



Hochschule Konstanz
Fakultät Architektur
und Gestaltung

Klimaschutzszenarien für die Stadt Radolfzell 2021 - 2050

Impressum

Auftraggeber

Strategische Steuerungsunterstützung

Stadtverwaltung Radolfzell am Bodensee

Carmen Grieshaber

Erika Katopodi (Klimaschutzmanagerin)

Sarah Wilm (Klimaneutralitätsmanagerin)

Marktplatz 2 | 78315 | Radolfzell am Bodensee

Web: www.radolfzell.de

Auftragnehmer

HTWG Konstanz

Fakultät Architektur und Gestaltung

Fachgebiet Energieeffizientes Bauen

Prof. Dr.-Ing. Thomas Stark

Alfred-Wachtel-Straße 8

78462 Konstanz

E-Mail: energie.ag@htwg-konstanz.de

Web: www.energie.ag.htwg-konstanz.de

Autoren

Sven Simon M.A.

unter Mitarbeit von

Prof. Dr.-Ing. Thomas Stark

Stand

10. November 2021

Inhaltsverzeichnis

Impressum	2
Inhaltsverzeichnis	3
Abbildungsverzeichnis	5
Tabellenverzeichnis	7
Zusammenfassung	9
1 Einführung	10
2 Status Quo	11
3 Ziele und Szenarien	12
3.1 Klimaschutzziele.....	12
3.1.1 Klimaschutzziel Baden-Württemberg	12
3.1.2 1,5-Grad-Ziel und globales CO ₂ -Budget	12
3.2 Entwicklungstrends in Radolfzell	13
3.2.1 CO ₂ -Emissionen	13
3.2.2 Entwicklung der Energieautonomie.....	16
3.2.3 Erneuerbare Energiepotenziale	16
3.3 Definition des Szenarios Klimaneutralität	17
3.4 Verschiedene Wege zur Klimaneutralität.....	22
3.4.1 Szenario Klimaneutralität bis 2045.....	22
3.4.2 Szenario Klimaneutralität bis 2040.....	23
3.4.3 Szenario Klimaneutralität bis 2035.....	23
3.4.4 Vergleich mit der 2000-Watt-Gesellschaft.....	24
4 Handlungsfelder Klimaschutz	27
4.1 Entwicklungsplanung und Raumordnung	27
4.1.1 Energieversorgung Neubaugebiete	27
4.1.1.1 Effekte unterschiedlicher Gebäudeenergiestandards in Neubauwohngebieten: Beispiel Gleisdreieck.....	28
4.1.1.2 Geschätztes PV-Potenzial von Neubaugebieten.....	29
4.1.2 Klimaanpassung	32
4.1.2.1 Synergieeffekt Erosionsschutz durch Nutzung von Energiepflanzen.....	32
4.1.2.2 Kühlung und Regenwasserrückhaltung als Synergieeffekte von Photovoltaik-Gründächern	33
4.1.2.3 Mögliche Synergieeffekte von Photovoltaikgründächern auf bestehenden Flachdachflächen im Stadtgebiet	34
4.1.2.4 CO ₂ -Absorption und Kühlwirkung von Baumpflanzungen	37
4.1.2.5 Maßnahmenvorschläge Klimaanpassung	39
4.1.3 Naturschutz	42
4.1.3.1 Synergieeffekte der Energiepflanzennutzung für den Naturschutz.....	42
4.1.3.2 Synergieeffekte von Photovoltaikanlagen für den Naturschutz	42

4.1.4	Landwirtschaft	43
4.1.4.1	Erneuerbare Energiepotenziale	43
4.1.4.2	Potenziale einer Umstellung auf ökologische Wirtschaftsweise im Hinblick auf Klimaanpassung und Klimaschutz.....	44
4.1.4.3	Schätzung der möglichen Kohlenstoffeinlagerung in landwirtschaftlichen Böden	45
4.1.4.4	Mögliche Folgen von Landnutzungsänderungen.....	46
4.1.5	Forstwirtschaft	46
4.1.5.1	Forstwirtschaftliche Klimaschutzmaßnahmen	46
4.2	Gebäude und Anlagen	49
4.2.1	Energieeffizienz Gebäudebestand.....	49
4.2.1.1	Elektrifizierung der Wohngebäudebeheizung.....	49
4.2.1.2	Endenergieverbrauch des Wohnens.....	51
4.2.1.3	Erforderliche Steigerung der Sanierungsquote	51
4.2.1.4	Effekte von Gebäudesanierung und Heizungsaustausch auf die CO ₂ -Emissionen des Wohnens	52
4.2.1.5	Mögliche CO ₂ -Vermeidung durch Nutzung nachhaltiger Dämmstoffe	53
4.3	Versorgung und Entsorgung.....	55
4.3.1	Erneuerbare Energien	55
4.3.1.1	Photovoltaik.....	55
4.3.1.2	Windenergie	57
4.3.1.3	Bioenergie	57
4.3.1.4	Zusammenfassung der lokalen Energiepotenziale.....	58
4.3.1.5	Stromspeicher	60
4.3.2	Mobilität.....	61
4.3.2.1	Umweltverbund.....	61
4.3.2.2	Elektrifizierung der Pkw	65
4.4	Kommunikation und Bildung.....	67
4.4.1	Ernährung.....	67
4.4.1.1	Mögliche Nahrungsautonomie und verbleibende Importabhängigkeit	67
4.4.1.2	Mögliche CO ₂ -Vermeidung durch ökologische Ernährung insgesamt	68
4.4.1.3	Mögliche CO ₂ -Vermeidung durch ökologische Ernährung in Kitas und Schulen	70
4.4.2	Geschätzte Verursacherbilanz einschließlich Konsum.....	70
4.4.2.1	Schätzung der möglichen Effekte eines veränderten Konsumverhaltens.....	71
4.5	Ausblick.....	75
4.5.1	Wichtige Stellschrauben und Ziele.....	75
4.5.2	Weitere Empfehlungen	76
5	Quellen- und Literaturverzeichnis.....	78

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Anteile der Sektoren am Endenergieverbrauch im Status Quo	11
Abbildung 2: Endenergieverbrauch in Radolfzell pro Einwohner im Status Quo nach Sektoren und Energieträgern	11
Abbildung 3: Energiebedingte CO ₂ -Emissionen in Radolfzell: Trend und Ziel bis 2040	15
Abbildung 4: Lokale Energiepotenziale in Radolfzell (ohne Umweltwärme) - Potenzialschätzungen 2011 und 2021 im Vergleich.....	16
Abbildung 5: Endenergieverbrauch in Radolfzell im Szenario Klimaneutralität 2045	22
Abbildung 6: Entwicklung der energiebedingten Treibhausgasemissionen in Radolfzell im Szenario Klimaneutralität 2045.....	22
Abbildung 7: Entwicklung des Energieverbrauchs im Szenario Klimaneutralität 2035	23
Abbildung 8: Entwicklung der energiebedingten Treibhausgasemissionen in Radolfzell im Szenario Klimaneutralität 2035.....	23
Abbildung 9: Vergleich der möglichen Energieautonomiegrade Radolfzells in der 2000-Watt- Gesellschaft und im berechneten Szenario Klimaneutralität.....	24
Abbildung 10: Energieverbrauch im Szenario Klimaneutralität 2035 im Vergleich zur 2000-Watt-Gesellschaft	25
Abbildung 11: Energiebedingte Treibhausgasemissionen in Radolfzell: Szenario Klimaneutralität 2035 im Vergleich zur 2000-Watt-Gesellschaft.....	26
Abbildung 12: Erosionsschutz auf Ackerflächen durch mehrjährige Energiepflanzen im Szenario Klimaneutralität	32
Abbildung 13: CO ₂ -Absorption durch Neupflanzung von Stadtbäumen in Radolfzell ...	37
Abbildung 14: Geschätzte Transpiration neu gepflanzter Stadtbäume an einem Sommertag bei 100 Neupflanzungen pro Jahr.....	38
Abbildung 15: Erneuerbare Energiepotenziale in der Landwirtschaft in Radolfzell.....	43
Abbildung 16: Aktuelle Abwärmenutzung von Biogasanlagen in Radolfzell	44
Abbildung 17: Potenzielle Entwicklung der Wohngebäudebeheizung in Radolfzell bei Fortsetzung des Trends bei der Gebäudehüllensanierung ohne Energieimporte	49
Abbildung 18: Potenzielle Entwicklung der Wohngebäudebeheizung in Radolfzell bei Steigerung der jährlichen Sanierungsrate ohne Energieimporte.....	50
Abbildung 19: Potenzielle Entwicklung der Wohngebäudebeheizung in Radolfzell bei Steigerung der jährlichen Sanierungsrate mit Bioenergieimporten aus Baden-Württemberg.....	50
Abbildung 20: Endenergieverbrauch des Wohnens im Szenario Klimaneutralität 2035	51
Abbildung 21: Geschätzte jährliche Veränderung der Heizungssysteme in Wohngebäuden im Szenario Klimaneutralität 2035 in den Jahren 2021 bis 2035.....	52
Abbildung 22: Treibhausgasemissionen des Sektors Wohnen im Szenario Klimaneutralität 2035.....	52
Abbildung 23: Photovoltaik - Entwicklung der installierten Leistung in Radolfzell im Szenario Klimaneutralität 2035	56
Abbildung 24: Geschätzte Bioenergiepotenziale in Radolfzell pro Einwohner im Jahr 2035 nach Energiequelle	57

Abbildung 25: Erneuerbare Energiepotenziale in Radolfzell pro Einwohner im Jahr 2035	58
Abbildung 26: Erneuerbare Energiepotenziale pro Einwohner 2035 nach Energieträgern.....	58
Abbildung 27: Energieautonomiegrade im Status Quo und im Szenario Klimaneutralität.....	59
Abbildung 28: Erneuerbare Stromproduktion im Szenario Klimaneutralität im Jahresverlauf	59
Abbildung 29: Geschätzter Modal Split - Entwicklung im Szenario Klimaneutralität 2035	63
Abbildung 30: Rad- und Fußweg in Radolfzell pro Einwohner	64
Abbildung 31: Radwegenetzlänge pro Einwohner im Vergleich	64
Abbildung 32: Entwicklung Pkw-Bestandes in Radolfzell pro 1.000 Einwohner im Szenario Klimaneutralität 2035	65
Abbildung 33: Entwicklung der CO ₂ -Emissionen der Pkw im Szenario Klimaneutralität.....	65
Abbildung 34: Entwicklung der öffentlich zugänglichen Ladepunkte im Szenario Klimaneutralität 2035.....	66
Abbildung 35: Flächenbezogene Nahrungsautonomie im Status Quo	67
Abbildung 36: Flächenbezogene Nahrungsautonomie nach Umstieg auf eine ökologische Wirtschaftsweise	68
Abbildung 37: Flächenbezogene Nahrungsautonomie im Szenario "Klimaneutralität"	68
Abbildung 38: CO ₂ -Emissionen der Konsums pro Einwohner bis 2050 im Szenario Klimaneutralität 2035.....	69
Abbildung 39: Geschätzte Verursacherbilanz: CO ₂ -Emissionen pro Einwohner bis 2050 im Szenario Klimaneutralität 2035	71
Abbildung 40: Emissionen von Textil- und Papierkonsum - Szenario	74

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Schätzungen der CO ₂ -Emissionen Radolfzells 2009 – 2017 nach STL BW, KEA BW und Zensus 2011	14
Tabelle 2:	Entwicklung von Wohnfläche und Jahresfahrleistung in Radolfzell pro Einwohner	14
Tabelle 3:	Bezugsjahre und Bevölkerung	17
Tabelle 4:	Sektor Wohnen - Wärmegewinnung und Beheizungsstruktur	17
Tabelle 5:	Sektor Wohnen - Gebäudebeheizungsstruktur (Anteile der Energieträger)	17
Tabelle 6:	Mobilität der Bevölkerung	17
Tabelle 7:	Modal Split im Individualverkehr	18
Tabelle 8:	Motorisierung der Pkw (bezogen auf die Fahrleistung)	18
Tabelle 9:	Motorisierung leichter Nutzfahrzeuge	18
Tabelle 10:	Motorisierung schwerer Nutzfahrzeuge	19
Tabelle 11:	Motorisierung Busse	19
Tabelle 12:	Kapazität und Besetzungsgrad im Busverkehr	19
Tabelle 13:	Energieeinsparung und Elektrifizierung Industrie / Produzierendes Gewerbe	19
Tabelle 14:	Energieeinsparung und Elektrifizierung im Sektor Gewerbe, Handel & Dienstleistung	20
Tabelle 15:	Sektor Landwirtschaft	20
Tabelle 16:	Import erneuerbarer Energien	20
Tabelle 17:	Nutzung lokaler erneuerbarer Energien	21
Tabelle 18:	Bekannte Flächen geplanter Neubaugebiete	27
Tabelle 19:	Angenommene Energiebedarfe neuer Baugebiete pro Quadratmeter Wohnfläche	27
Tabelle 20:	Angenommene Energiebedarfe neuer Baugebiete pro Quadratmeter Bürofläche	28
Tabelle 21:	Geschätzter Strombedarf des Wohnens im Quartier Gleisdreieck bei Standard KfW 40	28
Tabelle 22:	Geschätzter Strombedarf der Büroflächen im Quartier Gleisdreieck	28
Tabelle 23:	Geschätzter Strombedarf des Wohnens im Quartier Gleisdreieck bei Standard KfW 55	29
Tabelle 24:	Potenzielle Energieerträge aus Photovoltaik nach Stadtraumtypen (MWh/ha)	29
Tabelle 25:	Flächenpotenziale neuer Baugebiete	30
Tabelle 26:	Angenommene Anteile der Stadtraumtypen an den Neubaugebieten	30
Tabelle 27:	Angenommene Nutzung der Dachflächen in den Neubau-Wohngebieten	30
Tabelle 28:	Angenommene Nutzung der Flächenpotenziale in neuen Gewerbegebieten	31
Tabelle 29:	Angenommene Nutzung der Dachflächenpotenziale in neuen Gewerbegebieten	31
Tabelle 30:	Zusammenfassung der geschätzten Ertragspotenziale geplanter Neubaugebiete	31
Tabelle 31:	Angenommene Nutzung der Flachdachflächen des Gebäudebestandes im Szenario Klimaneutralität	34

Tabelle 32:	Stromerzeugungspotenzial der Flachdachflächen des Gebäudebestandes im Szenario Klimaneutralität	34
Tabelle 33:	Stromerzeugungspotenzial der Flachdachflächen des Gebäudebestandes pro Einwohner im Jahr 2035 (Szenario Klimaneutralität).....	34
Tabelle 34:	Mögliches Verdunstungspotenzial der Begrünung von bestehenden Flachdächern.....	35
Tabelle 35:	Erreichtes Wasserspeichervolumen durch angenommene Begrünungen von Flachdachflächen im Gebäudebestand.....	35
Tabelle 36:	Maßnahmenvorschläge zum Schutz vor Hitze und Dürren	39
Tabelle 37:	Maßnahmenvorschläge zu Wasserhaushalt und Wasserkreisläufen	40
Tabelle 38:	Maßnahmenvorschläge zum Schutz vor Sturzfluten infolge von Starkregenereignissen.....	40
Tabelle 39:	Maßnahmenvorschläge zum Schutz vor Sturmereignissen	41
Tabelle 40:	C-Sequestrierungsraten verschiedener Maßnahmen zum Humusaufbau und mögliche CO ₂ -Absorption.....	45
Tabelle 41:	Geschätztes CO ₂ -Absorptionspotenzial des Humusaufbaus auf Ackerflächen in Radolfzell	45
Tabelle 42:	CO ₂ -Absorptionspotenziale von Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen am Beispiel von Hanfdämmstoffen.	54
Tabelle 43:	Jährlicher Zubau der Photovoltaik im Szenario Klimaneutralität 2035...56	
Tabelle 44:	Angenommene Veränderung des Modal Splits 2017 - 2035	62
Tabelle 45:	Pkw Bestand in Radolfzell und im Kreis Konstanz	73

Zusammenfassung

Die Bundesregierung hat beschlossen, die Energieversorgung in Deutschland bis zum Jahr 2045 klimaneutral zu organisieren. In Baden-Württemberg hat die Landesregierung sich das Ziel gesetzt, Klimaneutralität bereits im Jahr 2040 zu erreichen. Bis dahin steht ausgehend vom 1,5-Grad Ziel des Pariser Klimaabkommens aus dem Jahr 2015 noch ein Budget von ca. 40 Tonnen CO₂-Äquivalent pro Person zur Verfügung. Um dieses einzuhalten muss in kurzer Zeit ein großer Teil der heutigen CO₂-Emissionen vermieden werden, wobei der Reduktionspfad nicht unbedingt linear verlaufen sollte, sondern einfach vermeidbare Emissionen möglichst früh vermieden werden sollten, um einen Zeitpuffer für jene Maßnahmen zu erhalten, die mehr Zeit erfordern. Bei einem linearen Reduktionspfad wird das Budget des 1,5-Grad-Ziel auch dann nicht eingehalten, wenn die Energieversorgung bereits fünf Jahre vor dem Ziel der Landesregierung im Jahr 2035 klimaneutral wird: Wird die Klimaneutralität im Jahr 2035 erreicht, summieren sich allein die lokalen energiebedingten Treibhausgasemissionen Radolfzells zwischen 2022 und 2035 noch auf 42 t CO₂-Äquivalent pro Person und Jahr. Damit lägen die Treibhausgasemissionen in Radolfzell auch ohne die nicht energiebedingten Emissionen noch knapp über dem verbleibenden Budget des 1,5-Grad-Ziels. Die energiebedingten Treibhausgasemissionen tragen in Deutschland laut Umweltbundesamt (2021) ca. 85 Prozent zu den Gesamtemissionen bei. Einsparungen, die in kurzer Zeit erreicht werden können, sind vor allem im Sektor Verkehr sowie im Bereich von Ernährung und Landwirtschaft möglich. Auch ein erheblicher Teil der bestehenden Gebäude könnte und sollte mit Blick auf das 1,5-Grad-Ziel frühzeitig auf Wärmepumpen umgestellt werden.

Dabei ist zu bedenken, dass neben den lokalen Emissionen Radolfzells ein guter Teil der durch Radolfzell verursachten Emissionen außerhalb der eigenen Stadtgrenzen erfolgt, wie etwa Emissionen des Straßenbaus oder der Nahrungsmittelproduktion. In dieser Hinsicht bieten vor allem eine Ernährungsumstellung auf Basis gesundheitlicher Kriterien, die Minimierung der Lebensmittelverschwendung und eine beschleunigte Umstellung auf eine Kreislaufwirtschaft mit langlebigen und reparaturgeeigneten Produkten erhebliche Reduktionspotenziale, die sich zwar nur teilweise direkt auf die lokalen Emissionen auswirken, aber von entscheidender Bedeutung für die verursacherbezogene Gesamtbilanz sind. Dies wird etwa mit Blick auf die beispielhaft betrachteten Konsumgüter Pkw und Textilien deutlich, die durchaus längere Nutzungsdauern ermöglichen als heute üblich sind.

Um die Ziele des Pariser Klimaabkommens zu erfüllen sind zudem Maßnahmen zur CO₂-Kompensation erforderlich. Dazu bieten sich auch auf lokaler Ebene einige Potenziale, die jedoch nicht überschätzt werden sollten, da sie nur wirklich effektiv sein können, wenn das pro Person verbleibende CO₂-Budget nur in möglichst geringem Umfang überschritten wird. Hier ist zu beachten, dass etwa die Pflanzung von Bäumen nicht auf die kommunale CO₂-Bilanz angerechnet werden kann, aber trotzdem sinnvoll ist – insbesondere mit Blick auf die nötige Anpassung an die nicht vermeidbaren Folgen des Klimawandels. In dieser Hinsicht bietet die Begrünung der Siedlungsfläche wichtige Potenziale, Regenwasser zu speichern und Siedlungsflächen im Sommer abzukühlen.

1 Einführung

Anlässlich der Fortschreibung des integrierten Klimaschutzkonzeptes der Stadt Radolfzell sollte anhand der vorliegenden Klimaschutzszenarien untersucht werden, wie Radolfzell seine Energieversorgung auf erneuerbare Energien umstellen und die Ziele des Pariser Klimaabkommens einhalten kann. Um in einer Stadt der Größe Radolfzells möglichst frühzeitig die angestrebte Klimaneutralität zu erreichen, muss eine Vielzahl von Maßnahmen ergriffen werden, die sämtliche Sektoren betreffen, vom Wohnen über den Verkehr, das Gewerbe und die Industrie bis hin zur Land- und Forstwirtschaft.

Das hier berechnete Szenario Klimaneutralität soll die Effekte der technisch machbaren Maßnahmen in diesen Sektoren abbilden und die Gesamtemissionen abschätzen, die sich aus dem Szenario ergeben, je nachdem in welchem Zieljahr die Klimaneutralität erreicht wird.

Ausgangspunkt der Szenarien für die Jahre 2035, 2040 und 2045 ist der heutigen Status Quo des von der Energieagentur Kreis Konstanz ermittelten Endenergieverbrauchs mit den aus ihm resultierenden energiebedingten Treibhausgasemissionen. Die Berechnungen des Status Quo durch die Energieagentur Kreis Konstanz erfolgten auf Basis der aktuellsten verfügbaren Daten mithilfe von BICO2 BW und beziehen sich daher auf das Jahr 2017¹.

Grundlage der darauf aufbauenden Szenarienberechnung sind die technischen Potenziale der erneuerbaren Energien sowie die erwarteten Potenziale zur Energieeinsparung, die sich beispielsweise aus der energetischen Sanierung des Gebäudebestandes, aus dem Umstieg auf Wärmepumpen oder aus der Nutzung von Elektrofahrzeugen ergeben.

Die Ergebnisse der Szenarien zeigen auf, wie sich das Ausschöpfen dieser Potenziale auf den möglichen Energieautonomiegrad der Stadt Radolfzell und ihre CO₂-Bilanz auswirken könnte. Dabei wurden Verluste durch die Produktion von Wasserstoff für einen Teil der Nutzfahrzeuge oder Netzverluste von Wärmenetzen soweit möglich berücksichtigt. Bei einer umfangreicheren Wasserstoffnutzung (z. B. zur saisonalen Speicherung lokal erzeugten Stroms) oder einem Einsatz von synthetischen Treibstoffen können die Energieautonomiegrade deutlich geringer ausfallen als in den hier berechneten Szenarien.

Die vorliegenden Szenarien sind daher als Diskussionsgrundlage zu verstehen, anhand derer mögliche Zielpfade für die Stadt Radolfzell entwickelt werden können, für die auch der kommunale Wärmeplan der Stadt Radolfzell eine wichtige Grundlage liefern wird.

¹ In einzelnen Bereichen liegen aktuellere Daten vor, die jedoch für eine Gesamtbilanz eines der folgenden Jahre noch nicht ausreichen.

2 Status Quo

Im Jahr 2017 betrug der geschätzte Endenergieverbrauch einschließlich Landwirtschaft ohne Gewächshäuser rund **19,2 MWh** pro Einwohner (Energieagentur Kreis Konstanz, 2021, eigene Berechnungen). Davon entfiel mit 38 Prozent der mit Abstand größte Anteil auf den Sektor Wohnen. Es folgten der Sektor Verkehr mit 26 Prozent und der Sektor Gewerbe, Handel, Dienstleistung (GHD) einschließlich öffentlicher Liegenschaften mit 19 Prozent vor dem Sektor Industrie mit 16 Prozent. Auf die Landwirtschaft entfiel nur 1 Prozent.

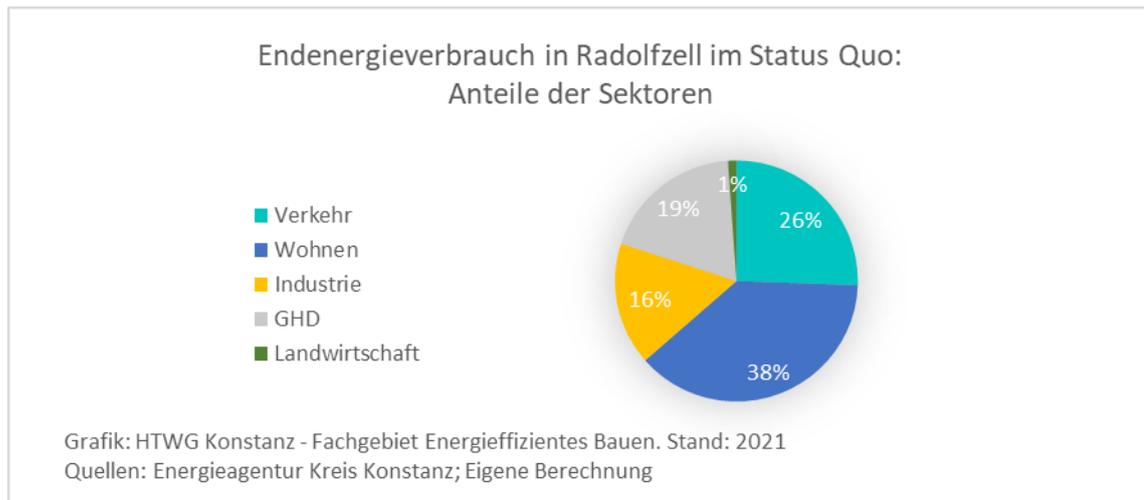


Abbildung 1: Anteile der Sektoren am Endenergieverbrauch im Status Quo

In Abbildung 2 ist der geschätzte Energieverbrauch der Sektoren pro Einwohner nach Energieträgern dargestellt. Insgesamt ergaben sich daraus energiebedingte Emissionen von **6,2 t CO₂-Äquivalent** pro Einwohner.

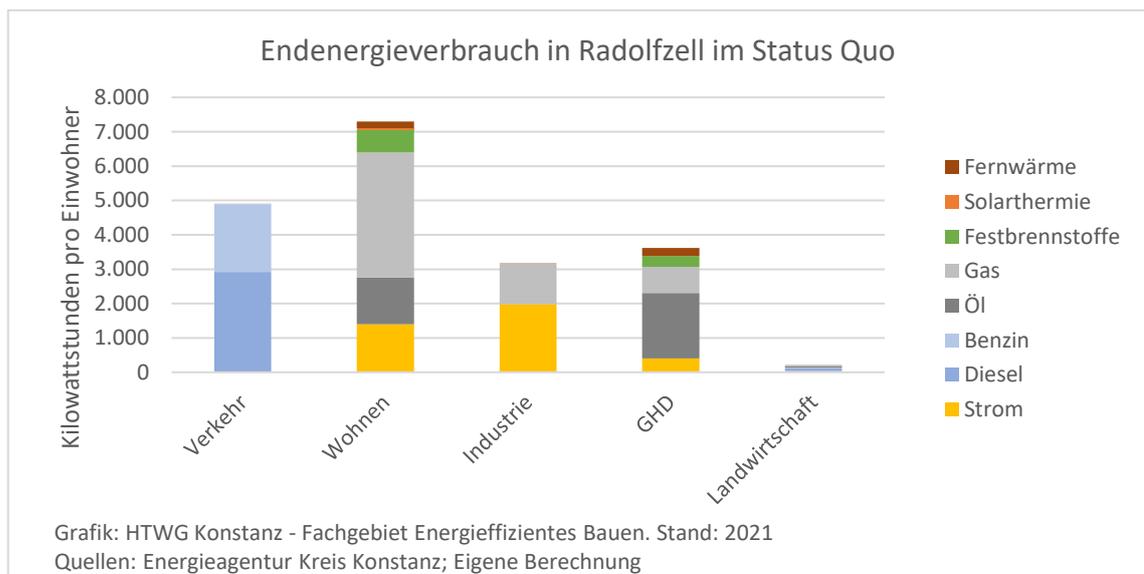


Abbildung 2: Endenergieverbrauch in Radolfzell pro Einwohner im Status Quo nach Sektoren und Energieträgern

3 Ziele und Szenarien

3.1 Klimaschutzziele

3.1.1 Klimaschutzziel Baden-Württemberg

Infolge der Novelle des Klimaschutzgesetzes Baden-Württemberg aus dem Jahr 2021 soll das Klimaschutzgesetz „nicht mehr nur eine ambitionierte Reduzierung von Treibhausgasemissionen bezwecken, sondern auf die Herbeiführung von Klimaneutralität im Land gerichtet sein. Als langfristiges Ziel löst die Netto-Treibhausgasneutralität bis zum Jahr 2040 aus diesem Grund das seither bestehende Reduktionsziel von 90 Prozent bis zum Jahr 2050 ab“ (Landtag von Baden-Württemberg, 2021a). Das neue Ziel der Klimaneutralität im Jahr 2040 wurde mit Gesetzesbeschluss des Landtags „Gesetz zur Änderung des Klimaschutzgesetzes Baden-Württemberg“ vom 6. Oktober 2021 festgelegt. (Landtag von Baden-Württemberg, 2021)

3.1.2 1,5-Grad-Ziel und globales CO₂-Budget

Mit dem Pariser Klimaabkommen der Klimakonferenz der Vereinten Nationen aus dem Jahr 2015 wurde beschlossen, die globale Erwärmung deutlich unter 2,0°C im Vergleich zum vorindustriellen Niveau zu halten und möglichst auf 1,5°C zu begrenzen. Die Abschätzung des verbleibenden CO₂-Budget wurde durch den IPCC zuletzt im Sommer 2021 mit der Vorlage des ersten Teils seines sechsten Sachstandsberichts aktualisiert. Demnach können, gerechnet ab Anfang 2020, noch 400 Gigatonnen (Gt) CO₂ in die Atmosphäre abgegeben werden, um das 1,5-Grad-Ziel nicht zu verfehlen. Bei 7,8 Mio. Menschen entspricht dies einem Budget von 51,3 t pro Person. Bis zum Oktober 2021 sind aktuellen Schätzungen zufolge bereits 74 Gigatonnen des Gesamtbudgets verbraucht, sodass ab Oktober 2021 noch 326 Gigatonnen emittiert werden können (Mercator Research Institute on Global Commons and Climate Change (MCC) gGmbH, 2021). Bei einer Weltbevölkerung von 7,9 Mrd. Menschen entspricht dies einem verbleibenden Budget von 41,3 Tonnen CO₂-Äquivalent pro Person. Pro Monat wurden also in den vergangenen 22 Monaten rund 0,45 t pro Person emittiert. Ende des Jahres 2021 dürfte demnach geschätzt noch ein Budget von 40,4 t CO₂-Äq./Person vorhanden sein.

Für Deutschland wurden Emissionen in Höhe von knapp 810 Millionen Tonnen CO₂ im Jahr 2019 berichtet (Umweltbundesamt Deutschland, 2021). Bei 83,2 Millionen Einwohnern entspricht dies ca. 9,84 t CO₂-Äquivalent pro Person. Im Jahr 2011 betrug die Emissionen 917 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalent (Statista, 2021e). Bei einer Bevölkerung von ca. 80,3 Millionen Einwohnern (nach Zensus 2011) entsprach dies ca. 11,42 CO₂-Äquivalent pro Person. Das bedeutet einen Rückgang um 1,58 t pro Person und Jahr, was über 8 Jahre eine jährliche Reduktion um 0,2 t pro Person ergibt. Im Jahr 2020 lagen die Emissionen aufgrund der Corona-Pandemie mit 739 Mio. Tonnen vorübergehend unterhalb der zu erwartenden Menge, weshalb Deutschland im Jahr 2021 vor dem höchsten Anstieg der Treibhausgasemissionen seit 1990 steht: „Berechnungen von Agora Energiewende zeigen, dass die Treibhausgasemissionen von Deutschland 2021

gegenüber dem Vorjahr voraussichtlich um rund 47 Millionen Tonnen CO₂ ansteigen“ (Agora Energiewende, 2021). Bei einer Bevölkerung von 83 Millionen wären somit 2020 und 2021 bereits 18,37 t des ab 2020 pro Person verbliebenen CO₂-Budgets des 1,5°-Ziels aufgebraucht, sodass zu Beginn des Jahres 2022 eigentlich nur noch ein Budget von maximal 32,9 t CO₂-Äq. pro Person verbleiben dürfte. Setzt sich der Trend der Jahre 2011 – 2019 nun wieder weiter fort, würden die Emissionen ausgehend von 9,45 t CO₂/EW im Jahr 2021 jährlich um 0,2 t/Einwohner sinken. Damit wäre auch das global ab Anfang 2022 verbleibende Budget von ca. 40 t CO₂ pro Einwohner bereits im Laufe des Jahres 2025 aufgebraucht. Dabei ist zu bedenken, dass Deutschland schon zuvor kontinuierlich größere Anteile des Budgets aufgebraucht hat als dem Land pro Person zustehen. Die jährliche Absenkung muss daher ab dem Jahr 2022 deutlich schneller erfolgen als bisher, wenn das rechnerisch verbleibende Budget für Deutschland ausreichen soll. Umgerechnet auf das Ziel der Vereinten Nationen, bis 2050 Klimaneutralität zu erreichen, stehen weltweit ca. 40 Tonnen Budget für 29 Jahre zur Verfügung, was im Schnitt 1,4 t pro Person und Jahr entspricht. Ungeachtet der Emissionen, die Deutschland im Ausland durch Reisen oder den Konsum von Importwaren verursacht, müsste Deutschland seine Emissionen somit im Durchschnitt um den Faktor 6,2 reduzieren.

3.2 Entwicklungstrends in Radolfzell

3.2.1 CO₂-Emissionen

Im Jahr 2010 wurden die Treibhausgasemissionen, die in Radolfzell im Jahr 2009 freigesetzt wurden, auf 8,48 t CO₂-Äq./Einwohner geschätzt (Stadt Radolfzell, 2011, S. 32). Die durch die Energieagentur Kreis Konstanz mithilfe des Berechnungstools geschätzten Emissionen des Jahres 2017 betragen ergänzt durch die energiebedingten Emissionen der Landwirtschaft rund 6,2 t CO₂-Äq./Einwohner (Energieagentur Kreis Konstanz, 2021, eigene Berechnung). Der Wert von 8,45 t energiebedingten CO₂-Emissionen, der im IKK aus dem Jahr 2011 für das Jahr 2009 angegeben wird, erscheint aus heutiger Sicht zu hoch eingeschätzt, da mit Blick auf die Entwicklung der Wohnfläche², des Verkehrsaufkommens³ (vgl. Tabelle 2) und des Ausbaus der erneuerbaren Energien in Radolfzell wenig für eine Reduktion der Emissionen um 27 Prozent in den Jahren 2009 – 2017 spricht. Dies gilt insbesondere, wenn man diese Differenz im Vergleich zu den Entwicklungen auf Bundes- und Landesebene betrachtet. Der relativ hohe Wert der Schätzung aus dem Jahr 2010 dürfte unter anderem darauf zurückzuführen sein, dass die LUBW ihre Schätzung zum Verbrauch von Heizöl in den Gemeinden ab dem Jahr 2016 erneuert hat, sodass seit diesem Zeitpunkt geringere Heizölverbräuche angenommen werden. Legt man die Emissionen, die auf Landesebene für Radolfzell geschätzt wurden, zu-

² Die Wohnfläche hat zwischen 2011 und 2017 um 6 Prozent zugenommen, woraus sich pro Person eine Zunahme der Wohnfläche um 2 Prozent bis 2017 ergeben dürfte.

³ Die Jahresfahrleistungen der Kfz in Radolfzell haben zwischen 2011 und 2017 um 3 Prozent zugenommen - bei einer gleichzeitigen Stagnation der spezifischen Treibstoffverbräuche im deutschen Pkw-Verkehr pro 100 km Fahrleistung

grunde, so ergibt sich zwischen den Jahren 2009 und 2017 eine Steigerung der absoluten Emissionen um 0,7 Prozent. Setzt man diese Emissionen in Relation zur offiziellen Bevölkerungsstatistik ergeben sich daraus Emissionen von 6,42 t/EW im Jahr 2009 und 6,37 t/EW im Jahr 2017, was einen Rückgang um 0,8 Prozent ergibt (vgl. Tabelle 1). Da jedoch im Jahr 2011 die Bevölkerungszahl durch den Zensus 2011 statistisch korrigiert worden ist, wurde hier versucht, die Bevölkerung des Jahres 2009 auf Basis des Zensus 2011 rückwirkend zu schätzen. Die sich daraus ergebenden Emissionswerte sind in Tabelle 1 mit Sternchen markiert. Nach dieser Schätzung dürften die Emissionen in Radolfzell zwischen 2009 und 2017 um ca. 4,2 Prozent gesunken sein. Wendet man diese Differenz auf die mittels BICO2 BW durchgeführte Schätzung der Energieagentur Kreis Konstanz (ergänzt durch die geschätzten energiebedingten Emissionen der Landwirtschaft) an, ergibt sich für das Jahr 2009 ein rückwirkend geschätzter Wert von 6,47 t CO₂ pro Einwohner.

Tabelle 1: Schätzungen der CO₂-Emissionen Radolfzells 2009 – 2017 nach STL BW, KEA BW und Zensus 2011

Gebiet	Quelle	2009	2010	2011	2013	2015	2016	2017
Land BW	STL BW, 2021		6,31			6,14	6,27	6,25
Radolfzell	KEA BW, 2021	6,42	6,61	6,70	7,04	6,34	6,50	6,37
Radolfzell	Anpassung ¹⁾	6,65*	6,84*	6,70	7,04	6,34	6,50	6,37
Radolfzell	Schätzung ²⁾	6,47	6,65	6,52	6,85	6,17	6,32	6,20

(1) Anpassung der Daten der KEA BW für die Jahre 2009 und 2010 nach Zensus 2011

(2) Rückwirkende Schätzung für die Jahre 2009 bis 2016 anhand der Daten von KEA BW und Zensus 2011 ausgehend von der Erhebung durch die Energieagentur Kreis Konstanz mittels BICO2 BW für das Jahr 2017 ergänzt um den geschätzten Energieverbrauch der Landwirtschaft.

Tabelle 2: Entwicklung von Wohnfläche und Jahresfahrleistung in Radolfzell pro Einwohner

	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Wohnfläche/Einwohner	44,4	44,2	44,5	44,6	44,4	45,0	45,1
Km JFL /Einwohner	6.655	6.618	6.619	6.720	6.760	6.907	6.856

Quelle: Eigene Berechnung nach Datensatz der KEA BW, 2021

Mit knapp 6,2 t/EW betragen die Emissionen Radolfzells 2017 noch das 4,5-fache des Budgets von 1,4 t/EW, das von 2022 bis 2050 jährlich zur Verfügung steht. Berechnungen nach BICO2 BW umfassen allerdings nur die energiebedingten Emissionen der Sektoren Private Haushalte, Gewerbe, Produzierendes Gewerbe, Kommunale Liegenschaften und Verkehr. Der Energieverbrauch der Landwirtschaft ist dabei ebenso außenvor wie die nicht energiebedingten Emissionen, die z. B. durch Landnutzungsänderungen (Grünland zu Ackerland), die Viehhaltung oder andere Emittenten freigesetzt werden. So lagen z. B. keine Daten zu Gewächshäusern vor, die, sofern sie beheizt werden, zwischen 150 und 400 kWh pro Quadratmeter oder mehr verbrauchen können – je nach Energiestandard. Ein Gewächshaus mit einer Fläche von 2 Hektar kann damit den Jahresertrag einer großen Windenergieanlage benötigen und bei Nutzung fossiler Energien einen beachtlichen CO₂-Ausstoß verursachen. Die nicht energiebedingten Emissionen machen in Deutschland etwa 15 Prozent der deutschen Treibhausgasemissionen aus.

In Radolfzell dürften sie absolut zwar einen geringeren Umfang haben, da pro Person unter anderem kleinere land- und forstwirtschaftliche Flächen verfügbar sind als im Bundesdurchschnitt. Dennoch erschweren kaum vermeidbare Anteile der nicht energiebedingten Emissionen das Erreichen der Klimaneutralität zusätzlich und machen Kompensationsmaßnahmen erforderlich.

Der bisherige Rückgang der energiebedingten THG-Emissionen in Radolfzell ist zudem teilweise auf einen verbesserten Emissionsfaktor des Strommixes zurückzuführen. BICO2 BW rechnet für das Jahr 2017 mit 0,554 t CO₂/MWh. Im Jahr 2009 lag der Emissionsfaktor des deutschen Strommixes für den Inlandsverbrauch noch um 8,8 Prozent über dem Wert des Jahres 2017 (Umweltbundesamt Deutschland, 2020, S. 9). In Radolfzell ist der Beitrag lokal erzeugten erneuerbaren Stroms zur Stromversorgung geringer als im Landes- oder Bundesdurchschnitt. Im Jahr 2017 betrug der Anteil der erneuerbaren Energien am Strommix in Deutschland rund 38,5 Prozent. In Baden-Württemberg hatten sie einen Anteil von 27,5 Prozent an der Bruttostromerzeugung (Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft, 2018, S. 6). Damit profitieren Städte auch von Verbesserungen, die außerhalb der eigenen Gemarkung bewirkt wurden, selbst wenn vor Ort wenig oder kein Zubau erneuerbarer Stromerzeugungskapazitäten erfolgt. Um mindestens das von der Landesregierung Baden-Württembergs ausgegebene Ziel der Klimaneutralität im Jahr 2040 zu erreichen, muss die jährliche Reduktion im Vergleich zum bisherigen Trend, wie in Abbildung 3 dargestellt, deutlich erhöht werden.

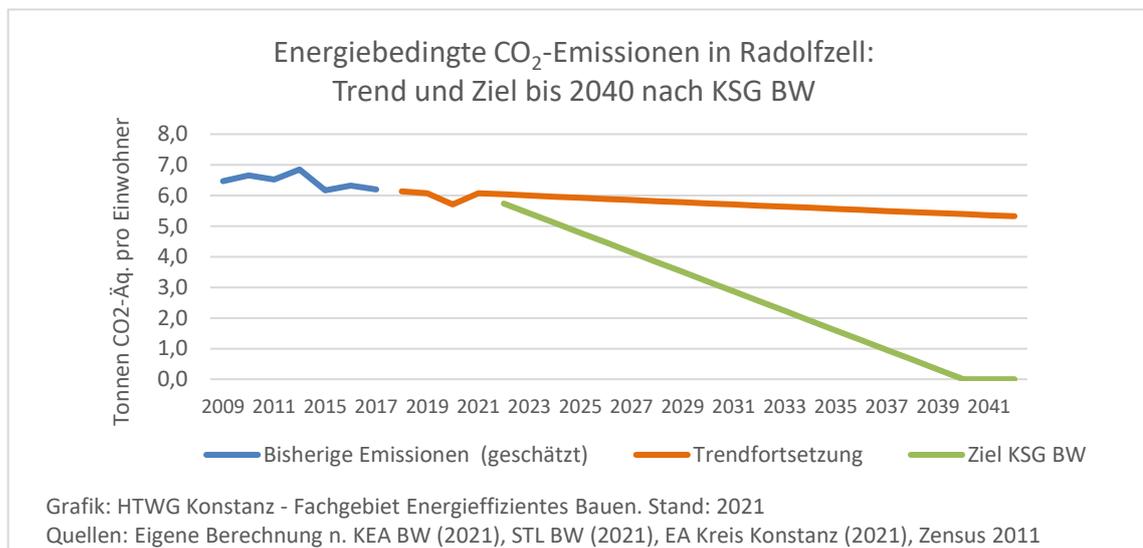


Abbildung 3: Energiebedingte CO₂-Emissionen in Radolfzell: Trend und Ziel bis 2040

Mit Blick auf das 1,5-Grad-Ziel des Pariser Klimaabkommens und die nicht energiebezogenen Emissionen, die in der energiebezogenen CO₂-Bilanz nicht erfasst sind, erscheint eine darüber hinausgehende Intensivierung der Bemühungen und Maßnahmen erforderlich, um die angestrebte Klimaneutralität möglichst früh zu erreichen: **Um das Budget des 1,5-Grad-Ziels einzuhalten, müsste die Klimaneutralität bereits deutlich vor dem Jahr 2040 erreicht werden**, wie in Abschnitt 3.4.3 anhand des Szenario Klimaneutralität bis 2035 ersichtlich wird.

3.2.2 Entwicklung der Energieautonomie

Nach Angaben des Klimaschutzkonzeptes 2011 deckte der lokal produzierte Strom aus erneuerbaren Energien bei der damaligen Erhebung „lediglich rund 3% der Stromnachfrage“ (Stadt Radolfzell, 2011, S. 10). 10 Jahre später wurde für das Jahr 2017 ein Anteil von 9 Prozent berechnet. Der Gesamtautonomiegrad für das Jahr 2017 wurde auf knapp 7 Prozent geschätzt. Das Potenzial für das Jahr 2035 wird auf rund 7,3 MWh pro Einwohner geschätzt. Somit könnten lokale erneuerbare Energien ohne Verluste mehr als 38 Prozent des aktuellen Endenergieverbrauchs Radolfzells pro Einwohner decken. Höhere Autonomiegrade können praktisch nur durch Effizienzsteigerungen, Energieeinsparungen oder eine Vergrößerung der bei dieser Schätzung angenommenen Agriphotovoltaik-fläche erreicht werden.

3.2.3 Erneuerbare Energiepotenziale

Im Rahmen des Klimaschutzkonzeptes aus dem Jahr 2011 wurde für Radolfzell ein lokales erneuerbares Energiepotenzial von 56 GWh erneuerbarer Stromgewinnung aus Biomasse (6,3 GWh/a) und Photovoltaik (49,9 GWh/a) sowie von 110 GWh Wärme aus Solarthermie (81,6 GWh/a), Biomasse (18,82 GWh/a) und Nahwärme (9,6 GWh/a) ermittelt (Stadt Radolfzell, 2011, S. 11/12). Dabei wurde der Solarthermie im Jahr 2011 ein deutlich größerer Anteil zugewiesen als in der vorliegenden Erhebung, in der die Dach- und Fassadenflächenpotenziale vor allem der Photovoltaik zugewiesen wurden, um Strom für die Elektrifizierung des Verkehrs und der Gebäudebeheizung zu gewinnen. Veränderte Rahmenbedingungen und technologische Entwicklungen lassen heute eine stärkere Elektrifizierung der Wärmeversorgung sinnvoll erscheinen. Zudem wurde in der vorliegenden Erhebung mit der Agriphotovoltaik auf 5 Prozent der landwirtschaftlichen Nutzfläche ein neues Potenzial ergänzt. Die Potenziale der Gewinnung von Wärme, Strom- und Abwärme aus Biomasse wurden 2021 etwas geringer eingeschätzt als 2011, unter anderem aufgrund des seit 2011 erfolgten Flächenverbrauchs. Somit fällt das geschätzte Potenzial in der Schätzung 2021 mit 228 GWh/a insgesamt um 37 Prozent größer aus als in der Schätzung aus dem Jahr 2011 (vgl. Abbildung 4).

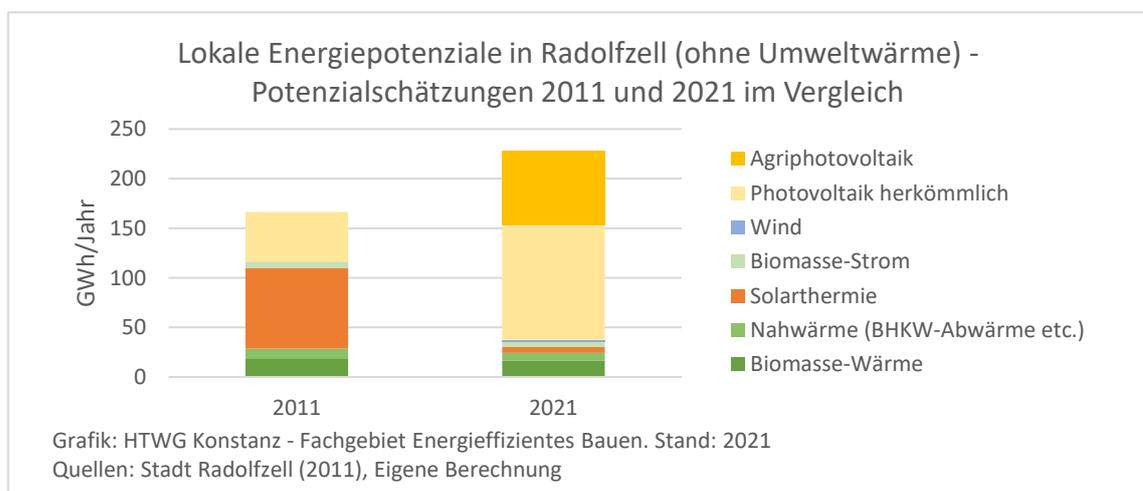


Abbildung 4: Lokale Energiepotenziale in Radolfzell (ohne Umweltwärme) -
Potenzialschätzungen 2011 und 2021 im Vergleich

3.3 Definition des Szenarios Klimaneutralität

Im Folgenden werden die Datengrundlagen und Annahmen für die Berechnung des **Szenarios Klimaneutralität** dargestellt, die zu den berechneten Energieverbräuchen, Autonomiepotenzialen und Treibhausgasemissionen im jeweils gewählten Zieljahr der Klimaneutralität (2035, 2040 oder 2045) führen.

Tabelle 3: Bezugsjahre und Bevölkerung des Status Quo und des Szenarios Klimaneutralität

Kennwert	Status Quo	Szenario	Quellen / Bemerkungen
Gemeinde	Radolfzell		Statistisches Landesamt, Regionaldatenbank, Bevölkerungsvorausschätzung
Bezug	Bestand	Szenario	
Bezugsjahr bzw. Zieljahr	2017	2035, 2040 oder 2045	
Einwohner:	31.064	31.808	

Tabelle 4: Sektor Wohnen - Wärmegewinnung und Beheizungsstruktur

Kennwert	Status Quo	Szenario	Quellen / Bemerkungen
Angestrebte Reduktion des Haushaltsstromverbrauchs:		20%	Stadt Frankfurt am Main, 2015 (in Frankfurt wurden 23 Prozent Einsparung erreicht)
KWK-Anteil der Nutzung von Festbrennstoffen		50%	Annahme
KWK-Anteil der Biogasnutzung		50%	Annahme
Nutzbare Abwärme Insgesamt (kWh)		226	Berechnung nach Abzug von 11 Prozent Netzverlust (basierend auf Eingaben zu KWK-Anteilen).
Für Wohngebäude nutzbarer Abwärmeanteil		70%	Annahme
Für Wohngebäude eingeplanter Festbrennstoffanteil		100%	Annahme
Wärmebedarf pro Quadratmeter (kWh/m ²):	125	56	Mittelwert des erreichbaren Standards (50 – 60 kWh/m ² nach (dena, 2016 S. 3)
Arbeitszahl Wärmepumpen:	3,0	3,5	Annahme

Tabelle 5: Sektor Wohnen - Gebäudebeheizungsstruktur (Anteile der Energieträger)

System	Status Quo*	Szenario	Quellen / Bemerkungen
Öl	23,9%	0,0%	Annahme
Gas (Status Quo: Erdgas, Szenario: Biogas)	60,5%	5,6%	Berechnung (Lokales Potenzial nach Eingabe KWK-Anteil)
Feste Biomasse	7,9%	13,7%	Berechnung (Lokales Potenzial nach Eingabe KWK-Anteil)
Solarthermie	1,0%	7,0%	Verdreifachung der heutigen Kollektorfläche
Wärmepumpen	2,8%	66,8%	Berechnung (Nicht über Biomasse, Solarthermie oder Infrarotheizung gedeckter Anteil)
Strom direkt	0,2%	1,0%	Infrarotheizungen
Nahwärme	3,7%	6,0%	Berechnung (Lokales Potenzial nach Eingabe KWK-Anteil)

* Schätzung nach Energieagentur Kreis Konstanz (2021) und LUBW zit. n. KEA BW (2021)

Tabelle 6: Mobilität der Bevölkerung

Kennwert	Status Quo	Szenario	Quellen / Bemerkungen
Kilometer pro Person und Jahr:	Stand 2017	Wie 2017	
Kilometer pro Pkw und Jahr:	10.929	10.929	Berechnung nach STL BW, 2021

Tabelle 7: Modal Split im Individualverkehr

Fortbewegung/ Verkehrsmittel	Geschätzter Bestand	Zukunftsmix	Quellen / Bemerkungen
Fußverkehr	3,0%	3,0%	Modal Split 2017: dt. Durchschnittswerte (MiD2017). Modal Split im Szenario: Annahmen in Anlehnung an div. Studien
Fahrrad	1,5%	5,0%	
E-Bike	1,5%	11,0%	
Kraftrad	1,0%	1,0%	
Pkw-Fahrer	55,0%	32,0%	
Pkw Mitfahrer	20,0%	21,0%	
Bus	8,8%	17,0%	
Bahn	9,2%	10,0%	
Besetzungsgrad Pkw:	1,48	1,66	

Tabelle 8: Motorisierung der Pkw (bezogen auf die Anteile an der erbrachten Fahrleistung)

Motorisierung	Geschätzter Bestand	Zukunftsmix	Quellen / Bemerkungen
Pkw mit Ottomotor, Gas (Status Quo: Erdgas, 2035:Biogas)	0,5%	2,0%	Status Quo: Anteile 2017 in BW Szenario: Annahme
Pkw mit Ottomotor, Benzin/Ethanol	51,4%	1,00%	
Pkw mit Dieselmotor	48,0%	0,0%	
Pkw mit Elektromotor	0,1%	97,0%	
Pkw mit Wasserstoff-BZ	0,0%	0,0%	
Pkw mit Verbrenner & synthetischen Treibstoffen	0,0%	0,0%	

Tabelle 9: Motorisierung leichter Nutzfahrzeuge (bezogen auf die erbrachte Fahrleistung)

Motorisierung	Geschätzter Bestand	Zukunftsmix	Quellen / Bemerkungen
Dieselmotor	100%	0%	Annahme
Elektromotor	0%	100%	Annahme
Wasserstoff-BZ	0%	0%	Annahme
Verbrenner mit synthetischen Treibstoffen	0%	0%	Annahme

Tabelle 10: Motorisierung schwerer Nutzfahrzeuge (bezogen auf die erbrachte Fahrleistung)

Motorisierung	Geschätzter Bestand	Zukunftsmix	Quellen / Bemerkungen
Dieselmotor	100%	0%	Annahme
Elektromotor	0%	70%	Annahme
Wasserstoff-BZ	0%	30%	Annahme
Verbrenner mit synthetischen Treibstoffen	0%	0%	Annahme

Tabelle 11: Motorisierung der Busse (bezogen auf die erbrachte Fahrleistung)

Motorisierung Busse	Geschätzter Bestand	Zukunftsmix	Quellen / Bemerkungen
Dieselmotor	100%	0%	Annahme
Elektromotor	0%	50%	Annahme
Wasserstoff-BZ	0%	50%	Annahme
Verbrenner mit synthetischen Treibstoffen	0%	0%	Annahme
SUMME	100%	100%	

Tabelle 12: Kapazität und Besetzungsgrad im Busverkehr

Kapazität des Busverkehrs	Geschätzter Bestand	Ziel	Quellen / Bemerkungen
Sitzplätze pro Bus	40	40	Schätzung
Besetzungsgrad	20%	30%	Durchschnitt in Bund und Landkreis / Annahme

Tabelle 13: Energieeinsparung und Elektrifizierung Industrie / Produzierendes Gewerbe

Kennwert	Bestand	Ziel	Quellen / Bemerkungen
Stromeinsparung:	-	30%	Annahme nach (BMU, 2009) ⁴
Wärmeeinsparung:	-	30%	Annahme nach (BMU, 2009)
Elektrifizierungsgrad Wärme	-	100%	10% Raumwärme: über Wärmepumpen, 90% sonstiger Wärmebedarf (direkt-elektrisch)

⁴ Das BMU ging im Jahr 2009 davon aus, dass in der Industrie zwischen 20 und 40 Prozent des Energieverbrauchs „zu wirtschaftlich vernünftigen Bedingungen bis 2020“ eingespart werden könnten (BMU, 2009). Die tatsächlich erfolgte Einsparung bis zum Jahr 2017 lag in den fünf betrachteten Landkreisen lediglich bei 6 Prozent.

Tabelle 14: Energieeinsparung und Elektrifizierung im Sektor Gewerbe, Handel & Dienstleistung

Kennwert	Bestand	Ziel	Quellen / Bemerkungen
Stromeinsparung:	-	20%	Annahme
Wärmeeinsparung:	-	30%	Annahme
Elektrifizierungsrad Wärme (Wärmepumpen)	-	100%	Annahme. Wärmebedarf i. d. R. fast ausschließlich Raumwärme

Tabelle 15: Sektor Landwirtschaft

Kennwert	Geschätzter Bestand	Ziel	Quellen / Bemerkungen
Wirtschaftsweise:	konventionell	ökologisch	Annahme
Ernährungsweise:	Bestand	AGES	An Nachfrage angepasste Produktion (AGES Österreich, 2017).
Nahrungsmittelverluste	25%	10%	Mögliche Minimierung der Verschwendung nach WWF Deutschland, 2015, und Schmidt, et al., 2019
Landmaschinen elektrifiziert (Rest Biodiesel)	0%	70%	Annahme
Neuer Flächenverbrauch bis 2035 ggü. Status Quo (Hektar)		58	Schätzung der Stadt Radolfzell

Tabelle 16: Import erneuerbarer Energien

Kennwert	Geschätzter Bestand	Ziel	Quellen / Bemerkungen
Import von Bioenergie aus BW	k. A.	Nein	Annahme
Angestrebter PV-Anteil am Stromimport		0%	Annahme
Angestrebter Windstrom-Anteil am Stromimport		100%	Annahme
Jahresertrag pro externe Windenergieanlagen (MWh/a)		5.000	Annahme

Tabelle 17: Nutzung lokaler erneuerbarer Energien

Kennwert	Geschätzter Bestand	Ziel	Quellen / Bemerkungen
Dachmodulfläche (m ² /EW)	17,7	17,7	Energieatlas BW für Radolfzell
Fassadenmodulfläche (kWh/m ² MF)	6,2	6,2	Annahme nach Ecofys (2007): Potenzial proportional zum Dachflächenpotenzial angepasst. (Studie für Deutschland: 7,0 m ² /EW)
Anteil Photovoltaik:	90%	98%	Annahme
Anteil Solarthermie:	10%	2%	Annahme
Wärmeertrag Solarthermie (kWh/m ² MF):	520	520	Status Quo: heutiges Ertragspotenzial. Szenario: Annahme
Stromertrag Dach-PV (kWh/m ² MF)	150	170	Status Quo: heutiges Ertragspotenzial. Szenario: Annahme
Stromertrag Fassaden-PV (kWh/m ² MF)	68	75	Status Quo: heutiges Ertragspotenzial. Szenario: Annahme
Nutzung des Dachmodulflächenpotenzials	11%	100%	Annahme
Nutzung des Fassadenmodulflächenpotenzials	0,6%	5%	Annahme
Freiflächen-PV-Potenzial (Hektar):	?	29	Schätzung nach LANUV Nordrhein-Westfalen, 2013
Nutzung Freifläche PV-Potenzial:	100%	100%	Annahme
Agriphotovoltaik-Anteil an LNF:	0%	5%	Annahme
Windenergie-Potenzial (MWh/a):	1.800	7.800	Annahme: 1 WEA zuzüglich zum heutigen Anteil an Verenafohren
Wasserkraftpotenzial (MWh/a):	0	0	
Energiepflanzenanteil an Ackerfläche:	10%	20%	Annahme. (Der Kreis Konstanz liegt mit 10 Prozent bisher deutlich unter dem Bundesdurchschnitt)

3.4 Verschiedene Wege zur Klimaneutralität

3.4.1 Szenario Klimaneutralität bis 2045

Um das Ziel der Bundesregierung zu erreichen, muss die Energieversorgung bis 2045 auf klimaneutrale erneuerbare Energien umgestellt werden. Wie dies in Radolfzell aus- sehen könnte, ist in Abbildung 5 dargestellt.

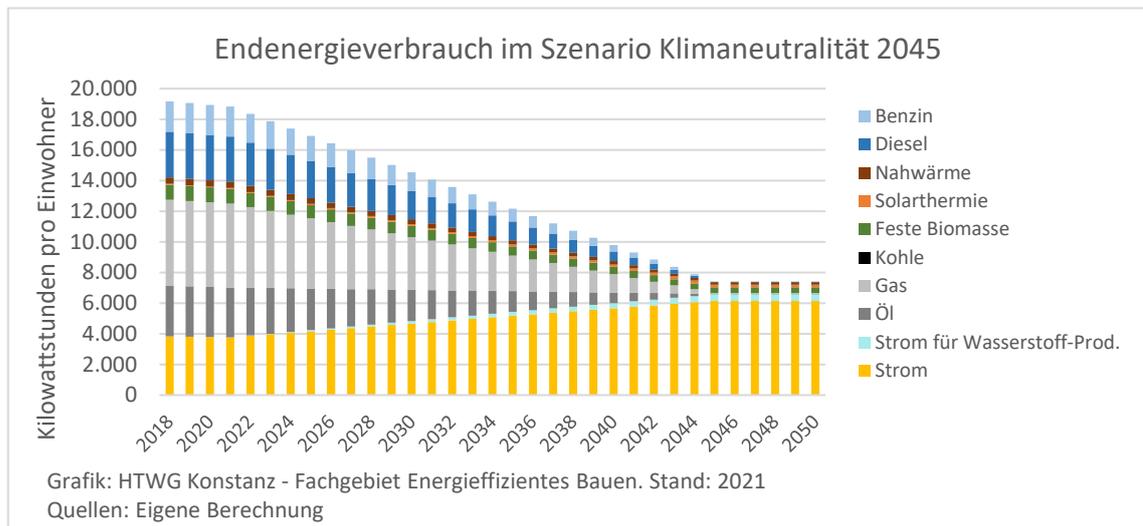


Abbildung 5: Endenergieverbrauch in Radolfzell im Szenario Klimaneutralität 2045

Die sich daraus ergebenden energiebedingten THG-Emissionen sind in Abbildung 6 dargestellt. Zwischen 2022 und 2045 entstehen damit Emissionen von 72 Tonnen CO₂-Äq. pro Person. Dies wären 180 Prozent des 1,5-Grad-Budgets, das maximal noch 40 t pro Person beträgt. Bedenkt man zudem allein die wahrscheinlich unvermeidbaren Emissionen aus der Nahrungsproduktion, läge man bei mindestens 215 Prozent des Budgets - wobei von den Emissionen der Nahrungsproduktion heute wie auch in Zukunft nur ein Teil in Radolfzell freigesetzt wird und der übrige Teil durch Importe verursacht wird.

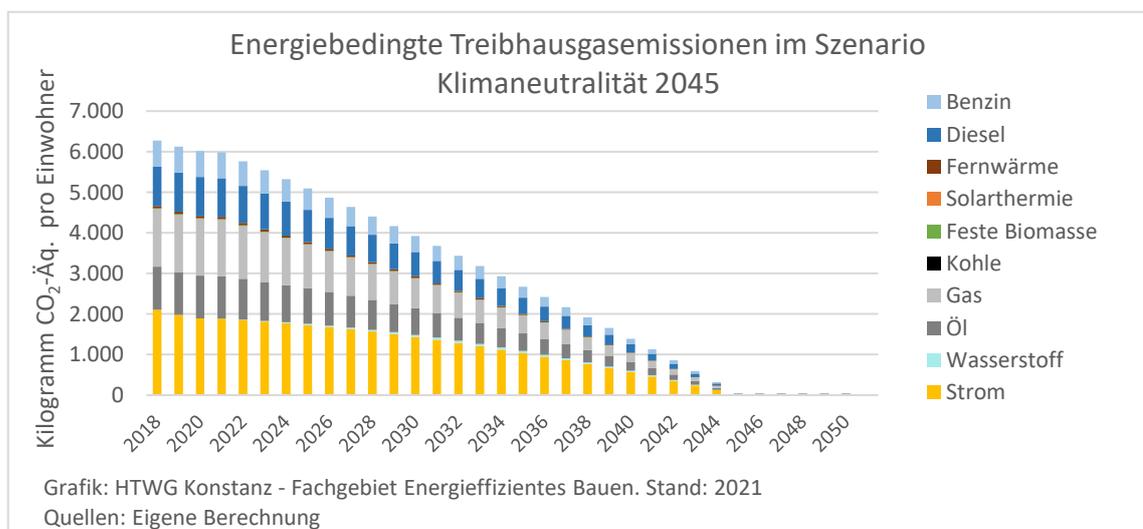


Abbildung 6: Entwicklung der energiebedingten Treibhausgasemissionen in Radolfzell im Szenario Klimaneutralität 2045

3.4.2 Szenario Klimaneutralität bis 2040

Wird die Klimaneutralität in Radolfzell gemäß dem Ziel des Klimaschutzgesetzes für Baden-Württemberg im Jahr 2040 erreicht, summieren sich die Emissionen ab dem Jahr 2022 noch auf 57 t CO₂-Äq. pro Person. Dies wären 142 Prozent des verbleibenden 1,5-Grad-Budgets. Bedenkt man zudem allein die wohl unvermeidbaren Emissionen aus der Nahrungsproduktion, läge man bei mindestens 178 Prozent des 1,5-Grad-Budgets.

3.4.3 Szenario Klimaneutralität bis 2035

Wird die Klimaneutralität der Energieversorgung im Jahr 2035 erreicht, summieren sich die lokalen energiebedingten Emissionen zwischen 2022 und 2035 noch auf 42 t CO₂-Äquivalent pro Person. Dies wären 105 Prozent des 1,5-Grad-Budgets. Bedenkt man zudem allein die unvermeidbaren Emissionen aus der Nahrungsproduktion, läge man bei mindestens 140 Prozent des verbleibenden 1,5-Grad-Budgets. Folglich müsste die Klimaneutralität schon vor 2035 erreicht werden, wenn das Budget Radolfzells mithilfe von Kompensationsmaßnahmen erreichbar werden soll. Die energiebedingten Treibhausgasemissionen im Szenario Klimaneutralität 2035 sind in Abbildung 8 dargestellt.

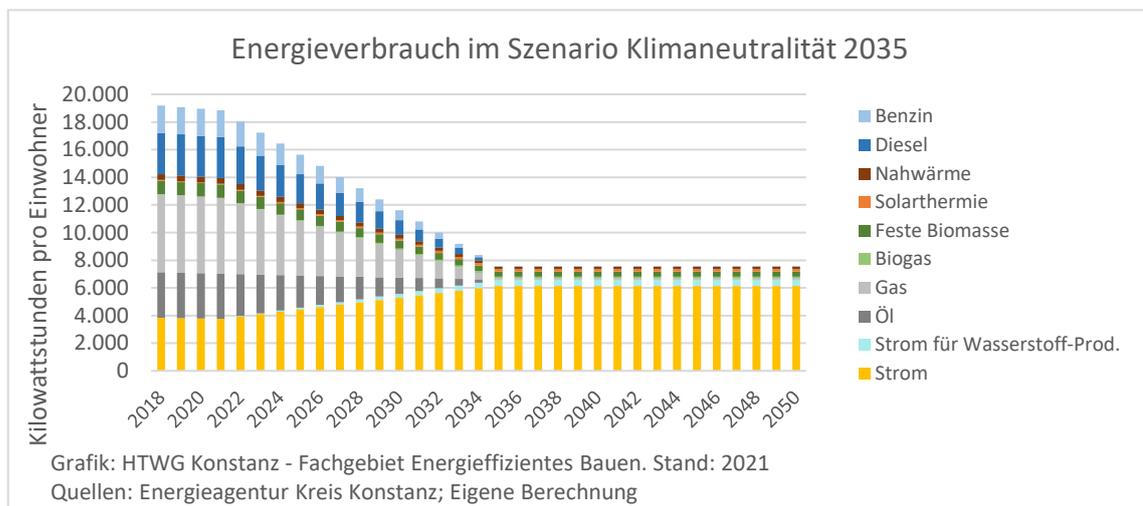


Abbildung 7: Entwicklung des Energieverbrauchs im Szenario Klimaneutralität 2035

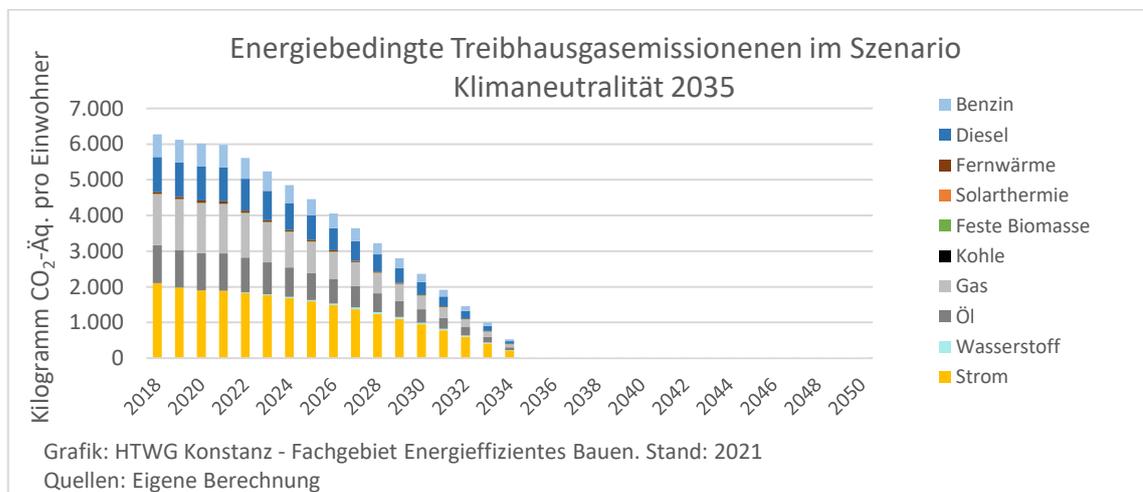


Abbildung 8: Entwicklung der energiebedingten Treibhausgasemissionen in Radolfzell im Szenario Klimaneutralität 2035

3.4.4 Vergleich mit der 2000-Watt-Gesellschaft

Im Gegensatz zur 2000-Watt-Gesellschaft wurden für das Szenario Klimaneutralität keine Zielwerte für den Energieverbrauch vordefiniert, sondern von den technischen Potenzialen der Energieeffizienzmaßnahmen und der erneuerbaren Energien sowie vom Ziel einer zu hundert Prozent erneuerbaren Energieversorgung abgeleitet.

Die 2000-Watt-Gesellschaft stellt dagegen jedem Bürger in Deutschland über das gesamte Jahr zu jeder Zeit durchschnittlich 2000 Watt Leistung auf der Stufe der Primärenergie zur Verfügung. Daraus ergibt sich ein Jahresverbrauch von 17.520 kWh Primärenergie pro Einwohner und Jahr. Um diesen Verbrauch in Radolfzell mit lokalen erneuerbaren Energien zu ermöglichen, müssten 240 Prozent des ermittelten lokalen Energiepotenzials zur Verfügung gestellt werden. In der 2000-Watt-Gesellschaft wäre Radolfzell daher nach dieser Potenzialschätzung - ungeachtet möglicher Speicherverluste - zu 58 Prozent auf direkte oder indirekte Energieimporte angewiesen. In dem im Rahmen dieser Ausarbeitung berechneten Szenario Klimaneutralität wäre man dagegen nur noch zu einem Zehntel auf Importe angewiesen, da die technischen Potenziale einen deutlich geringeren Bedarf an erneuerbarer Primärenergie erreichbar scheinen lassen. Die Ziele der 2000-Watt-Gesellschaft würden daher im Szenario Klimaneutralität deutlich übertroffen. Dies ist auch darauf zurückzuführen, dass mit der 2000-Watt-Gesellschaft ursprünglich keine Klimaneutralität angestrebt wurde. Das ursprüngliche Ziel der 2000-Watt-Gesellschaft war es, die Treibhausgasemissionen auf eine Tonne pro Person und Jahr zu senken. Berücksichtigt man wahrscheinliche Speicherverluste, sind die Importabhängigkeiten allerdings in beiden Fällen noch etwas größer. Diese Verluste konnten aber im Rahmen dieser Studie, über die vorgesehene Wasserstoffproduktion hinausgehend, nicht abgeschätzt werden.

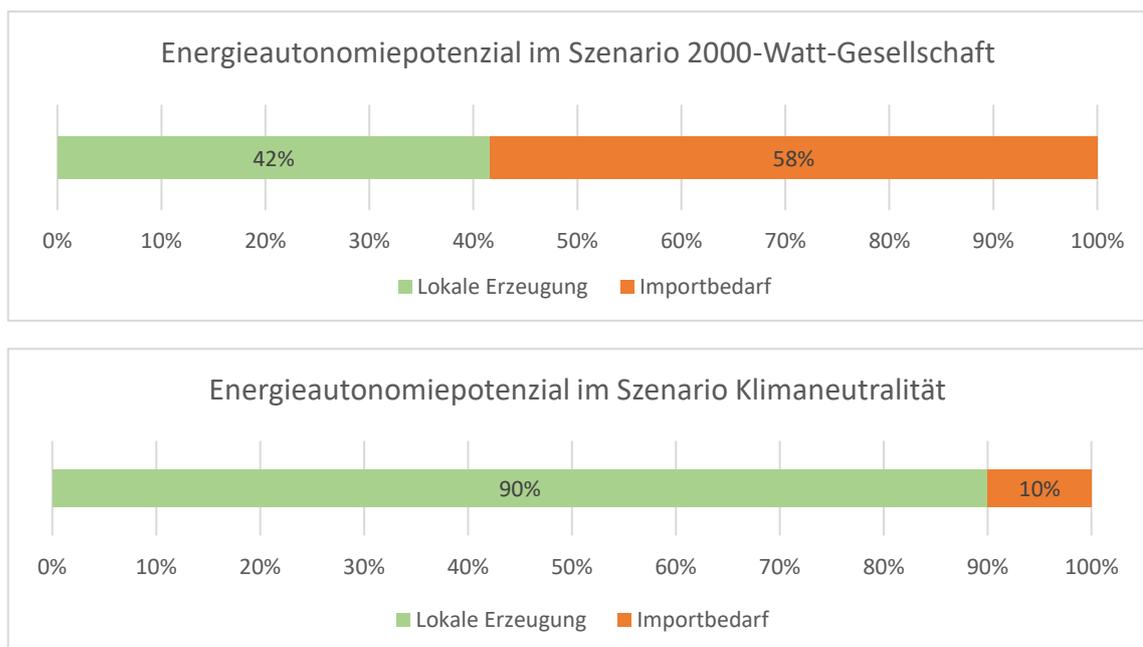


Abbildung 9: Vergleich der möglichen Energieautonomiegrade Radolfzells in der 2000-Watt-Gesellschaft und im berechneten Szenario Klimaneutralität

Vergleicht man den Energieverbrauch des Szenarios Klimaneutralität mit dem Ziel der 2000-Watt-Gesellschaft, ist hier nur ein relativ grober Vergleich möglich, da die Bilanz nach BICO2 BW den lokalen Energieverbrauch auf Ebene des Endenergieverbrauchs erfasst. Der Zielwert der 2000-Watt-Gesellschaft von ca. 17.520 kWh pro Person und Jahr bezieht sich dagegen auf den Primärenergieverbrauch. Für einen direkten Vergleich müsste daher der Primärenergiefaktor der 2000-Watt-Gesellschaft bekannt sein. Da dieser jedoch von zahlreichen Faktoren, wie etwa den gewählten Speichersystemen oder der Effizienz von Biomasseheizungen, BHKW und Verbrennungsmotoren abhängt, kann dieser nicht ohne weiteres geschätzt werden. In einem auf erneuerbaren Energien basierenden System würden sich vor allem hohe Anteile synthetischer Kraftstoffe im Verkehr negativ auf den Primärenergiefaktor auswirken, aber auch hohe Anteile von Wasserstoff als Speichermedium. Im berechneten Szenario Klimaneutralität wird der Primärenergiefaktor auf 1,12 geschätzt. Dabei sind Umwandlungsverluste von BHKW, Leitungsverluste (von Strom und Wärmenetzen) und die angenommene Wasserstoffproduktion berücksichtigt. Werden aber beispielsweise höhere Anteile des Endenergieverbrauchs als angenommen mit Wasserstoff gedeckt, steigt der erneuerbare Primärenergiebedarf und mit ihm der Primärenergiefaktor. Nimmt man vereinfachend für den Primärenergiefaktor eine Spanne von 1,12 bis 1,50 an, ergibt sich im Szenario Klimaneutralität auch im ungünstigeren Fall ein Primärenergieverbrauch, der mit ca. 11,5 MWh/Ea noch um 34 Prozent unter dem Vergleichswert der 2000-Watt-Gesellschaft liegt.

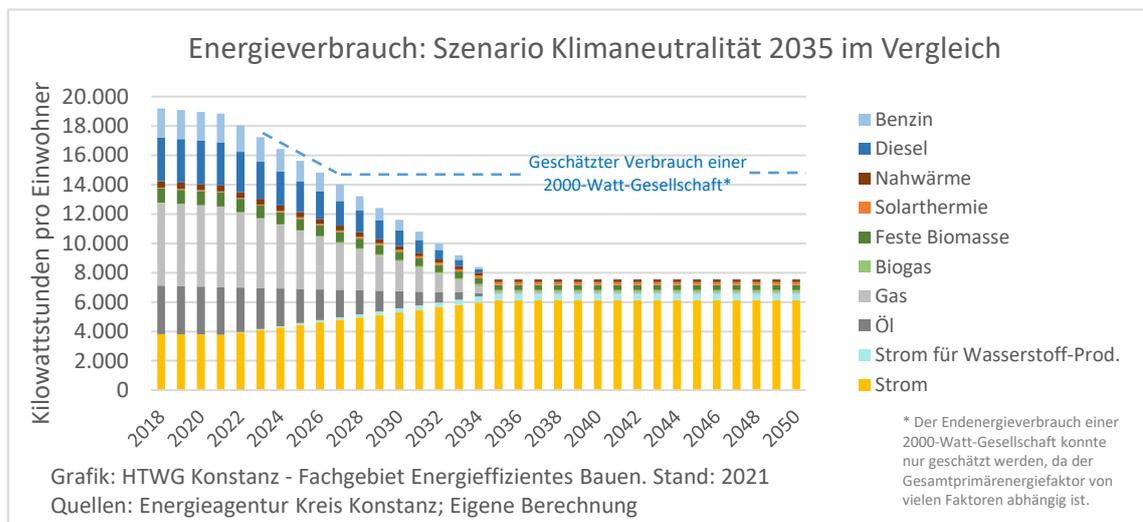


Abbildung 10: Energieverbrauch im Szenario Klimaneutralität 2035 im Vergleich zur 2000-Watt-Gesellschaft

Wie bereits dargestellt, muss umso mehr erneuerbare Energie nach Radolfzell importiert werden, je höher der erneuerbare Primärenergieaufwand ist. Bei einem Primärenergieverbrauch von 17.520 kWh pro Einwohner dürften dabei selbst die inländischen Potenziale, die in Deutschland bis 2035 oder 2040 erschlossen werden können, kaum ausreichen. Eine frühzeitige Klimaneutralität des Energiesektors, die mit dem 1,5-Grad-Ziel vereinbar wäre, ist in einer 2000-Watt-Gesellschaft somit kaum zu erreichen, da auch weltweit nur wenige Nationen bis zu diesem Zeitraum ihre eigene Klimaneutralität erreichen werden und darüber hinaus größere Mengen erneuerbarer Energie exportieren

können werden. Schließlich müssen auch im Szenario der 2000-Watt-Gesellschaft noch die nicht energiebedingten Emissionen berücksichtigt werden, die in Deutschland laut Umweltbundesamt (2021) ca. 15 Prozent zu den Treibhausgasemissionen Deutschlands beitragen.

Im Vergleich mit den Zielen der 2000-Watt-Gesellschaft lässt daher insgesamt feststellen, dass mit den angenommenen Szenarien zur Klimaneutralität alle Anforderungen der 2.000-Watt-Gesellschaft deutlich übererfüllt werden.

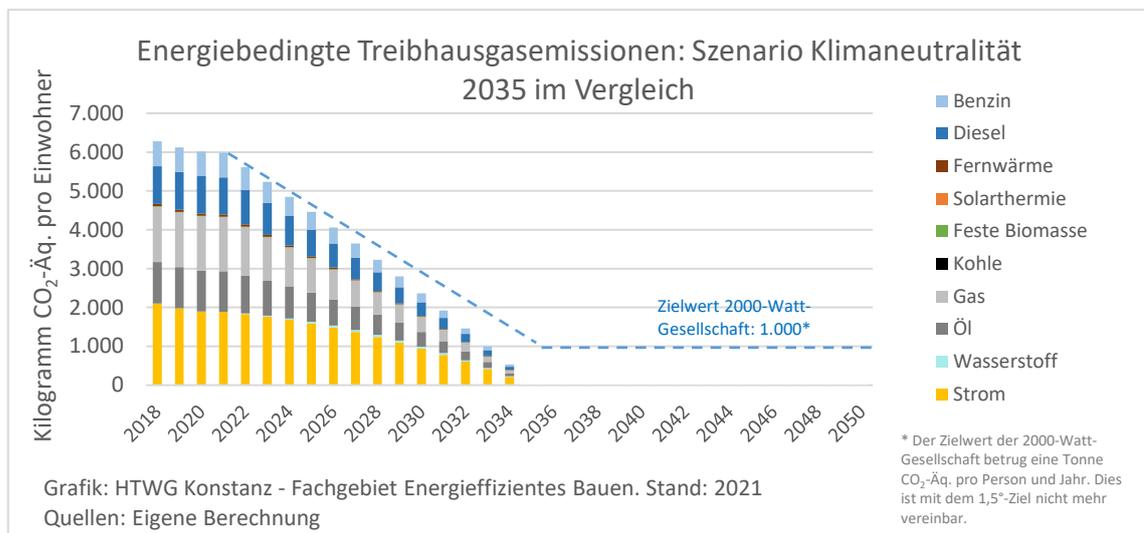


Abbildung 11: Energiebedingte Treibhausgasemissionen in Radolfzell: Szenario Klimaneutralität 2035 im Vergleich zur 2000-Watt-Gesellschaft

4 Handlungsfelder Klimaschutz

4.1 Entwicklungsplanung und Raumordnung

4.1.1 Energieversorgung Neubaugebiete

Der Energiebedarf geplanter Wohn- und Gewerbegebiete in Radolfzell ist aufgrund des frühen Planungsstadiums nur sehr grob abschätzbar und daher mit einigen Unsicherheiten behaftet. Die möglichen Wohn- und Büroflächen liegen bisher lediglich für das Quartier Gleisdreieck vor. Im Folgenden soll daher einmal am Beispiel des Gleisdreiecks anschaulich gemacht werden, wie sich ein Neubaugebiet auf den Gesamtenergiebedarf und den daraus folgenden Energieanlagenbedarf der Stadt auswirken könnte, je nachdem welcher Energiestandard realisiert wird. In Tabelle 18 sind die bisher bekannten Flächen geplanter Neubaugebiete dargestellt.

Tabelle 18: Bekannte Flächen geplanter Neubaugebiete

Kennwert	Wert	Einheit
Geplante neue Gewerbegebiete	20	Hektar
Dachfläche in neuen Gewerbegebieten	5,2	Hektar
Wohnfläche im Quartier Gleisdreieck	39.000	m ²
Bürofläche im Quartier Gleisdreieck	12.000	m ²

Quelle: Stadt Radolfzell

Für die Schätzung des Energiebedarfs neuer Wohnquartiere wurde ein Haushaltsstrombedarf pro Quadratmeter Wohnfläche angenommen, der 20 Prozent unter dem heutigen Durchschnitt liegt. Als Wärmebedarf wurde ein Raumwärmebedarf von 40 kWh/m² angenommen. Bei einer Wärmebereitstellung mittels Wärmepumpen und einer Arbeitszahl von mindestens 3,5 ergibt sich daraus, wie in Tabelle 19 dargestellt, ein Strombedarf von 33,5 kWh/m². Werden andere Energieträger genutzt, wie z. B. Biogas, liegt der Endenergiebedarf bei 62,0 kWh/m², sofern effiziente Brennwertkessel genutzt werden.

Tabelle 19: Angenommene Energiebedarfe neuer Baugebiete pro Quadratmeter Wohnfläche

Kennwerte Wohnen	Wert	Einheit
Bedarf Haushaltsstrom	22,0	kWh/m ² WF
Bedarf Raumwärme Wohnen	40,0	kWh/m ² WF
Bedarf Strom für Wärmepumpen	11,4	kWh/m ² WF
Bedarf Strom Insgesamt	33,4	kWh/m² WF
Angenommene Arbeitszahl Wärmepumpen	3,5	

Quelle: Eigene Annahmen

Der Energiebedarf der Wohnflächen liegt im Durchschnitt unter dem Energiebedarf von Büroflächen, weil z. B. Schlafräume und sonstige Räume, die nur gelegentlich genutzt werden, u. a. nicht so stark beheizt werden müssen, wie Wohnzimmer und Büroräume.

Tabelle 20: Angenommene Energiebedarfe neuer Baugebiete pro Quadratmeter Bürofläche

Kennwert Büro (gewerblich)	Wert	Einheit
Bedarf Strom Büro	26,0	kWh/m ² WF
Bedarf Raumwärme Büro	47,0	kWh/m ² WF
Bedarf Strom für Wärmepumpen	13,4	kWh/m ² WF
Bedarf Strom Insgesamt	39,4	kWh/m² WF
Angenommene Arbeitszahl Wärmepumpen	3,5	

Quelle: Eigene Annahmen

4.1.1.1 Effekte unterschiedlicher Gebäudeenergiestandards in Neubauwohngebieten: Beispiel Gleisdreieck

Das Gleisdreieck umfasst 39.000 m² Wohnfläche und 12.000 m² Bürofläche. Bei den angenommenen Energiestandards und einer Beheizung mittels Wärmepumpen wird der Energiebedarf des Wohnens im Quartier Gleisdreieck auf 1.304 Megawattstunden Strom pro Jahr geschätzt. Ohne Berücksichtigung von Speicherverlusten entspricht das etwa 20 Prozent des Ertrags einer größeren Windenergieanlage im Kreis Konstanz.

Tabelle 21: Geschätzter Strombedarf des Wohnens im Quartier Gleisdreieck bei Standard KfW 40

Energiebedarf Wohnen	Wert	Einheit
Haushaltsstrom	858	MWh/a
Raumwärme	1.560	MWh/a
Strom für Wärmepumpen	446	MWh/a
Strom Insgesamt	1.304	MWh/a

Quelle: Eigene Annahmen

Der Strombedarf der Büroflächen im Quartier Gleisdreieck wird auf 461 Megawattstunden Strom pro Jahr geschätzt. Ohne Berücksichtigung von Speicherverlusten entspricht das etwa 7 Prozent des Ertrags einer größeren Windenergieanlage im Kreis Konstanz.

Tabelle 22: Geschätzter Strombedarf der Büroflächen im Quartier Gleisdreieck

Energiebedarf Büro	Wert	Einheit
Bedarf Strom	300	MWh/a
Bedarf Raumwärme	564	MWh/a
Bedarf Strom für Wärmepumpen	161	MWh/a
Bedarf Strom Insgesamt	461	MWh/a

Quelle: Eigene Annahmen

Insgesamt summiert sich der geschätzte Strombedarf des Gleisdreiecks ohne Mobilität somit auf **1.765 MWh/a**. Wird nicht mit Wärmepumpen beheizt, sondern mit gasförmigen Energieträgern, werden geschätzt rund **3.282 MWh/a** benötigt, was einem Mehrbedarf von 86 Prozent entspricht.

Wird im Bereich Raumwärme für das Wohnen ein Energiestandard von 55 kWh/m² erreicht und auch im Bereich der Büroflächen ein dementsprechend höherer Energiestandard realisiert, steigt der geschätzte Strombedarf des Gleisdreiecks ohne Mobilität somit auf 1.993 MWh/a, wenn mit Wärmepumpen beheizt wird.

Tabelle 23: Geschätzter Strombedarf des Wohnens im Quartier Gleisdreieck bei Standard KfW 55

Energiebedarf Wohnen	Wert	Einheit	Rel. Zu KfW 40
Haushaltsstrom	858	MWh/a	+0 %
Raumwärme	2.145	MWh/a	+38 %
Strom für Wärmepumpen	613	MWh/a	+38 %
Strom Insgesamt	1.471	MWh/a	+13 %

Quelle: Eigene Berechnungen

Im Vergleich zum Energiestandard 40 kWh_{th}/m² fällt der Endenergiebedarf somit bei einem Energiestandard von 55 kWh_{th}/m² um 13 Prozent höher aus. Sofern mit anderen Energieträgern als Strom beheizt wird, werden geschätzt rund **4.079 MWh** Endenergie pro Jahr benötigt. In diesem Fall fällt der Bedarf um **24 Prozent** höher aus, als beim Energiestandard KfW 40, wenn keine Wärmepumpen genutzt werden.

Dies zeigt: Sofern nicht mit Wärmepumpen beheizt werden kann, ist ein höherer Dämmstandard umso wichtiger, wenn der Endenergiebedarf geringgehalten werden soll. Bei der künftigen genaueren Abschätzung der Energiebedarfe sollten zu erwartende Speicher und die mit ihnen verbundenen Speicherverluste berücksichtigt werden.

4.1.1.2 Geschätztes PV-Potenzial von Neubaugebieten

Das ungefähre Photovoltaik-Potenzial von Neubaugebieten kann, wenn noch keine Daten zu den Dachflächen der Neubaugebiete vorliegen, nach BMVBS & BBR (2009) anhand typischer Ertragskennwerte der verschiedenen Stadtraumtypen abgeschätzt werden. Nach BMVBS & BBR (2009) betrug das Ertragspotenzial im Siedlungsbereich auf dem Stand des Jahres 2009, je nach Stadtraumtyp, bis zu 248 MWh pro Hektar (BMVBS & BBR, 2009, S. 32). Dabei ist man von ca. 100 kWh pro Quadratmeter Modulfläche ausgegangen (BMVBS & BBR, 2009, S. 12). Legt man der Schätzung die heutige Ertragserwartung von mindestens 150 kWh/m² zugrunde, kann man heute, wie in Tabelle 24 dargestellt, mit deutlich höheren Erträgen rechnen.

Tabelle 24: Potenzielle Energieerträge aus Photovoltaik nach Stadtraumtypen (MWh/ha)

SRT	Beschreibung	MWh/ha*a 2009 ¹⁾	MWh/ha*a 2021 ²⁾
VI	Siedlungen des sozialen Wohnungsbaus	88	132
VIII	Geschosswohnungsbau	94	141
IX	Einfamilienhausgebiete	34	51
XI	Gewerbe- und Industriegebiete	248	372
XII	Zweckbau-Komplexe und öffentliche Einrichtungen	126	189

Quellen: (1) BMVBS & BBR, 2009, S. 32; (2) Eigene Berechnung n. BMVBS & BBR, 2009

Derzeit sind bis zum Zeitraum 2030 – 2035 38 Hektar neue Wohngebietsfläche und 20 Hektar Gewerbegebiet geplant. Nach Schätzung der Stadt Radolfzell dürften auf der neuen Gewerbegebietsfläche ca. 5,2 Hektar Dachfläche entstehen, die für die Erholung, die Produktion von Nahrungsmitteln oder die Stromerzeugung genutzt werden können.

Tabelle 25: Flächenpotenziale neuer Baugebiete

Flächenkategorie	Wert	Einheit
Wohngebiet	38,0	Hektar
Gewerbegebiet	20,0	Hektar
Dachfläche in Gewerbegebieten	5,2	Hektar

Quelle: Stadt Radolfzell

Für die Schätzung anhand der Stadtraumtypenpotenziale wurde angenommen, dass maximal 20 Prozent der Fläche für den Bau von Einfamilienhäusern und mindestens 80 Prozent für den Geschosswohnungsbau genutzt werden. Somit dienen die Stadtraumtypen VIII, IX und XI als Berechnungsgrundlage.

Tabelle 26: Angenommene Anteile der Stadtraumtypen an den Neubaugebieten

SRT	Beschreibung	Anteile am Zubau bis 2030	Hektar
Wohngebiete			
VIII	Geschosswohnungsbau	80 %	30,4
IX	Einfamilienhausgebiete	20 %	7,6
Gewerbe und Sonstige			
XI	Gewerbe- und Industriegebiete	100 %	20,0

Quelle: Eigene Annahmen

Für den Geschosswohnungsbau wurde ein Anteil von PV-Dächern von 70 Prozent angenommen, während 30 Prozent als Potenzial für Erholung und Nahrungsproduktion angenommen wurden. Anhand der Stadtraumtypenpotenziale wurde damit ein Ertragspotenzial von 3.349 MWh/a geschätzt.

Tabelle 27: Angenommene Nutzung der Dachflächen in den Neubau-Wohngebieten

SRT	Beschreibung	Dachflächen-nutzung	Anteil	Fläche Baugebiet (ha)	PV-Poten-zial (MWh/a)
VIII	Geschosswohnungsbau	Erholung	20 %	6,1	
		Begrünung	0 %		
		Dachfarm	10 %	3,0	
IX	Einfamilienhausgebiete	Photovoltaik	70 %	21,3	3.000
		Erholung	0 %		
		Begrünung	10 %	0,76	
		Photovoltaik	90 %	6,84	349
	Neubau-Wohngebiete Insgesamt	Photovoltaik		28,1	3.349

Quelle: Eigene Berechnungen

Ebenfalls ein Anteil von 70 Prozent an den nutzbaren Flächen in den neuen Gewerbegebieten wurde als Potenzial für Photovoltaik angenommen. Damit ergibt sich ein potenzieller Ertrag von 5.208 MWh/a.

Tabelle 28: Angenommene Nutzung der Flächenpotenziale in neuen Gewerbegebieten

SRT	Beschreibung	Dachflächennutzung	Anteil	Fläche Baugebiet (ha)	PV-Potenzial (MWh/a)
XI	Gewerbegebiet	Erholung	10 %	2	
		Begrünung	10 %	2	
		Nahrungsproduktion	10 %	2	
		Photovoltaik	70 %	14	5.208

Quelle: Eigene Berechnungen

Da zu den Dachflächen der neuen Gewerbegebiete bereits eine Schätzung vorliegt, konnten die PV-Potenziale der Dachflächen bereits genauer geschätzt werden. Nimmt man auch hier einen Anteil von 70 Prozent an, liefern Photovoltaik-Gründächer einen Ertrag von 3.276 MWh pro Jahr. Ohne Begrünung wäre auf 70 Prozent der Fläche ein Maximalertrag von ca. 5.000 MWh möglich. Würde man 100 Prozent der Dachflächen mit PV ohne Begrünung belegen, wären bis zu 7.150 MWh/a Ertrag zu erwarten.

Tabelle 29: Angenommene Nutzung der Dachflächenpotenziale in neuen Gewerbegebieten

SRT	Beschreibung	Dachflächennutzung	Anteil	Fläche Baugebiet (ha)	PV-Potenzial (MWh/a)
XI	Gewerbegebiet	Erholung	10 %	0,52	
		Begrünung	10 %	0,52	
		Dachfarm	10 %	0,52	
		Photovoltaik-Gründach	70 %	3,64	3.276
		SUMME	100 %	5,20	3.276

Quelle: Eigene Berechnungen

Insgesamt entfallen nach dieser Schätzung rund 63 Prozent des Ertragspotenzials von Gewerbegebieten auf die Dachflächenpotenziale. Daneben bieten Überdachungen von Parkplätzen sowie grüne Randstreifen oder Brachflächen weitere Potenziale. Insgesamt erscheinen in den geplanten Neubaugebieten (Wohnen und Gewerbe) nach dieser Schätzung Erträge von mindestens 8,56 GWh pro Jahr realistisch.

Tabelle 30: Zusammenfassung der geschätzten Ertragspotenziale geplanter Neubaugebiete

Beschreibung	PV-Potenzial (MWh/Ea)	PV-Potenzial (MWh/a)
Wohngebiet	105	3.349
Gewerbegebiet - Dachflächen	103	3.276
Gewerbegebiet - Parkplätze, Brachflächen etc.	61	1.932
Neubaugebiete Insgesamt	269	8.557

Quelle: Eigene Berechnungen

Bei einer vollflächigen PV-Nutzung der Dachflächen könnten deutlich höhere Erträge erreicht werden, doch ginge dies mit geringeren Vorteilen hinsichtlich Regenwasserrückhaltung, sommerlicher Kühlwirkung, Erholung und Biodiversität einher.

4.1.2 Klimaanpassung

Die Nutzung erneuerbarer Energien bietet verschiedene Möglichkeiten, Synergieeffekte für den Schutz von Böden, Gewässern und Artenvielfalt zu erzielen. Dies gilt vor allem für die Nutzung von Energiepflanzen der zweiten Generation und Photovoltaikanlagen über Grünland und Gründächern.

4.1.2.1 Synergieeffekt Erosionsschutz durch Nutzung von Energiepflanzen

Das Risiko der Bodenerosion durch Wind und Wasser hängt in hohem Maße von der Bodenbearbeitung und der Bodenbedeckung ab. Im Gegensatz zu den meisten Nahrungspflanzen, Rohstoffpflanzen und Energiepflanzen der ersten Generation bietet ein großer Teil der Energiepflanzen zweiter Generation aufgrund ihrer Mehrjährigkeit die Möglichkeit, den Boden durch intakte Wurzeln das ganze Jahr vor Erosion zu schützen und jährliches Pflügen unnötig zu machen. Besonders hohen Wert haben in dieser Hinsicht jene Pflanzen, die erst im Frühjahr geerntet werden, wie etwa Miscanthus oder Sida, wenn diese thermisch genutzt werden. So bleibt etwa das Laub der Sida auf der Fläche und trägt zur Humusbildung bei, die die Wasseraufnahmefähigkeit des Bodens verbessert. Da unter den Energiepflanzen der zweiten Generation einjährige Nutzpflanzen in der Minderheit sind, können diese Vorteile auf einem großen Teil ihrer Anbaufläche genutzt werden. In der gewählten Kombination haben einjährige Pflanzen nur einen Anteil von 10 Prozent an der Energiepflanzenfläche, die 2 Prozent der Ackerfläche entsprechen. Somit entfallen 18 Prozent der gesamten Ackerfläche auf mehrjährige Energiepflanzen. Heute (Status Quo) dürfte dagegen deutlich weniger als 1 Prozent der Ackerfläche für den Anbau mehrjähriger Nutzpflanzen genutzt werden, sofern die Anteile dem Durchschnitt im Landkreis Konstanz entsprechen.

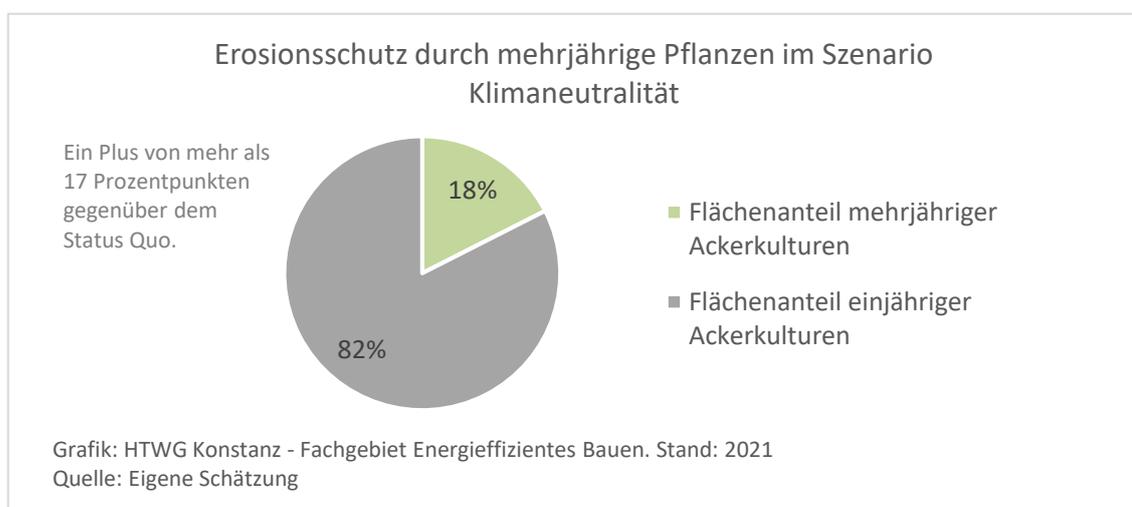


Abbildung 12: Erosionsschutz auf Ackerflächen durch mehrjährige Energiepflanzen im Szenario Klimaneutralität

4.1.2.2 Kühlung und Regenwasserrückhaltung als Synergieeffekte von Photovoltaik-Gründächern

Mit dem Klimawandel steigt das Risiko, dass sich Siedlungen an heißen Sommertagen stark aufheizen. Gründächer können die Temperaturen auf den Dachflächen deutlich reduzieren und durch die Verdunstung von Wasser auch die Umgebungsluft abkühlen. So verdunstet bereits ein extensiv begrüntes Gründach des Typs Sedumteppich mit einer Fläche von 100 m² an warmen Sommertagen bereits ca. 35 Liter (Zinco, 2019, S. 8), bei einem extensiv begrüntem Retentionsdach ist die Verdunstungsleistung noch um ein Drittel höher (Optigrün, 2021). Die Kühlleistung wirkt sich dabei nicht nur positiv auf das Wohlbefinden der Anwohner aus. Aufgrund des Kühleffektes einer Dachbegrünung erhöht sich die auch Leistung der Solarmodule um etwa 4 Prozent (Zinco, o. J.).

Auch mit Blick auf den Hochwasserschutz bieten Gründächer beachtliche Vorteile. Je nach Aufbau und Retentionsraum können Gründächer bis zu 136 Liter Niederschlag pro Quadratmeter zwischenspeichern, bevor der Niederschlag abgeleitet werden muss. Ein Standard-Photovoltaik-Gründach bietet nach Herstellerangaben bereits ein Zwischenspeichervolumen von 36 Litern/m² (Zinco, 2020). Somit reduziert sich nicht nur die Wassermenge, die insgesamt in die Kanalisation abgeleitet werden muss, sondern auch die Menge die gleichzeitig abgeleitet werden muss, da sich der Abfluss des noch abzuleitenden Wassers auch zeitlich verzögert.

Darüber hinaus bietet die Installation von Solarmodulen auf einem Gründach weitere Vorzüge:

- Ersatzlebensräume für Pflanzen und Lebewesen.
- Schutz des Flachdachs vor UV-Strahlung und mechanischer Beschädigung.
- Verbessertes Mikroklima durch Staubbindung
- Zusätzlicher Schallschutz.

4.1.2.3 Mögliche Synergieeffekte von Photovoltaikgründächern auf bestehenden Flachdachflächen im Stadtgebiet

Die von der Stadt Radolfzell geschätzte Flachdachfläche im Gebäudebestand beträgt knapp 33,5 Hektar. Es wurde hier von einer ausreichenden Tragfähigkeit für extensive Dachbegrünungen mit PV-Anlagen ausgegangen, die jedoch in jedem Einzelfall zu überprüfen ist. Angenommen wurde weiterhin ein Anteil der Photovoltaik von 80 Prozent an der Flachdachfläche im Bestand. Drei Viertel davon wurden als Photovoltaikgründach und ein Viertel als ausschließlich photovoltaisch genutzte Dachfläche einkalkuliert. Darüber hinaus wurden 10 Prozent als Klimadach mit spezieller Extensivbegrünung und hoher Verdunstungsleistung von 850 Litern pro Quadratmeter und Sommertag (Zinco, 2019, S. 8) angenommen. 10 Prozent verbleiben als Dachterrasse oder für andere Nutzungen. (Vgl. Tabelle 31)

Tabelle 31: Angenommene Nutzung der Flachdachflächen des Gebäudebestandes im Szenario Klimaneutralität

Flächennutzung	Anteil	Einheit
Photovoltaik	20	Prozent
Photovoltaik-Gründach	60	Prozent
Klimagründach (Kühlung)	10	Prozent
Dachterrasse unbegrünt	10	Prozent

Quelle: Eigene Annahmen

In diesem Fall könnten auf den Flachdächern des heutigen Gebäudebestandes jährlich rund 27 Gigawattstunden Strom produziert werden. Davon erzeugen die Photovoltaik-Gründächer rund zwei Drittel.

Tabelle 32: Stromerzeugungspotenzial der Flachdachflächen des Gebäudebestandes im Szenario Klimaneutralität

Flächennutzung	PV-Potenzial	Einheit
Photovoltaik	9.336	MWh/a
Photovoltaik-Gründach	18.089	MWh/a
Photovoltaik insgesamt	27.424	MWh/a

Quelle: Eigene Berechnungen

Im Jahr 2035 entspricht das bei der prognostizierten Bevölkerungsentwicklung rund 862 kWh Stromertrag pro Einwohner und Jahr.

Tabelle 33: Stromerzeugungspotenzial der Flachdachflächen des Gebäudebestandes pro Einwohner im Jahr 2035 (Szenario Klimaneutralität)

Flächennutzung	PV-Potenzial	Einheit
Photovoltaik	294	kWh/Ea
Photovoltaik-Gründach	569	kWh/Ea
Photovoltaik insgesamt	862	kWh/Ea

Quelle: Eigene Berechnungen

Bei einer Kombination von Photovoltaik Gründächern auf 60 Prozent der Flachdachfläche und Klimagründächern auf 10 Prozent der Flachdachfläche kann trotz 30 Prozent unbegrünter Fläche bezogen auf die gesamte Dachfläche an warmen Sommertagen eine Verdunstung von 109 Litern pro 100 m² Dachfläche erreicht werden (vgl. Tabelle 34). Das bedeutet, dass auf der gesamten Flachdachfläche im Durchschnitt 13 Prozent des Verdunstungspotenzials eines Klimagründachs, welches bis zu 850 Liter Wasser pro Tag verdunsten kann (Zinco, 2019, S. 8), erreicht werden.

Tabelle 34: Mögliches Verdunstungspotenzial der Begrünung von bestehenden Flachdächern

Kennwert	Wert	Einheit
Verdunstungsleistung der Flachdachfläche an Sommertagen	109	l/100 m ²
Erreichter Anteil des Maximalpotenzials	13%	Prozent
Verdunstungspotenzial der Flachdachfläche an Sommertagen	10.852	Liter/ha

Quelle: Eigene Berechnungen n. Zinco, 2019

Bezogen auf das gesamte Jahr ist mit Extensivbegrünungen eine Verdunstung von 41 - 75 Prozent des Jahresniederschlags möglich (Bundesverband GebäudeGrün e. V., 2019). Mit der Dachbegrünung werden auch vorteilhafte Effekte für den Hochwasserschutz erreichbar. So erhöht sich bei der angenommenen Begrünung im Vergleich zu üblichen Kiesdächern neben der Verdunstungsleistung auch das Zwischenspeichervolumen der Dachflächen. Als Speichervolumen von Kiesdächern wurde nach Nophadrain ein Wert von 8 Litern pro Quadratmeter angenommen. Im Falle von unbegrüntem Dachflächen mit Terrasse und zusätzlicher Retentionsschicht wurde ein Wert von mindestens 20 Litern angenommen. Ein übliches Extensiv-Gründach kann ca. 30 Liter/m² speichern (BuGG zit n. Landtag Schleswig-Holstein, 2020), ein Photovoltaik-Gründach 36 Liter/m² (Zinco, 2021a). Ein Klima-Gründach (extensiv) verfügt über ein Speichervolumen von ca. 45 Litern (Zinco, 2021). Als Maximalpotenzial üblicher Gründächer wurde das Speichervolumen eines Dachgartens von 136 Litern pro Quadratmeter angenommen (Zinco, 2020, S. 5). Höhere Dachaufbauten besitzen auch noch deutlich größere Speichervolumina, sofern ein Gebäude über die ausreichende Traglast verfügt und der hohe Aufbau konstruktiv möglich ist.

Tabelle 35: Erreichtes Wasserspeichervolumen durch angenommene Begrünungen von Flachdachflächen im Gebäudebestand

Kennwert	Wert	Einheit
Durchschnittliches Speichervolumen der Flachdachfläche	24	Liter/m ²
Erreichter Anteil des Maximalpotenzials	18%	Prozent
Speichervolumen pro Hektar Siedlungsfläche	10.245	Liter/ha
Speichervolumen pro Hektar Gebäude- und Freifläche	15.118	Liter/ha

Quelle: Eigene Berechnungen nach (Zinco, 2021; Zinco, 2021a; BuGG zit n. Landtag Schleswig-Holstein, 2020),

Neben der Verdunstung und der Wasserspeicherung bieten Gründächer auch eine höhere Wasserretentionsfähigkeit. „Bei Wasserspeicherung wird das Niederschlagswasser

langandauernd festgehalten und an die Vegetation weitergegeben. Bei Wasserretention wird das Niederschlagswasser verzögert an die Kanalisation abgegeben“ (Nophadrain, 2020, S. 16). Beim Kiesdach fließen von 27 Litern ca. 21,6 l/m² vom Dach und belasten die Kanalisation (Optigrün, 2016, S. 3). Bei herkömmlicher Extensivbegrünung mit Drainage-Element (10 cm Aufbauhöhe) fließt mit 13,5 l/m² die Hälfte des Bemessungsregens vom Dach, Retentions Gründächer können mit 26,7 l/m² knapp 99 Prozent auf dem Dach zurückhalten (Optigrün, 2016, S. 3).

So bieten Gründächer die Möglichkeit, die Kanalisation erheblich zu entlasten. Insgesamt können nach diversen Erhebungen bei extensiven Substraten im Jahresmittel ca. 75 - 90 Prozent des Gesamtniederschlags zurückgehalten werden, bei intensiven Dachbegrünungen beträgt der Wasserrückhalt je nach Aufbau 60 - 99 Prozent der Niederschlagsmenge bei einer Speicherfähigkeit von 30 - 160 l/m² (Diverse Quellen zit. n. Bundesverband GebäudeGrün e. V., 2019).

4.1.2.4 CO₂-Absorption und Kühlwirkung von Baumpflanzungen⁵

Stadtbäume bieten ein gewisses Potenzial CO₂ zu absorbieren. Das Wachstum und das damit verbundene Absorptionspotenzial sind wesentlich von ihrer Nährstoff- und Wasserversorgung sowie von den am Standort vorherrschenden Temperaturen abhängig (Umweltbundesamt Deutschland, 2019). In den ersten Jahren ist das Absorptionspotenzial gering, denn junge „Bäume mit einem Alter von unter 20 Jahren weisen einen geringen Volumenzuwachs auf. Dieser steigt dann in den Folgejahren stark an und sinkt im Alter in Abhängigkeit von der Baumart wieder ab“ (Umweltbundesamt Deutschland, 2019). Zudem hängen das Wachstum und Absorptionspotenzial von der Baumart ab. Eine Buche muss etwa 80 Jahre wachsen, um eine Tonne CO₂ aufnehmen zu können (co2online, 2009). Folglich bindet sie pro Jahr 12,5 Kilogramm CO₂. Um jährlich eine Tonne CO₂ durch Bäume wieder zu kompensieren, müssten also 80 Bäume gepflanzt werden (co2online, 2009).

Durchschnittlich ist in Stadtbäumen über alle Baumaltersgruppen hinweg geschätzt eine Menge von 417 kg Kohlenstoff pro Baum gebunden (Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg, 2011). Auf die Stadtfläche (ohne Wald) bezogen, wurde bei einer Erhebung in Karlsruhe ein Vorrat von 25,6 t/ha Biomasse bzw. 12,8 t/ha Kohlenstoff geschätzt (Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg, 2011). Dies entspricht einer Absorption von ca. 47 t CO₂ pro Hektar. Nach Schätzung der Stadt Radolfzell könnten in Radolfzell pro Jahr ca. 50 Bäume durch die stadt eigenen Betriebe gepflanzt werden. Zusätzlich könnten geschätzt rund 100 Bäume an Bürger zur Pflanzung abgegeben werden. Nimmt man vereinfachend eine Absorption von 12,5 kg CO₂ pro Baum und Jahr bis zum Alter von 80 Jahren an, könnten durch die von der Stadt gepflanzten Bäume unter Berücksichtigung des Baumwachstums bis zum Jahr 2050 ca. 283 t CO₂ absorbiert werden. Würden die Bürger zusätzlich 100 Bäume pro Jahr pflanzen, käme man insgesamt auf eine Absorption von knapp 850 t CO₂, wie in Abbildung 13 dargestellt. Dies entspricht im Durchschnitt der Jahre etwas mehr als 26 kg CO₂ pro Einwohner und Jahr.

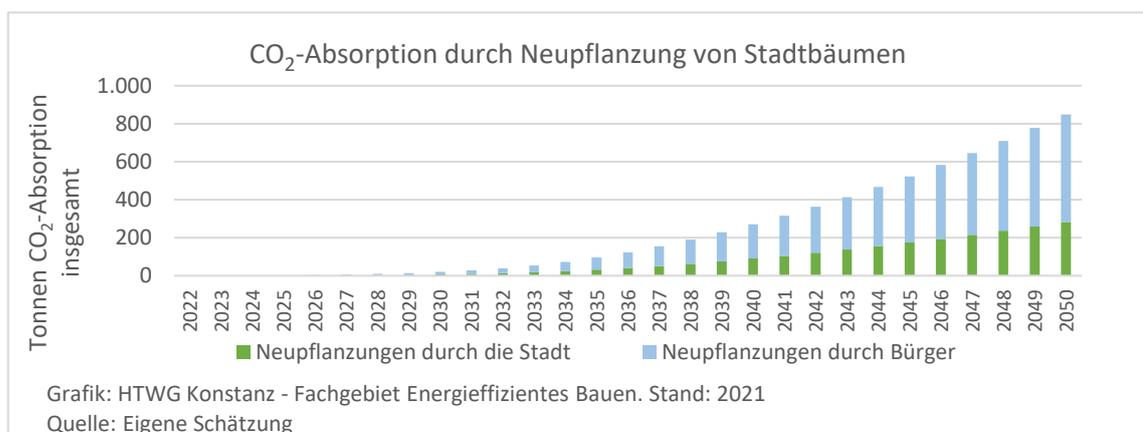


Abbildung 13: CO₂-Absorption durch Neupflanzung von Stadtbäumen in Radolfzell

⁵ „Die Kompensation von CO₂ durch Baumpflanzungen ist in Deutschland offiziell nicht möglich“ (Stiftung Unternehmen Wald, 2021)

Ein ausgewachsener, gut mit Wasser versorgter Stadtbaum erreicht eine Verdunstungsleistung von 300–500 Litern pro Tag (Zinco, 2019, S. 8). Da Bäume das Wasser durch die Spaltöffnungen auf der Blattfläche verdunsten, steht die Transpiration im direkten Verhältnis zur Blattoberfläche. Diese nimmt zwischen dem 20 und 50 Lebensjahr des Baumes stark zu und wächst danach im Vergleich nur noch wenig an (Meier, Krug, & Scherer, 2013). Angenommen wurde ein Pflanzalter von 10 Jahren und eine Zunahme der Verdunstungsleistung auf 250 Liter pro Baum und Sommertag, wenn der Baum ein Alter von 40 Jahren erreicht hat. Bei 100 Neupflanzungen pro Jahr summiert sich die Verdunstungsleistung der neu gepflanzten Bäume dann an warmen Sommertagen im Jahr 2050 geschätzt auf knapp 300.000 Liter pro Tag. Damit kann an heißen Sommertagen ein erhebliches Luftvolumen spürbar gekühlt werden.

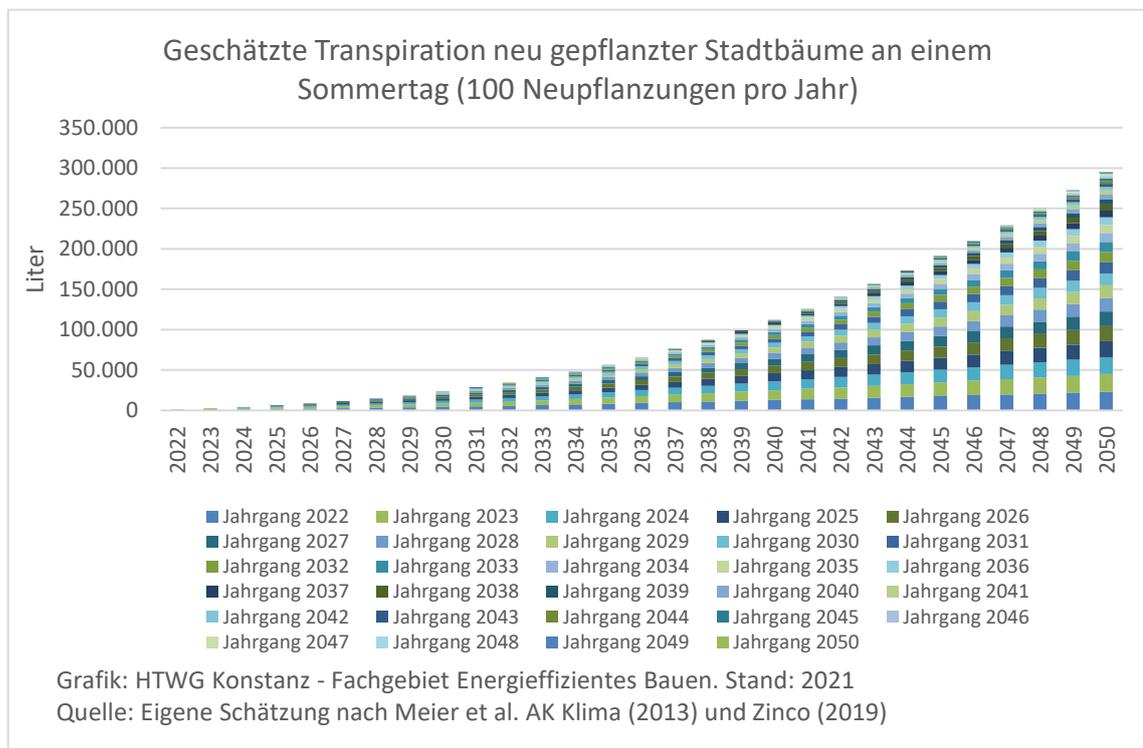


Abbildung 14: Geschätzte Transpiration neu gepflanzter Stadtbäume an einem Sommertag bei 100 Neupflanzungen pro Jahr

4.1.2.5 Maßnahmenvorschläge Klimaanpassung

Auch bei einer erfolgreichen Begrenzung der Erderwärmung auf 1,5°C bis 2,0°C wird es zu einer spürbaren Erhöhung der Temperaturen in den Siedlungen kommen, die insbesondere in Städten häufigere Probleme mit sommerlicher Hitze, Trockenheit und Sturzfluten infolge von Starkregenereignissen zur Folge haben können. Dem sogenannten Wärmeinseleffekt in den Städten kann vor allem durch eine gezielte Begrünung der Städte entgegengewirkt werden. Um die Risiken durch Sturzfluten zu reduzieren, sollte vor allem der Flächenverbrauch minimiert werden. Darüber hinaus können diverse Maßnahmen ergriffen werden, um den Ablauf des Regenwassers zu verbessern und Gebäude und Menschen vor Sturzfluten und Sturmereignissen zu schützen.

In der Landwirtschaft können ebenfalls zahlreiche Maßnahmen ergriffen werden, um die Risiken durch Erosion und Austrocknung zu reduzieren.

Ohne Anspruch auf Vollständigkeit sind im Folgenden einige Vorschläge möglicher Klimaanpassungsmaßnahmen aufgelistet.

Tabelle 36: Maßnahmenvorschläge zum Schutz vor Hitze und Dürren

Handlungsfelder	Maßnahmen
Gebäude allgemein	Photovoltaik mit Dachbegrünung kombinieren.
	Dachbegrünung fördern, insbesondere Klima-Gründächer mit hoher Verdunstungsleistung
	Fassadenbegrünung (südseitig vorzugsweise Sommergrün → größere Wärmegewinne im Winter)
	Sommerlicher Wärmeschutz durch konstruktive Gebäudeverschattung
	Albedooptimierung durch geeignete Material- und Farbauswahl
Gebäude Neubau	Nutzung klimatisch günstiger Baustoffe (Lehm, Holz, Stroh, Hanfstein usw.).
	In Neubaugebieten Gebäudeausrichtung und Bebauungsdichte optimieren, dabei gegenseitige Verschattung gezielt einsetzen
	Öffnung zu Freiräumen optimieren
Freiflächen und Verkehrsinfrastruktur	Luftleitbahnen schützen und schaffen
	Verschattung im öffentlichen Raum erhöhen
	Begrünte Freiflächen schaffen (öffentliche und private)
	Begrünung sonstiger Freiflächen mit Bäumen, Sträuchern etc.
	Begrünung möglichst mit artenreichen Wiesen (Pflegeaufwand berücksichtigen)
	Wahl von geeigneten, trockenheits- und wärmetoleranten Bäumen
	Optimierung der Luftzirkulation durch Berücksichtigung der Windrichtung und Vermeidung von Hindernissen in Kaltluftbahnen.
	Fuß- und Radwegenetze durchgängig verschatten
	Haltestellen und Wartebereiche begrünen und beschatten
	Parkplätze begrünen und verschatten (an geeigneten Standorten begrünte Solarcarports nutzen)
Landwirtschaft	Agriphotovoltaik (kann in Dürrephasen Austrocknung der Böden und Ertragsausfälle reduzieren)
	Agroforstwirtschaft
	Permakulturwirtschaft

Tabelle 37: Maßnahmenvorschläge zu Wasserhaushalt und Wasserkreisläufen

Handlungsfelder	Maßnahmen
Allgemein	Stadtentwässerung und Stadtklima strategisch zusammendenken
	Optimierung der Wassereffizienz in den Produktionsprozessen
	Nutzung von Regenwasser und aufbereitetem Grauwasser als Prozesswasser und zur Bewässerung von Grünflächen sowie für (temporäre) Wasserflächen
Gebäude	Regenwasserspeicherung zur sommerlichen Bewässerung der Gebäudebegrünung und der grünen Freiflächen an den Gebäuden
	Trockenheitstolerante Begrünung und integrierte Bewässerungskonzepte für Grünflächen
	Abwasseraufbereitungskonzepte für Gebäude, die Kanalisation und Vorfluter entlasten (Möglichst ohne Anschluss an Kanalisation auskommen)
Freiflächen	Dezentrale Regenwasserbewirtschaftung auf privaten und öffentlichen Flächen
	Oberflächenversiegelung vermeiden
	Flächensparende Mobilitätsinfrastruktur mit geringer Versiegelung
	Trockenheitstolerante Begrünung
Landwirtschaft	Verbesserung der Wasserspeicherung der Böden durch Humusaufbau, z. B. durch Ökolandbau, verbesserte Fruchtfolge, Zwischenfruchtanbau
	Reduktion von Schadstoffeinträgen in Grundwasser und Gewässer durch Ökolandbau und Nutzung mehrjähriger Energie- und Rohstoffpflanzen, die keinen chemischen Pflanzenschutz benötigen.
	Schutz vor Winderosion und Austrocknung, z. B. durch Agroforstwirtschaft oder Ergänzung von Grünstreifen mit Gehölzen und Blühpflanzen

Tabelle 38: Maßnahmenvorschläge zum Schutz vor Sturzfluten infolge von Starkregenereignissen

Handlungsfelder	Maßnahmen
Gebäude	Überflutungssichere Zugänge
	Überflutungssichere Technikräume
Freiflächen	Dezentrale Niederschlagswasserbehandlung und -versickerung
	Wasserrückhalteflächen möglichst in das Freiflächenkonzept (Wege- und Erholungskonzept) integrieren.
	Oberflächenversiegelung vermeiden
	Flächensparende Mobilitätsinfrastruktur mit geringer Versiegelung
	Stationäre und mobile Schutzeinrichtungen (Staustufen, Schutzwände etc.)
	Außengebietswasser rück- und abhalten
	Sicher Ableiten: Regenwasser auf definierten Fließwegen sicher ab- und umleiten, Bauwerke und Verkehr sichern, Objektschutz
Versickerungsbecken einrichten	
Landwirtschaft	Verbesserung der Wasseraufnahmefähigkeit der Böden durch Humusaufbau, z. B. durch Ökolandbau, verbesserte Fruchtfolge, Zwischenfruchtanbau
	Erosionsschutz durch Nutzung mehrjähriger Energie- und Rohstoffpflanzen (Vorteile: kein Pflügen notwendig, ganzjährige Durchwurzelung des Bodens). Dies mindert auch den Stoffeintrag in Gewässer und Grundwasser
	Schutz vor Winderosion und Austrocknung, z. B. durch Agroforstwirtschaft oder Ergänzung von Grünstreifen mit Gehölzen und Blühpflanzen

Tabelle 39: Maßnahmvorschläge zum Schutz vor Sturmereignissen

Handlungsfelder	Maßnahmen
Gebäude	Verstärkte Dächer und Fassaden
	Sturmsichere Verankerung von Solaranlagen
Freiflächen	Sturmsichere Verankerung von Außenmobiliar
	Pflanzung sturmfester Bäume entlang der Verkehrsinfrastruktur
	regelmäßige Kontrolle der Bäume in Gebäudenähe auf Sturmfestigkeit

4.1.3 Naturschutz

4.1.3.1 Synergieeffekte der Energiepflanzennutzung für den Naturschutz

Viele Energiepflanzen der zweiten Generation liefern mit Pollen und Nektar ein wertvolles Nahrungsangebot für Insekten. Bisher bietet auf der Ackerfläche vor allem der Raps ein Nektarangebot. Dieser ist aber in der Regel nach zwei Monaten Blühdauer bereits im Juni verblüht. Anschließend finden Insekten ein deutlich geringeres Angebot auf den Ackerflächen vor. Kombiniert man z. B. Durchwachsene Silphie, Miscanthus, Paulownia, Rutenhirse/Switchgrass, Sida, Sonnenblume, Sorghum bicolor, Ungarisches Hirschgras, Weide und Wildblumen-Mischungen, erhält man neben guten Energieerträgen ein Nahrungsangebot für Insekten, dass von Ende März bis in den Oktober nahezu die gesamte Vegetationsphase abdeckt. Damit wird nicht nur die Pflanzenvielfalt, sondern auch der Anteil der als Insektenweide dienenden Pflanzen auf der Ackerfläche deutlich erhöht.

Thermisch genutzte Pflanzen wie Miscanthus und Sida, die erst im Frühjahr geerntet werden, bieten zudem Wildtieren bis zur Ernte einen wertvollen Schutzraum und den ganzen Winter hindurch Deckung. Zudem ergaben Untersuchungen auf Flächen mit Silphie und Topinambur signifikant mehr Brutnachweise als auf Flächen mit Wintergetreide oder Mais (Dziewiaty, 2011). Daher wird die Nutzung mehrjähriger Energiepflanzen auch mit Blick auf den Vogelschutz empfohlen (Dziewiaty, 2011).

4.1.3.2 Synergieeffekte von Photovoltaikanlagen für den Naturschutz

Ein Pilotversuch des BUND und der solarcomplex AG hat belegt, dass sich intensiv genutztes Grünland unterhalb von Photovoltaikanlagen innerhalb kurzer Zeit zu einer artreichen Wiese entwickeln kann: Nach Erhebungen des BUND haben sich aufgrund einer zielgerichteten Pflege auf der Fläche Solarparks Mooshof bereits in den ersten beiden Jahren diverse gefährdete Tierarten angesiedelt. Nach Einschätzung des BUND ist der hohe Bestand an seltenen Insekten auf der Fläche des Solarparks auffallend (Siebler, 2013). Auch nach Einschätzung des Bayerischen Staatsministeriums für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie können auf Grünland errichtete Solaranlagen bei extensiver Nutzung ökologische Vorteile bieten: „Bei geschickter Einbindung von PV-Freiflächenanlagen in vorhandene Biotop-Strukturen und Landschaftsbild können PV-Freiflächenanlagen die Landschaft ökologisch aufwerten“ (Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie, 2020).

4.1.4 Landwirtschaft

4.1.4.1 Erneuerbare Energiepotenziale

Das Bioenergiepotenzial der Landwirtschaft in Radolfzell wird auf 390 - 480 kWh pro Einwohner geschätzt. Der größte Anteil davon besteht in der angenommenen Nutzung von Energiepflanzen mit rund 280 kWh//Ea (Eigene Brechnung nach KTBL, 2012; TFZ Bayern, 2017; Vollrath, et al., 2016; GFEL Szarvas, o. J.). Angenommen wurde ein Energiepflanzenanteil von maximal 20 Prozent an der Ackerfläche, wobei hier die Nutzung von Energiepflanzen der zweiten Generation ⁶ bei ökologischer Wirtschaftsweise angenommen wurde. Das größte erneuerbare Energiepotenzial der Landwirtschaft besteht aber in der Nutzung von Agriphotovoltaikanlagen. Würden 5 Prozent der landwirtschaftlichen Nutzfläche mit Agriphotovoltaikanlagen ausgestattet, könnten bei einer Nutzung von bifazialen Modulen bis zu 2.370 kWh pro Einwohner und Jahr erzeugt werden (Eigene Brechnung nach Fraunhofer ISE, 2019). Dies entspricht rund 80 Prozent des Dachflächenphotovoltaikpotenzials.

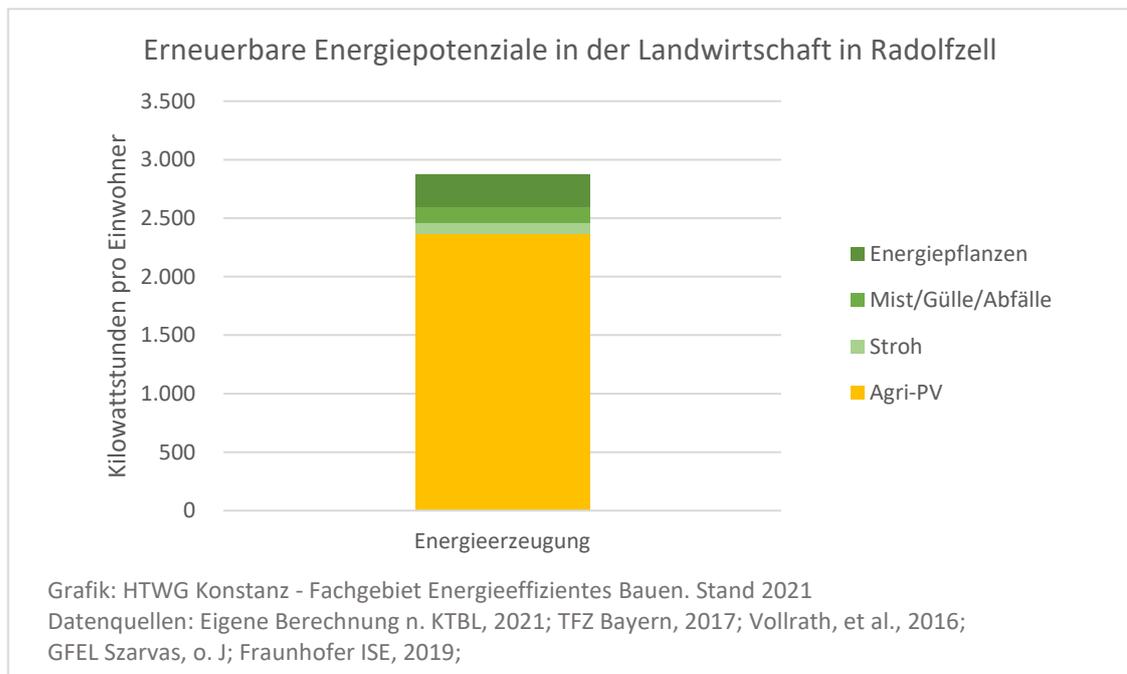


Abbildung 15: Erneuerbare Energiepotenziale in der Landwirtschaft in Radolfzell

Anhand der aktuellen Biogasnutzung wurde geschätzt, welches Potenzial die bisher ungenutzte Abwärme der Biogasanlagen noch bietet. Geht man nach Angaben des KTBL (2012) von einem elektrischen Wirkungsgrad von 35 Prozent und einem thermischen Wirkungsgrad von 50 Prozent aus, ergibt sich theoretisch ein Potenzial, das bei einem Energiestandard von 55 kWh/m²*a ausreicht, um ca. 540 Haushalte mit Wärme zu versorgen, was etwa 3,6 Prozent der Haushalte entspricht, die für das Jahr 2035 erwartet werden.

⁶ Miscanthus, Durchwachsene Silphie, Rutenhirse/Switchgrass, Sida, Sonnenblume, Sorghum bicolor, Ungarisches Hirschgras, KUP (Weide) und Wildblumen-Mischungen

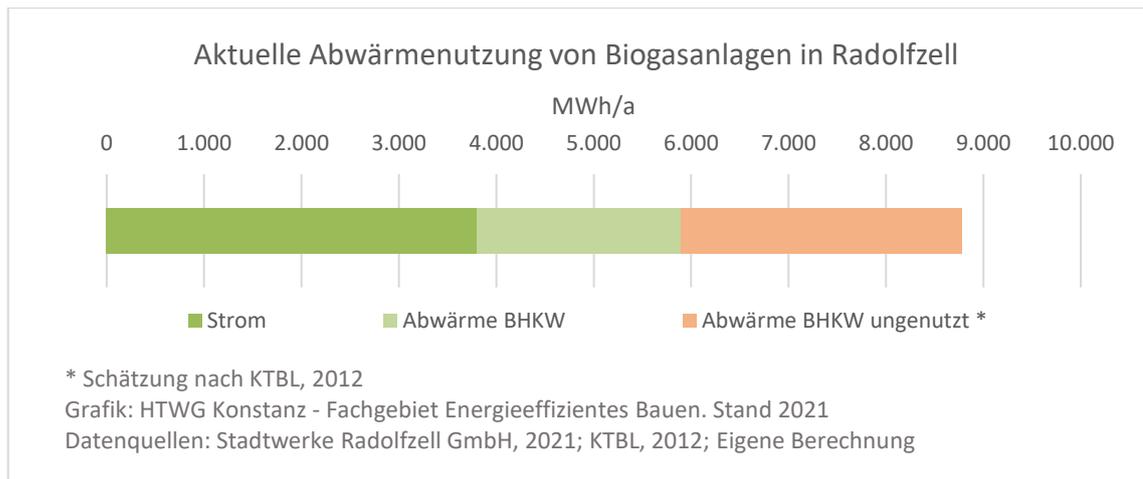


Abbildung 16: Aktuelle Abwärmenutzung von Biogasanlagen in Radolfzell

4.1.4.2 Potenziale einer Umstellung auf ökologische Wirtschaftsweise im Hinblick auf Klimaanpassung und Klimaschutz

Eine umfassende Analyse des Potenzials des Ökolandbaus zu Erosions- und Hochwasserschutz stellte eindeutige Vorteile in Vergleich zur konventionellen Wirtschaftsweise fest: In ökologisch bewirtschafteten Flächen wurden „neben höheren Gehalten an organischem Bodenkohlenstoff und höherer Aggregatstabilität auch 26 Prozent weniger Oberflächenabfluss und 22 Prozent weniger Bodenabtrag festgestellt als in vergleichbaren konventionellen Flächen“ (Hauschild, Weckenbrock, & Gattinger, 2021). Einzelstudien deuten zudem auf Vorteile hinsichtlich des Einflusses auf Hitze und Dürren hin (Hauschild, Weckenbrock, & Gattinger, 2021). Nach Hausschild et al. reichen die Anpassungspotenziale jedoch nicht aus, wenn der Klimawandel weiterhin fortschreitet wie bisher und seine negativen Effekte wie erwartet auftreten. Und bisher trage auch die Landwirtschaft erheblich zu den Treibhausgasemissionen bei. Daher ist es nach Hausschild et al. erforderlich, parallel zu den Anpassungsbemühungen an den bereits laufenden Klimawandel auch die Anstrengungen zu verstärken, Treibhausgasemissionen (THG-Emissionen) zu reduzieren. Eine Möglichkeit besteht in einer Reduktion des Einsatzes von synthetischen Dünge- und Pflanzenschutzmitteln. Daneben bietet eine Umstellung auf ökologische Wirtschaftsweise unabhängig von den Einsparungen durch den Verzicht auf synthetische Dünge- und Pflanzenschutzmittel Potenziale zur Treibhausgasminde- rung. Die Auswertung von 119 Studien im Rahmen des Thünen Reports 65 aus dem Jahr 2019 führte zu folgendem Ergebnis: „Verglichen mit konventioneller Bewirtschaftung ergeben sich durch ökologische Bewirtschaftung pro Hektar und Jahr Einsparungen an bodenbürtigen THG-Emissionen in Höhe von einer Tonne CO₂-Äquivalente“ (Sanders & Heß, 2019, zit. n. Hauschild, Weckenbrock, & Gattinger, 2021). Möglicherweise könnten die Einsparungen sogar auf bis zu 1,5 Tonnen CO₂-Äquivalente pro Hektar und Jahr, wie weitere Vergleichsstudien nahelegen (Hauschild, Weckenbrock, & Gattinger, 2021). Überträgt man dieses Potenzial vereinfachend auf die Ackerflächen Radolfzells, ergibt sich ein Potenzial von ca. 1.145 Tonnen pro Jahr, das möglicherweise auf bis zu 1.720 Tonnen pro Hektar und Jahr gesteigert werden kann.

Bezogen auf die Bevölkerung von Radolfzell ergibt dies ein Potenzial von ca. 37 bis 55 kg pro Einwohner und Jahr. Hinzu kämen die außerhalb Radolfzells vermiedenen Emissionen, die ansonsten bei der Herstellung synthetischer Dünge- und Pflanzenschutzmittel verursacht würden.

4.1.4.3 Schätzung der möglichen Kohlenstoffeinlagerung in landwirtschaftlichen Böden

Unabhängig von der Wirtschaftsweise bietet sich in der Landwirtschaft grundsätzlich die Möglichkeit, durch Humusaufbau Kohlenstoff in den Böden einzulagern und somit CO₂ zu absorbieren. So können auch im Ackerbau durch Zwischenfruchtanbau, verbesserte Fruchtfolge und Ökolandbau ca. 0,75 t C pro Hektar und Jahr eingelagert werden, was einem CO₂-Absorptionspotenzial von ca. 2,75 t CO₂/ha*a entspricht. (Vgl. Tabelle 40)

Tabelle 40: C-Sequestierungsraten verschiedener Maßnahmen zum Humusaufbau und mögliche CO₂-Absorption

Maßnahme	C-Sequestierungsrate t C/ha*a	Standardabweichung t C/ha*a	CO ₂ -Absorption t CO ₂ /ha*a
Zwischenfruchtanbau	0,32	± 0,08	1,17
Verbesserte Fruchtfolge	0,16	± 0,05	0,59
Ökolandbau	0,27	± 0,37	0,99
Umwandlung Acker- zu Grünland	0,73	± 0,17	3,68
Agroforstwirtschaft	0,68	± 0,30	2,50

Quelle: Literaturdaten zit. n. Wiesmeier, Burmeister, Treisch, & Brandhuber, 2017.

Angewendet auf den Ackerflächen von Radolfzell ergibt sich damit, wie in Tabelle 41 dargestellt, ein geschätztes CO₂-Absorptionspotenzial des Humusaufbaus von rund 100 kg pro Einwohner und Jahr.

Tabelle 41: Geschätztes CO₂-Absorptionspotenzial des Humusaufbaus auf Ackerflächen in Radolfzell

Maßnahme	CO ₂ -Absorption	Einheit
Zwischenfruchtanbau	1.357	t CO ₂ /a
Verbesserte Fruchtfolge	684	t CO ₂ /a
Ökolandbau	1.148	t CO ₂ /a
SUMME	3.190	t CO ₂ /a
CO ₂ -Absorptionspotenzial pro Einwohner	100	kg CO ₂ /Ea

Quelle: Eigene Berechnung

Durch eine zusätzliche Umstellung auf Agroforstwirtschaft kann das Potenzial pro Hektar, wie in Tabelle 40 ersichtlich ist, fast verdoppelt werden. Würde also die Hälfte der Ackerfläche in Form einer Agroforstwirtschaft bewirtschaftet, wäre im Ackerbau eine CO₂-Absorption von ca. 145 kg pro Einwohner und Jahr möglich. Setzen sich das Bevölkerungswachstum und der Flächenverbrauch weiter fort, reduziert sich das Absorptionspotenzial dementsprechend.

4.1.4.4 Mögliche Folgen von Landnutzungsänderungen

Zu den Kohlenstoffvorräten in den Böden Radolfzells lagen im Rahmen dieser Untersuchung keine Daten vor, die eine genauere Einschätzung der Folgen von Landnutzungsänderungen in Radolfzell zulassen. Daher wurde auf Daten aus Bayern zurückgegriffen, um zumindest die Zusammenhänge und vermutete Potenziale anschaulich zu machen. Die mittleren SOC-Vorräte in den oberen 40 cm Boden werden in Bayern auf 78 t/ha auf Ackerflächen und auf 111 t/ha auf Grünlandflächen geschätzt (Wiesmeier, Burmeister, Treisch, & Brandhuber, 2017). Die Umwandlung von Grünland in Ackerland ist in der Regel mit einem entsprechenden Verlust an Humus und Kohlenstoffvorräten verbunden und sollte daher möglichst vermieden werden. Allerdings ist auch die Umwandlung inländischer Ackerflächen in Grünland als Klimaschutzmaßnahme nicht unproblematisch, wenn der Ackerflächenverlust durch Nahrungsmittelimporte aus dem Ausland kompensiert werden muss und dort zu klimaschädlichen Landnutzungsänderungen führt. So ist hinlänglich bekannt, dass die erhöhte Nachfrage nach Agrarerzeugnissen erheblich zu den klimaschädlichen Rodungen wertvoller Ur- und Regenwälder beiträgt.

4.1.5 Forstwirtschaft

4.1.5.1 Forstwirtschaftliche Klimaschutzmaßnahmen

Die Forstwirtschaft kann durch verschiedene Maßnahmen den Kohlenstoffvorrat pro Hektar Wald erhöhen. Als Speicher dienen die lebende, ober- und unterirdische Biomasse, Totholz, Mineralboden und Streuauflage. Allerdings: „Die Kompensation von CO₂ durch Baumpflanzungen ist in Deutschland offiziell nicht möglich“ (Stiftung Unternehmen Wald, 2021). In der gesamten lebenden Biomasse sind in Bayern je Hektar im Mittel rund 130 t C gebunden, was bei einer Freisetzung rund 477 t CO₂ entsprechen würde (Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft, 2021). In Baden-Württemberg entsprach die oberirdische Biomasse im Jahr 2012 einer Gesamtmenge von 517 Mio. t CO₂, was rund 390 t CO₂/ha entspricht (Forst Baden-Württemberg, 2021).

4.1.5.1.1 CO₂-Absorption im bewirtschafteten Bestand

Die durchschnittliche jährliche Kohlenstoffbindung liegt in Bayern bei ca. 0,9 t C je Hektar, was einer CO₂-Absorption von rund 3,3 t pro Hektar und Jahr entspricht (Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft, 2021). Einzelne Bäume weisen eine jährliche CO₂-Absorption im Kilogramm Bereich auf (Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft, 2021). Der durchschnittliche Holzzuwachs in Bayern beträgt rund 12 Vfm pro Hektar und Jahr und liegt damit sehr nah an den Werten Baden-Württembergs, wo der jährliche Holzzuwachs über alle Baumarten bei 12,3 Vfm/ha liegt (SDW Schutzgemeinschaft Deutscher Wald, 2021). Pro Hektar wird nach Ergebnissen der dritten Bundeswaldinventur weniger als der Zuwachs geerntet (mit 8,7 Kubikmeter) (Forst Baden-Württemberg, 2021). Im Kreis Konstanz werden etwa 88 Prozent des Zuwachses geerntet. Unter der Annahme, dass die Zuwächse in Radolfzell dem Durchschnitt nahekommen, ergibt sich bei einer jährlichen CO₂-Absorption von ca. 3 t/ha und einer Waldfläche von 1.899 ha eine Absorption von rund 180 kg CO₂ pro Einwohner und Jahr.

4.1.5.1.2 Nutzungsverzicht

Alle der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft bekannten „wissenschaftlichen Arbeiten, die unter gleichen Rahmenbedingungen bewirtschaftete und unbewirtschaftete Wälder vergleichen, kommen zu dem Ergebnis, dass bewirtschaftete Wäldern mit der C-Speicherung in Wald und Holzprodukten sowie der Substitutionsleistung die Atmosphäre stärker entlasten, als die C-Speicherung im unbewirtschafteten Wald“ (Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft, 2021). Wie groß die Differenz ist, hängt jedoch von der Wald- bzw. Holznutzung sowie den betrachteten Zeiträumen ab. So ergibt sich nach Kohl et al. (2009) bei einem Vergleich zwischen Nutzungsverzicht und einer vollständigen energetischen Verwertung des geernteten Holzes für einen 30-jährigen Zeitraum sogar eine bessere CO₂-Bilanz des Nutzungsverzichts (Kohl et al., 2009, zit. n. NABU, 2010 S. 2). Zudem weist der NABU darauf hin, dass verschiedene Studien belegt haben, dass auch sehr alte ungenutzte Naturwälder die Fähigkeit besitzen, weiterhin Kohlenstoff einzulagern und damit als CO₂-Senke zu wirken (Naturschutzbund Deutschland, 2010, S. 3). Trotzdem kann auch nach Schulze et al. die gezielte Optimierung des Holzzuwachses bei der Bewirtschaftung zu einer höheren CO₂-Speicherung führen (Schulze, et al., 2020). Einen Kompromiss zwischen Nutzungsverzicht und Bewirtschaftung hat man beim sogenannten Lübecker Modell gewählt. Bei der naturnahen Waldbewirtschaftung wird auf Einzelstammnutzung und eine hohe Qualität gesetzt, um auch andere ökologische Funktionen des Waldes zu erhalten oder wieder zu stärken, die über die Kohlenstoffeinlagerung hinausgehen (Naturwald Akademie gGmbH, 2017). „Obwohl auch naturnahe Wälder unter den Folgen des Klimawandels leiden, zeigt sich, dass sie weit weniger betroffen sind als naturferne Forste“ (Naturschutzbund Deutschland, 2019). Ein Grund dafür ist, dass naturnah bewirtschaftete Wälder mit hohem Totholzanteil und mehr Humusbildung mehr Wasser speichern und Dürrephasen besser überstehen können. Auf diese Weise können die Wälder auch ihre Funktion als lebende Kohlenstoffspeicher voraussichtlich länger als konventionell bewirtschaftete Wälder erhalten, wenn sich die klimatischen Bedingungen ändern.

4.1.5.1.3 Aufforstungen

Das Potenzial, durch Aufforstungen einen Nutzen für den Klimaschutz zu erzielen, dürfte eher gering sein, da die Flächen dafür von der Landwirtschaft bereitgestellt werden müssen. Ein Verlust an landwirtschaftlicher Nutzfläche würde angesichts des hohen flächenbezogenen Importanteils der Ernährung in Deutschland ⁷ den Importbedarf weiter erhöhen. Zusätzliche Importe können z. B. den Druck auf Ur- und Regenwälder erhöhen, deren Rodung mit erheblichen Treibhausgasemissionen verbunden sind. Angesichts des hohen Kohlenstoffspeicherpotenzials inländischer Grünlandflächen sollte dieses Risiko bei der Diskussion über Aufforstungen stets berücksichtigt werden. Grundsätzlich bietet aber eine Aufforstung das Potenzial, auf lange Sicht den Kohlenstoffspeicher pro

⁷ „Im Jahr 2017 betrug die insgesamt für den Inlandsverbrauch von Ernährungsgütern benötigte Fläche 19,1 Mill. ha. Sie übersteigt damit die im Inland für Ernährungszwecke belegte Fläche um 5,0 Mill. ha. Deutschland weist bei der Flächenbelegung einen Importüberschuss, das heißt ein „Flächendefizit“ auf. (Statistisches Bundesamt, 2019)

Hektar zu erhöhen und somit CO₂ zu absorbieren. In Bayern etwa wird der Kohlenstoffvorrat der Wälder auf 275 t C/ha geschätzt (Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft, 2021). Dabei handelt es sich allerdings um einen mittleren Wert für Bayern, der nicht auf einen einzelnen Bestand übertragen werden kann. Gleiches gilt für die Kohlenstoffvorräte der Dauergrünlandflächen, die in Bayern im Durchschnitt auf 111 t C/ha geschätzt werden (Wiesmeier, Burmeister, Treisch, & Brandhuber, 2017), aber in Deutschland auch 180 t C/ha und deutlich mehr betragen können, je nach Boden und Nutzung des Grünlandes (BLE Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung, 2021). Die Differenz deutet darauf hin, in welcher Größenordnung über lange Zeiträume Kohlenstoff durch Aufforstung gespeichert werden könnte.

Wie sich die CO₂-Bilanz einer Aufforstung allerdings unter den sich verändernden klimatischen Bedingungen auf dem Weg dorthin in den ersten 30 bis 60 Jahren entwickeln würde und welche Baumarten am besten geeignet sind, das theoretische Potenzial auch nachhaltig auszuschöpfen, erscheint nach der Literaturrecherche noch fraglich. Schließlich müssen die heranwachsenden Bäume dauerhaft mit sich ändernden klimatischen Bedingungen zurechtkommen müssen, solange die Anteile der Treibhausgase in der Atmosphäre weiter zunehmen.

In Radolfzell stehen aktuell etwa 2 Hektar für die Aufforstung zur Verfügung. Die theoretisch mögliche Kohlenstoffeinlagerung kann in Radolfzell deutlich von den genannten Mittelwerten abweichen und muss daher speziell untersucht werden.

4.1.5.1.4 Holznutzung im Hochbau

Entscheidet man sich für eine Fortsetzung der Waldbewirtschaftung, ist der Einsatz im Hochbau eine Möglichkeit, den im genutzten Holzzuwachs gebunden Kohlenstoff über einen möglichst großen Zeitraum zu fixieren. Dies gilt insbesondere, wenn das Holz nach dem Ende seiner Nutzung als Bauholz weiterhin stofflich genutzt wird, etwa für die Produktion von Möbeln oder Dämmstoffen. Voraussetzung dafür ist eine schadstofffreie Behandlung des Holzes über den gesamten Lebenszyklus.

Der Anteil von Holz am Neubau ist in Radolfzell zwischen den Jahren 2009 und 2020 von knapp 28 Prozent auf etwas mehr als 37 Prozent gestiegen. Sofern ausreichende Mengen an Bauholz verfügbar sind, besteht somit in Radolfzell noch Potenzial, Bauholz als Kohlenstoffspeicher verstärkt zu nutzen.

In bekannten Holzwohnhäusern, die in Geschossbauweise meist in Hybridbauweise errichtet werden, wurden ca. 400 bis 700 m³ Holz verbaut (Beispiele: e3 in Berlin, MFH Holzhausen in Steinhausen (CH) oder Woodcube in Hamburg). In durchschnittlichen Einfamilienhäusern können je nach Bauweise 40 bis 140 m³ Holz verbaut werden, in größeren Einfamilienhäusern auch mehr. Fichtenholz bindet ca. 0,2 t C pro Kubikmeter, Buchenholz ca. 0,3 t C pro Kubikmeter Bauholz. Somit können pro Kubikmeter Bauholz ca. 0,7 bis 1,1 t CO₂ absorbiert werden. Bei einer vollständigen CO₂-Bilanz sind jedoch auch die Emissionen der Rohstoffbereitstellung, der Gebäudeherstellung, des Rückbaus und der Entsorgung zu berücksichtigen. Umso wichtiger ist es daher, auch hier möglichst vollständig auf die Nutzung erneuerbarer Energien umzustellen.

4.2 Gebäude und Anlagen

4.2.1 Energieeffizienz Gebäudebestand

4.2.1.1 Elektrifizierung der Wohngebäudebeheizung

Nach co2online wird die jährliche Reduktion des Energiebedarfs für Raumwärme in Wohngebäuden auf ca. 2,4 kWh/m² geschätzt (co2online gemeinnützige GmbH, 2011/2014). Wird dieser Trend der Energieeinsparung fortgesetzt, wird bis 2035 eine Reduktion um 30 kWh/m²*a erreicht. In diesem Fall müssten, sofern keine Biomasse importiert würde, geschätzt rund 80 Prozent des Wohngebäudebestandes mit strombasierten Systemen beheizt werden, wie etwa Wärmepumpen, Infrarotheizungen oder anderen strombasierten Systemen. (Vgl. Abbildung 17)

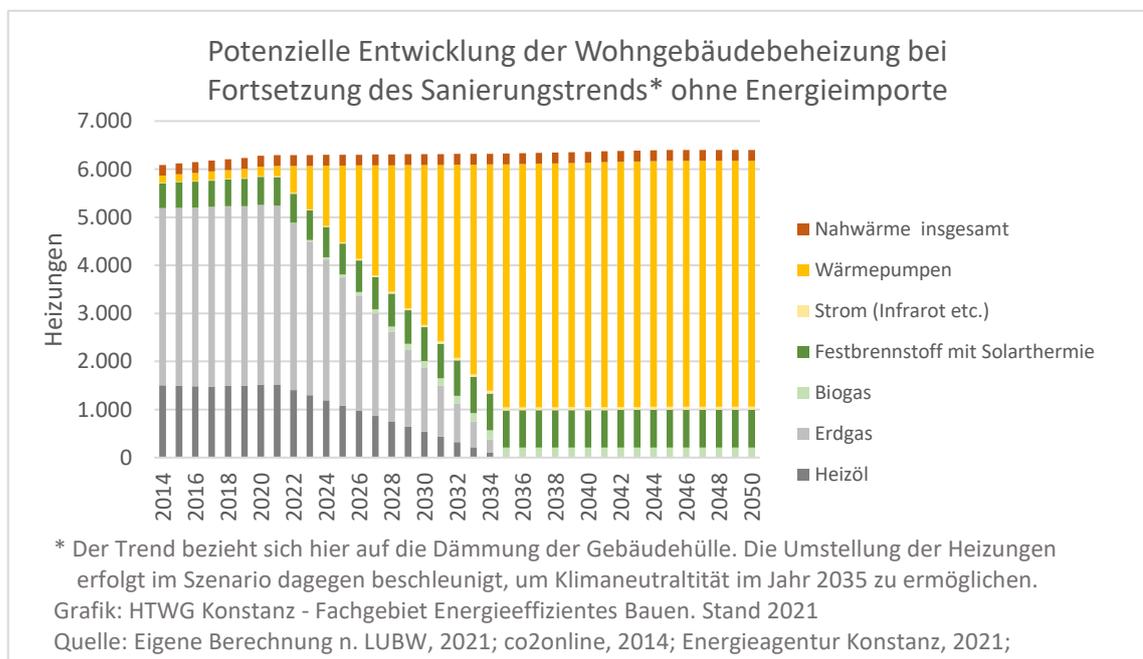


Abbildung 17: Potenzielle Entwicklung der Wohngebäudebeheizung in Radolfzell bei Fortsetzung des Trends bei der Gebäudehüllensanierung ohne Energieimporte

Nach Einschätzung der Deutschen Energie-Agentur GmbH (dena) ließe sich der Wärmebedarf im Durchschnitt auf Werte von 50 – 60 kWh/m² senken. Bei besserem Dämmstandard, einer Nutzung von Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung und von Solaranlagen etc. können auch Werte von ca. 30 kWh/m² erreicht werden. (dena, 2016, S. 3) Für das Szenario Klimaneutralität 2035 wurde daher ein Mittelwert von 55 kWh/m² angenommen. Dies entspricht einer Bedarfsreduktion um 55 Prozent. In diesem Szenario könnten die lokalen biogenen Brennstoffe unterstützt durch die Dachflächensolarthermie mehr als ein Viertel der Wohngebäude mit Wärme versorgen. Dementsprechend müssten nur noch knapp zwei Drittel der Wohngebäude strombasiert beheizt werden. Mit der gleichen Abwärme könnten mit Biomasse befeuerte BHKW dabei doppelt so viele Häuser versorgen, wie im heutigen Status Quo. (Vgl. Abbildung 18)

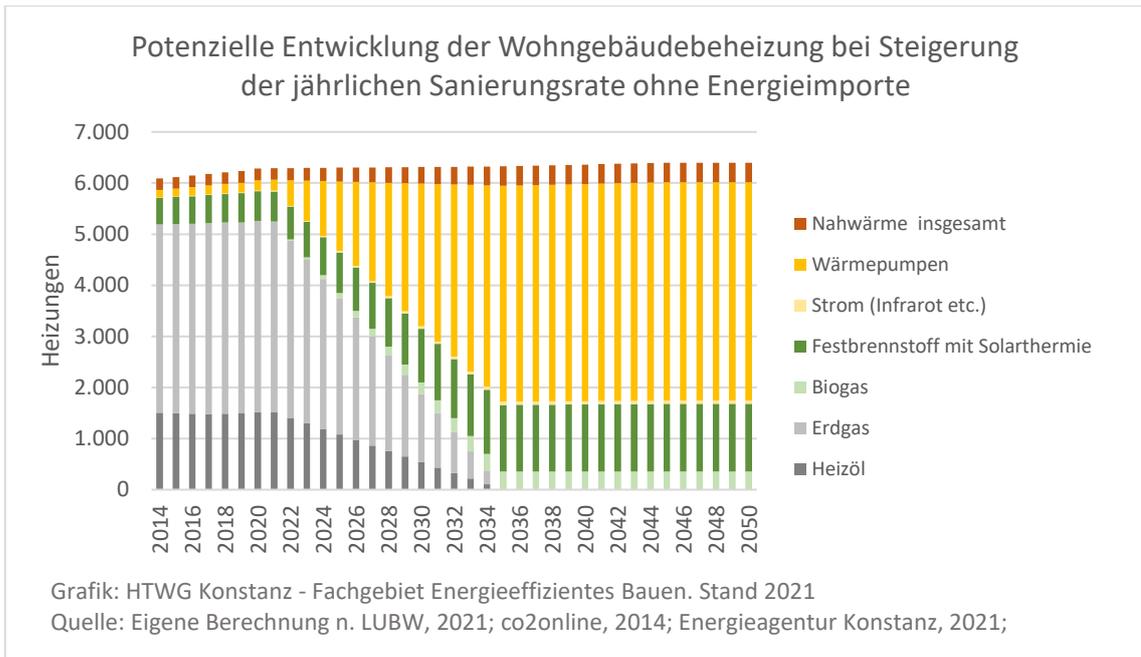


Abbildung 18: Potenzielle Entwicklung der Wohngebäudebeheizung in Radolfzell bei Steigerung der jährlichen Sanierungsrate ohne Energieimporte

Da die geschätzten Bioenergiepotenziale im Land Baden-Württemberg im Durchschnitt über den pro Person in Radolfzell vorhandenen Potenzialen liegen, besteht die Möglichkeit Energie zwischen den Gemeinden und Landkreisen in Baden-Württemberg auszutauschen. Nimmt man an, dass das pro Person in Baden-Württemberg vorhandene Bioenergiepotenzial genutzt würde, müsste im Szenario Klimaneutralität nur noch etwa die Hälfte des Wohngebäudebestandes in Radolfzell mit strombasierten Systemen beheizt werden. (Vgl. Abbildung 19)

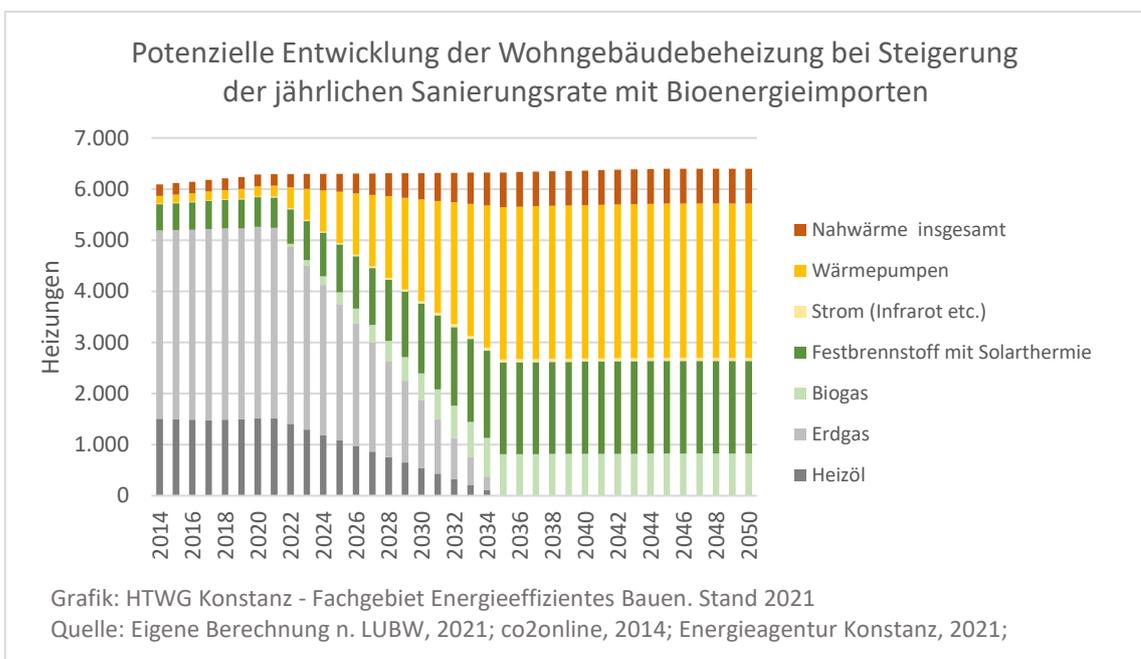


Abbildung 19: Potenzielle Entwicklung der Wohngebäudebeheizung in Radolfzell bei Steigerung der jährlichen Sanierungsrate mit Bioenergieimporten aus Baden-Württemberg

4.2.1.2 Endenergieverbrauch des Wohnens

Im Szenario Klimaneutralität 2035 könnte der Endenergieverbrauch des Wohnens deutlich reduziert werden, pro Einwohner von knapp 7,0 MWh auf rund 2,4 MWh jährlich. Grund dafür ist die hohe Energieeffizienz heutiger Wärmepumpen, die bei einer Arbeitszahl von 3,5 für die Bereitstellung von 55 kWh Wärme pro Quadratmeter weniger als 16 kWh Strom benötigen. Oft werden heute auch höhere Arbeitszahlen erreicht.

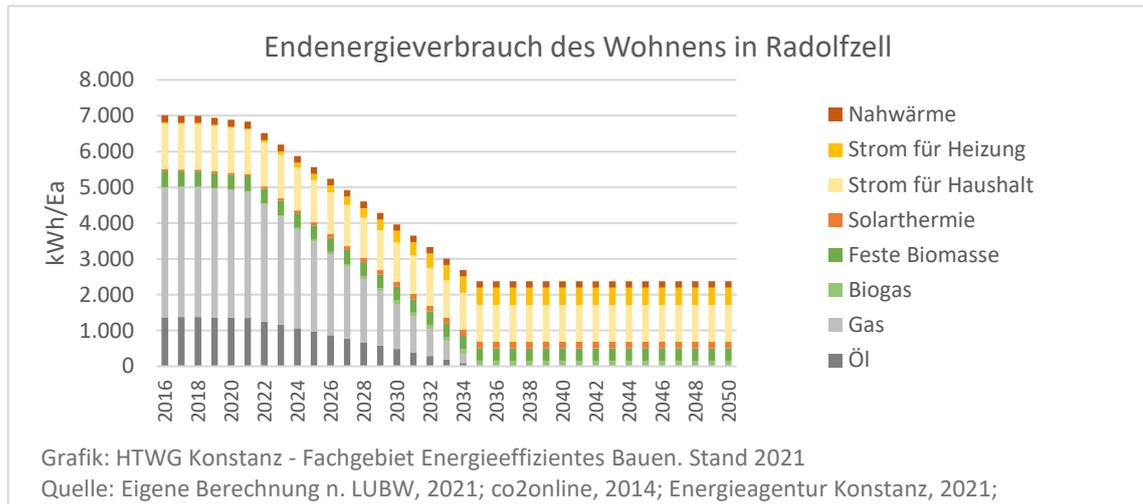


Abbildung 20: Endenergieverbrauch des Wohnens im Szenario Klimaneutralität 2035

4.2.1.3 Erforderliche Steigerung der Sanierungsquote

In Radolfzell gab es im Jahr 2019 insgesamt 6.232 Wohngebäude (STL BW Statistisches Landesamt Baden-Württemberg, 2021). Davon waren gemäß BICO2 BW nach Energieagentur Kreis Konstanz (2021) 5.148 mit Zentralheizungen ausgestattet (82,6 Prozent), 431 Wohngebäude wurden durch Einzel- oder Mehrraumöfen beheizt (6,9 Prozent), 350 waren mit Etagenheizung ausgestattet, 50 mit Blockheizungen und 243 wurden per Fernheizung versorgt. Die Zahl der beheizten Wohngebäude ist derzeit nicht bekannt.

Da aber in Radolfzell immerhin 7.560 Zentralheizungen erfasst sind, gibt es zumindest 2.412 Zentralheizungen in Nichtwohngebäuden. Die Zahl der Nichtwohngebäude, die mit Einzel- oder Mehrraumöfen, Etagenheizungen, Blockheizung oder Fernheizung beheizt werden, kann jedoch anhand der vorliegenden Datenbasis nicht geschätzt werden.

Die folgende Schätzung der jährlichen Veränderung der Heizsysteme in Abbildung 21 bezieht sich daher nur auf die Wohngebäude und ihre geschätzte Beheizungsstruktur.

Um im Jahr 2035 ausschließlich mit erneuerbaren Energien heizen zu können, müssten pro Jahr geschätzt ca. 375 Heizsysteme von Erdgas und Erdöl auf erneuerbare Energien umgestellt werden. Dies entspricht rund 6 Prozent des heutigen Wohngebäudebestandes. Heute liegt die geschätzte Sanierungsquote insgesamt bei ca. 1 Prozent des Bestandes. Dies macht deutlich, dass für die Sanierung des Gebäudebestandes und die Erneuerung des Heizungsbestandes deutlich mehr Arbeitskräfte benötigt würden als bisher.

Nimmt man die Zentralheizungen der Nichtwohngebäude hinzu, dürfte der Umstellungs- und Erneuerungsbedarf geschätzt bereits bei mehr als 550 Heizungen pro Jahr liegen.

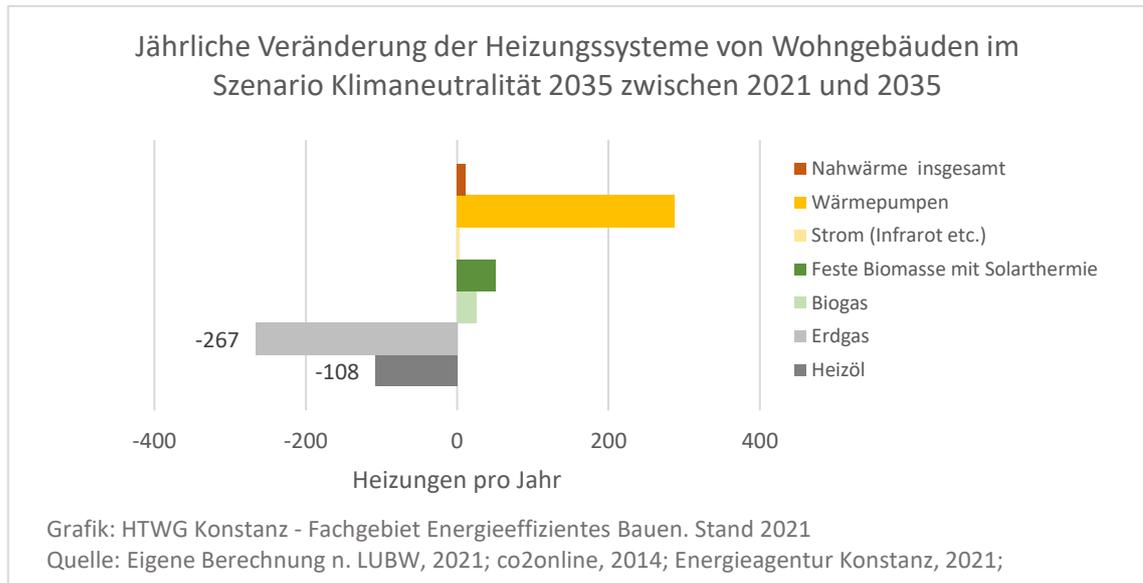


Abbildung 21: Geschätzte jährliche Veränderung der Heizungssysteme in Wohngebäuden im Szenario Klimaneutralität 2035 in den Jahren 2021 bis 2035

4.2.1.4 Effekte von Gebäudesanierung und Heizungsaustausch auf die CO₂-Emissionen des Wohnens

Werden die Heizungen bis 2035 auf erneuerbare Energien umgestellt, können die Gesamtemissionen im Durchschnitt bis 2050 auf knapp über 650 kg CO₂-Äq. pro Einwohner und Jahr sinken. Dies entspricht ca. 45 Prozent des verbleibenden CO₂-Budgets, welches sich aus dem 1,5-Grad-Ziel des Pariser Klimaabkommens ergibt. Voraussetzung dafür ist jedoch, dass der Emissionsfaktor des Strommixes im Szenario Klimaneutralität 2035 bis zum Jahr 2035 ebenfalls auf null gesenkt wird.

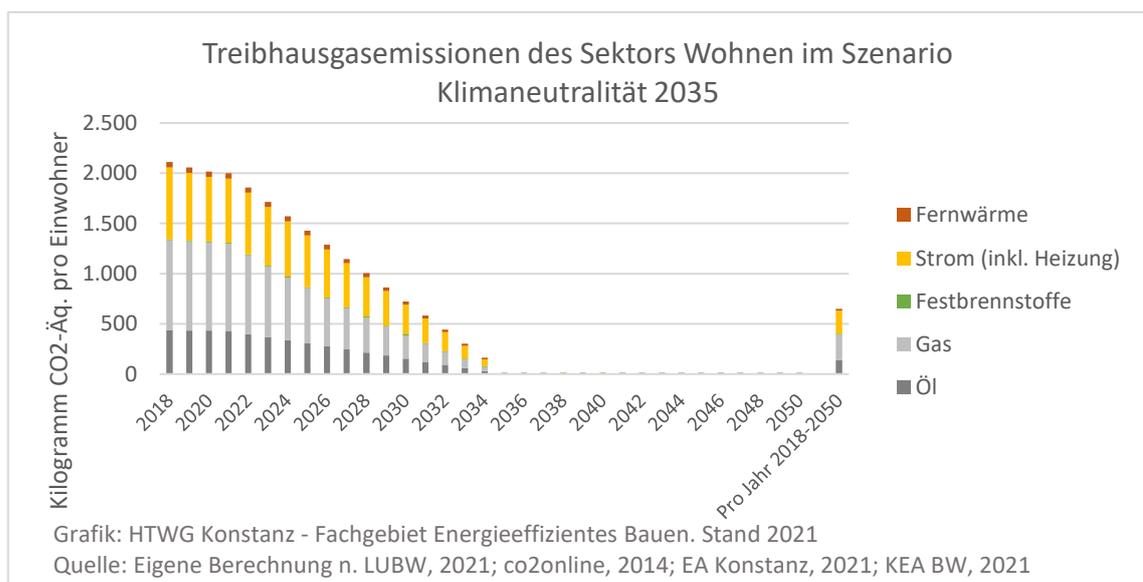


Abbildung 22: Treibhausgasemissionen des Sektors Wohnen im Szenario Klimaneutralität 2035

4.2.1.5 Mögliche CO₂-Vermeidung durch Nutzung nachhaltiger Dämmstoffe

Über die üblichen Renovierungszyklen (zwischen 30 und 50 Jahren), „ist auch bei Dämmstoffen mit hohem Energieaufwand zur Herstellung die Gesamtenergiebilanz positiv“ (Verbraucherzentrale des Saarlandes, 2020). Vergleichsweise kurz ist die Amortisationszeit bei Zellulosedämmstoffen: So hat beispielsweise „eine nach Neubaustandard gedämmte Wand bereits nach 8 Monaten den Energieaufwand der Produktion wieder eingespart“ (Verbraucherzentrale des Saarlandes, 2020). Besonders der typische Primärenergieaufwand der Herstellung von Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen ist sehr gering. Somit „liegt die energetische Amortisation für eine Dämmung aus Hanf, Kokos oder Schafwolle bei weniger als 6 Monaten“ (Verbraucherzentrale des Saarlandes, 2020). Darüber hinaus bieten Dämmmaterialien aus nachwachsenden Rohstoffen das Potenzial Kohlenstoff zu binden. Durch den Energieaufwand der Herstellung eines Dämmstoffs aus Hanf wurden im Jahr 2010 nach Herstellerangaben rund 57,5 kg CO₂-Äq./m³ freigesetzt. Absorbiert wurden pro Kubikmeter Hanfdämmstoff rund 71,9 kg CO₂, womit sich eine Netto-Absorption von -14,4 kg CO₂-Äq./m³ ergab (Hock GmbH, o. J., S. 11). Je mehr der Anteil erneuerbarer Energien am Primäraufwand erhöht werden kann, desto besser kann das Absorptionspotenzial von 71,9 kg CO₂ pro Kubikmeter ausgeschöpft werden.

Die Sanierungsquote liegt in Deutschland seit einigen Jahren bei rund einem Prozent des Gebäudebestandes. Das von der Politik angestrebte Ziel lag vor dem Beschluss des Pariser Klimaabkommens von 2015 bei 2,5 Prozent (Riering, 2014). Für das Jahr 2017 geht man von einem Nachfragevolumen von 36,8 Millionen Kubikmetern Dämmstoff aus. Davon war jedoch ein erheblicher Teil auf den Neubau zurückzuführen (Branchenradar, 2018). Für das Jahr 2017 ergab sich somit ein Verbrauch von 0,45 m³ pro Einwohner. Ein Prozent der Wohnfläche entsprach im Jahr 2017 rund 38,51 Mio. Quadratmetern (Statistisches Bundesamt, 2018). Die fertiggestellte Neubaufäche betrug 29,76 Mio. Quadratmeter (Statistisches Bundesamt, 2021). Somit kann man davon ausgehen, dass wahrscheinlich nur etwas mehr als die Hälfte des Dämmstoffverbrauchs auf Gebäudesanierungen entfällt.

Je nachdem, welcher Zeitpunkt für das Erreichen der Klimaneutralität angestrebt wird, müsste allerdings eine höhere Sanierungsquote erreicht werden. Dementsprechend müsste auch der Dämmstoffverbrauch erhöht werden. Vereinfachend wurde hier angenommen, dass der Dämmstoffverbrauch sich proportional zur Sanierungsquote entwickelt. Geht man von einem Dämmstoffverbrauch für Neubau von 0,22 m³ pro Einwohner und für Sanierungen von 0,23 m³ pro Einwohner aus, könnte der jährliche Dämmstoffverbrauch durch eine Steigerung der Sanierungsquote auf 2,5 Prozent theoretisch auf 0,8 m³ pro Person steigen. Bei einer Steigerung der Sanierungsquote auf 6 Prozent ergibt sich aus diesen Annahmen ein möglicher Bedarf von 1,6 m³ pro Person. Sollte zugleich der Neubau erhöht werden, um den Mangel an Wohnraum zu lindern, könnte der künftige Bedarf sogar jeweils über diesen Werten liegen. Daraus ergeben sich bei

einer Verwendung von nachwachsenden Rohstoffen theoretisch folgende CO₂-Absorptionspotenziale für das Jahr 2029, in dem die Halbzeit zwischen 2022 und 2035 erreicht sein wird:

Tabelle 42: CO₂-Absorptionspotenziale von Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen am Beispiel von Hanfdämmstoffen.

Kennwert	2017	2029	2029
Sanierungsquote	1,0%	2,5%	6,0%
DS-Bedarf Sanierung (m ³ /Ea)	0,23	0,58	1,38
DS-Bedarf Neubau (m ³ /Ea)	0,22	0,22	0,22
DS-bedarf insgesamt (m ³ /Ea)	0,45	0,80	1,60
CO ₂ -Absorption gering (kg CO ₂ /Ea)	6	11	23
CO ₂ -Absorption mittel (kg CO ₂ /Ea)	19	34	69
CO ₂ -Absorption hoch (kg CO ₂ /Ea)	32	57	115

Quelle: Berechnung nach Statistisches Bundesamt (2018, 2021), Branchenradar (2018) und Hock GmbH (o. J.)

Da es äußerst unwahrscheinlich ist, dass bereits im Jahr 2029 ein klimaneutraler Energiemix erreicht wird, erscheint der Mittelwert von 69 kg CO₂ pro Einwohner als das realistische Optimum in einem Szenario, in dem die Sanierungsquote frühzeitig auf mindestens 6 Prozent erhöht wird und die Klimaneutralität im Jahr 2035 erreicht wird.

4.3 Versorgung und Entsorgung

4.3.1 Erneuerbare Energien

4.3.1.1 Photovoltaik

4.3.1.1.1 Lokale Photovoltaikpotenziale

Das Modulflächenpotenzial Radolfzells beträgt nach Angaben des Energieatlas Baden-Württemberg 17,7 m² pro Einwohner. Bei einem angenommenen Durchschnittsertrag von 150 kWh/m² könnte die Dachflächenphotovoltaik ohne Speicherverluste knapp 14 Prozent des Endenergiebedarfs des Jahres 2017 decken, wenn ihr Potenzial zu 100 Prozent ausgeschöpft würde. Im Szenario Klimaneutralität reicht ihr Potenzial für etwas mehr als ein Drittel des Endenergiebedarfs (36 Prozent) aus, wenn man von einer Ertragssteigerung auf 170 kWh/m² bis zum Jahr 2035 ausgeht. Aus diesem Grunde wurden auch sonstige Photovoltaikpotenziale untersucht.

Ein gewisses Potenzial bietet die Fassadenphotovoltaik. Ihr Flächenpotenzial in Deutschland wurde auf 7 m²/Einwohner geschätzt. Wäre es proportional zum Dachflächenpotenzial, betrüge es in Radolfzell ca. 6,2 Quadratmeter pro Einwohner. Würde dieses zu 100 Prozent ausgeschöpft, könnte die Fassadenphotovoltaik ca. 2,4 Prozent des Endenergiebedarfs im Status Quo und ca. 5,7 Prozent des Endenergiebedarfs im Szenario Klimaneutralität decken. Es ist jedoch sehr fraglich, ob das Fassadenpotenzial überhaupt genutzt werden wird, da die optische Integration nicht einfach und die Wirtschaftlichkeit im Vergleich zur Dachflächenphotovoltaik geringer ist.

Die preisgünstigste Variante der Photovoltaiknutzung pro Kilowattstunde ist die Freiflächenphotovoltaik, wenn sie beispielsweise entlang von Verkehrswegen oder auf Konversionsflächen errichtet werden kann. Ebenfalls hohe Erträge kann sie auf Parkplatzflächen liefern, wo jedoch eine aufwendigere Unterkonstruktion nötig ist. Da das Freiflächenpotenzial in Radolfzell noch nicht erhoben wurde, wurde es anhand einer Potenzienschätzung für das Land Nordrhein-Westfalen geschätzt (LANUV Nordrhein-Westfalen, 2013, S. 77). In Nordrhein-Westfalen wird das Modulflächenpotenzial auf 210,14 km² geschätzt, was bei 17.905.566 Einwohnern etwa 11,7 m² Modulfläche entspricht. Das Potenzial von Randstreifen und Parkplatzflächen wurde anhand der Verkehrsflächen in NRW und Radolfzell grob schätzend auf Radolfzell angepasst. Nach dieser sehr groben Schätzung wurde ein Potenzial von rund 9 m² Modulfläche pro Einwohner ermittelt, das überwiegend Randstreifen und Parkplätze umfasst. Nutzbar wären dabei jedoch auch Lärmschutzwände, Brücken und vergleichbare Konstruktionen, an denen mono- oder auch bifaziale Module installiert werden könnten. Um Unsicherheiten auszugleichen und konservativ zu schätzen, wurde angenommen, dass das geschätzte Modulflächenpotenzial von 9 m²/Einwohner im Szenario Klimaneutralität etwa zur Hälfte ausgenutzt wird. Damit ergibt sich eine Anlagenfläche von rund 29 Hektar, was in der Größenordnung einem gewöhnlichen Solarpark entspricht. Damit können 2,7 Prozent des heutigen Endenergiebedarfs gedeckt werden. Im Szenario Klimaneutralität reicht der Ertrag für 7 Prozent des berechneten Bedarfs aus.

Ein großes Potenzial besteht zudem in der Nutzung von Agriphotovoltaikanlagen. Angenommen wurde hier eine Nutzung von 5 Prozent der landwirtschaftlichen Nutzflächen. Damit könnten rund 12 Prozent des heutigen Endenergiebedarfs gedeckt werden. Im Szenario Klimaneutralität reicht die Stromproduktion dieser Agriphotovoltaikflächen für 31 Prozent des berechneten Bedarfs aus. Damit stellt die Agriphotovoltaik in Radolfzell das zweitgrößte Potenzial dar und kann bei einem größeren Flächenanteil sogar das größte Potenzial stellen. Allerdings wirkt sich die Agriphotovoltaik nachteilig auf die Nahrungsautonomie aus, da sie im Pflanzenbau unter den Anlagen je nach Kultur und Witterungsbedingungen zu Ertragseinbußen zwischen Null und 20 Prozent führen kann.

4.3.1.1.2 Ausbau der Photovoltaik auf Dach- und Freiflächen im Szenario Klimaneutralität 2035

Um die zuvor dargestellten Potenziale bis zum Jahr 2035 auszuschöpfen, muss der Zubau an installierter Leistung pro Jahr deutlich beschleunigt werden. Die Steigerung ist in Abbildung 23 grafisch dargestellt.

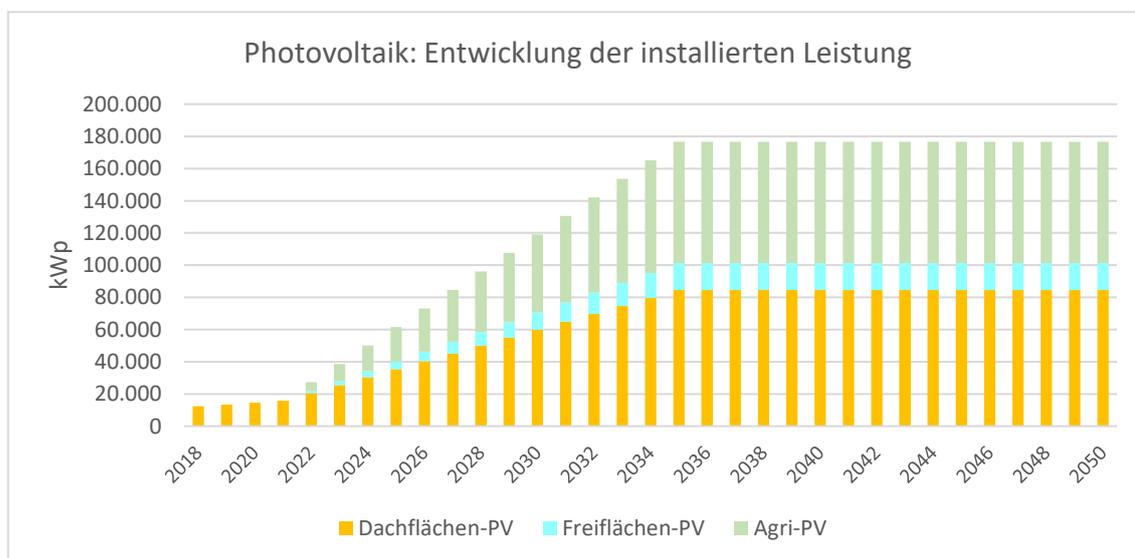


Abbildung 23: Photovoltaik - Entwicklung der installierten Leistung in Radolfzell im Szenario Klimaneutralität 2035

Insgesamt müsste der Zubau pro Jahr rund 11.490 kWp pro Jahr betragen. Somit müsste allein der jährliche Zubau an Dachflächen-PV auf das Achtfache erhöht werden. Hinzu kämen der Zubau von Freiflächen- und Agriphotovoltaik.

Tabelle 43: Jährlicher Zubau der Photovoltaik im Szenario Klimaneutralität 2035

Flächennutzung	Anteil	Einheit
Dachflächen-PV	4.950	kWp/a
Freiflächen-PV	1.200	kWp/a
Agriphotovoltaik	5.375	kWp/a
SUMME	11.525	kWp/a

Quelle: Eigene Annahmen und Berechnungen

4.3.1.2 Windenergie

Bisher hat Radolfzell einen Anteil von einem Elftel an den drei Windenergieanlagen Verenafohren. Dieses entspricht 1.800 MWh/a und deckt 0,3 Prozent des Endenergieverbrauchs des Jahres 2017. Würde man eine große Windenergieanlage mit einer Jahresproduktion von 6 GWh ergänzen, könnten im Status Quo rund 1,3 Prozent des Endenergiebedarfs mit lokalem Windstrom gedeckt werden. Im Szenario Klimaneutralität könnten mit den 7,8 GWh Windstrom dagegen rund 3 Prozent Energiebedarfs gedeckt werden.

4.3.1.3 Bioenergie

Das Bioenergiepotenzial in Radolfzell im Jahr 2035 wird insgesamt auf rund 32 GWh/a pro Jahr geschätzt. Dies entspricht im Jahr 2035 rund einer Megawattstunde pro Einwohner. Die größten Einzelpotenziale weisen dabei Holz aus der Forstwirtschaft und Energiepflanzen aus der Landwirtschaft auf, wie in Abbildung 24 dargestellt ist.

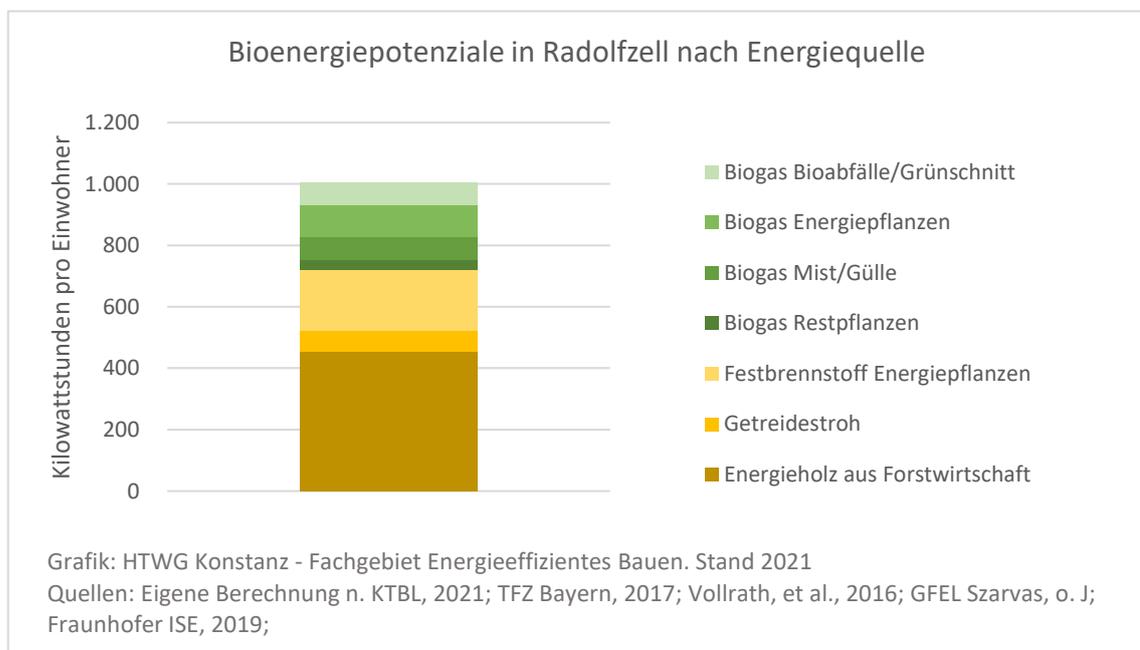


Abbildung 24: Geschätzte Bioenergiepotenziale in Radolfzell pro Einwohner im Jahr 2035 nach Energiequelle

4.3.1.3.1 Organische Abfälle

Das Potenzial energetisch nutzbarer Grün- und Bioabfälle in Radolfzell wurde auf rund 70 kWh pro Einwohner geschätzt. Biogene Reststoffe und Abfälle (Stroh, Mist, Gülle etc.) aus der lokalen Landwirtschaft können im Szenario Klimaneutralität 2035 schätzungsweise rund 170 kWh pro Einwohner und Jahr liefern. Dabei ist zu berücksichtigen, dass hier ein Viehbestand angenommen wurde, der einer veränderten Ernährungsweise und den reduzierten Futterflächen flächengebunden angepasst wurde. Durch eine Reduktion der Lebensmittelverschwendung könnte sich allerdings auch das energetisch nutzbare Bioabfallaufkommen reduzieren.

4.3.1.4 Zusammenfassung der lokalen Energiepotenziale

Die lokalen Energiepotenziale werden auf knapp 228 GWh pro Jahr. Das entspricht im Jahr 2035 voraussichtlich rund 7,3 MWh/Einwohner. Die größten Potenziale bieten dabei die Dachflächenphotovoltaik mit ca. 2,95 MWh/Ea und die Agriphotovoltaik mit 2,34 MWh/Ea, wofür allerdings Agriphotovoltaikanlagen auf 5 Prozent der landwirtschaftlichen Nutzflächen errichtet werden müssten. Bioenergie kann mit 1 MWh/Ea rund 13,6 Prozent des erneuerbaren Energiepotenziales beitragen. Die Windenergie kann bei Ergänzung einer großen Windenergieanlage ca. 3,3 Prozent des geschätzten Energiebedarfs liefern.

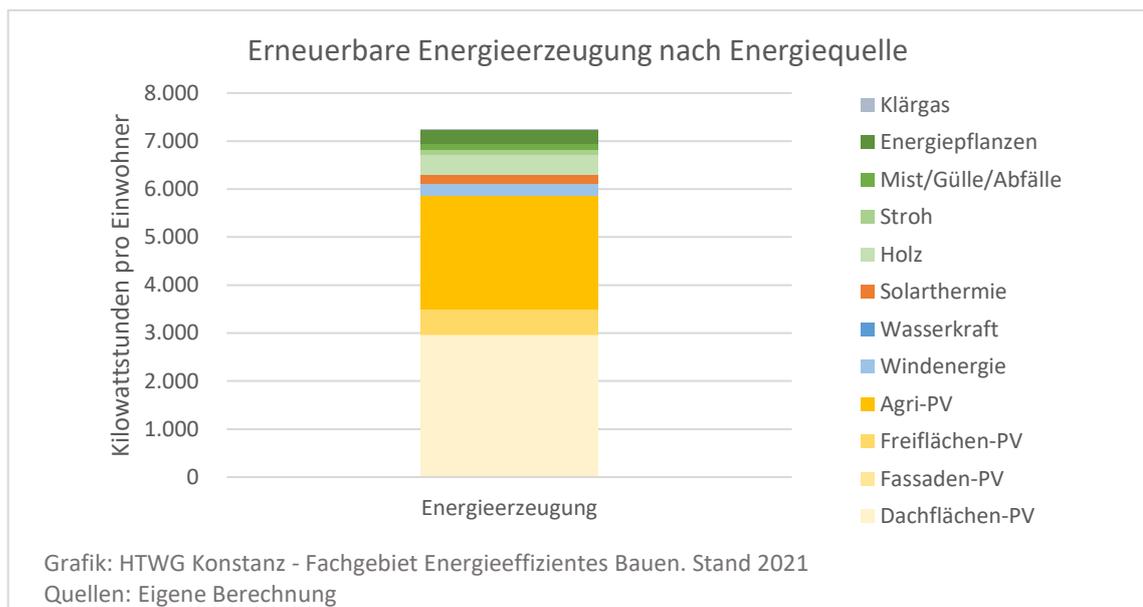


Abbildung 25: Erneuerbare Energiepotenziale in Radolfzell pro Einwohner im Jahr 2035

Werden rund 50 Prozent der biogenen Energieträger mittels Blockheizkraftwerken genutzt, steigt der Anteil des Stroms an den erneuerbaren Energieträgern auf 87 Prozent.

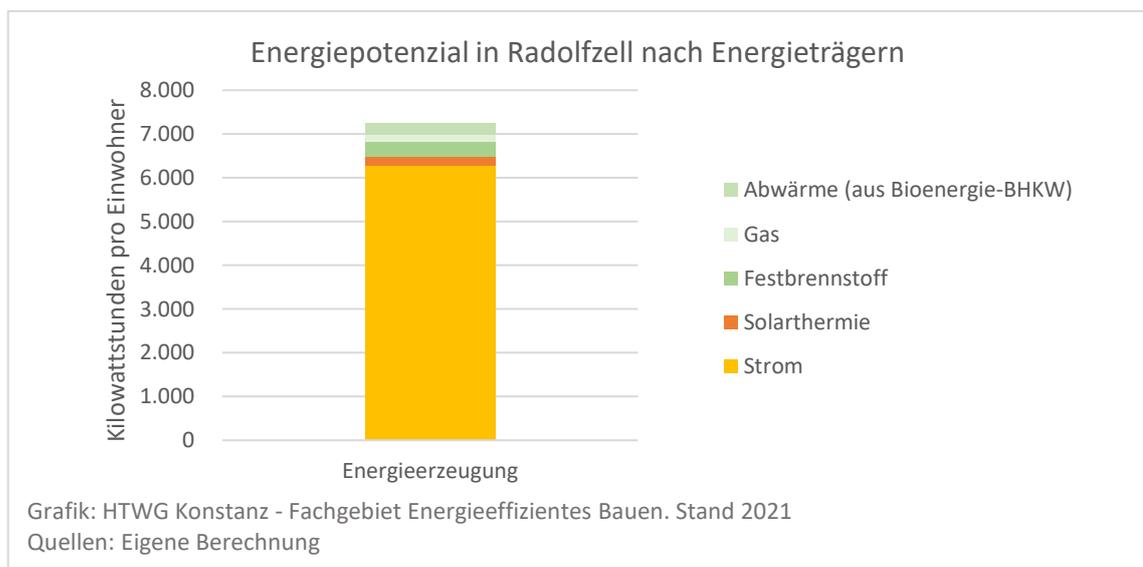


Abbildung 26: Erneuerbare Energiepotenziale pro Einwohner 2035 nach Energieträgern

Durch die Ausschöpfung der Potenziale erneuerbarer Energien sowie der Potenziale zur Energieeinsparung durch Sanierung und Elektrifizierung könnte der Energieautonomiegrad von ca. 7 Prozent im Status Quo auf ca. 89 Prozent im Szenario Klimaneutralität gesteigert werden.

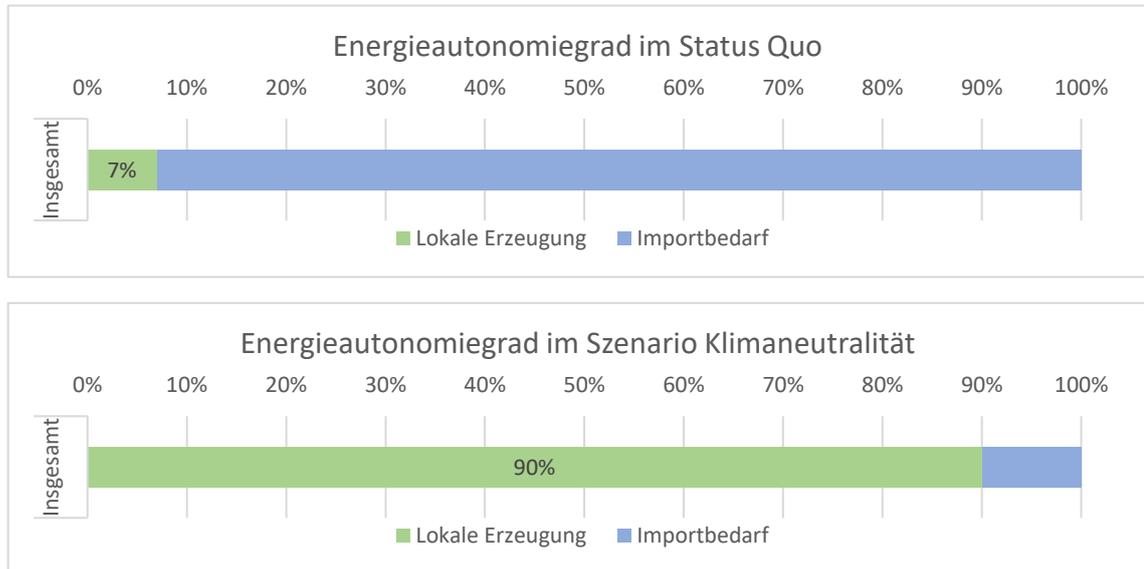


Abbildung 27: Energieautonomiegrade im Status Quo und im Szenario Klimaneutralität

Allerdings sind die Erträge der Stromproduktion im Jahresverlauf, wie in Abbildung 28 aufgrund der geringen Windenergiepotenziale sehr ungleich verteilt. Ohne Importe kann die lokale Bioenergie bei saisonaler Verstromung von 50 Prozent des Aufkommens nur zu einem geringen Abmildern dieser Ungleichheit beitragen. Es ist daher sinnvoll, mit anderen Gemeinden und Landkreisen in Baden-Württemberg zu kooperieren und Energie auszutauschen, um den Speicherbedarf möglichst gering zu halten.

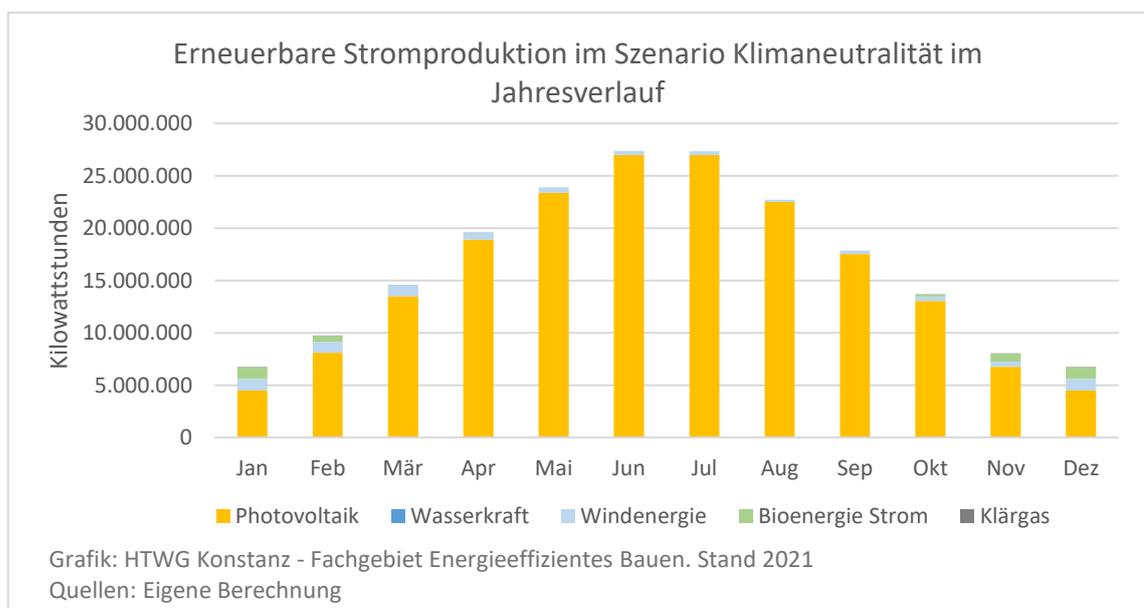


Abbildung 28: Erneuerbare Stromproduktion im Szenario Klimaneutralität im Jahresverlauf

4.3.1.5 Stromspeicher

Die Photovoltaik gilt insbesondere in windarmen und dicht besiedelten Regionen wie im Südwesten Deutschlands als der entscheidende Eckpfeiler des zukünftigen Energiesystems. Um sie möglichst umfassend nutzen zu können, werden sowohl saisonale Speicher als auch Kurzzeitspeicher benötigt.

Bei Dachphotovoltaikanlagen kommen Batteriespeicher heute bereits häufig zum Einsatz. Für die Netzstabilität und die Rohstoffeffizienz sind jedoch vor allem größere zentralere Speicher vorteilhaft. Beispielsweise Lithium-Ionen-Batterien könnten auch bei großen Photovoltaik-Kraftwerken eingesetzt werden. Eine Alternative dazu können Redox-Flow-Batterien darstellen, insbesondere wenn dabei künftig vermehrt nachwachsende Rohstoffe eingesetzt werden können, wie beispielsweise bei einer ligninbasierten „Organic Flow Battery“. Lignin kann beispielsweise aus Schwarz- und Braunlaugen gewonnen werden, die bei der Papier- oder Viskoseproduktion anfallen. Bereits im Jahr 2021 sollte ein Redox-Flow Großspeicher in China fertiggestellt werden, der aus zehn Einheiten mit jeweils 20 Megawatt Leistung besteht und eine Speicherkapazität von insgesamt 800 Megawattstunden aufweist (RWE, 2021).

Nach Vartiainen et al. wird die optimale Speichergröße von Photovoltaik-Kraftwerken auf etwa ein bis zwei Kilowattstunden je Kilowatt Photovoltaik-Leistung geschätzt (Vartiainen, Masson, Breyer, Moser, & Medina, 2020). Nimmt man den Mittelwert von 1,5 kWh/kW_p, wäre bei einem Solarpark von 29 Hektar somit wahrscheinlich ein Speicher mit einer Kapazität zwischen 26 bis 32 MWh sinnvoll.

Für die saisonale Speicherung sommerlicher Stromüberschüsse eignen sich vor allem Wasserstoff und synthetisches Erdgas, das ins Gasnetz eingespeist werden kann. Sogenannte Power-to-X-Technologien erreichen jedoch nur hohe Wirkungsgrade, wenn die Abwärme ebenfalls sinnvoll genutzt werden kann.

4.3.2 Mobilität

Die technischen Potenziale von Photovoltaik (348 TWh/a), Windenergie an Land (717 TWh/a); Offshore-Windenergie (263 TWh/a), Wasserkraft (25 TWh/a), tiefer Geothermie (26 TWh/a) und Bioenergie ohne Energiepflanzen (249 TWh/a) werden in Deutschland zusammen auf 1.379 Terawattstunden pro Jahr geschätzt (Knorr, Horst, Bofinger, & Hochloff, 2017; BMVBS, 2010; Agentur für Erneuerbare Energien, 2021). Darüber hinaus können Energiepflanzen ca. 100 TWh/a liefern, sofern 20 Prozent der Ackerflächen für den Energiepflanzenanbau genutzt werden. Insgesamt beträgt das technische Potenzial der erneuerbaren Energien damit 1.479. Das entspricht 58 Prozent des deutschen Endenergieverbrauchs, der im Jahr 2017 bei rund 2.560 TWh lag. Unter Berücksichtigung von Fragen des Naturschutzes und der sozialen Verträglichkeit dürfte der bis 2035 erschließbare Anteil dieses Potenzials deutlich unterhalb der technischen Potenziale liegen, insbesondere im Falle der Windenergie.

Wie weit die damit verbleibende Differenz zu den zweieinhalbtausend Terawattstunden durch Importe abgedeckt werden kann, ist noch weitgehend ungeklärt.⁸ Zudem liefern erneuerbare Energien überwiegend Strom. Um bis 2035 klimaneutral werden zu können, müssen daher eine höhere Energieeffizienz erreicht werden und große Teile der Mobilität und der Wärmeversorgung elektrifiziert werden. Der Umstieg auf Elektroautos ist somit eine entscheidende Voraussetzung für das Gelingen der Energiewende.

Bei einem für Deutschland üblichen Besetzungsgrad von 1,36 Insassen pro Pkw benötigt Elektroauto pro beförderte Person 11 bis 15 kWh auf 100 km. Könnte der Besetzungsgrad auf 1,66 Personen erhöht werden, würde der Verbrauch pro Person auf 9 bis 12 kWh auf 100 km sinken. Verbrenner kommen in Deutschland auf 100 km bei einem Verbrauch von 7,3 Litern und einem Besetzungsgrad von 1,36 Insassen auf einen Wert von rund 50 kWh pro beförderte Person.

4.3.2.1 Umweltverbund

Carsharing bietet die Möglichkeit, die gleiche Mobilität mit weniger Autos zu ermöglichen, was zwar ohne eine Veränderung des Modal Splits den Energieverbrauch im Betrieb nicht verringert, aber dafür den Bedarf an Pkw deutlich reduzieren kann – und mit ihm sowohl den Platzbedarf für parkende Autos als auch den Energie- und Rohstoffaufwand der Pkw-Produktion. Um darüber hinaus auch den Energieverbrauch im Straßenverkehr

⁸ Bisher werden in absehbarer Zeit nur wenige Nationen in der Lage sein, sich selbst zu 100 Prozent erneuerbar zu versorgen und darüber hinaus relevante Mengen erneuerbarer Energie zu exportieren: „Im Jahr 2018 betrug der Anteil der Energie, die aus erneuerbaren Energiequellen gewonnen wurde, 13,5 Prozent am globalen Primärenergieverbrauch“ (Statista, 2021d). Zu den wenigen Ländern, die sich bereits vollständig mit erneuerbarer Energie versorgen können, zählen Norwegen und Costa Rica. Auch innerhalb der EU wurden die höchsten Anteile erneuerbarer Energien von Ländern mit vergleichsweise geringer Einwohnerzahl und Bevölkerungsdichte erzielt: Die höchsten Anteile erreichten Schweden mit 56 Prozent und Finnland mit 43 Prozent (Statista, 2021c). Unter den Industrieländern mit hoher Einwohnerzahl innerhalb der EU erreichten Spanien und Italien mit mehr als 18 Prozent die Höchstwerte (Statista, 2021c). Unter den G20-Staaten ist Brasilien (Stand 2017) mit ca. 45 Prozent Spitzenreiter (Statistisches Bundesamt, 2021).

zu reduzieren, kommt man jedoch nicht umhin, neben einer Erhöhung des Besetzungsgrades der Pkw auch verstärkt auf die Alternativen Bus, Bahn, Fahrrad, Elektrofahrrad und Transportfahrrad zu setzen. Denn kleine bis mittelgroße Elektroautos kommen zwar bei der Energieeffizienz Elektrobussen nahe, doch benötigen auch sie ca. 15 bis 20 kWh Strom pro 100 Kilometer, für deren Produktion ein Quadratmeter Photovoltaikmodul mit einem Jahresertrag von 150 kWh für 36 bis 49 Tage in Anspruch genommen werden muss. Bei einer Pkw-Fahrleistung von rund 6.000 km pro Person und Jahr müssen daher für den Pkw-Betrieb mit 7 Quadratmetern rund 40 Prozent des Dachflächenphotovoltaikpotenzials genutzt werden, das in Radolfzell laut Energieatlas pro Person verfügbar ist.

Ähnlich effizient sind Elektrobusse. So ergab eine Erhebung in den Niederlanden, dass batterieelektrisch betriebene 12-m-Solos ca. 115 kWh_{el}/100 km und Gelenkbusse ca. 163 kWh_{el}/100 km benötigen (HUSS, 2020). 12-m-Solos haben in der Regel 33 bis 37 Sitzplätze, Gelenkbusse zwischen 43 und 47 Sitzplätze. Bei einem für Deutschland und den Kreis Konstanz typischen Besetzungsgrad von ca. 20 Prozent entspricht dies auf 100 km einem Verbrauch von 16 bis 18 kWh pro Person. Könnte der Besetzungsgrad auf 40 Prozent gesteigert werden, würde ein Energieverbrauch von ca. 8,5 kWh pro Person erreicht. Deutlich effizienter sind Elektrofahrräder, die in der Regel 0,4 bis 0,7 kWh pro 100 Kilometer benötigen. Da sie keinerlei Energie und Stromspeicher benötigen, bleiben aber auch herkömmliche Fahrräder ein wichtiger Baustein der Verkehrswende.

4.3.2.1.1 Modal Split

Ein Modal Split für die Stadt Radolfzell liegt bisher nicht vor. Gleiches gilt für die meisten Städte, sofern dabei nicht die Zahl der Wege, sondern die zurückgelegte Wegstrecke betrachtet wird. Daher wurde vorläufig der deutsche Durchschnittswert für Radolfzell übernommen. Für den zukünftig möglichen Modal Split wurden Annahmen getroffen, die sich an den Schätzungen diverser Studien orientieren. Demnach wird es für möglich gehalten, die Zahl der Pkw um 50 Prozent zu reduzieren. Laut Christian Hochfeld, Geschäftsführer der Initiative Agora Verkehrswende, würden auch 30 Prozent des heutigen Autobestandes ausreichen (Hochfeld zit. n. ZEIT Online, 2016). Für eine vorsichtige Schätzung wurde eine Reduktion der Fahrleistung um zwei Fünftel angenommen, wobei eine Steigerung des Besetzungsgrades von 1,34 auf 1,66 Insassen angenommen wurde.

Tabelle 44: Angenommene Veränderung des Modal Splits 2017 - 2035

Flächennutzung	Modal Split 2017 ⁽¹⁾	Modal Split 2035 ⁽²⁾
Fußverkehr	3,0 %	3,0 %
Fahrrad	1,5 %	5,0 %
E-Bike	* 1,5 %	11,0 %
Kraftrad	1,0 %	1,0 %
Pkw Fahrer	55,0 %	32,0 %
Pkw Mitfahrer	20,0 %	21,0 %
Bus & Bahn	18,0 %	27,0 %

Quellen: (1) BMVI: Mobilität in Deutschland 2017; (2) Eigene Annahmen

* Annahme

Ausgeglichen wird die reduzierte Pkw-Fahrleistung durch höhere Anteile von Fahrrad, E-Fahrrad, Bus und Bahn. Die angenommene Entwicklung ist in Abbildung 29 dargestellt.

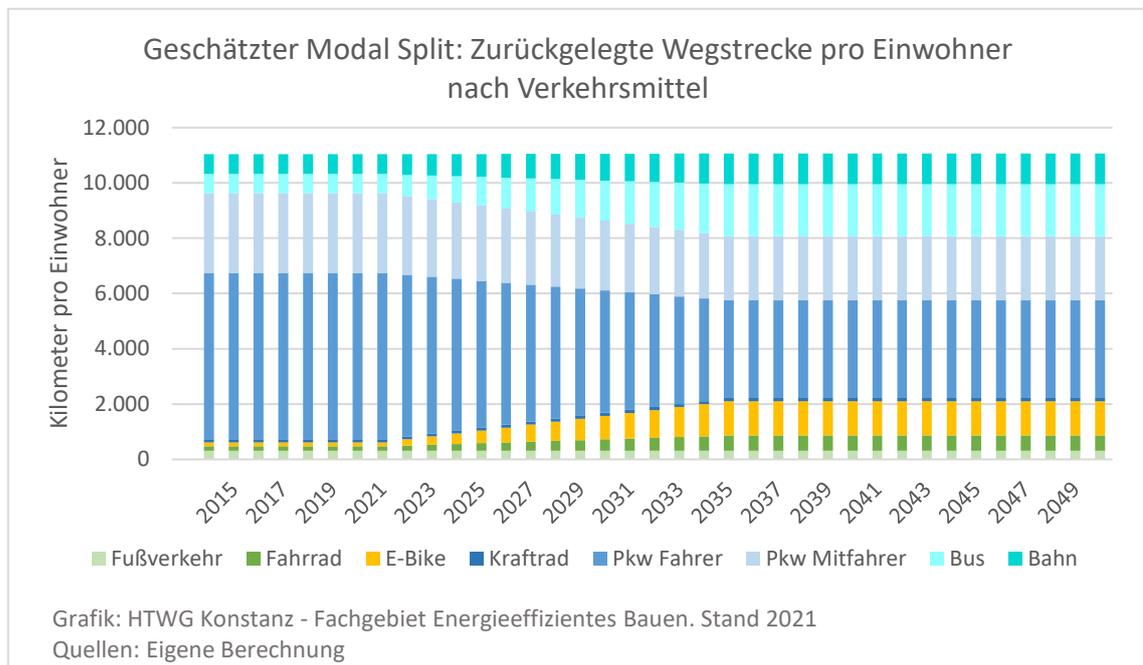


Abbildung 29: Geschätzter Modal Split - Entwicklung im Szenario Klimaneutralität 2035

4.3.2.1.2 Parkplatzfläche und Kosten

Im Szenario Klimaneutralität werden, sofern die Fahrleistung pro Pkw unverändert bleibt, etwa 7.360 Pkw weniger benötigt als im Jahr 2017. Geht man von einer Flächeninanspruchnahme von mindestens 11,5 m² (5,0m x 2,3m) pro stehenden Pkw aus, würden dadurch theoretisch 87 Hektar weniger Stellplatzfläche benötigt⁹. Andere Schätzungen gehen sogar von einem weit höheren Flächenbedarf pro Stellplatz aus, da sie die Erschließung in die Rechnung einbeziehen. In diesem Fall werden pro Stellplatz rund 30 m² angerechnet (Schnieper, 2018). Dementsprechend würde deutlich mehr Fläche frei, die je nach räumlicher Situation beispielsweise begrünt werden oder womöglich als Radwegfläche genutzt werden könnte.

Beachtlich sind auch die Kosten, die vermieden werden können, wenn mehr Mobilität mit dem Fahrrad ermöglicht wird und der Pkw-Bestand nicht mehr weiterwächst: Ein Fahrradbügel kostet ca. 120 Euro, ein Pkw-Stellplatz draußen kostet mit 1.500 Euro mehr als das Zwölfwache (ADFC 2012 und Zukunft Bau 2015 zit. n. Staude, 2019). Eine Fahrradbox ist mit 1.000 Euro auch deutlich günstiger als ein Pkw-Stellplatz im Parkhaus, für den durchschnittliche Kosten von 7.000 Euro angegeben werden (ADFC 2012 und Zukunft Bau 2015 zit. n. Staude, 2019).

⁹ Da pro Pkw sowohl am Heimstandort als auch an Zielorten wie Arbeitsorten, Supermärkten, Universitäten etc. Parkplatzfläche benötigt wird, muss pro Pkw mehr als ein Stellplatz verfügbar sein. Allerdings parken auch zahlreiche Pkw auf der Fahrbahn. Zudem erfolgt zum Teil auch ein Wechsel im Tagesverlauf, sodass eine Schätzung der freiwerdenden Fläche nicht ohne weiteres möglich ist.

4.3.2.1.3 Ausbau Fahrradwegenetz

Die Stadt Radolfzell verfügt über 0,87 Meter Radweg pro Einwohner. Davon handelt es sich bei 32 Prozent um Geh- und Radweg kombiniert.

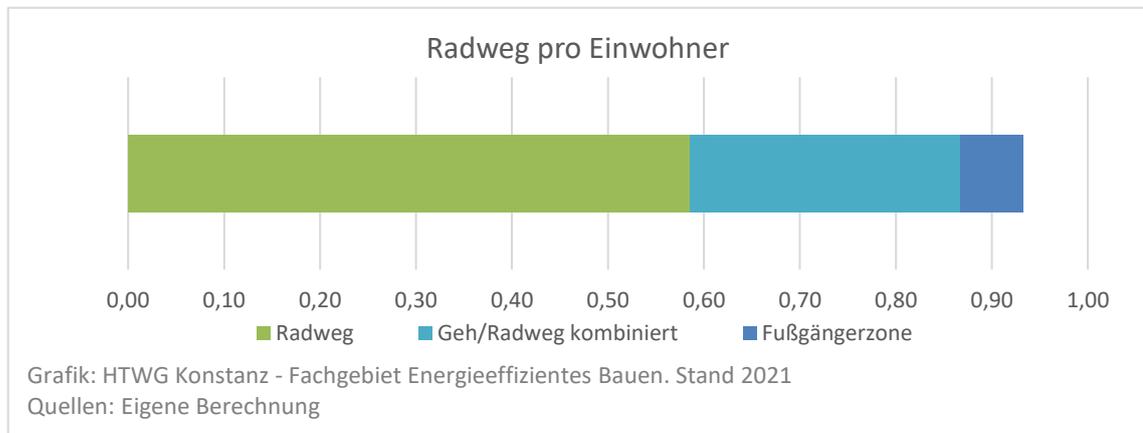


Abbildung 30: Rad- und Fußweg in Radolfzell pro Einwohner

Damit erreicht Radolfzell 53 Prozent des Spitzenwertes unter den Städten in Deutschland, den die Stadt Münster aufweist. Im Vergleich zur Großstadt Bremen kommt Radolfzell, wie in Abbildung 31 dargestellt, auf 66 Prozent des dort nutzbaren Radwegenetzes (Westfälische Nachrichten, 2019).

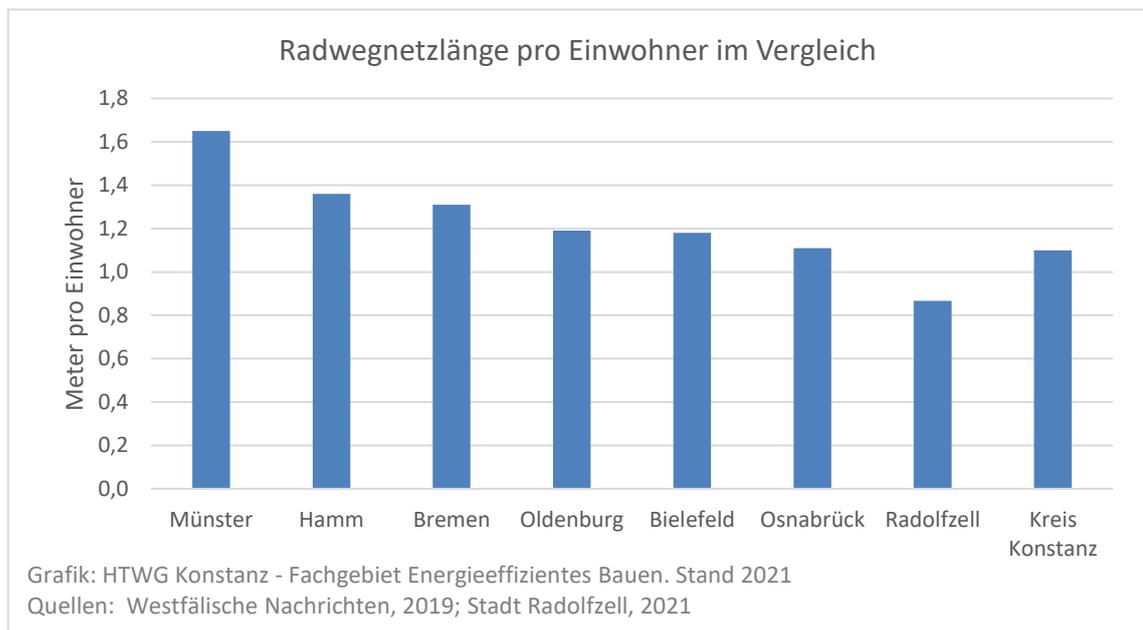


Abbildung 31: Radwegenetzlänge pro Einwohner im Vergleich

4.3.2.2 Elektrifizierung der Pkw

Im Szenario Klimaneutralität werden bei unveränderter Fahrleistung pro Pkw statt der heutigen 584 Pkw pro 1.000 Einwohner in Zukunft nur noch 342 Pkw pro 1.000 Einwohner benötigt. Dementsprechend ist auch der Bedarf an Rohstoffen für die Batterieherstellung um 42 Prozent geringer als bei einer unveränderten Pkw-Dichte.

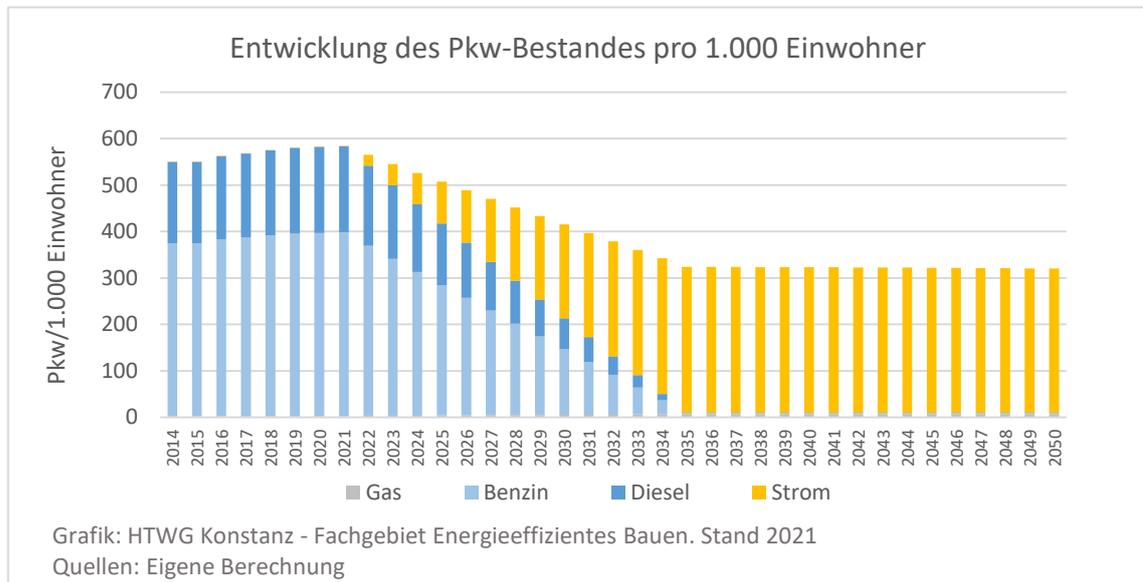


Abbildung 32: Entwicklung Pkw-Bestandes in Radolfzell pro 1.000 Einwohner im Szenario Klimaneutralität 2035

Durch die Veränderungen des Modal Splits und der Motorisierung kann der Energieverbrauch der Pkw um mehr als 80 Prozent reduziert werden. Wird zugleich die Stromversorgung bis 2035 vollständig auf erneuerbare Energien umgestellt, können die Emissionen des Pkw-Verkehrs drastisch gesenkt werden. So würden sie im Durchschnitt der 25 Jahre zwischen 2020 und 2045 auf ca. 0,45 t pro Einwohner und Jahr reduziert.

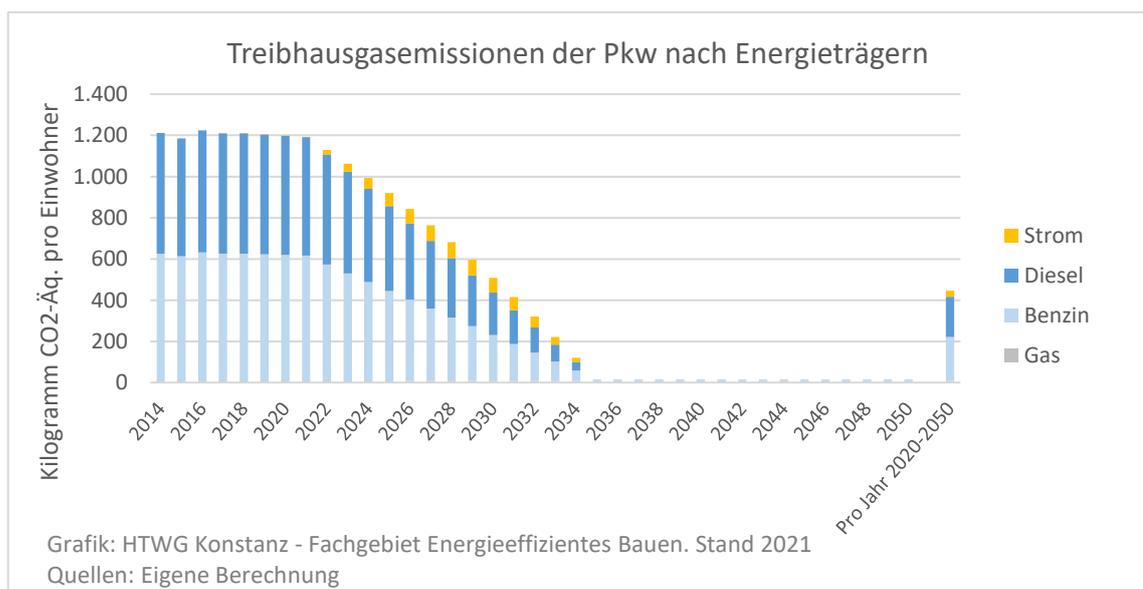


Abbildung 33: Entwicklung der CO₂-Emissionen der Pkw im Szenario Klimaneutralität

Um wie im Szenario Klimaneutralität eine große Zahl von Elektroautos auf die Straße zu bringen, müssen deutlich mehr Ladestationen eingerichtet werden. Nach Schätzungen des DLR werden pro 1.000 Elektroautos mehr als 35 öffentliche und halböffentliche Ladepunkte benötigt (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt / KIT, 2016, S. 6).

Wurden in Radolfzell im Durchschnitt der Jahre 2018 - 2020 pro Jahr 8 Ladepunkte errichtet, müssten im Szenario Klimaneutralität 2035 durchschnittlich 25 Ladepunkte pro Jahr errichtet werden, um den Verkehrsteilnehmern eine ausreichende Zahl an Ladepunkten zur Verfügung stellen zu können.

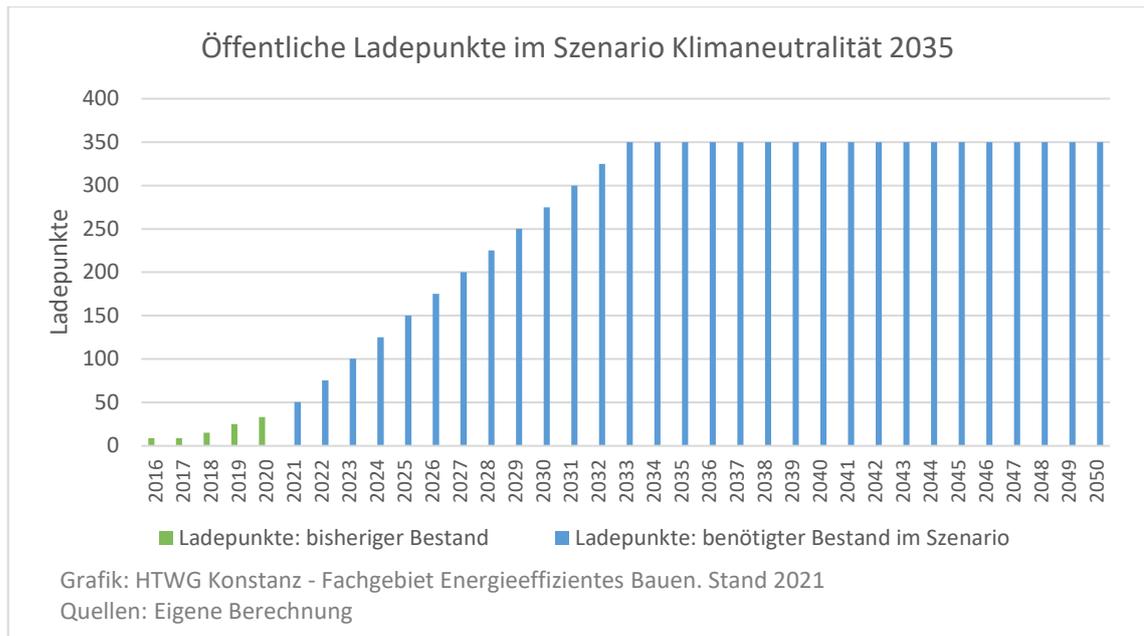


Abbildung 34: Entwicklung der öffentlich zugänglichen Ladepunkte im Szenario Klimaneutralität 2035

4.4 Kommunikation und Bildung

4.4.1 Ernährung

Mit Blick auf die Ernährung sind neben den klimawirksamen Emissionen der Ernährung auch die Auswirkungen der Energiegewinnung auf die für die Ernährung verfügbaren Anbauflächen zu bedenken. Allerdings ist es sinnvoll, hierbei auch die Potenziale zu berücksichtigen, die beispielsweise eine an gesundheitlichen und Kriterien orientierte Ernährungsumstellung bietet.

4.4.1.1 Mögliche Nahrungsautonomie und verbleibende Importabhängigkeit

Mit ca. 400 Terawattstunden pro Jahr weist die Bioenergie eines der drei größten erneuerbaren Energiepotenziale in Deutschland auf. Um dieses Potenzial auszuschöpfen, ist auch die Produktion von Anbaubiomasse erforderlich. Allerdings reduziert der Anbau von Energiepflanzen und nachwachsenden Rohstoffen die für die Nahrungsproduktion verfügbare Anbaufläche. Dies wirkt sich auf die Nahrungsautonomiepotenziale aus. Nach Erhebungen des Statistischen Bundesamtes beträgt die durchschnittliche Flächenbelegung durch Ernährungsgüter für den deutschen Konsum aktuell rund 0,23 Hektar pro Einwohner (Statistisches Bundesamt, 2019). Würde die gesamte landwirtschaftliche Nutzfläche für die Produktion von Nahrungsmitteln genutzt, könnte mit den in Radolfzell vorhandenen Flächen (STL BW Statistisches Landesamt Baden-Württemberg, 2021) im Status Quo ein Autonomiegrad von 31 Prozent erreicht werden. Werden 20 Prozent der landwirtschaftlichen Nutzfläche für die Gewinnung von Energie und nachwachsenden Rohstoffen aufgewendet, verbleibt ein Autonomiepotenzial von ca. 27 Prozent.

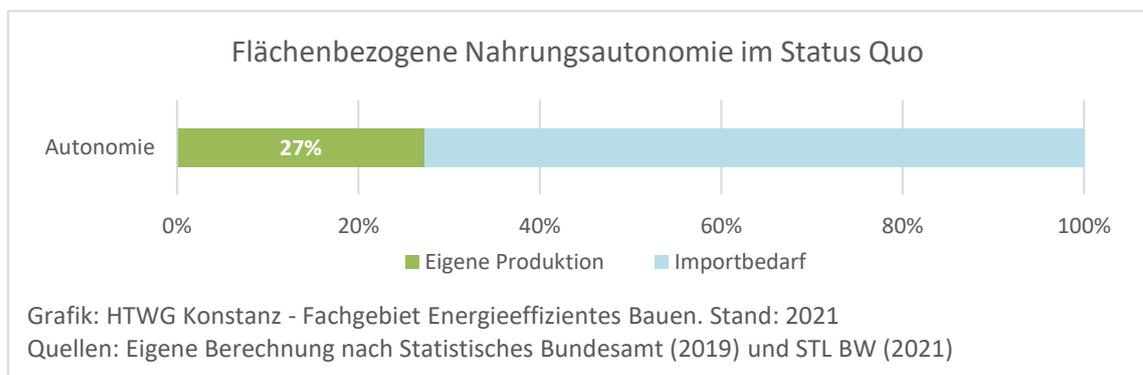


Abbildung 35: Flächenbezogene Nahrungsautonomie im Status Quo

Bleiben Konsum, Produktionsweise und klimatische Bedingungen konstant, dürfte der Verlust von 58 Hektar landwirtschaftlicher Nutzfläche bis 2035 dazu führen, dass das Nahrungsautonomiepotenzial in Radolfzell um ca. 1,5 Prozentpunkte sinkt. In Verbindung mit Folgen des Klimawandels kann der Verlust von Autonomie auch größer ausfallen, da sich auch der weltweite Temperaturanstieg negativ auf die Erträge wichtiger Feldfrüchte (z. B. Weizen, Reis, Mais, Soja) auswirken wird (Zhao, et al., 2017).

Nach Angaben der Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft zum konventionellen Anbau (Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft, 2010, S. 22) und Erhebungen von

Wakamiya zum Flächenbedarf des Ökologischen Landbaus (Wakamiya, 2011) stiege der Flächenbedarf der Ernährung durch den Umstieg auf eine rein ökologische Erzeugung um ca. 54 Prozent, wenn die Ernährungsgewohnheiten ansonsten unverändert blieben. Dies würde zu einem Autonomiegrad von nur noch 18 Prozent führen.

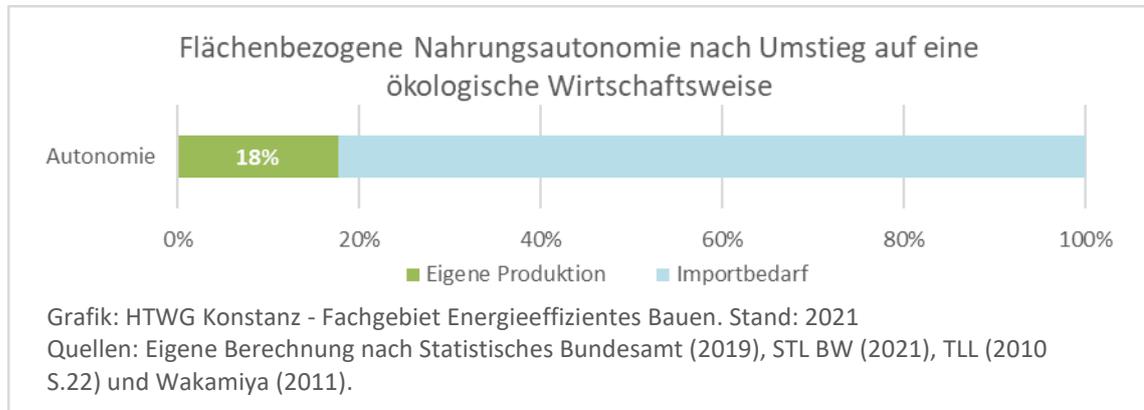


Abbildung 36: Flächenbezogene Nahrungsautonomie nach Umstieg auf eine ökologische Wirtschaftsweise

Durch eine Umstellung auf eine an gesundheitlichen Kriterien orientierte Ernährung, z. B. nach Empfehlungen der Österreichischen Agentur für Gesundheit und Ernährungssicherheit (AGES, 2017) und eine Minimierung der Lebensmittelverschwendung könnte dieser Verlust an Autonomie jedoch mehr als kompensiert werden. So sind nach Erhebungen des WWF aus dem Jahr 2015 (WWF Deutschland, 2015) und einer Studie des Thünen-Instituts aus dem Jahr 2019 (Schmidt, Schneider, Leverenz, & Hafner, 2019) ca. 54 Prozent der aktuellen Lebensmittelverluste vermeidbar. In Verbindung mit der als Beispiel genannten Ernährungsweise nach AGES könnte das Nahrungsautonomiepotenzial von Radolfzell daher trotz der Umstellung auf ökologische Wirtschaftsweise auf einen Wert von ca. 38 Prozent gesteigert werden.

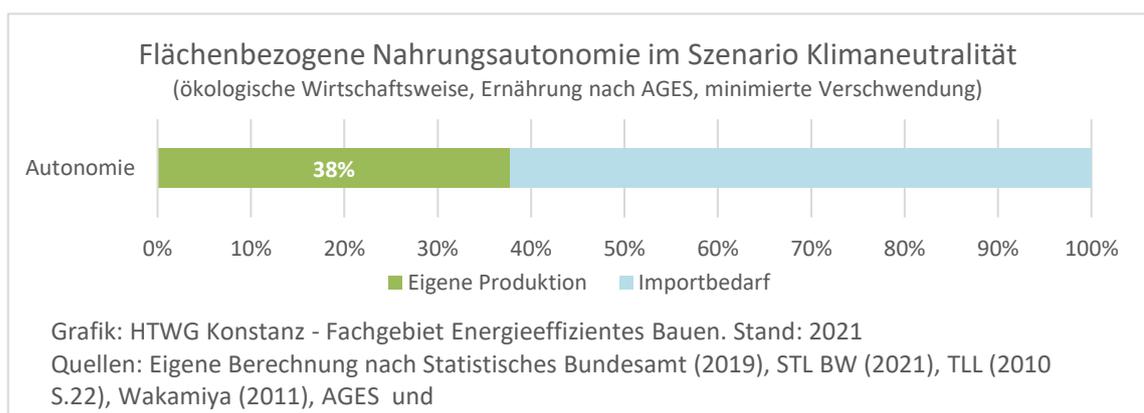


Abbildung 37: Flächenbezogene Nahrungsautonomie im Szenario "Klimaneutralität"

4.4.1.2 Mögliche CO₂-Vermeidung durch ökologische Ernährung insgesamt

Nach Angaben des Umweltbundesamtes wird die Klimabilanz der Ernährung in Deutschland derzeit auf ca. 1,7 Tonnen pro Person und Jahr geschätzt (Umweltbundesamt, 2021a). Gesenkt werden kann dieser Wert vor allem durch eine Reduktion tierischer

Nahrungsmittel, die Vermeidung von Verschwendung, den Umstieg auf eine ökologische Wirtschaftsweise und eine Reduktion von Transport und Lagerung durch eine Bevorzugung regionaler und saisonaler Produkte. Wird zudem auf eine an gesundheitlichen Kriterien orientierte Ernährungsweise umgestellt, dürfte im Szenario „Klimaneutralität 2035“ eine Reduktion der jährlichen Emissionen auf 0,8 t CO₂-Äquivalent pro Person erreichbar sein. Somit würde die Ernährung im Szenario „Klimaneutralität 2035“ immer noch fast 1,1 t CO₂-Äq. pro Person und Jahr verursachen, wenn man den gesamten Zeitraum von 2022 bis zum Jahr 2050 betrachtet, in dem die Vereinten Nationen Klimaneutralität erreichen möchten. Der Gesamtausstoß entspricht damit rund 73 Prozent des verbleibenden Budgets des 1,5-Grad-Ziels. Eine klimaneutrale Nahrungsversorgung ist mit derzeitigen Mitteln nicht ohne weiteres möglich und erfordert voraussichtlich mehrere Kompensationsmaßnahmen, wie z. B. die CO₂-Absorption durch Humusaufbau (Kohlenstoffbindung).

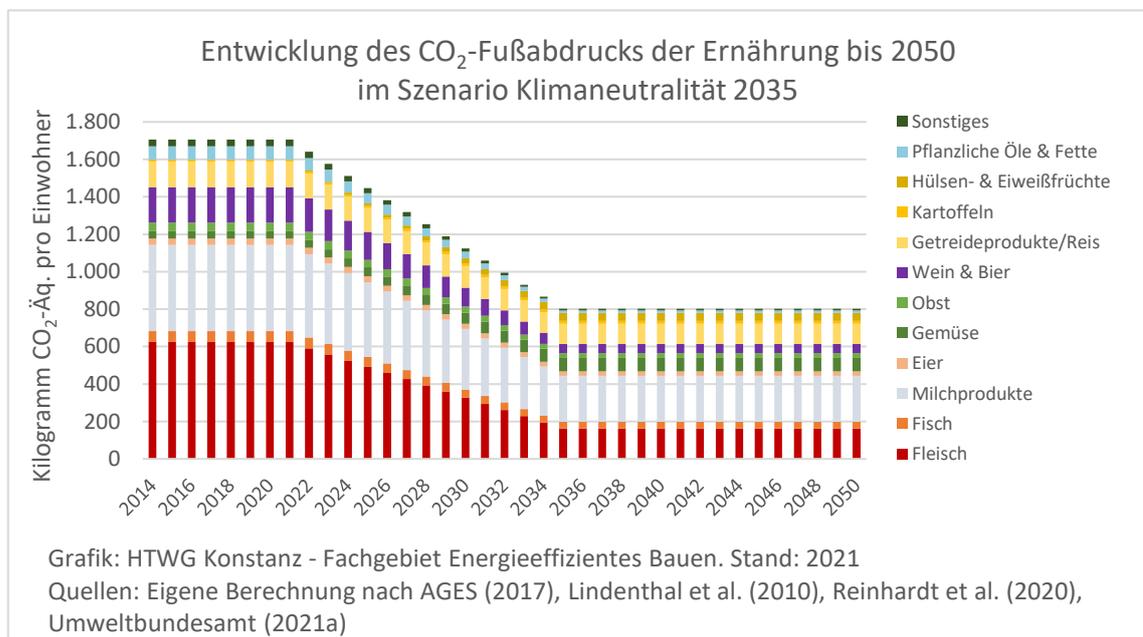


Abbildung 38: CO₂-Emissionen der Konsums pro Einwohner bis 2050 im Szenario Klimaneutralität 2035

Eine Orientierung der Ernährung an gesundheitlichen und ökologischen Kriterien und eine Reduktion vermeidbarer Nahrungsverluste sind dabei entscheidende Voraussetzungen, da der Flächenbedarf der ökologischen Landwirtschaft im Vergleich zur konventionellen Wirtschaftsweise höher ausfällt. Bei unveränderten Ernährungsgewohnheiten würde der alleinige Umstieg auf Bio-Lebensmittel daher dazu führen, dass aufgrund des erhöhten Flächenbedarfs vermehrte Importe und damit ein erhöhter Transportaufwand erforderlich würden. Zudem dürften die zusätzlich benötigten Anbauflächen durch Landnutzungsänderungen gewonnen werden, die zu erheblichen CO₂-Emissionen führen und die positiven Effekte der ökologischen Produktion wieder zunichtemachen können. Auf diese Risiken weisen inzwischen mehrere Studien hin (vgl. z. B. Smith, Kirk, & Jones, 2019).

Die vorliegende Schätzung der Minderungspotenziale basiert auf den Ernährungsempfehlungen der Österreichischen Agentur für Gesundheit und Ernährungssicherheit (AGES, 2017), Erhebungen von Reinhardt et al. (2020) zu den ökologischen Fußabdrücken von Lebensmitteln und Gerichten in Deutschland (Reinhardt, Gärtner, & Wagner, 2020) und einem Vergleich der Klimabilanz biologischer und konventioneller Lebensmittel durch Lindenthal et al. (Lindenthal, Markut, Hörtenhuber, Rudolph, & Hanz, 2010). Die Auswirkungen einer vermehrt regionalen Versorgung wurden nach Angaben des CO₂-Rechners des Umweltbundesamtes geschätzt.

4.4.1.3 Mögliche CO₂-Vermeidung durch ökologische Ernährung in Kitas und Schulen

Zur Versorgung von Kitas und Schulen sowie der internen Verpflegung lagen Daten des Pestalozzi Kinderdorfs vor, das zwei Drittel der Einrichtungen in Radolfzell beliefert. Anhand der durch das Pestalozzi Kinderdorf verbrauchten Mengen an Fleisch, Fisch, Milchprodukten, Reis, Gemüse, Salat und Obst wurden die CO₂-Emissionen der Verpflegung geschätzt: Im Falle einer vollständig ökologischen Produktion wurde dabei im Vergleich zur konventionellen Produktion ein Vermeidungspotenzial von ca. 11,7 Tonnen CO₂-Äquivalent pro Jahr errechnet. Bei ca. 230 Werktagen pro Jahr ergibt dies rund 50 kg CO₂-Äq. pro Werktag. Im Schnitt werden täglich 1.000 Speisen produziert. Da bereits 85 Prozent der verwendeten Nahrungsmittel ökologisch erzeugt werden, dürfte dieses Vermeidungspotenzial zu 77 bis 85 Prozent ausgeschöpft sein.

Die Schätzung der Minderungspotenziale basiert ebenfalls auf Erhebungen von Reinhardt et al. (2020) zu den ökologischen Fußabdrücken von Lebensmitteln und Gerichten in Deutschland (Reinhardt, Gärtner, & Wagner, 2020) und einem Vergleich der Klimabilanz biologischer und konventioneller Lebensmittel durch Lindenthal et al. (Lindenthal, Markut, Hörtenhuber, Rudolph, & Hanz, 2010).

4.4.2 Geschätzte Verursacherbilanz einschließlich Konsum

Um den Konsum in der CO₂-Bilanz abbilden zu können, muss anstelle einer auf das Gemeindegebiet bezogenen Quellenbilanz eine Verursacherbilanz erstellt werden, die auch jene Emissionen umfasst, die durch den eigenen Konsum auch außerhalb der eigenen Stadtgebietsgrenzen verursacht werden. Da es zum Konsum der Einwohner Radolfzells und der CO₂-Bilanz der durch sie konsumierten Produkte jedoch keine ausreichende Datengrundlage gibt, kann diese Bilanz nur sehr grob geschätzt werden. Um sie zumindest näherungsweise abzubilden, wurden vereinfachend bundesweite Durchschnittswerte für die Emissionen des Konsums einschließlich der Nutzung von Bahn, Flugzeug und Kreuzfahrtschiffen mit den Radolfzeller Emissionen des Wohnens und des motorisierten Individualverkehrs kombiniert. Obwohl es sich hierbei nur um eine grobe Annäherung handeln kann, weist sie jedoch deutlich darauf hin, dass der Konsum bei den Bemühungen um das Erreichen des 1,5-Grad-Ziel ebenfalls berücksichtigt werden muss. Die geschätzte Verursacherbilanz liegt mit über 9,2 t CO₂ pro Einwohner nur wenig unter den deutschen Durchschnittsemissionen. Davon gehen mehr als 43 Prozent

auf den Konsum zurück. Da sich die Brutto-Emissionen der Nahrungsproduktion nicht auf null senken lassen, ergibt sich auch im Szenario Klimaneutralität ein Wert von ca. 800 Kilogramm pro Einwohner und Jahr. Die Emissionen der Landwirtschaft lassen sich z. B. durch Maßnahmen zur vermehrten Humusbildung zumindest teilweise wieder kompensieren. Nicht eingeschätzt werden konnte, wie sich die Emissionen von Flugzeugen und Kreuzfahrtschiffen reduzieren werden, weshalb für sie keine spezifischen Absenkungen pro Streckeneinheit berechnet wurden. Angenommen wurde in diesem Bereich aber eine Reduktion des Konsums um 30 Prozent. So ergibt sich für die gesamte Zeitspanne von 2022 bis 2050, je nach Berücksichtigung von Flugverkehr und Kreuzschiffahrt, eine Bilanz von 76 bis 87 t CO₂-Äq. pro Einwohner. Damit betragen die Gesamtemissionen nach dieser Schätzung selbst im Szenario Klimaneutralität 2035 noch mehr als das Zweifache des Wertes, der dem Budget des 1,5-Grad-Ziels entspricht.

Die Differenz von 36 bis 47 t CO₂-Äq. pro Einwohner lässt sich durch lokale Maßnahmen zur Kohlenstoffspeicherung nur teilweise kompensieren. Es müssten daher auch Kompensationsmaßnahmen außerhalb der Gemarkung Radolfzells ergriffen werden, um die Differenz auszugleichen.

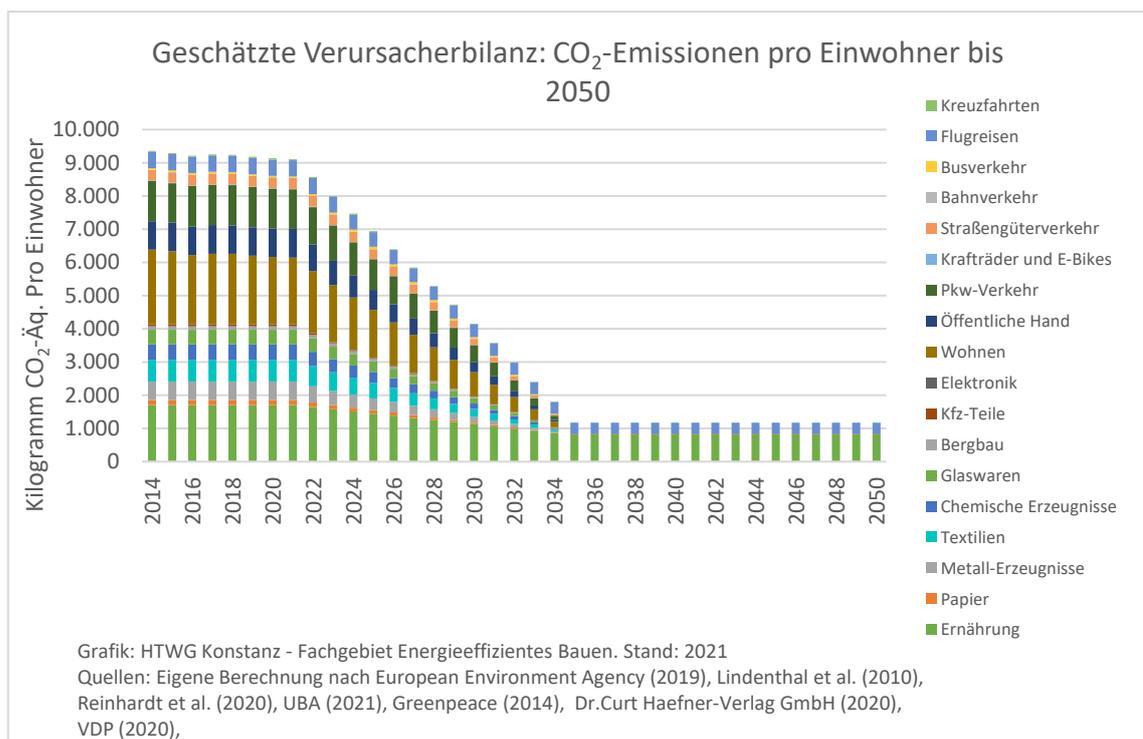


Abbildung 39: Geschätzte Verursacherbilanz: CO₂-Emissionen pro Einwohner bis 2050 im Szenario Klimaneutralität 2035

4.4.2.1 Schätzung der möglichen Effekte eines veränderten Konsumverhaltens

Im Folgenden wird am Beispiel dreier Konsumgüter betrachtet, welche Effekte ein verändertes Konsumverhalten auf die CO₂-Bilanz haben könnte. Dabei wird zunächst ein Blick auf die Reduktion des Stahlbedarfs der Pkw-Produktion geworfen, die im Szenario Klimaneutralität möglich würde, wenn die angenommene Verlagerung des Individualverkehrs vom Pkw auf den Umweltverbund erfolgen würde.

4.4.2.1.1 Beispiel Pkw-Konsum

Die deutsche Automobilindustrie hat im Jahr 2019 rund 4,66 Millionen Kraftfahrzeuge im Inland produziert (VDA Verband der Automobilindustrie, 2021) und damit einen Anteil von 26 Prozent am Stahlbedarf in Deutschland gehabt (Wirtschaftsvereinigung Stahl, 2020, S. 15). Sie ist damit nach dem Bausektor (35 Prozent) der zweitgrößte Stahlabnehmer in Deutschland. Bei einem Gesamtverbrauch von 34,7 Mio. Tonnen im Jahr 2019 (Wirtschaftsvereinigung Stahl, 2020, S. 14) ergibt sich daraus ein Stahlverbrauch von 1,93 t Stahl pro Kfz. Heutige Pkw bestehen zu ca. 54 Prozent aus Stahl, bis 2035 wird mit einem Rückgang des Anteils auf 49 Prozent gerechnet (Wirtschaftsvereinigung Stahl, 2018, zit. n. Handelsblatt Research Institut, 2018, S. 33) Im Jahr 2020 betrug das Leergewicht der Neuzulassungen von Pkw in Deutschland rund 1.600 Kilogramm (Statista, 2021a). Allerdings ist bei den neu zugelassenen Pkw in Deutschland eine fortlaufende Gewichtszunahme erkennbar, während auch die Zulassungen sogenannter SUV deutlich ansteigen (Statista, 2021b). Im Vergleich zum europäischen Durchschnitt von 1.408 kg/Pkw (Rosenberger, 2020) sind die Neuzulassungen in Deutschland somit um fast 200 kg schwerer. Viele der Rohstoffe, die in einem Pkw verarbeitet werden, sind mit ökologischen und sozialen Folgen in den Herkunftsländern verbunden (Seiwert, Deuber, Bergemann, Book, & Busch, 2017). Mit Blick auf die Energiewende in Deutschland ist vor allem der Energieverbrauch der Stahlproduktion eine Herausforderung. Geht man von einem Stahlanteil von 54 Prozent und einem Pkw-Gewicht von 1,6 t aus, liegt der Stahlbedarf bei 864 kg pro Pkw. Im Jahr 2015 betrug der Endenergieverbrauch der Stahlindustrie bei einer Produktion von 42,1 Mio. Tonnen insgesamt 166,8 Terawattstunden, wodurch 59 Mt CO₂-Äq. emittiert wurden (Schlemme, Schimmel, & Achtelik, 2019). Daraus ergibt sich ein Verbrauch von 3,96 kWh pro kg Stahl und ein Ausstoß von 1,4 kg CO₂-Äq./kg Stahl¹⁰. Daraus folgt ein Energieverbrauch von 3.420 kWh und eine Emission von 1.210 kg CO₂ pro Pkw allein für die Stahlproduktion.

Geht man von ca. 970 Neuzulassungen pro Jahr aus, entspricht dies ca. 37 kg Stahl pro Einwohner und Jahr, die in der Produktion mit einem Energieverbrauch von bis zu 107 kWh und Emissionen von bis zu 38 kg CO₂ verbunden sind.

Für das Jahr 2050 rechnet man mit einem Energiebedarf der Stahlindustrie von 200 TWh für Prozesswärme (dena, 2018). Bei einem unveränderten Anteil von 26 Prozent entfielen davon 52 TWh auf die Pkw-Produktion. Dies entspricht 50 Prozent der deutschen Windstromproduktion des Jahres 2017.

Durch die angenommenen Veränderungen des Modal Splits könnte der Bedarf an Pkw um 43 Prozent reduziert werden und eine dementsprechende Reduktion des Energieverbrauchs der Produktion erreicht werden.

Insgesamt fallen bei der Pkw-Herstellung hohe Emissionen an. Nach Angaben des VCO aus dem Jahr 2011 verursachte die Herstellung eines Kleinwagens zu dieser Zeit rund 4,1 Tonnen CO₂, die eines Mittelklassewagen zwischen 4,9 und 5,4 Tonnen und die

¹⁰ Nach Angaben der dena werden pro Tonne Stahl rund 1.600 kg CO₂ emittiert. (dena, 2018)

eines großen Pkw zwischen 6,3 und 7,1 Tonnen CO₂ (VOL, 2011). In der Größenordnung sind diese Werte heute noch immer nah an der Realität. So hat etwa die Daimler AG im Jahr 2019 für ihre B-Klasse Emissionen der Herstellung von 5,7 t CO₂ pro Pkw ermittelt, die damit um 0,3 t CO₂ pro Pkw unter dem Wert der Vorgängergeneration der B-Klasse lag (Daimler AG, 2019, S. 13). Geht man vereinfachend von 5,2 t CO₂ pro Durchschnittsfahrzeug aus, würde eine um 407 Pkw geringere Neuzulassungszahl pro Jahr rund 2.120 t CO₂ vermeiden, was etwa 67 kg pro Einwohner entspricht.

Tabelle 45: Pkw Bestand in Radolfzell und im Kreis Konstanz

Kennwert	Anzahl	Einheit
Pkw-Bestand im Kreis Konstanz ¹⁾	541	Pkw/1.000 EW
Pkw-Bestand in Radolfzell ¹⁾	574	Pkw/1.000 EW
Neuzulassungen im Kreis Konstanz 2017 ²⁾	8.349	Pkw
Neuzulassungen in Radolfzell pro Jahr geschätzt ³⁾	970	Pkw

Quellen: (1) Statistisches Landesamt BW, 2021; (2) Kraftfahrtbundesamt, 2021 (3) Schätzung

4.4.2.1.2 Beispiel Textil- und Papierkonsum

Derzeit liegt der Konsum von Textilien in Europa bei ca. 26 kg pro Person und Jahr. In Deutschland wird der Konsum mit ca. 25 kg/Ea auf einen ähnlichen Umfang geschätzt. Dieser Konsum ist mit einem CO₂-Ausstoß von ca. 654 kg pro Person und Jahr verbunden (European Environment Agency, 2019). Der Papierkonsum, der aktuell bei ca. 243 kg pro Einwohner und Jahr liegt, verursacht Emissionen von ca. 148 kg CO₂ pro Einwohner und Jahr (VDP Verband deutscher Papierfabriken, 2020; Dr.Curt Haefner-Verlag GmbH, 2020). So schöpft allein der Konsum von Textilien und Papier das verbleibende jährliche CO₂-Budget des 1,5°-Ziels mit rund 800 kg/Person bereits zu 60 Prozent aus.

Würde die Produktion nach dem Ziel der Bundesregierung durch den kontinuierlichen Umstieg auf erneuerbare Energien bis 2045 klimaneutral, könnten die Emissionen durch den Konsum von Textilien auf 8,0 t CO₂-Äq./Person und die Emissionen aus dem Papierkonsum auf 1,8 t CO₂-Äq./Person begrenzt werden. Dies entspricht zusammen immer noch fast 25 Prozent des verbleibenden Budgets für das 1,5°-Ziel. Bedenkt man die unvermeidbaren Emissionen im Bereich Ernährung, wäre das Budget mit der Ernährung und dem Konsum von Textilien und Papier praktisch ausgeschöpft. Eine wirksame und einfache Möglichkeit, den Bedarf an neuer Kleidung zu reduzieren, ist die Verlängerung der Nutzungsdauer. Weitere Möglichkeiten bieten z. B. die Nutzung von Mietkleidern oder Kleidertauschbörsen. Kleider, die nur für einen einzelnen besonderen Anlass benötigt werden, müssen so nicht mehr von jedem Einzelnen gekauft werden. Ein solches Kleider-Sharing könnte den Kleiderkonsum in beachtlicher Weise senken, denn rund 40 Prozent der in Deutschland gekauften Kleidung werden selten getragen und rund die Hälfte davon wird sogar so gut wie nie getragen (BMU Bundesministerium für Umwelt, 2021).

Um den Ressourcenverbrauch des Kleiderkonsums um 60 Prozent zu reduzieren, müsste der Verbrauch der tatsächlich häufiger genutzten Kleidung daher lediglich um

ein Drittel gesenkt werden. Dafür würde es beispielsweise ausreichen, die Nutzungsdauer eines Kleidungsstückes von drei Jahren auf 4,5 Jahre zu erhöhen.

Würde der Konsum durch solche Maßnahmen ab dem Jahr 2025 auf zwei Fünftel des heutigen Konsums reduziert, könnte der CO₂-Fußabdruck des Kleiderkonsums im ab 2022 noch auf unter 4,0 t pro Person gesenkt werden. Würde die gleiche Reduktion auch beim Papierverbrauch gelingen, könnten sich die daraus folgenden Emissionen auf 0,9 t CO₂-Äq./Person begrenzen lassen. Statt 25 Prozent würden der Konsum von Textilien und Papier so nur noch 12 Prozent des verbleibenden Budgets für das 1,5°-Ziel in Anspruch nehmen. Der Unterschied macht deutlich, dass eine Reduktion des Konsums einen erheblichen Effekt haben kann. Der dennoch große CO₂-Fußabdruck der Textilien macht aber auch ersichtlich, dass es durchaus ratsam sein kann, Produkte von Herstellern zu bevorzugen, die bereits heute auf eine klimaneutrale Produktion umgestellt haben.

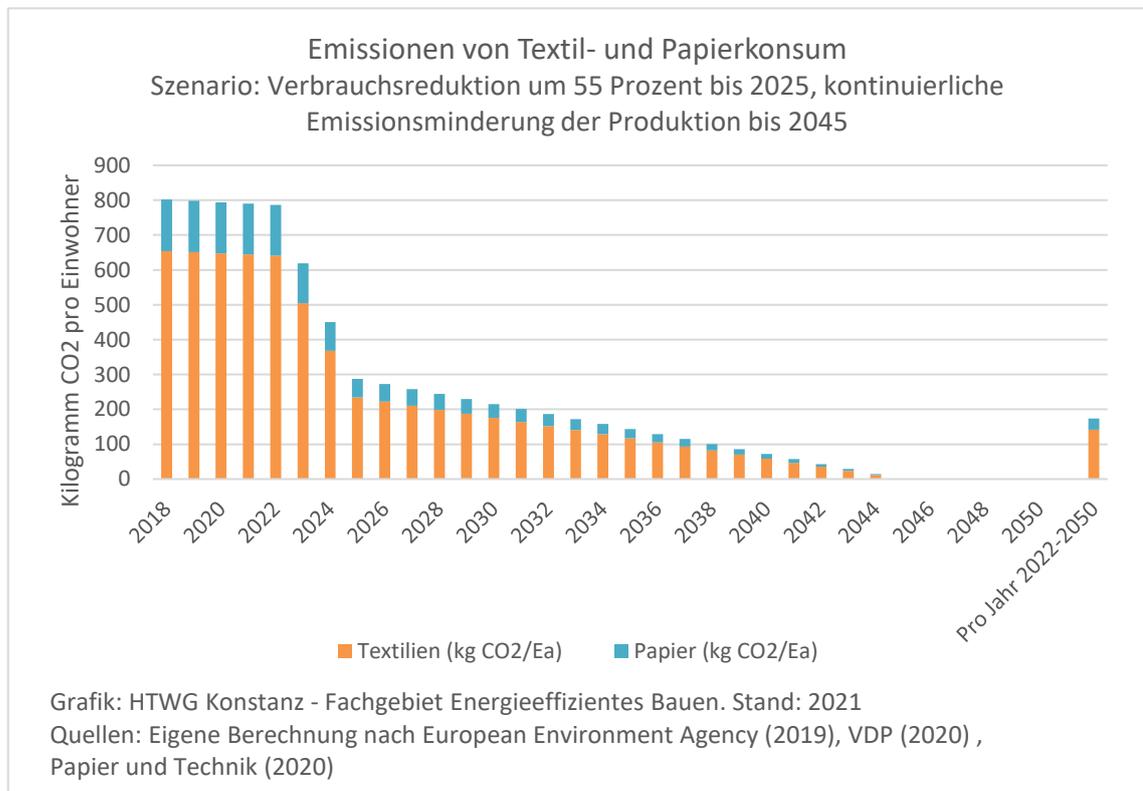


Abbildung 40: Emissionen von Textil- und Papierkonsum - Szenario

Papierverbrauch der Verwaltung

Der Papierverbrauch der Verwaltung in Radolfzell wurde anhand der angegebenen Blattzahlen auf 15,3 Tonnen pro Jahr geschätzt. Sollte diese Schätzung zutreffen, wäre dieser Verbrauch mit einem Energieverbrauch von 42,9 MWh pro Jahr verbunden und würde zu Emissionen von 9,36 t CO₂-Äq./Jahr führen. Dies entspricht ungefähr dem durchschnittlichen Jahresausstoß einer Person in Deutschland. Umgerechnet auf die Gesamtbevölkerung Radolfzells ergibt dies Emissionen von jährlich rund 0,3 kg CO₂-Äq. pro Einwohner.

4.5 Ausblick

Entscheidend für das Erreichen der Klimaschutzziele sind im Bereich der Energieversorgung vor allem eine erhebliche Beschleunigung des Zubaus der erneuerbaren Energien sowie eine rasche Elektrifizierung der Gebäudebeheizung und der Kraftfahrzeuge, insbesondere der Pkw und leichten Nutzfahrzeuge. Ergänzt werden sollten diese Maßnahmen auf der Seite der Energieerzeugung durch einen Umstieg von Energiepflanzen der ersten Generation auf Energiepflanzen der zweiten Generation und eine bedarfsangepasste Verstromung von biogenen Energieträgern vor allem in den Wintermonaten. Auf Seite des Verbrauchs sollten eine Veränderung des Modal Splits mit einer massiven Stärkung des Umweltverbundes und gezielte Sanierungen des Gebäudebestandes erfolgen, um mit der bereits verfügbaren Wärme aus Biomasse und Abwärme künftig einen größeren Anteil der Gebäude versorgen zu können. Die Beheizung der übrigen Gebäude sollte soweit und sobald wie möglich auf Wärmepumpen umgestellt werden.

Das 1,5-Grad-Ziel ist nur noch zu erreichen durch einen möglichst frühen Verzicht auf die Nutzung fossiler Energien deutlich vor dem Jahr 2040. Selbst bei einem Erreichen der Klimaneutralität 2035 sind Kompensationsmaßnahmen in Radolfzell sowie außerhalb Radolfzells erforderlich, um das Budget des 1,5-Grad-Ziels zumindest annähernd einzuhalten.

Über die Maßnahmen im Bereich der Energieversorgung hinaus können vor allem eine Umstellung der Ernährung, die Vermeidung von Lebensmittelverschwendung und eine Erhöhung der Nutzungsdauer von Konsumgütern mittels Reparatur- und Kreislaufwirtschaft erhebliche Effekte hinsichtlich der Vermeidung von Treibhausgasen bewirken. Neben den lokalen energiebedingten Emissionen sollte daher auch die Verursacherbilanz stets bedacht werden, auch wenn die Datenbasis für ein genaueres Monitoring der Verursacherbilanz noch nicht ausreicht.

4.5.1 Wichtige Stellschrauben und Ziele

- Reduktion des Haushaltsstromverbrauchs um 20 Prozent (z. B. durch bessere Effizienz und Vermeidung von Standby-Betrieb).
- Gezielte Gebäudesanierung mit einem möglichst günstigen Verhältnis von Arbeitszeitaufwand und Kosten zu Energieeinsparung: Reduktion des Raumwärmebedarfs des Gebäudebestandes auf 55 (50 – 60) kWh/m² durch Gebäudedämmung.
- Umstieg von Erdgas- und Ölheizungen auf Heizsysteme auf Basis erneuerbarer Energien, vor allem auf Wärmepumpen, da in Wohngebäuden voraussichtlich nicht mehr als 29 (20 – 38) Prozent der neuen Heizungen mit biogenen Energieträgern befeuert werden können. Geschätzter Austauschbedarf: jährlich 375 Heizungen im Wohngebäudebestand und mehr als 175 in Nichtwohngebäuden.
- Veränderung des Modal Splits mit deutlicher Verlagerung von Pkw hin zu Bussen und Elektrofahrrädern inkl. Cargo-Bikes.
- Erhöhung des Besetzungsgrades von Pkw und Bussen.

- Vollständiger Umstieg von Pkw mit Verbrennungsmotoren auf Elektroautos.
- Weitestgehende Elektrifizierung leichter Nutzfahrzeuge.
- Bei schweren Nutzfahrzeugen und Bussen vollständiger Umstieg auf Elektromotoren mit Batterie oder Wasserstoff-Brennstoffzelle, d. h. kein weiterer Neukauf von Bussen mit Verbrennungsmotoren.
- Ausbau der Ladeinfrastruktur (ca. 25 neue öffentliche Ladepunkte pro Jahr).
- Deutlich beschleunigter Ausbau der Photovoltaik: Der für hohe Autonomiegrade voraussichtlich erforderliche Zubau wird geschätzt auf jährlich 4,9 MWp Dachphotovoltaik sowie 5,4 MWp Agriphotovoltaik und 1,2 MWp Freiflächenphotovoltaik auf Parkplätzen und Randstreifen.
- Ernährung: Umstellung auf eine an gesundheitlichen Kriterien orientierte Ernährungsweise, z. B. nach Empfehlungen der deutschen DGE oder der AGES Österreich.
- Vermeidung vermeidbarer Lebensmittelverluste: Mindestens Halbierung der Gesamtverluste durch Vermeidung von Verschwendung.
- Umstellung auf ökologische Wirtschaftsweise. Diese ist in vollem Umfang jedoch nur sinnvoll, wenn die genannte Umstellung der Ernährungsweise und die Vermeidung vermeidbarer Lebensmittelverluste gelingen.
- Umstellung auf Energiepflanzen zweiter Generation.
- Nutzung von Biomasse-BHKW: Verstromung von Bioenergie in zentralen und dezentralen Blockheizkraftwerken möglichst nur im Winter, um saisonale Defizite bei der Stromversorgung zu reduzieren und eine maximale Abwärmennutzung zu ermöglichen.
- Möglichst weitgehende Vermeidung weiteren Flächenverbrauchs.
- Vermeidung des Umbruchs von Dauergrünland.
- Maßnahmen zur CO₂-Absorption: Nutzung von Potenzialen in der Landwirtschaft, Holzbau, Stadtbaumpflanzungen etc.
- Klimaanpassung: v. a. Begrünung von Dächern und Fassaden sowie innenstädtischer Freiflächen, Pflanzungen von Stadtbäumen, Schaffung von zusätzlichen Flächen für die Regenwasserrückhaltung und Versickerung. Schaffung saisonaler Regenwasserspeicher, die im Sommer zur Bewässerung kühlender Grünflächen genutzt werden können.

4.5.2 Weitere Empfehlungen

Raum- und Verkehrsplanung

- Erstellung eines Energienutzungsplans inkl. Speicherplanung
- Konzept für die „Stadt der kurzen Wege“, dessen Maßnahmen ergänzt werden durch Anreize für Versorgungskonzepte und Umzüge (z. B. per Wohnungstausch) die das Verkehrsaufkommen reduzieren.
- Privilegierung des Umweltverbundes und Anreize für die Nutzung von Fahrrädern und Bussen

- Maßnahmen zur Erhöhung der Besetzungsgrade von Pkw und Bussen, z. B. durch Boni oder Privilegierung von Fahrgemeinschaften.
- Entwicklungs-, Betriebs- und Erhaltungskonzept Radinfrastruktur
- Städtisches Konzept für Lieferverkehr (z. B. Wechseldepots und Transportfahräder).
- Förderung der Nutzung von Transporträdern durch Handwerk und Dienstleistungsunternehmen.
- Konzept für ein nachhaltiges Wohnflächenmanagement inkl. Förderung von Altbauanierungen, die Flächenverbrauch und Erschließungskosten reduzieren
- Klimafreundliches Freizeit- und Tourismuskonzept
- Verbindung von Klimaschutz- und Klimaanpassungsmaßnahmen

Kooperationen

- Kooperationen mit Nachbargemeinden bei der Entwicklung der Energienutzungspläne und der Ermittlung von Energieimport- und Exportpotenzialen
- Gemeinde- und kreisübergreifende Kooperation bei der Ertüchtigung von Netzinfrastuktur, der Entwicklung von Smart Grids und beim Aufbau von Energiespeichern.
- Gezielte Nutzung von Wohnungstauschbörsen und Mitfahrzentralen in Kooperationen mit dem Landkreis und den Nachbargemeinden.
- Kooperation mit Nachbargemeinden bei der Förderung von Umzügen (z. B. per Wohnungstausch), die Verkehrsaufkommen reduzieren.

5 Quellen- und Literaturverzeichnis

- Agentur für Erneuerbare Energien. (2021). *Föederal Erneuerbar. Daten: Deutschland*. Von <https://www.foederal-erneuerbar.de/landesinfo> abgerufen
- AGES Österreich. (2017). *Die Österreichische Ernährungspyramide*. (Österreichische Agentur für Gesundheit und Ernährungssicherheit GmbH, Herausgeber) Von <https://www.ages.at/themen/ernaehrung/oesterreichische-ernaehrungspyramide/> abgerufen
- Agora Energiewende. (16. 08. 2021). *Deutschland steht 2021 vor dem höchsten Anstieg der Treibhausgasemissionen seit 1990*. Von <https://www.agora-energiewende.de/presse/pressemitteilungen/deutschland-steht-2021-vor-dem-hoechsten-anstieg-der-treibhausgasemissionen-seit-1990-1> abgerufen
- Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft. (2021). *Kohlenstoffbindung in Bayerns Wäldern*. (Freistaat Bayern, Herausgeber) Abgerufen am 2021 von <https://www.lwf.bayern.de/boden-klima/kohlenstoffbindung/266779/index.php>
- Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie. (2020). *Anergieatlas Bayern. Photovoltaik - Umweltaspekte*. Abgerufen am 05.. Februar 2020 von https://www.energieatlas.bayern.de/thema_sonne/photovoltaik/umweltaspekte.html
- BLE Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung. (15. 06. 2021). *Wie viel CO2 binden landwirtschaftlich genutzte Böden?* Von <https://www.landwirtschaft.de/landwirtschaft-verstehen/wie-funktioniert-landwirtschaft-heute/wie-viel-co2-binden-landwirtschaftliche-boeden> abgerufen
- BMU. (2009). *Energieeffizienz - Die intelligente Energiequelle - Tipps fuer Industrie und Gewerbe*. Berlin.
- BMU Bundesministerium für Umwelt. (16. 03. 2021). *Mode und Textilien: Fast Fashion*. Von <https://www.bmu.de/themen/nachhaltigkeit-digitalisierung/konsum-und-produkte/produktbereiche/mode-und-textilien> abgerufen
- BMVBS & BBR. (2009). *Nutzung städtischer Freiflächen für erneuerbare Energien*. (BMVBS, & BBSR, Hrsg.) Berlin/Bonn.
- BMVBS. (2010). *Globale und regionale Verteilung von Biomassepotenzialen. Status-quo und Möglichkeiten der Präzisierung*. *BMVBS-Online-Publikation 27/2010*. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) (Hg.). Bonn.
- Branchenradar. (2018). *Dämmstoffe in Deutschland 2017. Saint Gobain und Knauf bauen Marktanteil aus*. (BRANCHENRADAR.com Marktanalyse GmbH, Herausgeber) Abgerufen am 29. Mai 2018 von BRANCHENRADAR: <https://www.branchenradar.com/Artikel.aspx?id=195>

- Bundesverband GebäudeGrün e. V. (2019). *BuGG-Fachinformation „Positive Wirkungen von Gebäudebegrünungen (Dach-, Fassaden- und Innenraumbegrünung)“*. Berlin.
- co2online. (25. 06. 2009). *Wie viele Bäume braucht es, um eine Tonne CO₂ zu binden?* Von <https://www.co2online.de/service/klima-orakel/beitrag/wie-viele-baeume-braucht-es-um-eine-tonne-co2-zu-binden-10658/> abgerufen
- co2online gemeinnützige GmbH. (2011/2014). *Trendreport Energie I „Heizenergieverbrauch: Stand und Entwicklung“*. Berlin, August 2011 (Aktualisiert: September 2014). Abgerufen am 23. August 2019 von https://www.co2online.de/fileadmin/co2/research/Trendreport1_Heizenergieverbrauch.pdf
- Daimler AG. (2019). *360° Umweltcheck Mercedes-Benz B-Klasse*. Untertürkheim.
- dena. (2016). *Auswertung von Verbrauchskennwerten*. (Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), Hrsg.) Deutsche Energie-Agentur GmbH.
- dena. (2018). *Factsheet Einsatzgebiete für Power Fuels: Stahlproduktion*. (Deutsche Energie-Agentur GmbH, Hrsg.) Berlin.
- Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt / KIT. (2016). *LADEN2020. Konzept zum Aufbau einer bedarfsgerechten Ladeinfrastruktur in Deutschland von heute bis 2020*.
- Dr.Curt Haefner-Verlag GmbH. (03. April 2020). *Papier und Technik - Papierindustrie senkt Energieverbrauch und Emissionen*. Abgerufen am 1. Oktober 2021 von <https://www.papierundtechnik.de/im-blickpunkt/papierindustrie-senkt-energieverbrauch-und-emissionen/>
- Dziwiaty, K. (24. Juni 2011). *Energiepflanzen und Vogelschutz – Maßnahmen zur Verbesserung der Artenvielfalt*. Abgerufen am 29. Juni 2019 von [https://www.landwirtschaft.sachsen.de/download/Energiepflanzen_und_Vogelschutz_\(2\)_Endf_Dziwiaty.pdf](https://www.landwirtschaft.sachsen.de/download/Energiepflanzen_und_Vogelschutz_(2)_Endf_Dziwiaty.pdf)
- Ecofys. (2007) zit. n. EEM. (03. 08. 2007). *Ecofys: Mehr als 2300 Quadratkilometer Gebäudefläche für Photovoltaik und Solarthermie nutzbar*. Von <https://www.solarserver.de/2007/08/03/ecofys-mehr-als-2300-quadratkilometer-gebäudefläche-für-photovoltaik-und-solarthermie-nutzbar/> abgerufen
- Energieagentur Kreis Konstanz. (Oktober 2021). *BiCO₂ BW: Radolfzell mit Schornsteinfegerdaten*. Konstanz.
- European Environment Agency. (19. November 2019). *Textiles in Europe's circular economy*. Abgerufen am 27. Oktober 2021 von <https://www.eea.europa.eu/publications/textiles-in-europes-circular-economy/textiles-in-europe-s-circular-economy>

- Forst Baden-Württemberg. (2021). *Der Wald in Baden-Württemberg*. Von <https://www.forstbw.de/schuetzen-bewahren/waldinventur/bundeswaldinventur/bwi3/> abgerufen
- Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg. (29. 08 2011). *Wie viel Kohlenstoff speichern Stadtbäume?* Von <https://www.waldwissen.net/de/lebensraum-wald/klima-und-umwelt/klimawandel-und-co2/kohlenstoff-in-stadtbaeumen> abgerufen
- Fraunhofer ISE. (2019). *Solaranlagen in der Praxis: Hofgemeinschaft Heggelbach*. Abgerufen am 29. Mai 2019 von <http://www.ise.solar-monitoring.de/year.php?page=yearsyst&system=apvh&undersystem=0&date=2018-06-15&lang=de&jahr=2018>
- Fraunhofer UMSICHT. (o. J.). *inFARMING: Landwirtschaft auf dem Dach der Forschung. Presseinformation*. Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT. Von <https://www.inhaus.fraunhofer.de/content/dam/inhaus/de/documents/PressemittteilunginFARMINGtcm581-85232.pdf> abgerufen
- GFEL Szarvas. (o. J.). *Verwendung des Energiegrases Szarvasi 1 aus energetischen Zwecken*. (Gemeinnützige Forschungs- und Entwicklungsgesellschaft für Landwirtschaft Szarvas, Hrsg.) Von http://www.energiafu.hu/energia_de.html abgerufen
- Greenpeace. (2014). *Wir entscheiden selbst, wie klimafreundlich wir leben*. Von <https://www.greenpeace.de/sites/www.greenpeace.de/files/publications/greenpeace-co2-fussabdruck-gp.pdf> abgerufen
- Handelsblatt Research Institut. (2018). *Die Rolle von Stahl in der Elektromobilität*. (voestalpine, Hrsg.)
- Hauschild, M., Weckenbrock, P., & Gattinger, A. (2021). *Ökolandbau – besser für das Klima? Über Landwirtschaft in Zeiten des Klimawandels und die Potenziale der Ökologischen Landwirtschaft*. In AgrarBündnis e.V. (Hrsg.), *Der kritische Agrarbericht 2021* (S. 122-127). Konstanz: ABL Verlag,.
- Hock GmbH. (o. J.). *Thermo Hanf. Produktbroschüre*. Abgerufen am 06. Juni 2018 von <http://www.gt-holzbau.at/systembauteile/uploads/2014/massivhaus/naturmaterialien-innen/Thermo%20Hanf.pdf>
- HUSS. (09. 08. 2020). *Energieverbrauch von Elektrobussen*. (HUSS VERLAG GmbH, Herausgeber) Von <https://www.nfz-messe.com/de/news/elektromobilitaet-studie-energieverbrauch-von-elektrobussen-2705.html> abgerufen
- KEA Baden-Württemberg. (2021). LKR Konstanz. .

- Knorr, K., Horst, D., Bofinger, S., & Hochloff, P. (2017). *Energiewirtschaftliche Bedeutung der Offshore-Windenergie für die Energiewende - Update 2017*. (S. OFFSHORE-WINDENERGIE, Hrsg.) Varel/Berlin.
- Köhl et al. (2009). Potenzial und Dynamik der Kohlenstoffspeicherung in Wald und Holz: Beitrag des deutschen Forst- und Holzsektors zum Klimaschutz. . *Landbauforschung – vTI Agriculture and Forestry Research, Sonderheft 327*, S. 103-109.
- KTBL. (2012). *Energiepflanzen. Daten für die Planung des Energiepflanzenanbaus*. (Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V. (KTBL), Hrsg.) Darmstadt.
- KTBL. (2014). *Die Produktion in Niedrigenergiegewächshäusern ist pflanzenbaulich möglich und wirtschaftlich sinnvoll. Fachsymposium ZINEG, 24.09. - 25.09.2014, Berlin*. (Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft, Hrsg.) Abgerufen am 28. 02 2018 von http://www.zineg.net/symposium_24.9.2014.pdf
- Landtag Schleswig-Holstein. (2020). *Umdruck 19-04352*.
- Landtag von Baden-Württemberg. (2021). *Drucksache 17 / 943. Gesetz zur Änderung des Klimaschutzgesetzes Baden-Württemberg*. Stuttgart.
- Landtag von Baden-Württemberg. (2021a). *Drucksache 17 / 521. 13.7.2021. Gesetzentwurf "Gesetz zur Änderung des Klimaschutzgesetzes"*. Stuttgart.
- LANUV Nordrhein-Westfalen. (2013). *Potenzialstudie Erneuerbare Energien NRW. Teil 2 - Solarenergie. LANUV-Fachbericht 40*. Recklinghausen.
- Lindenthal, T., Markut, T., Hörtenhuber, S., Rudolph, G., & Hanz, K. (2010). *Klimabilanz biologischer und konventioneller Lebensmittel im Vergleich. Ökologie und Landbau*.
- Meier, F., Krug, A., & Scherer, D. (2013). *Der Einfluss des Baumwachstums auf das Mikroklima in Straßenschluchten*. (T. U. Berlin, Hrsg.) Von https://www.klima.tu-berlin.de/team/krug/Meier_et_al_AK_Klima_2013.pdf abgerufen
- Mercator Research Institute on Global Commons and Climate Change (MCC) gGmbH. (2021). *Verbleibendes CO₂-Budget. So schnell tickt die CO₂-Uhr*. Abgerufen am 28. 10 2021 von <https://www.mcc-berlin.net/forschung/co2-budget.html>
- Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft. (2018). *Erneuerbare Energien in Baden-Württemberg 2017*. Stuttgart.
- Naturschutzbund Deutschland. (2010). *NABU-HINTERGRUND – Die unterschätzte Senkenleistung von Naturwäldern*. Berlin.
- Naturschutzbund Deutschland. (2019). *12-PUNKTE-PAPIER Wald und Forstwirtschaft im Klimawandel. Natur für sich arbeiten lassen: Stabilisieren – Wiederherstellen*.

- Naturwald Akademie gGmbH. (2017). *Allgemeine und betriebswirtschaftliche Grundsätze der naturnahen Waldbewirtschaftung*. Von https://naturwald-akademie.org/wp-content/uploads/2017/07/Anleitung_naturnaher-Wald-Grundgedanken.pdf abgerufen
- Nophadrain. (2020). *Nophadrain Gründächsystem Extensiv. Planungs- und Ausführungshilfe für extensive Gründächer*. Kerkrade/Aachen.
- Optigrün. (2016). *Retentionsdach Mäander. Minderung des Spitzenabflusses bis zu 99 %*. Krauchenwies-Göggingen.
- Optigrün. (2021). *Verdunstungsleistung von Optigründachbegrünungen*. Von <https://www.optigruen.de/fachthemen/verdunstungsleistung-von-dachbegruenungen/> abgerufen
- Reinhardt, G., Gärtner, S., & Wagner, T. (2020). *Ökologischer Fußabdruck von Lebensmitteln und Gerichten in Deutschland*. (ifeu, Hrsg.) Heidelberg.
- Riering, B. (18. 07. 2014). *Hendricks: „Unsere Sanierungsquote ist zu schwach“*. (A. Holzmann, Herausgeber, & Holzmann Medien GmbH & Co. KG) Abgerufen am 29. Mai 2018 von handwerk-magazin: <https://www.handwerk-magazin.de/steuerbonus-unsere-sanierungsquote-ist-zu-schwach/150/12/242802>
- Rosenberger, J. (28. 02. 2020). *Durchschnittsgewicht von Fahrzeugen nimmt zu*. Von <https://www.automobil-produktion.de/technik-produktion/forschung-entwicklung/durchschnittsgewicht-von-fahrzeugen-nimmt-zu-336.html> abgerufen
- RWE. (17. 05. 2021). *China baut die weltweit größte Batterie ohne Lithium*. Von <https://www.en-former.com/china-baut-die-weltweit-groesste-batterie-ohne-lithium/> abgerufen
- Sanders, J., & Heß, J. (Hrsg.). (2019). *Leistungen des ökologischen Landbaus für Umwelt und Gesellschaft. 2. überarbeitete und ergänzte Auflage. (Thünen Report 65)*. Braunschweig.
- Schlemme, J., Schimmel, M., & Achtelik, C. (2019). *Energiewende in der Industrie. Potenziale und Wechselwirkungen mit dem Energiesektor. Branchensteckbrief der Eisen- und Stahlindustrie*. (Navigant Energy Germany GmbH, Hrsg.)
- Schmidt, T., Schneider, F., Leverenz, D., & Hafner, G. (2019). *Thünen Report 71. Lebensmittelabfälle in Deutschland – Baseline 2015 –*. (Thünen-Institut, Hrsg.) Braunschweig.
- Schnieper, P. J. (30. 11. 2018). *Zukunft Autoparkplätze – Teil II: Autonom fahrende Autos versus aktuelles Parkplatzangebot*. Von <https://www.schnieperarchitekten.ch/2018/11/30/zukunft-autoparkplaetze-teil-ii-autonom-fahrende-autos-versus-aktuelles-parkplatzangebot/> abgerufen

- Schulze, E. D., Sierra, C. A., Egenolf, V., Woerdehoff, R., Irslinger, R., Baldamus, C., . . . Spellmann, H. (2020). The climate change mitigation effect of bioenergy from sustainably managed forests in Central Europe. *GCB Bioenergy*, 12(3), S. 186-197. doi:<https://doi.org/10.1111/gcbb.12672>
- SDW Schutzgemeinschaft Deutscher Wald. (2021). *Der Wald in Baden-Württemberg*. Von <https://www.sdw-bw.de/waldwissen/der-wald-in-baden-wuerttemberg/index.html> abgerufen
- Seiwert, M., Deuber, L., Bergermann, M., Book, S., & Busch, A. (2017). *Für Dein Auto*. (WirtschaftsWoche, Herausgeber) Von <https://tool.wiwo.de/wiwoapp/3d/storyflow/102017/fuerdeinauto/> abgerufen
- Siebler, J. (2013). *Die Natur kehrt zurück*. Abgerufen am 28. Mai 2019 von www.bundkreis-konstanz.de/fileadmin/bundgruppen/bcmskvkonstanz/Dokumente/Solarpark_Artikel_SW_Konstanz_4_2013.pdf
- Smith, L. G., Kirk, G., & Jones, P. (2019). The greenhouse gas impacts of converting food production in England and Wales to organic methods. *Nature Communications*, 10 (Article number: 4641).
- Stadt Frankfurt am Main. (2015). *Frankfurt spart Strom. Aktuelle Zahlen. Gemeinsam viel erreichen. Stand: August 2015*. Von <http://www.frankfurt-spart-strom.de/stromsparpraemie/ergebnis/> abgerufen
- Stadt Radolfzell. (2011). *Integriertes Klimaschutzkonzept Stadt Radolfzell*. (Stadt Radolfzell, Hrsg.) Radolfzell.
- Statista. (2021e). *Höhe der Treibhausgas-Emissionen in Deutschland in den Jahren 1990 bis 2020*. Von <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/76558/umfrage/entwicklung-der-treibhausgas-emissionen-in-deutschland/#professional> abgerufen
- Statista. (2021a). *Durchschnittliches Leergewicht neu zugelassener Personenkraftwagen in Deutschland von 2010 bis 2020. Veröffentlicht am 03.09.2021*. Von <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/12944/umfrage/entwicklung-des-leergewichts-von-neuwagen/> abgerufen
- Statista. (2021b). *Durchschnittliches Gewicht neu zugelassener Personenkraftwagen in der EU nach Marken im Jahr 2019. Veröffentlicht am 04.08.2021*. Von <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/238004/umfrage/gewicht-von-pkw-nach-autoherstellern/> abgerufen
- Statista. (2021c). *Anteil Erneuerbarer Energien am Bruttoendenergieverbrauch in den EU-Ländern 2019 und 2020*. Von <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/29592/umfrage/anteil-der-energieerzeugung-durch-erneuerbare-energie-in-der-eu-27-in-2005/> abgerufen

- Statista. (2021d). *Erneuerbare Energien - Anteil am Energieverbrauch weltweit bis 2018*. Von <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/153867/umfrage/anteil-erneuerbarer-energien-am-energieverbrauch-weltweit-seit-1990/> abgerufen
- Statistisches Bundesamt. (26. 07. 2018). *Wohnungsbestand Ende 2017: 42,0 Millionen Wohnungen*. Von https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2018/07/PD18_275_31231.html abgerufen
- Statistisches Bundesamt. (2019). *Umweltökonomische Gesamtrechnungen. Flächenbelegung von Ernährungsgütern 2010 – 2017*. (Statistisches Bundesamt (Destatis), Hrsg.) Wiesbaden.
- Statistisches Bundesamt. (28. 05. 2021). *Baufertigstellungen im Hochbau Deutschland*. Von <https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Bauen/Tabellen/baufertigstellungen.html> abgerufen
- Statistisches Bundesamt. (2021). *Nachhaltige Energiegewinnung*. Von https://www.destatis.de/DE/Themen/Laender-Regionen/Internationales/Thema/umwelt-energie/energie/_inhalt.html abgerufen
- Stauder, J. (04. 11. 2019). *Der Abriss der Tiefgarage*. Von <https://www.klimareporter.de/verkehr/das-ende-der-tiefgarage> abgerufen
- Stiftung Unternehmen Wald. (2021). *Wie viel Kohlendioxid (CO₂) speichert der Baum bzw. der Wald*. Von <https://www.wald.de/waldwissen/wie-viel-kohlendioxid-co2-speichert-der-wald-bzw-ein-baum/> abgerufen
- STL BW Statistisches Landesamt Baden-Württemberg. (2021). *Regionaldaten*. Von <https://www.statistik-bw.de/SRDB/?E=GS> abgerufen
- TFZ Bayern. (2017). *Sida: Anbautelegramm*. Abgerufen am 12. Januar 2017 von <http://www.tfz.bayern.de>
- Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft. (2010). *Regionale Biomassepotenziale zur energetischen Nutzung im Freistaat Thüringen*. Jena.
- Umweltbundesamt. (2021a). *CO₂-Rechner des Umweltbundesamtes*. Von https://uba.co2-rechner.de/de_DE/ abgerufen
- Umweltbundesamt Deutschland. (26. 11. 2019). *FW-I-3: Holzzuwachs*. Von <https://www.umweltbundesamt.de/fw-i-3-das-indikator#fw-i-3-holzzuwachs> abgerufen
- Umweltbundesamt Deutschland. (2020). *Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 - 2019*. Dessau-Roßlau.

- Umweltbundesamt Deutschland. (02. 06. 2021). *Energiebedingte Emissionen*. Von <https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/energiebedingte-emissionen#energiebedingte-treibhausgas-emissionen> abgerufen
- Umweltbundesamt Deutschland. (21. 06. 2021). *Treibhausgas-Emissionen in Deutschland*. Von <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/treibhausgas-emissionen-in-deutschland#emissionsentwicklung> abgerufen
- Vartiainen, E., Masson, G., Breyer, C., Moser, D., & Medina, E. R. (2020). Impact of weighted average cost of capital, capital expenditure, and other parameters on future utility-scale PV levelised cost of electricity. *Volume 28, Issue 6*, S. 439-453. doi:<https://doi.org/10.1002/pip.3189>
- VDA Verband der Automobilindustrie. (2021). *Automobilproduktion. Zahlen zur Automobilproduktion im In- und Ausland. Inlandsproduktion*. Von <https://www.vda.de/de/aktuelles/zahlen-und-daten/jahreszahlen/automobilproduktion> abgerufen
- VDP Verband deutscher Papierfabriken. (2020). *Papier Kompass*. Verband deutscher Papierfabriken.
- Verbraucherzentrale des Saarlandes. (21. 07. 2020). *Positive Energiebilanz von Dämmstoffen*. (V. d. V., Herausgeber) Von <https://www.verbraucherzentrale-saarland.de/pressemitteilungen/energie/positive-energiebilanz-von-daemmstoffen-49985> abgerufen
- voestalpine. (22. 03. 2019). *Die Rolle von Stahl in der Elektromobilität*. Von <https://www.voestalpine.com/blog/de/mobilitaet/automotive/die-rolle-von-stahl-in-der-elektromobilitaet/> abgerufen
- VOL. (24. 02. 2011). *VCÖ: Produktion eines Autos verursacht so viel CO2 wie 30.000 Kilometer*. Von <https://www.vol.at/vc-produktion-eines-autos-verursacht-so-viel-co2-wie-30-000-kilometer/1453014> abgerufen
- Vollrath, B., & Marzini, K. (April 2016). Mehr Vielfalt und rentable Biogasproduktion - mit den richtigen Blümmischungen ist beides möglich. *BIOGAS Journal | Sonderheft Energiepflanzen 2016*, S. 6-10.
- Wakamiya, A. (2011). Wie viel Fläche braucht ein Mensch um sich zu ernähren? *landinfo*, 7, S. 44-46.
- Westfälische Nachrichten. (03. 06. 2019). *Das ist Spitze: 1,65 Meter Radweg pro Einwohner. Münster führt Großstadt-Ranking an*. Von <https://www.wn.de/muenster/das-ist-spitze-165-meter-radweg-pro-einwohner-1133198> abgerufen
- Wiesmeier, M., Burmeister, J., Treisch, M., & Brandhuber, R. (2017). Klimaschutz durch Humusaufbau – Umsetzungsmöglichkeiten der 4 Promille-Initiative in Bayern. In Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL), & Bayerische

- Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) (Hrsg.), *Landwirtschaft im Klimawandel. Lösungen, die Geld sparen* (S. 21-29). Freising-Weihenstephan.
- Wirtschaftsvereinigung Stahl. (2020). *Fakten zur Stahlindustrie in Deutschland 2020*. Berlin.
- WWF Deutschland. (2015). *Das große Wegschmeißen. Vom Acker bis zum Verbraucher: Ausmaß und Umwelteffekte der Lebensmittelverschwendung in Deutschland*. (W. Deutschland, Hrsg.)
- ZEIT Online. (26. 09. 2016). "30 Prozent der Autos würden reichen". Von https://www.zeit.de/mobilitaet/2016-09/verkehr-autos-carsharing-elektromobilitaet-agma-verkehrswende?utm_referrer=https%3A%2F%2Fduckduckgo.com%2F abgerufen
- Zhao, C., Liu, B., Piao, S., Wang, X., Lobell, D., Huang, Y., . . . Yao, Y. (29.. August 2017). Temperature increase reduces global yields of major crops in four independent estimates. *PNAS*, 114, S. 9326-9331. doi:10.1073/pnas.1701762114
- Zinco. (2019). *Planungshilfe Dachbegrünung 4.0*. Nürtingen.
- Zinco. (2020). *Planungshilfe "Systeme für die intensive Dachbegrünung"*.
- Zinco. (2020). *Planungshilfe Solarenergie und Dachbegrünung*. Von https://zinco.de/sites/default/files/2020-04/ZinCo_Solarenergie_und_Dachbegruening.pdf abgerufen
- Zinco. (2021). *Zinco Gründachsysteme*. Von <https://www.zinco.de/gruendachsysteme> abgerufen
- Zinco. (2021a). *Zinco: Planungshilfe "Solarenergie und Dachbegrünung"*. Nürtingen.
- Zinco. (o. J.). *Dachbegrünung erhöht Erträge der Photovoltaik*. Von <https://zinco.de/solarmessung> abgerufen