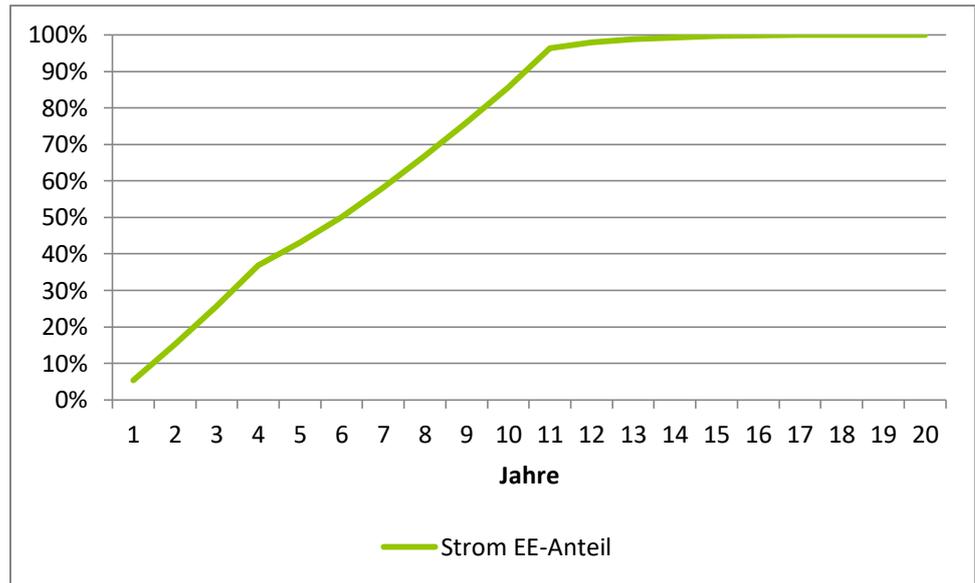


ABBILDUNG 14

Aus der Kombination der Umstellungsgeschwindigkeiten für Erzeugung und Verbrauch ergibt sich folgender CO<sub>2</sub>-Reduktionspfad. Innerhalb von 10 Jahren kann der energiebedingte CO<sub>2</sub>-Ausstoß um 60% reduziert werden, innerhalb von 15 Jahren um 90% und nach 20 Jahren komplett vermieden werden. Angesichts eines Anteils der energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen von 85% an den anthropogenen CO<sub>2</sub>-Emissionen ist dies ein wesentlicher Beitrag zur Erreichung der Pariser Klimaziele.

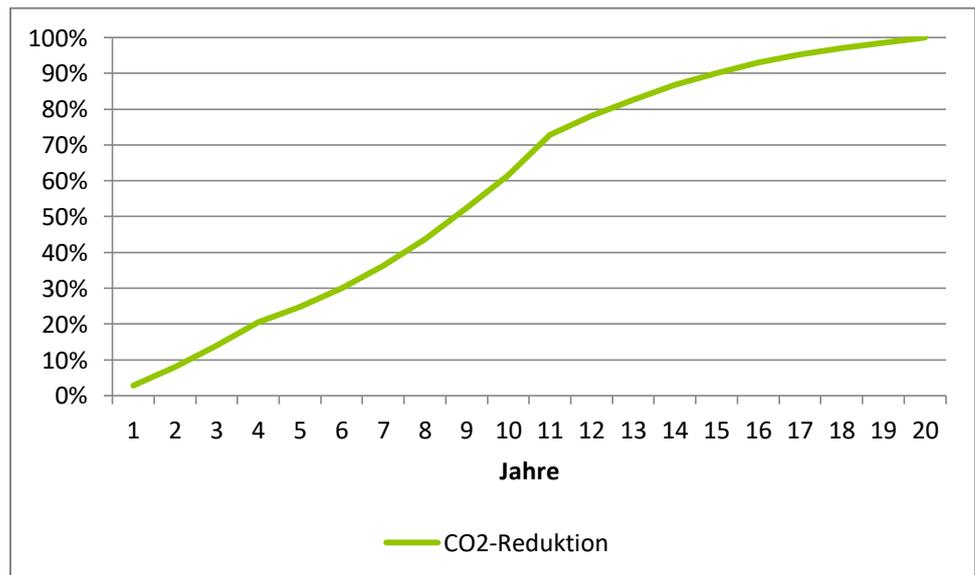


ABBILDUNG 15

## SCHLUSSBEMERKUNG

Dieses Konzept geht nicht von einer Verhaltensänderung der Menschen in Heilbronn aus. Bislang ist nur bei einer kleinen Minderheit erkennbar dass diese dazu bereit wäre. Die Erreichung der Pariser Klimaziele wurde daher unter massivem Einsatz von anderer Technik modelliert. Das bedingt auch einen sehr großen Rohstoffbedarf. Die Gewinnung und der Abbau dieser Rohstoffe sollten möglichst nachhaltig erfolgen. Zu bedenken ist dass auch die Gewinnung der Rohstoffe für unser bestehendes Energiesystem nicht nachhaltig ist. Neben den Emissionen werden die Folgen für Mensch und Umwelt in großen Katastrophen sichtbar, aber auch alltägliche Verschmutzungen und Zerstörungen finden statt. Die für das hier modellierte Energiesystem notwendigen Ressourcen werden demgegenüber nicht verbrannt sondern langfristig genutzt. Anlagen sollten nach Ende ihrer Nutzungszeit recycelt werden.

Die bei der Gewinnung der Rohstoffe und der Herstellung der Anlagen unvermeidbar entstehenden CO<sub>2</sub>-Emissionen werden innerhalb weniger Monate bis Jahre im Betrieb der Anlagen durch die Substitution der alten Energieerzeugung amortisiert.

Am unmittelbarsten sichtbar ist der Flächenbedarf. In unserer Kulturlandschaft muss es jedoch möglich sein für den unmittelbaren Energiebedarf der in ihr lebenden Menschen ausreichend Platz zu schaffen. Alternativ ist eine Verhaltensänderung der in ihr lebenden Menschen notwendig.

## LITERATURVERZEICHNIS

**BMWi. Fassung vom 12.01.2016.** *Energiedaten*. Berlin : Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, Fassung vom 12.01.2016.

**Bund Technischer Experten e.V. 2015.** *Arbeitsblatt der BTE-Arbeitsgruppe: Lebensdauer von Bauteilen, Zeitwerte*. Essen : s.n., 2015.

**Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur. 2018.** *Rechtliche Rahmenbedingungen für ein integriertes Energiekonzept 2050 und die Einbindung von EE-Kraftstoffen*. Berlin : s.n., 2018.

**Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (BDEW). 2019.** Netzbetreiber sind startklar für den Boom der Elektromobilität. [Online] 28. 05 2019. [Zitat vom: 29. 07 2019.] <https://www.bdew.de/presse/presseinformationen/netzbetreiber-sind-startklar-fuer-den-boom-der-elektromobilitaet/>.

**Bundesverband Solarwirtschaft (BSW). 2019.** Solare Heim- und Gewerbespeicher vermeiden Netzausbau für E-Autos. [Online] 04. 02 2019. [Zitat vom: 29. 07 2019.] <https://www.solarwirtschaft.de/presse/pressemitteilungen/pressemitteilungen-im-detail/news/solare-heim-und-gewerbespeicher-vermeiden-netzausbau-fuer-e-autos.html>.

**Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung (DIW). 2016.** *Stromnetze und Speichertechnologien für die Energiewende – Eine Analyse mit Bezug zur Diskussion des EEG 2016*. Berlin : Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung (DIW), 2016. ISBN 978-3-946417-02-6.

**European Federation for Transport and Environment AISBL. 2019.** *Electric surge: Carmakers' electric car plans across Europe 2019-2025*. Brüssel : s.n., 2019.

**IPCC. 2007.** *Climate Change 2007, Working Group I: The Science of Climate Change, Figure 6.10*. 2007.

— **2013.** *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change; FAQ 5.1, Figure 1, 1870 bis 2010*. 2013.

— **2014.** *Klimaänderung 2014: Synthesebericht. Beitrag der Arbeitsgruppen I, II und III zum Fünften Sachstandsbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen (IPCC)*. Genf, Schweiz : s.n., 2014.

— **2018.** *Summary for Policymakers. In: Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels ...* Geneva, Switzerland : World Meteorological Organization, 2018.

**Jacobson, M.Z. / Delucchi, M.A. / Bazouin, G. / Bauer, Z.A.F. / Heavey, C.C. / Fisher, E. / Morris, S.B. / Piekutowski, D.J.Y. / Vencill, T.A. / Yeskoo, T.W. 2015.** 100% clean and renewable wind, water, and sunlight (WWS) all-sector energy roadmaps for the 50 United States. *Energy Environ. Sci.* 2015, Bd. Bd. 8, Nr. 7.

**Kraftfahrt-Bundesamt. 2019.** *Statistische Mitteilungen des Kraftfahrt-Bundesamtes FZ 15.* Flensburg : s.n., 2019.

**Leopoldina, Nationale Akademie der Wissenschaften. 2019.** Klimaziele 2030: Wege zu einer nachhaltigen Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen. [Online] 07 2019. [Zitat vom: 24. 07 2019.]

[https://www.leopoldina.org/uploads/tx\\_leopublication/2019\\_Stellungnahme\\_Klimaziele\\_2030.pdf](https://www.leopoldina.org/uploads/tx_leopublication/2019_Stellungnahme_Klimaziele_2030.pdf).

**LUBW Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg.** *Energieatlas mit Geobasisdaten © Landesamt für Geoinformation und Landentwicklung Baden-Württemberg, www.lgl-bw.de.* Az.: 2851.9-1/19.

**NewsGreen.** Nur acht Monate Bauzeit: So sieht das größte Solarkraftwerk der Welt in Indien aus. [Online] [Zitat vom: 26. 07 2019.]  
<https://newsgreen.net/2018/01/12/nur-acht-monate-bauzeit-so-sieht-das-gruesste-solarkraftwerk-der-welt-in-indien-aus/>.

*On the economics of electrical storage for variable renewable energy sources.*

**Zerrahn, Alexander, Schill, Wolf-Peter und Kemfert, Claudia. 2018.** s.l. : European Economic Review, 2018, Bd. Volume 108. ISSN 0014-2921.

**Paris, Übereinkommen von.** Übereinkommen von Paris. [Online]

[https://www.bmu.de/fileadmin/Daten\\_BMU/Download\\_PDF/Klimaschutz/paris\\_abkommen\\_bf.pdf](https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaschutz/paris_abkommen_bf.pdf).

**Quaschnig, Volker. 2016.** *Sektorkopplung durch die Energiewende.* s.l. : Hochschule für Technik und Wirtschaft HTW Berlin, 2016.

**Scientists for Future, u.A. G. Hagedorn, T. Loew, S. I. Seneviratne, W. Lucht, M.-L. Beck, J. Hesse, R. Knutti, V. Quaschnig, J.-H. Schleimer, L. Mattauch, C. Breyer, H. Hübener, G. Kirchengast, A. Chodura.** The concerns of the young protesters are justified. A statement by Scientists for Future concerning the protests for more climate protection. *GAI*A. 28/2, 79-87.

**Seba, Tony. 2014.** *Saubere Revolution 2030.* Mannheim : MetropolSolar (Übersetzung: 2017), 2014.

**Stadt Heilbronn. 2019.** Fahrzeugflotte wächst, E-Autos ziehen nach. [Online] 9. 7 2019. [Zitat vom: 27. 7 2019.]

<https://www.heilbronn.de/kontrast/rathaus/aktuelles/details/artikel/fahrzeugflotte-waechst-e-autos-ziehen-nach.html>.

**Stuttgarter Zeitung.** Größter Windpark in Baden-Württemberg geht ans Netz. [Online] <https://www.stuttgarter-zeitung.de/inhalt.windenergie-groesster-windpark-in-baden-wuerttemberg-geht-ans-netz.b250f5a1-7a8f-4a63-9b14-2cbd96c79707.html>.

**Thielmann, Axel, et al. 2015.** *Technologie-Roadmap Stationäre Energiespeicher 2030*. Karlsruhe : Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI, 2015.

**Umweltbundesamt . 2019.** *Übersicht zur Entwicklung der energiebedingten Emissionen und Brennstoffeinsätze in Deutschland 1990 – 2017*. Dessau-Roßlau : s.n., 2019.

**Umweltbundesamt. 2019.** Emissionen ausgewählter Treibhausgase in Deutschland nach Kategorien 2007. [Online] 25. 04 2019. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/treibhausgas-emissionen-in-deutschland>.

**VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V. 2019.** *Zellulares Energiesystem – Ein Beitrag zur Konkretisierung des zellularen Ansatzes mit Handlungsempfehlungen*. Frankfurt am Main : s.n., 2019.