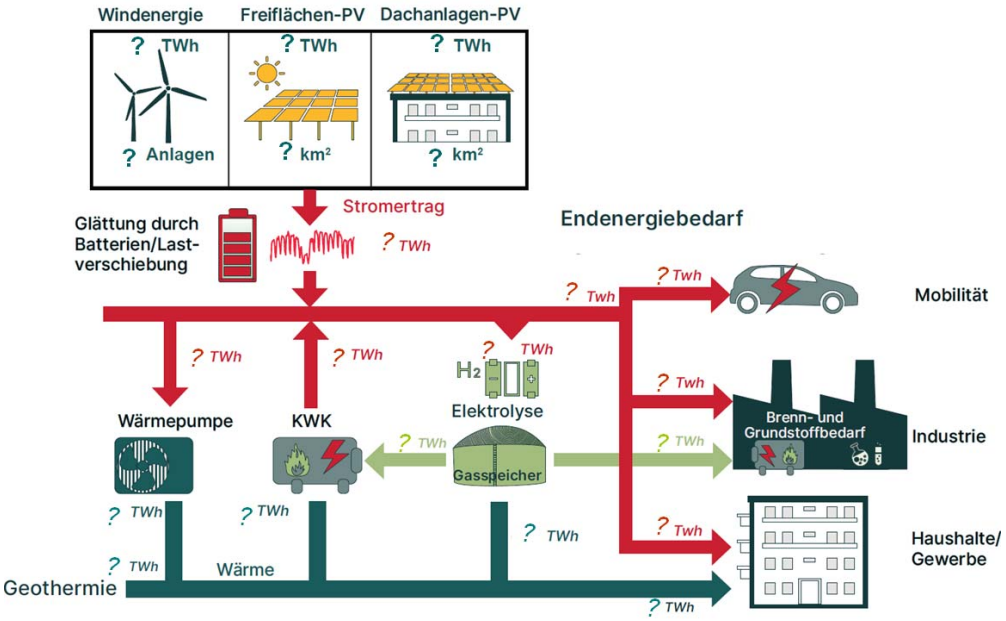
100% Erneuerbare in der Breisgau Region

Überlegungen zu einer regionalen Energieversorgung

Eine Fallstudie für die Versorgung eines Regionalverbunds in Baden-Württemberg

Version 2.1 *2. Mai 2022*

Dr. Matthias Seelmann-Eggebert, Dipl.-Physiker, Au im Breisgau



„Die reinste Form des Wahnsinns ist es, alles beim Alten zu belassen und gleichzeitig zu hoffen, dass sich etwas ändert“ *Albert Einstein*

Bemerkung zur vorliegenden Version:

Die erste Version wurde zum 5. April 2022 erstellt. In der vorliegenden 2. Version wurden grobe Schätzungen für das Potential von Aufdachanlagen durch präzisere regionale Daten ersetzt, welche im Energieatlas der Landesanstalt für Umwelt des Landes Baden-Württembergs erhoben und gelistet sind. Eine Erläuterung der Abschätzung unter weitestgehender Einbeziehung aller verfügbaren Energiequellen fehlte in der ersten Version. Eine andere grafische Darstellung ermöglichte eine Verbesserung der Anschaulichkeit der Energieflüsse.

Danksagung:

Diese Studie wurde in ihrer Urfassung von Herrn Gerhard Stryi-Hipp vom Department of Group Smart Cities, Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme, in der Herangehensweise und der Größenordnung des erforderlichen Ausbaus der Erneuerbaren bestätigt. Auf der Basis seiner Kommentare wurde sie um die Aspekte Speicher, Verluste und saisonale Bilanzierung grundlegend erweitert. Auch wurde Tiefengeothermie, Solarthermie und Wasserkraft als weitere erneuerbare Energiequellen mit aufgenommen und ihr möglicher Beitrag abgeschätzt.
Die vorliegende Version wurde von Dr. Joachim Nitsch (Seniorwissenschaftler DLR und Berater der Bundes- und Landesregierung) kritisch durchgesehen. Seine Kommentare fanden in der vorliegenden Version ebenfalls Berücksichtigung. Vielen Dank für die Mithilfe! Dr. Jörg Lange gilt mein Dank für die anschaulichere Grafik in der 2. Version der Studie.

Inhaltsverzeichnis

Verzeichnisse 5
Abkürzungen 5
Tabellen 6
Abbildungen 7
Vorüberlegungen 8
Welche Gründe gibt es für eine regionale Vollversorgung mit erneuerbaren Energien? 10
Terminologie der Energiewirtschaft 11
Erneuerbaren Energiequellen und ihre Kenndaten 13
Landkreis Breisgau-Hochschwarzwald 17
Flächennutzung 17
Energieverbrauch des Landkreises Breisgau-Hochschwarzwald 18
Energie- und Strombedarf bei einer 100%EE Versorgung 19
Notwendige Kapazitäten und Ressourcen 21
Landkreis Emmendingen 22
Flächennutzung 22
Energieverbrauch 22
Energie- und Strombedarf bei einer 100%EE Versorgung 23
Notwendige Kapazitäten und Ressourcen 24
Stadt Freiburg 24
Flächennutzung 25
Energieverbrauch 25
Energie- und Strombedarf bei einer 100%EE Versorgung 25
Notwendige Kapazitäten und Ressourcen 26
100% EE Versorgung innerhalb eines Regionalverbundes 27
Flächennutzung und Energieverbrauch 27
Für welchen Endenergiebedarf wäre zu planen? 28
Notwendige Kapazitäten und Ressourcen 29
Investitionskosten 31

Energieversorgung unter Berücksichtigung der saisonalen Abhängigkeiten 32
Zusammenfassung 37
Quellenverzeichnis 42
Anhang 44
Erläuterungen zum Modell zur Beschreibung eines 100% EE Versorgungsszenarios 44
Ergebnisse der Szenarien-Rechnungen 45
Saisonale Verläufe 47

Verzeichnisse

Abkürzungen

GHD	Gewerbe, Handel, Dienstleistungen
LUBW	Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg
LK	Landkreis
BHS	Breisgau-Hochschwarzwald
PV	Photovoltaik
FFPV	Freiflächen-Photovoltaik
EE	Erneuerbare Energien
BHKW	Blockheizkraftwerk
WKA	Windkraftanlage
JAZ	Jahresarbeitszahl
ha	Hektar
km	Kilometer
kWh/MWh/GWh/TWh	kilo/Mega/Giga/Tera-Wattstunden (Energieeinheit)
kW,MW,GW	kilo/Mega/Giga-Watt (Leistungseinheit)

Tabellen

Tab. 0: Kenndaten für Erzeugungskapazitäten der Erneuerbaren Energien

Tab. 1: Ergebnis der Potentialanalyse für PV-Aufdachflächen gemäß des Energieatlas Baden-Württemberg

Tab. 2: Anzahl der potentiellen Windkraftstandorte gemäß der Potentialstudie des Energieatlas BW nach [EAW2]. Angegeben ist die Zahl der möglichen WKA auf geeigneten Flächen/bedingt geeigneten Flächen.

Tab. 3: Potential des Wasserkraftertrags gemäß der Potentialstudie des Energieatlas BW nach [EAWSK]. Angegeben ist die Zahl der möglichen Wasserkraftwerke, ihre Gesamtleistung und ihr zu erwartender Jahresertrag.

Tab.4: Endenergiebedarf der vier Sektoren Haushalt, Gewerbe, Industrie und Verkehr nach den Energieträgern Strom und Brennstoff.

Tab. 5: Angenommener Energiebedarf für eine Versorgung des LK Breisgau-Hochschwarzwald mit 100% Erneuerbaren Energien.

Tab.6: Endenergiebedarf des LK Emmendingen für die vier Sektoren Haushalt, Gewerbe, Industrie und Verkehr nach den Energieträgern Strom und Brennstoff (Referenzjahr 2009).

Tab. 7: Angenommener Energiebedarf für eine Versorgung des LK Breisgau-Hochschwarzwald Emmendingen mit 100% Erneuerbaren Energien nach vollzogener vollständiger Elektrifizierung des Verkehr- und Wärmesektors.

Tab.8: Endenergiebedarf der Stadt Freiburg für die vier Sektoren Haushalt, Gewerbe, Industrie und Verkehr nach den Energieträgern Strom und Brennstoff (nach Ökoinstitut/IFEU Forschreibung Klimaschutzkonzept 2018, Referenzjahr 2014).

Tab.9: Endenergiebedarf der vier Sektoren Haushalt, Gewerbe, Industrie und Verkehr nach den Energieträgern Strom und Strom für Wärme/Brennstoff bei einer Versorgung mit 100% EE.

Tab.10 : Eckdaten eines Regionalverbunds aus zwei Landkreisen und einer Stadt

Tab.11 : Energiebedarf des Regionalverbunds nach Sektoren

Tab.12 : Energiebedarf des Regionalverbunds nach Umstellung auf 100%EE

Tab. A1: Eingabedaten (P) und Ergebnisse (X) für verschiedene Szenarien

Abbildungen

Abb.1: Durchschnittlicher Monatlicher PV-Ertrag pro kWp installierte Nennleistung im Breisgau für die Jahre 2018 und 2019 (nach [PVE]).

Abb. 2: Auszug aus dem Windatlas BW für das Gebiet des gedachten regionalen Verbundes [EAW1]

Abb. 3: Saisonale Abhängigkeit der Onshore-Windausbeute in Deutschland für das Jahr 2016 nach [WEEC]

Abb. 4: Flächennutzung im Landkreis Breisgau-Hochschwarzwald im Jahr 2017 und bei Umnutzung von 2% der Fläche für Erneuerbare Energien.

Abb. 5: Flächennutzung im Landkreis Emmendingen nach [SDEM]

Abb. 6: Flächennutzung für die Stadt Freiburg nach [SDFR]

Abb. 7: Anteile der drei Verbundpartner an Einwohnerzahl, Fläche und Endenergiebedarf.

Abb. 8: mögliche Aufteilung einer 100%EE Versorgung des Regionalverbunds.

Abb. 9: Energieflussdiagramm für das 100%EE Versorgungsszenario 1

Abb. 10: Energieflussdiagramm für das 100%EE Versorgungsszenario 2

Abb. 11: Energieflussdiagramm für das 100%EE Versorgungsszenario 3

Abb. 12: Energieflussdiagramm für das 100%EE Versorgungsszenario 4

Abb. 13: Energieflussdiagramm für das 100%EE Versorgungsszenario 5

Abb. A1: Zeitverlauf von Aussentemperatur (in °C) und Arbeitszahlen für Szenario 1

Abb. A2: Zeitverlauf von Erzeugungs- und Bedarfskurven (in GW) für Strom von Szenario 1

Abb. A3: Zeitverlauf von Erzeugungs- und Bedarfskurven (in GW) für Wärme von Szenario 1.

Abb. A4: Zeitverlauf der Erzeugungsrate von Wasserstoff (in GW) von Szenario 1.

Vorüberlegungen

Auch das Jahr 2021 mit seinen nationalen und weltweiten Katastrophen hat uns wieder gezeigt, dass die Klimakrise unerbittlich voranschreitet. Als einer der Hauptverursacher trägt Deutschland eine wesentliche Mitverantwortung und steht in der Pflicht, alles nur Erdenkliche zu unternehmen, um die Erderhitzung auf ein erträgliches Maß zu Begrenzen. Leider ist aber auch in Baden-Württemberg der Ausbau der erneuerbaren Energien fast zum Stillstand gekommen, obwohl unser an Industrie reiches Bundesland ganz besonders zum Handeln aufgefordert ist, die Transformation zu einer klimaneutralen Wirtschaft in Angriff zu nehmen .

In der Region Südbaden gibt es Bestrebungen einen Bürgerrat einzurichten, der ein modellhaftes Konzept erarbeiten soll, wie eine Versorgung eines aus den Landkreisen Breisgau Hochschwarzwald (BHS)und Emmendingen (EM) und der Stadt Freiburg bestehender Regionalverbund eine klimaneutrale Versorgung mit 100% Erneuerbare Energien (EE) bewerkstelligt werden kann.

Mit der Verpflichtung 2% der Landesfläche auf regionaler Basis für Erneuerbare Energien auszuweisen [NKSG] hat das Land die Weichen für eine Entwicklung gestellt, die eine 100% Versorgung mit erneuerbaren Energien ermöglichen soll und im Rahmen dieser Flächenressourcen auch verwirklicht werden muss. Für die reale Machbarkeit einer 100%EE Versorgung werden in dieser Studie lediglich zwei Kriterien angewendet:
1.) die Verfügbarkeit von Windkraftstandorten gemäß des Energieatlas [EAW2] und
2.) die Einhaltung der Obergrenze von 2% der Landesfläche, welche gemäß Klimaschutzgesetznovelle §4b [NKSG] regional für die EE bereitzustellen sind.

Diese Studie soll dabei insofern Hilfestellung leisten, als sie für die regionale Wirtschaft ein klimaneutrales Szenario skizziert, bei welchem Elektrifizierung und Sektorkopplung eine wesentliche Rolle spielen. Dabei soll auf der Basis von einfachen und transparenten Annahmen abgeschätzt werden, mit welcher Energienachfrage innerhalb dieses Regionalverbunds zu rechnen ist und ob und wie diese durch regionale Maßnahmen innerhalb des Verbundgebiets abzudecken ist.

Eine solche Abschätzung beruht immer auf einer Reihe von Annahmen, die mit teilweise erheblichen Unsicherheiten behaftet sind. Der wissenschaftliche Ansatz basiert dabei auf einem Vorgehen in drei Schritten.

In einem ersten Schritt sind aktuelle Daten für den Energieverbrauch der Gebietskörperschaft, d.h. der Gemeinde oder des Kreises zu erheben. Eine unabhängige Erhebung oder Bewertung vorliegender Daten entzieht sich den Möglichkeiten dieser Studie, die sich deshalb auf vorliegende Daten aus den Klimaschutzkonzepten verlassen muss. Es sei darauf hingewiesen, dass diese Daten einer Unsicherheit von mindestens 10% unterliegen.

In einem zweiten Schritt ist abzuschätzen, wie sich der Energieverbrauch auf Grund der zu erwartenden großen Transformation unserer Energiewirtschaft entwickeln wird. Auch in den genannten vorliegenden Klimaschutzkonzepten werden diesbezüglich Annahmen getroffen, die meist auf Plausibilitätsbetrachtungen beruhen oder Einsparungspotentiale auf verschiedenen Sektoren nutzen. Eine ausführliche Beschreibung, wie sich der Energieverbrauch in Deutschland zusammensetzt, findet sich z.B. in einer Studie des Ökoinstituts in Zusammenarbeit mit Prognos [PROG]. In dieser detaillierten Studie wurden zwei begrenzende Szenarien für eine klimaneutrale

Energiewirtschaft untersucht mit dem Ziel, die Prognose der Endenergie nach oben und nach unten einzuschränken. Diese beiden Szenarien ergaben für die gesamte Endenergie eine Reduktion um mindestens 33% und höchstens 58%. Eine neue Studie für BW geht von einer Reduktion des Endenergiebedarfs um 40% aus [PEEBW]. Die Unsicherheit für eine solche Prognose ist erheblich, da sie letztlich auf schwer einzuschätzenden Entwicklungen beruht.

Letztlich muss in jedem Fall ein substantieller Betrag an Energie eingespart werden, um Klimaneutralität auch nur ansatzweise erreichen zu können. Die aktuellen Daten lassen aber kaum einen Trend zur Reduktion des Energiebedarfs erkennen. Zielszenarien beruhen letztlich auf der Hoffnung, vorliegende Einsparpotentiale zu nutzen. An diesem Punkt soll hier ein etwas anderer Weg verfolgt werden. Es wird davon ausgegangen, dass unser Wohlstand im Wesentlichen auf der Verfügbarkeit der aktuell benötigten Energie beruht und substantielle Einschränkungen kaum hingenommen werden oder durchzusetzen sind. Allerdings verschwenden wir einen großen Teil dieser Energie, da sie für den beabsichtigten Zweck als Nutzenergie gar nicht benötigt wird. Eine Umstellung der Energieversorgung auf 100% Erneuerbare wird aus drei Gründen automatisch zu einer erheblichen Steigerung der Effizienz führen. Wind- und Sonnenenergie stellen die Endenergie direkt als Strom ohne das Abfallprodukt Wärme zur Verfügung, das bei Energie aus konventionellen Kraftwerken sogar überwiegt. Strom kann deshalb auch von den Verbrauchern in weit größerem Maße genutzt werden. Ein zweiter Hebel ist die Mobilität. Eine gegebene Kilometerleistung kann durch Elektrifizierung des Mobilitätssektors mit einem Bruchteil der Endenergie erfüllt werden. Ein weiterer Punkt ist die Elektrifizierung des Wärmesektors mittels Wärmepumpen, denn mittels Wärmepumpen kann die Umweltenergie als beliebig verfügbare erneuerbare Wärmequelle erschlossen werden. Alle drei Punkte haben weniger den Charakter eines graduellen Einsparens, sondern das Potential eines „System Change“.

Der dritte Schritt, der in dieser Abschätzung vorgenommen wird, besteht darin, die im Zukunftsszenario zu erwartende Endenergie durch erneuerbare Energiequellen (EE) abzudecken. Im Schwarzwald gibt es eine lange Tradition der Versorgung mit Wasserkraft. Der Oberrheingraben bietet erhebliches Potential für eine Wärmeversorgung durch Tiefengeothermie. Auch sind im Laufe der letzten Dekaden viele Biogasanlagen entstanden. Heizen mit Holz ist für waldreiche Gebiete wie dem Schwarzwald durchaus auch eine Option für eine klimaschonende Wärmeversorgung. Auch Solarthermie kann einen Teil der Wärmeversorgung übernehmen. So wichtig die Nutzung all dieser Energieversorgungsmöglichkeiten ist, sie können nur einen kleinen Beitrag zur Gesamtversorgung leisten oder sprengen den engen Rahmen der Nachhaltigkeit. Der zu erwartende Energiebedarf wird deshalb vor allem durch Windenergie und Photovoltaik abzudecken sein, für die grundsätzliche Begrenzungen keine Rolle spielen.

Das in dieser Studie entworfene Zielszenario fokussiert sich daher auf diese beiden Mittel zur Energiegewinnung. Beiden Energiegewinnungsmethoden ist der Nachteil gemeinsam, dass sie über gewisse Zeiträume keine oder nur in deutlich reduziertem Maße Energie zur Verfügung stellen können (nachts gibt es keinen Sonnenstrom) und dass sie zudem erheblichen saisonalen Schwankungen unterworfen sind. Eine Energieversorgung ist daher nur in Verbindung mit Speichern zuverlässig. Einerseits werden Kurzzeitspeicher zum Ausgleich benötigt, z.B. der Sonnenenergie durch den

Tag-Nacht-Zyklus und der Windenergie in Phasen von Flauten. Andererseits müssen Langzeitspeicher die Phasen mit geringerem saisonalen Ertrag überbrücken.

In einem vierten Schritt wird schließlich unter Zugrundelegung eines einfachen Modells eine Abschätzung des Gesamtbedarfs an Erzeugungsanlagen und Speichern für die einzelnen Gebietskörperschaften und den Regionalverbund als ganzes vorgenommen. Diese Abschätzungen werden durch Modellrechnungen abgesichert, welche Speicher und saisonale Lastengänge berücksichtigen.

Diese Studie ist in mehrere Kapitel gegliedert. Zunächst wird dargelegt, welche Gründe für eine vollständige regionale Energieversorgung mit erneuerbaren Energien sprechen. Es folgt ein Abschnitt, welcher die Möglichkeiten zur Erzeugung der erneuerbaren Energien im Verbundsgebiet darlegt und die Kenngrößen erläutert, welche den Zusammenhang zwischen Flächenressourcen, Jahresertrag und saisonaler Verteilung beschreiben. Es folgt für jede der drei Gebietskörperschaften eine Bestandsanalyse, sowie eine pauschale Prognose für den zu erwartenden Endenergiebedarf, wenn eine vollständige Elektrifizierung des Verkehrssektors und des Wärmesektors vorgenommen würde. Schließlich erfolgt eine analoge Analyse für den gedachten Regionalverbund der drei Gebietskörperschaften. In einem letzten Abschnitt wird exemplarisch ein Versorgungs-Szenario mit 100%EE unter vollständiger Berücksichtigung der saisonalen Abhängigkeit von Strom und Wärme vorgestellt.

Welche Gründe gibt es für eine regionale Vollversorgung mit erneuerbaren Energien?

Eine regionale Versorgung mit 100% Erneuerbaren Energien bietet vielfältige Vorteile. Zum einen gewährleistet sie eine vollständige Vermeidung von Treibhausgasemissionen auf dem Energiesektor und ist damit **die** zentrale Maßnahme zum Erreichen von Klimaneutralität. Aber ganz unabhängig vom Klimaschutz bietet eine regionale Energieversorgung weitere Vorteile.

Unabhängigkeit

In Anbetracht des Ukrainekriegs ist die ausgeprägte Abhängigkeit unseres Landes von fossilen Energieimporten ins Bewusstsein der Öffentlichkeit gerückt, denn mit diesen Energieimporten finanzieren sich häufig autokratische Systeme (Scharia in Saudi-Arabien, Russland, Iran…). Energieunabhängigkeit ist eine Voraussetzung, solchen Unrechtssystemen die Unterstützung zu entziehen. Die Abhängigkeit von Energieimporten gilt es deshalb rasch zu mildern und möglichst zu beseitigen. Erneuerbare Energien bieten uns eine einzigartige Möglichkeit, von fossilen Energieimporten unabhängig zu werden und ermöglichen eine weitgehend autarke Versorgung. Gegebenenfalls verbleibende Importe (z.B. Wasserstoff) sind ebenfalls auf eine erneuerbare Basis zu stellen.

Resilienz

Heute erfolgt unsere regionale Stromversorgung größtenteils über Fernleitungen, welche mittels des europäischen Verbundnetz miteinander verknüpft sind. Die starke Einbindung in ein einheitliches Netz macht unsere Stromversorgung anfällig für großflächige und lang andauernde Stromausfälle. Bei einem länger anhaltenden Blackout kann die Wasserversorgung, Telefon- und Mobilnetz, Internet und Radio- bzw. Fernsehempfang zusammenbrechen. Die heutige Stromversorgung als Rückgrat unserer

Volkswirtschaft kann in ihrer zentralen Netzstruktur auch nur schwer vor folgenschweren Hackerangriffen geschützt werden.

Eine starke regionale Versorgung, bei der nur relativ geringe Ausgleichsmengen von Strom über Fernleitungen übertragen werden, macht unsere Stromversorgung sicher und stabiler, insbesondere resilient gegen apokalyptische Blackoutszenarien. Eine zumindest teilweise regionale Energieversorgung erlaubt es auch, diese Grundversorgung selbst in Krisen oder Konfliktfällen aufrecht zu erhalten.

Authentizität

Eine regionale erneuerbare Energieversorgung bedingt den Bau von sehr vielen hohen Windkraftanlagen auf den Höhenzügen des Schwarzwaldes und die Errichtung von quadratkilometergroßen Solarparks im Rheintal. Diese Anlagen würden etwa in dem Umfang errichtet, wie sie zur Befriedigung des lokalen Bedarfs erforderlich sind. Ihre Sichtbarkeit demonstriert unseren Energiehunger und erinnert uns ständig an den Preis, den wir für unseren wirtschaftlichen Wohlstand leisten müssen. Mit dem Ausbau der Erneuerbaren vor Ort zeigen wir Ehrlichkeit und Authentizität, indem wir die Verantwortung sichtbar übernehmen und nicht in andere Regionen der Welt oder unseres Landes abschieben.

Signalwirkung

Würde eine regionale Vollversorgung durch erneuerbare Energien für den angedachten Regionalverbund quasi als Pilotprojekt realisiert, so hätte dies eine erhebliche Signalwirkung für andere Regionen in Deutschland und Europa.

Ersparnis

Zuletzt gibt es auch ökonomische Gründe für eine Vollversorgung mit erneuerbaren Energien, denn eine solche Umstellung spart einerseits eine erhebliche Menge Energie und andererseits – zumindest aus Sicht der Bürgerinnen und Bürger - auch sehr viel Geld. Es ist dabei wichtig, dass die Erneuerbaren Anlagen möglichst in Bürgerhand oder zumindest in öffentlicher Hand bleiben.

Trotz dieser Vorteile stehen einer Verwirklichung viele Hindernisse entgegen. Für die benötigten Flächen und Standorte bestehen fast immer Nutzungskonflikte. Dabei beharren die Menschen gerne auf dem Althergebrachten und überwinden nur schwer lange eingespielte Gewohnheiten. Einer schnellen und konsequenten Realisierung von 100% EE steht aber in vielerlei Hinsicht auch die aktuelle Gesetzeslage mit ihrem Gestrüpp von Verordnungen und Vorschriften im Wege. Mit dem gerade angekündigten Osterpaket der Bundesregierung wird ein Anfang beim Lichten dieses Dickichts in Aussicht gestellt.

Terminologie der Energiewirtschaft

Eine Analyse des Versorgungskonzepts beginnt mit der Erhebung von Daten für Heizbedarf, Stromverbrauch und Kraftstoffverbrauch und einer Einführung in die Terminologie der Energiewirtschaft. Ist der Bedarf einmal ermittelt, müssen die Möglichkeiten zu dessen Deckung beleuchtet werden und z.B. die Verfügbarkeit von Dachflächen und Windkraftstandorten geprüft werden.

Unser Energieverbrauch im Alltagsleben ist durch eine Vielzahl technischer Einrichtungen bestimmt: Beleuchtungen, Computer, Fernseher, Küchenherde, Waschmaschinen, insbesondere aber Autos und Heizungen. Die Energie, welche zum Betrieb dieser Einrichtungen vor Ort erforderlich ist, nennt man Endenergie. Die Energie, die dabei tatsächlich zur Erfüllung des eigentlichen Zwecks benötigt wird, z.B. mechanische Energie oder Traktionsenergie beim Auto, ist die Nutzenergie. In allen Fällen beträgt sie nur einen Teil der Endenergie, da jede Energieumwandlung mit Verlusten verbunden ist. Teilweise sind diese Verluste beträchtlich, wenn z.B. als Abfallprodukt in erheblichem Maße Wärme freigesetzt wird, die nicht genutzt werden kann (z.B. in Verbrennungsmotoren). Um die Endenergie vor Ort verfügbar zu machen, muss zusätzlich Energie aufgewandt werden. In der Summe erhält man so den insgesamt erforderlichen Energieeinsatz, der als Primärenergie bezeichnet wird. Um eine Kilowattstunde (kWh) Strom aus der Steckdose entnehmen zu können, muss eine ungleich höhere Energiemenge in thermischen Kraftwerken z.B. als Kohle verbrannt werden. Die Verlustwärme gelangt meist ungenutzt in unsere Umwelt. Sie kann aber durch sog. Kraft-Wärme-Kopplung teilweise in nutzbare (Fern-)Wärme überführt werden. Ziel einer effizienten Energienutzung ist, soviel Nutzenergie wie möglich aus der Primärenergie zu ziehen. Der Zusammenhang zwischen Primärenergie und Endenergie wird durch den sogenannten Primärenergiefaktor gegeben. Der Primärenergiefaktor für Strom nimmt mit wachsendem Zubau der Erneuerbaren ab und beträgt aktuell 1,8.

Die in diesem Dokument verwendeten Energieeinheiten werden von Wattstunden (Wh) abgeleitet , wobei die folgenden Zusammenhänge bestehen

1 TWh= 1000 GWh; 1 GWh=1000 MWh; 1 MWh = 1000 kWh

Bei einer Energiebilanz werden Erzeugung und Verbrauch gegenübergestellt. Meist wird die Bilanz auf Jahresebene für die Endenergie gezogen. Für ein autarkes Energiesystem ist allerdings nicht nur die Jahresbilanz ausschlaggebend. Vielmehr muss zu jedem Zeitpunkt der Energiebedarf durch eine Energiequelle abgedeckt werden. Eine 100%ige Versorgungssicherheit fordert eine ausgeglichene Bilanz: Tag für Tag und auf saisonaler Ebene. Dies erfordert den Einsatz von saisonalen Speichern. Da diese mit Verlusten verbunden sind, ergibt eine Jahresbilanz nur eine untere Grenze für die Menge an bereitzustellender Energie. Konventionelle Maßeinheiten der Energie sind Kilowattstunden. Ein Verbraucher mit einer Leistung von 1 kW kann mit einer kWh eine Stunde lang betrieben werden. Ein Liter Heizöl oder Diesel enthält eine Energie von 10 kWh. Der Energiebedarf des Regionalverbundes ist hingegen in Terawattstunden (TWh) zu bemessen, wobei eine TWh die ungeheure Energiemenge von 1 Milliarde kWh bedeuten. Wollte man 10 TWh als Heizöl einkaufen, so würde das über 1 Milliarde Euro kosten und man müsste als Speicher einen Würfel von 100 Meter Kantenlänge bereitstellen.

Um solche Mengen an Energie erneuerbar z.B. mit PV zu erzeugen müssen sehr große Flächen zur Verfügung stehen. Im Klimaschutzgesetz des Landes BW wie auch im Koalitionsvertrag des Bundes steht, dass 2% der Landesfläche für die Erneuerbaren verfügbar gemacht werden sollen.

Erneuerbaren Energiequellen und ihre Kenndaten

Eine der beiden Hauptsäulen einer Energieversorgung mit 100% EE ist die Photovoltaik. Photovoltaik (PV) hat den Vorteil, dass sie nur geringe Anforderungen an den Standort stellt, die i.a. auch leicht zu erfüllen sind.

Die Leistungsfähigkeit von Solarmodulen wird über eine sog. Nennleistung gemessen, welche angibt, welche Leistung das Modul für eine normierte Referenz-Einstrahlung liefert. In unseren Breiten liefert eine Nennleistung von 1 kW_P(Kilowatt Peak) ungefähr einen Jahresertrag von 1000 kWh(=1 MWh) [PVE]. Die Volllaststundenzahl ist die hypothetische Zahl an Stunden, mit der die Anlage im Jahr exakt mit der Nennleistung betrieben werden müsste, um den Jahresertrag zu produzieren. Moderne Solarmodule haben eine hohe Ausbeute. Ein Standard-Solarmodul hat eine Fläche von 1,60 m auf 1 m und liefert eine Nennleistung zwischen 300 und 350 Watt. Dies bedeutet, dass eine Nennleistung von 1 kWp ungefähr 5 Quadratmeter Fläche benötigen. Solarmodule können auf Dächern oder als Freiflächenanlagen installiert werden.

Tab. 0: Kenndaten für Erzeugungskapazitäten der Erneuerbaren Energien (1 ha = 10 000 m^2)

	Nennleistung	**Volllaststunden**	**Jahresertrag**	**Flächenbedarf**
Aufdach PV	**1 kWp**	**1000**	**1 MWh**	**5 m2**
Freiflächen PV	**1 MWp**	**1000**	**1 GWh**	**1 ha**
Windkraftanlage	**5 MW**	**2000**	**10 GWh**	**1,8 ha**
Brennholz	**nachhaltige Bewirtschaftung**		**8 MWh**	**1 ha**
Energiepflanzen			**25 MWh**	**1 ha**

Bei einer Aufdachanlage können die Module dicht an dicht gelegt werden. Aufdach-PV stellt den geringsten Eingriff in Natur und Landschaft dar, hat aber den Nachteil, dass der Ausbauprozess im Bestand nur sehr langsam voranschreitet. Ein Grund dafür liegt darin, dass eine PV Montage oft nur Sinn in Kombination mit einer Dachsanierung macht. Die jährliche Sanierungsquote liegt im Gebäudebestand bei etwa 2% bis 3%.

Das Potential für Aufdach-PV ist ebenfalls bei der Erstellung des Energieatlas auf regionaler Ebene abgeschätzt worden. Diese Ergebnisse sind in Tab. 0 zusammengefasst und in Relation zur Siedlungsfläche und Bevölkerungszahl der Gebietskörperschaften gesetzt. Hierbei handelt es sich um Obergrenzen, die sich bei vollständiger Nutzung der Dachflächen ergeben. In dieser Studie wird davon ausgegangen, dass bestenfalls 80 bis 90% der Flächen tatsächlich genutzt werden. Die spätere Analyse wird bestätigen, dass man zu einem Anhaltswert für den Beitrag von Aufdach PV Anlagen zur Energieversorgung auch mit folgender Daumenregel gelangen kann. In den meisten Bestandsgebäuden kann –bei vollständiger Belegung mit Solarmodulen – liegt der Wert für die Solarenergie, die über die Dachfläche gewonnen werden kann, in der Jahresbilanz bei etwa 50% des Wärmebedarfs des Gebäudes. Dieser Zusammenhang zwischen Wärmebedarf für die Gebäude und dem Solarpotential für Aufdachanlagen erlaubt, wie später gezeigt wird, über den Umweg von saisonalen Speichern einen

klimaneutrale Wärmeversorgung des Gebäudebestands. Für Bestandsgebäude mit mehr als drei Geschossen ist allerdings die Wärme-Dach-Daumenregel nicht mehr so leicht zu erfüllen, da der Anteil der Dachfläche an der Gebäudeoberfläche zu klein wird. Im Vergleich mit der Freiflächen PV ist der Ausbau teuer, langsam und verlangt Fachkräfte. Die Daten aus dem Energieatlas zeigen, dass bisher nur ein kleiner Prozentsatz des Potentials für Aufdachanlagen genutzt wird.

Tab. 1: Ergebnis der Potentialanalyse für PV-Aufdachflächen gemäß des Energieatlas Baden-Württemberg [EAPV]. Die Analyse geht von Modulen mit einer Fläche von 1,6 m2 und einer Nennleistung von 320 Wp aus. Die abgeschätzten Dachflächen wurden in Relation zu der Siedlungsfläche und der Einwohnerzahl gesetzt. In der Studie wurde angenommen, dass maximal 80-90% des Potentials tatsächlich genutzt werden können. Im Jahr 2018 war nur ein kleiner Prozentsatz des Potentials tatsächlich genutzt.

Kreis	Ertrag [TWh]	2018 inst.	Fläche [km2]	%Anteil Siedl.fl.	m^2 pro Einw.
Breisgau/Hochschwarzwald	1,65	8 %	8,4	11,5	32
Emmendingen	1,02	10 %	5,1	12,4	31
Freiburg	0,67	6 %	3,4	13,0	15
Verbund	3,34	8 %	16,9	12	25

Bei einer Freiflächenanlage werden die Module üblicherweise aufgeständert. Die gebildeten Reihen müssen, um Verschattung zu vermeiden, einen Abstand einhalten, so dass nur etwa 50 bis 70% der Fläche für die Belegung mit Modulen genutzt werden können. Bei Freiflächenanlagen (und ebenso bei Agri-PV) geht man daher von einem Belegungsgrad von 50% aus. PV Freiflächenanlagen haben den Vorteil, dass man sie sehr schnell aufbauen (und auch wieder abbauen) kann, denn die Pfähle für die Unterkonstruktion werden üblicherweise nur gerammt. Die Installation ist preisgünstig und kann im wesentlichen von angelernten Kräften vorgenommen werden. Für eine Überschlagsrechnung (eine Nennleistung mit 1 kW_P liefert jährlich ca. 1 MWh elektrische Energie) ergibt sich, dass eine Anlage mit 1 GW_P Nennleistung mit einer Fläche von bis zu 10 km^2 benötigt.

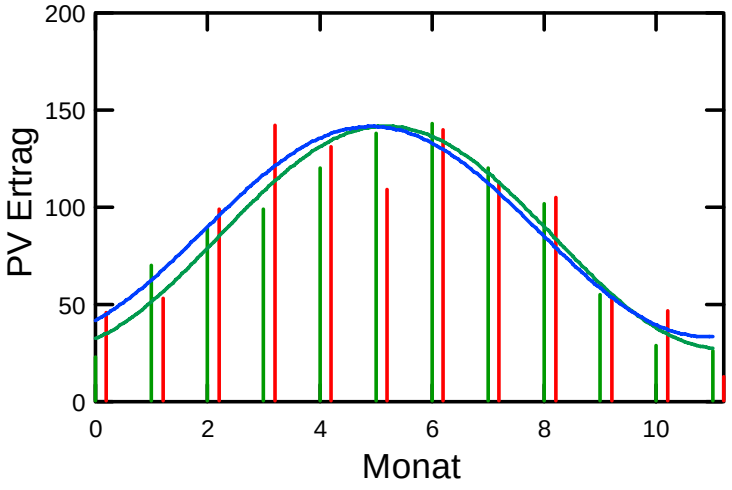
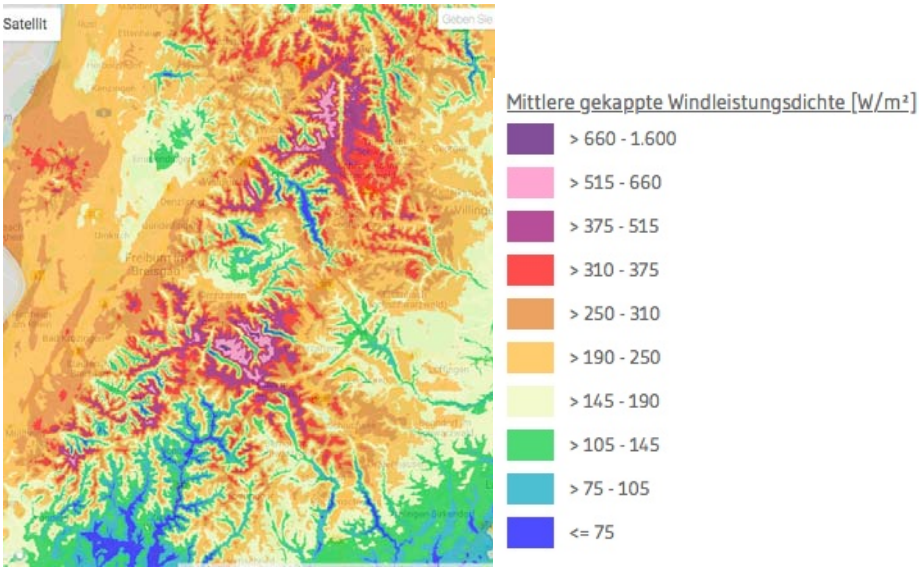


Abb.1: Durchschnittlicher Monatlicher PV-Ertrag pro kWp installierte Nennleistung im Breisgau für die Jahre 2018 und 2019 (nach [PVE]).

Abb. 2: Auszug aus dem Windatlas BW für das Gebiet des gedachten regionalen Verbundes [EAW1]



Die andere Hauptsäule einer Energieversorgung mit 100% EE ist die Windkraft. Anders als an der Küste weht in Baden-Württemberg der Wind in Bodennähe nur schwach. Allerdings ist in einer Höhe von 100 Metern und mehr an geeigneten Standorten reichlich Wind vorhanden, so dass sich hohe Jahreserträge ergeben. Voraussetzung für eine lohnende Ausbeute ist daher eine Windkraftanlagen-Höhe von 100 Meter und mehr. Windkraftanlagen (WKA) dieser Art haben eine Nennleistung von 5 Megawatt (MW). In geeigneten Lagen ergibt sich dann eine Volllaststundenzahl von mehr als 2000 und damit eine Jahresproduktion von 10 Millionen kWh.

Tab. 2: Anzahl der potentiellen Windkraftstandorte gemäß der Potentialstudie des Energieatlas BW nach [EAW2]. Angegeben ist die Zahl der möglichen WKA auf geeigneten Flächen/bedingt geeigneten Flächen. Beide Flächenarten können unabhängig voneinander nutzbar gemacht. Bedingt geeignete Flächen sind Flächen, die nicht innerhalb von Ausschlussflächen liegen, deren Nutzungsmöglichkeit für Windenergieanlagen aufgrund bekannter Flächenrestriktionen jedoch im Einzelfall besonders zu prüfen ist. Die Zeile „Verbund“ bezieht sich auf einen Zusammenschluss der drei Gebietskörperschaften zu einem Versorgungsgebiet.

Kreis	Anzahl WKA	Anzahl WKA/km2	Ertrag [TWh]
Breisgau/Hochschwarzwald	148/419	0,11/0,31	6,33
Emmendingen	117/169	0,17/0,24	3,11
Freiburg	20/40	0,13/0,26	0,64
Verbund	285/628	0,13/0,29	10,1

Die LUBW hat eine Potentialanalyse mit detaillierten Untersuchungen zur ortsbedingten Eignung von Standorten für die Windkraft durchgeführt. Als Referenz diente dabei eine Anlage mit einer Nabenhöhe von 160 m, einem Rotordurchmesser von 150 m und einer Nennleistung von 4,2 MW. Als Kriterium für die Eignung eines Standorts wurde die Windhöffigkeit angesetzt, wobei in 160 m Höhe die mittlere gekappte

Windleistungsdichte einen Wert von 215 W/m2 überschreiten musste. Geschützte Flächen wurden bei der Analyse als nicht bebaubar bereits berücksichtigt. Die Ergebnisse dieser Potentialanalyse zeigt eine hohe Zahl von potentiellen Standorten für WKA auf, wie in Tab.2. aufgelistet ist.

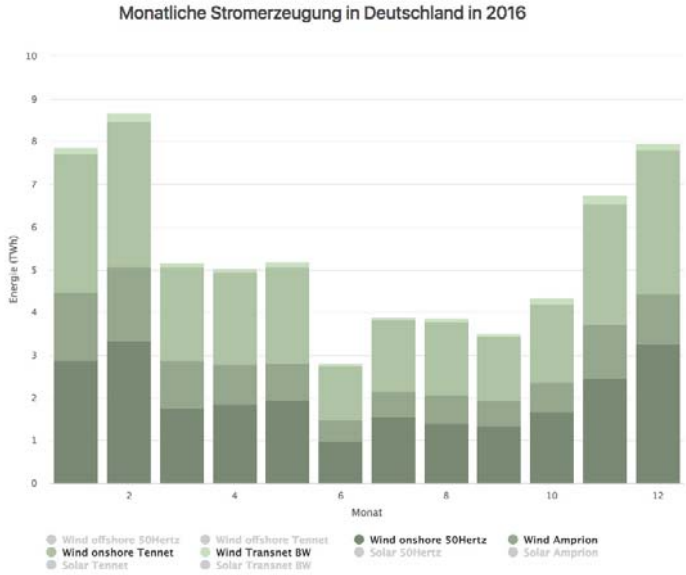


Abb. 3: Saisonale Abhängigkeit der Onshore-Windausbeute in Deutschland für das Jahr 2016 nach [WEEC]

Während die Photovoltaik vor allem im Sommer Erträge bringt (Abb.1), zeigt die Windkraft ein komplementäres Verhalten (Abb.3). Insgesamt ist ihre saisonale Abhängigkeit weniger ausgeprägt. Da der Wärmebedarf wegen des hohen Anteils an Heizwärme größtenteils in der kalten Jahreszeit anfällt, ist er bevorzugt durch Windkraft zu decken. Wenn auch im Winter eine 100% Deckung durch regionale Energiequellen angestrebt wird, müssen daher möglichst viel Standorte für Windkraft genutzt werden. Alternativ können Blockheizkraftwerke (BHKW) die Wärmeversorgung im Winter sicher stellen. In einer Wärmeversorgung mit 100% EE, bedeutet dies aber, dass dann nur mit erneuerbarem Strom hergestellte Brennstoffe (z.B. Wasserstoff) zum Einsatz kommen dürfen. Substantielle energetische Verluste, die bei der Herstellung zwangsläufig entstehen, sind dann – wie bereits erwähnt - durch einen erhöhten Zubau von EE auszugleichen.

Grundsätzlich kann auch Holz als nachwachsender Brennstoff in einem 100% EE Szenario eingesetzt werden. Allerdings sollte nur Restholz zur Verbrennung freigegeben werden, welches ansonsten im Wald verrotten würde. Bei nachhaltiger Bewirtschaftung ergeben sich jährlich ca. 8 Erntefestmeter pro Hektar, wovon 60% stofflich als langfristiger Kohlenstoffspeicher (z.B. als Bauholz oder zum Möbelbau) genutzt werden sollten. „Klimaneutral“ als Brennholz verbleiben nur 40% als sonst nicht verwertbares Restholz. Der durchschnittliche Brennwert von Holz liegt bei 2,6 MWh pro Festmeter [HBW]. Bei nachhaltiger Bewirtschaftung (und stofflicher Nutzung von Holz) liefert ein Hektar Wald damit jährlich Brennstoff mit einem Brennwert von etwa 8 MWh (Tab.1).

Der Oberrheingraben bietet auf Grund seiner geologischen Beschaffenheit eine gute Grundlage für hydrothermale Tiefengeothermie. Der Bundesverband Geothermie schätzt das Wärmepotential des gesamten Oberrheingrabens mit 186 TWh pro Jahr ein [BVTG]. Auf der Basis von Probebohrungen führt Badenova gerade eine Einschätzung des Potentials in der Breisgauer Bucht durch. Es ist davon auszugehen, dass Wärmeleistungen von 100 MW und mehr gewonnen werden können und damit ein Jahresbedarf bis 1 TWh abgedeckt werden kann.

Eine weitere erneuerbare Wärmequelle ist Solarthermie. Die Effizienz von Solarthermie übersteigt die von PV um den Faktor 3 bis 4 , allerdings entsteht Wärme statt Strom. Zudem entsteht diese Wärme überwiegend im Sommer, wenn sie außer zur Warmwassererzeugung keine Verwendung findet. Eine Überdimensionierung zur Heizungsunterstützung im Winter ist möglich, erfordert dann aber saisonale (Groß-) Wärmespeicher. Dafür gibt es insbesondere in Dänemark sehr gelungene Beispiele.

Der Schwarzwald hat eine lange Tradition der Wasserkraft. Die LUBW hat deshalb im Namen des Umweltministeriums eine Potentialstudie für die Wasserkraft durchführen lassen. Das Ergebnis findet sich im Energieatlas und ergibt für die Gebietskörperschaften die in Tab 3 zusammengefassten Daten. Die zu erwartende Strommenge ist allerdings im Vergleich zum Bedarf sehr klein und kann nur einen vernachlässigbaren Anteil beitragen [EAWSK].

Tab. 3: Potential des Wasserkraftertrags gemäß der Potentialstudie des Energieatlas BW nach [EAWSK]. Angegeben ist die Zahl der möglichen Wasserkraftwerke, ihre Gesamtleistung und ihr zu erwartender Jahresertrag. Die Zeile Verbund bezieht sich auf einen Zusammenschluss der drei Gebietskörperschaften zu einem Versorgungsgebiet..

Kreis	Anzahl	Nennleistung [MWh]	Ertrag [GWh]
Breisgau/Hochschwarzwald	59	4,9	14
Emmendingen	87	6,2	23
Freiburg	10	0,65	2,2
Verbund	156	11,8	39

Landkreis Breisgau-Hochschwarzwald

Flächennutzung

Der Landkreis Breisgau-Hochschwarzwald ist mit 192 Einwohnern pro km^2 relativ dünn besiedelt. Abb. 4 zeigt die Landnutzung für den Landkreis Breisgau Hochschwarzwald (BHS), dessen Fläche von etwa 1400 Quadratkilometer fast 4% der Landesfläche von Baden-Württemberg einnimmt. Nahezu die Hälfte des Landkreises ist mit Wald bedeckt, 40% werden landwirtschaftlich genutzt. 5,3% sind Siedlungsfläche und 4,4% Verkehrsfläche, überwiegend Straßen. Die für erneuerbare Energien vorgesehene Fläche von 2% ist weniger als die halbe Verkehrsfläche. Der Windatlas schlägt für den Landkreis mögliche Standorte für insgesamt 567 WKA vor, welche hypothetisch (bei 1,8 ha pro WKA) weniger als 1 % der Gesamtfläche des Landkreises einnehmen würden. Die nach dem Landesklimaschutzgesetz auszuweisende Fläche wird zu Lasten der landwirtschaftlich genutzten Fläche und der Waldfläche gehen. Würden 2% der Landkreisfläche mit Freiflächen-PV Anlagen belegt, so ließen sich damit ca. 2,8 TWh Strom erzeugen.

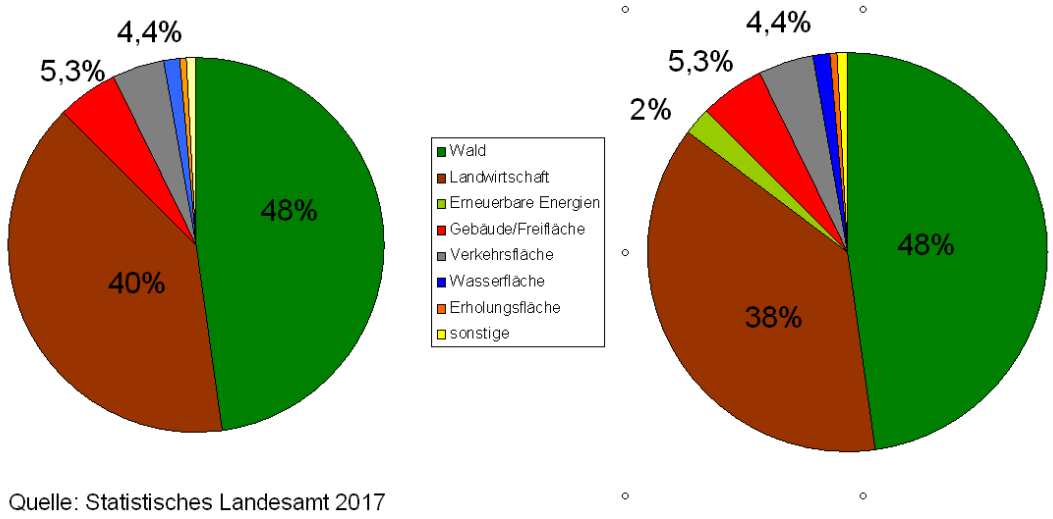


Abb. 4: Flächennutzung im Landkreis Breisgau-Hochschwarzwald im Jahr 2017 und bei Umnutzung von 2% der Fläche für Erneuerbare Energien.

Energieverbrauch des Landkreises Breisgau-Hochschwarzwald

Im Rahmen der Klimaschutzplanung [KSKBHS] hat der Landkreis eine Erhebung des Endenergiebedarfs durchgeführt und nach Sektoren und Energieträgern aufgeschlüsselt. Das Ergebnis ist in Abb. 5 dargestellt. Jeweils ein Drittel des Endenergieverbrauchs fällt auf die Sektoren private Haushalte und Verkehr. Für die folgenden Überlegungen genügt es, die Energieträger Erdgas, Holz, Heizöl und Kraftstoffe unter einer Rubrik Brennstoffe zusammenzufassen, weil sie sich in ihrer Funktion weitestgehend gegenseitig ersetzen können (Tab.4).

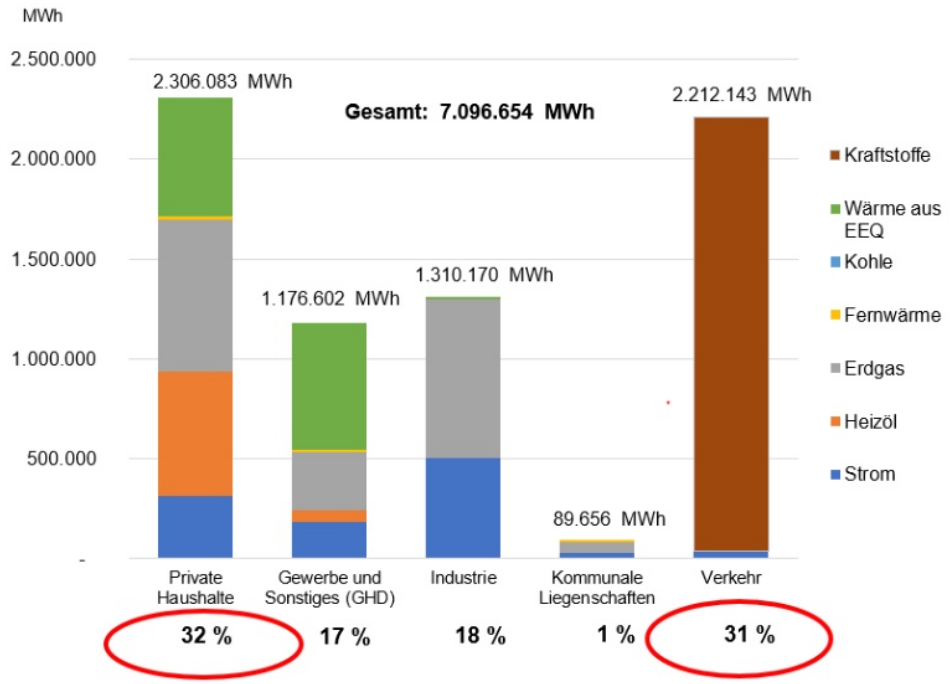


Abb. 5: Endenergieverbrauch des Landkreises BHS aufgeschlüsselt nach Sektoren und Energieträgern (Quelle Klimaschutzkonzept des LK BHS, Referenzjahr 2017)

Tab.4: Endenergiebedarf der vier Sektoren Haushalt, Gewerbe, Industrie und Verkehr nach den Energieträgern Strom und Brennstoff. Die Rubrik „Gewerbe“ umfasst hier auch Handel und Dienstleistungen (GHD), sowie die kommunalen Liegenschaften. Die roten Zahlen kennzeichnen Bereiche, in welchen allein durch Elektrifizierung direkt Endenergie eingespart werden kann. Brennstoffe (BS), Kraftstoffe (KS) und Wärme (W) sind der Einfachheit halber unter einer Rubrik subsummiert.

TWh	**Haushalt**	**Gewerbe**	**Industrie**	**Verkehr**	Summe Endenergie	„Primär-energie“
Strom	**0,30**	**0,19**	**0,49**	**0,02**	**1**	**1,8**
BS/KS/W	**2,01**	**1,07**	**0,82**	**2,19**	**6,09**	**6,09**
Endenergie	**2,31**	**1,26**	**1,31**	**2,21**	**7,09**	**7,89**

Zur Deckung des Endenergiebedarfs muss wegen Verlusten bei der Bereitstellung eine höhere Menge von Primärenergie eingesetzt werden, die ebenfalls in Tab. 4 angegeben ist. Die angegebenen Daten stellen dabei lediglich Anhaltswerte dar. Für Brenn- und Kraftstoffe entspricht die Primärenergie näherungsweise der Endenergie. Für den Energieträger Strom gilt mit dem heutigen Strommix der Primärenergiefaktor 1,8, d.h. nur etwas mehr als die Hälfte der Primärenergie steht vor Ort auch als Endenergie zur Verfügung. Unter dem Strich werden zur Deckung des Endenergiebedarfs des Landkreises Breisgau Hochschwarzwald heute etwa 8 TWh pro Jahr an Primärenergie benötigt. Bei einer Einwohnerzahl von 265 000 ergibt sich ein durchschnittlicher Jahresverbrauch von etwa 30 MWh pro Einwohner. Dies entspricht etwa dem Landesdurchschnitt für Baden-Württemberg. Angesichts dieses enormen Primärenergiebedarfs stellt sich zwangsläufig die Frage nach Einsparungen.

Energie- und Strombedarf bei einer 100% EE Versorgung

Die Umstellung der bisherigen fossilen Energieversorgung auf Erneuerbare Energien bringt für den Stromsektor einen enormen Vorteil. Sonne und Wind stellen die Energie direkt als Strom zur Verfügung.

Schon heute ließe sich gemäß Tab. 0 der Strombedarf im Landkreis Breisgau-Hochschwarzwald bilanziell vollständig durch Solarstrom von Aufdachanlagen decken und so etwa 80% des damit verbundenen Primärenergieanteils einsparen. Die Deckung des gesamten Endenergiebedarfs von 7 TWh liegt allerdings außerhalb der regionalen Möglichkeiten.

Im folgenden wird davon ausgegangen, dass wir unsere Lebensgewohnheiten im wesentlichen beibehalten wollen. Erfreulicherweise ist die dafür erforderliche Nutzenergie wesentlich kleiner, als die in Tab. 4 angegebenen Endenergiewerte nahelegen. So lässt sich durch Elektrifizierung dieselbe Fahrleistung bereits mit etwa einem Drittel des Energieeinsatzes erbringen.

Neben Sonne und Wind als den Arbeitspferden der Energiewende gilt es die Umweltwärme als weitere bisher wenig genutzte erneuerbare Energiequelle zu erschließen. Wärmepumpen stellen dabei die Schlüsselkomponente dar. Gehen wir von einer Jahresarbeitszahl von 3 aus, so können mit Hilfe von einem Teil elektrischer Energie zwei Teile Umweltwärme geschöpft werden. Umweltwärme ist wie Strahlungs-

und Windenergie eine sich stets erneuernde Energiequelle, so dass sie als Primärenergie nicht in Rechnung gestellt werden braucht.

Unter die Kategorie Umweltwärme fällt auch die Tiefengeothermie, für deren Nutzung es im Oberrheingraben innerhalb des Verbundsgebiets erhebliches Potential gibt.

Unter der Rubrik Brennstoffe können daher über die Elektrifizierung und die Nutzung der Umweltwärme in den Sektoren private Haushalte, Gewerbe und Verkehr jeweils etwa zwei Drittel der Endenergie eingespart werden. Der Sektor Industrie bedarf einer differenzierteren Betrachtung, denn die Industrie benötigt auch höhertemperaturige Prozesswärme, welche nicht durch Wärmepumpen zur Verfügung gestellt werden kann. Solche Prozesse können CO2 neutral durch „grünen" Wasserstoff oder andere synthetische Brennstoffe betrieben werden. Grüner Wasserstoff kann elektrolytisch (sogar vor Ort) durch erneuerbaren Strom hergestellt werden. Dieser Umwandlungsprozess geht mit Wärmeverlusten einher, die aber nicht ungenutzt bleiben müssen, z.B. wenn die Abwärme abgeführt und über ein Wärmenetz verteilt wird. Andererseits wird auch in der Industrie in erheblichem Umfang Wärme (und Kälte) benötigt, welche durch Wärmepumpen zur Verfügung gestellt werden kann. Eine Abschätzung der Energieeinsparung ist daher komplex. Der Einfachheit halber wird angenommen, dass sich Einsparungen durch den Einsatz von Wärmepumpen und Mehraufwendungen bei der Erzeugung von Wasserstoff etwa die Waage halten und bei der für die Industrie unter der Rubrik Brennstoff aufgelisteten Endenergie keine Änderungen auftreten.

Tab. 5: Angenommener Energiebedarf für eine Versorgung des LK Breisgau-Hochschwarzwald mit 100% Erneuerbaren Energien nach vollzogener vollständiger Elektrifizierung des Verkehr- und Wärmesektors. Zusätzlich zum bisherigen Strombedarf (Zeile 2) ist Strom für Wärme und die Herstellung von Brenn- und Kraftstoffen (Strom für WKB Zeile 3) bereitzustellen

TWh	**Haushalt**	**Gewerbe**	**Industrie**	**Verkehr**	Summe Endenergie	„Primär-energie"
Strom	**0,3**	**0,19**	**0,49**	**0,02**	**1,0**	**1,0**
Strom für WBK	**0,69**	**0,33**	**0,82**	**0,74**	**2,58**	**2,58**
Endenergie	**0,99**	**0,52**	**1,31**	**0,76**	**3,58**	**3,58**

Unter diesen vereinfachenden Annahmen gelangt man für das Szenario einer 100% EE Energiewirtschaft zu den Energieanforderungen von Tab. 5. Die Energieangaben in Zeile 2 der Tabelle sind nun als zusätzlicher Strom zu betrachten, der zur Deckung von Wärme und zur Erzeugung von synthetischen Brennstoffen benötigt wird. Man erkennt, dass die angestrebte Umstellung des Energiesystems in der Summe eine erhebliche Energieeinsparung ermöglicht, denn der jährliche Bedarf an Primärenergie wird mehr als halbiert. Das ist einerseits darauf zurückzuführen, dass bei regionaler Erzeugung und Umstellung auf Erneuerbare Energiequellen fast die gesamte Primärenergie auch als Endenergie zur Verfügung steht. Andererseits führen Nutzung von Umweltwärme und Effizienzsteigerung bei der Elektrifizierung des Verkehrs zu weiteren erheblichen Einsparungen an Endenergie. Allerdings steigt dabei die Menge an benötigtem Strom auf mehr als das Dreifache an. Pro Bürger fällt für das Heizen (mit Wärmepumpe) ein Strombedarf von 3,8 MWh an. Im Landkreis BHS würde der pro Kopf Jahresverbrauch an Primärenergie von fast 30 MWh auf 13,5 MWh deutlich sinken. Selbst bei einem – wegen des hohen Strombedarfs - höheren Energiepreises sind damit erhebliche Einspa-

rungen verbunden. Beträgt der durchschnittliche Energiepreis beispielsweise 12 ct pro kWh sinkt die durchschnittliche Belastung für jede Bürgerin und jeden Bürger um etwa 500 € pro Jahr.

Notwendige Kapazitäten und Ressourcen

Der Jahresbedarf an Energie, der sich nach Umstellung auf 100% EE für den Landkreis ergibt, kann auf verschiedene Weisen gedeckt werden. Zunächst sei nur die Jahresbilanz betrachtet. Zur Deckung eines zu erwartenden Jahresstrombedarfs von 3,6 TWh ausschließlich durch Photovoltaik müsste eine Nennleistung von 3,6 GWp installiert werden. In Form von Freiflächenanlagen wäre hierfür eine Fläche von 36 km² bereitzustellen, was einem Flächenanteil von 2,6% entspräche. Für den Betrieb von Heizungen durch Wärmepumpen fällt nun überwiegend in der kalten Jahreszeit zusätzlich die beträchtliche Strommenge von 1 TWh an. Zu dieser Zeit ist aber der Ertrag durch Sonnenstrom gerade besonders niedrig (Abb. 1). Andererseits haben Windkraftanlagen gerade im Winter die höchste Ausbeute (Abb.3). Ohne in eine Detailanalyse des Lastprofils zu gehen, sollte daher zumindest der Heizbedarf vollständig durch Windkraft abgedeckt werden. Nach Tab. 1 erfordert die Deckung von 1 TWh den Bau von knapp 90 großen Windanlagen. Private Haushalte, Gewerbe, Industrie und Verkehr benötigen weitere 2,6 TWh an Strom, der dann als Sonnenenergie über PV erbracht werden muss. Davon sollten Aufdachanlagen einen möglichst großen Teil beitragen. Ausgehend von Tab. 0 und der Annahme, dass 90% des Aufdachpotentials genutzt werden, ergibt sich ein Aufdachpotential von 1,5 TWh. Die beanspruchte Dachfläche betrüge insgesamt 7,5 km². Dieser Wert entspricht etwa der Hälfte des Werts von 3 TWh für den jährlichen Wärmebedarf. Auf Gebäudeebene ist es durchaus plausibel, dass bei optimaler Dachbelegung etwa halb so viel an Sonnenenergie über Aufdachanlagen gewonnen werden kann, wie das Haus an Wärme verbraucht.

Von der nicht-wärmegebundenen Strommenge bleiben weitere 1,1 TWh zur Deckung der Endenergiebilanz, welche durch Freiflächen- oder Agri-PV Anlagen zu liefern wären. Der Landkreis müsste dafür insgesamt 11 km² landwirtschaftliche Fläche oder 0,8% seiner Gesamtfläche umwidmen. Dazu käme noch der Flächenbedarf von 90 Windkraftanlagen, die mit etwa 1 km² nur wenig ins Gewicht fallen würden. Insgesamt kann eine energetische Eigenversorgung des Landkreises im Sinne einer ausgeglichenen Jahresbilanz realisiert werden, sogar ohne dass das im Koalitionsvertrag beschlossene Ziel von 2% der Landesfläche ausgeschöpft wird.

Schließlich ist noch der Beitrag von Holz aus nachhaltiger Bewirtschaftung zu bewerten. Bei 612 km2 Waldfläche ergibt sich (nach Tab.1) jährlich ein Brennholzertrag mit einem Heizwert von ca. 0,5 TWh dem ein Wärmebedarf von 3 TWh entgegensteht. Dies bedeutet: etwa 17% des Wärmebedarfs können nachhaltig durch nachwachsendes Restholz gedeckt werden. Die Berücksichtigung von Holz als Brennstoff führt bei der Erstellung von Tab. 5 aber lediglich zu einer Reduktion von 0,17 TWh und hat damit nur geringe Auswirkung auf die Gesamtbilanz.

Auf kommunale Ebene heruntergebrochen bedeuten die Anforderungen an den Ausbau der EE, dass jede Gemeinde im Durchschnitt zwei Windräder auf ihrer Gemarkung benötigt und zusätzlich den Bau von PV Freiflächenanlagen auf einigen Hektar der bisher landwirtschaftlich genutzten Fläche zulassen muss.

Landkreis Emmendingen

Flächennutzung

Der Landkreis Emmendingen ist strukturell quasi der kleine Bruder des Landkreises BHS. Er ist flächenmäßig etwa halb so groß wie der Landkreis BHS und umfasst 24 Gemeinden, ist aber mit 265 Einwohnern pro km² etwas dichter besiedelt. 46% sind Waldfläche und 40% Äcker und Wiesen. 6,1% sind Siedlungsfläche und 4,1% Verkehrsfläche, so dass auch bei der Flächenaufteilung ähnliche Verhältnisse wie beim Landkreis BHS vorliegen. Der Windatlas weist für den Landkreis mögliche Standorte für insgesamt 286 WKA aus, welche theoretisch jährlich 3,1 TWh an Windenergie produzieren könnten. Würden 2% der Landkreisfläche mit Freiflächen-PV Anlagen belegt, so ließen sich damit ca. 1,4 TWh Strom erzeugen.

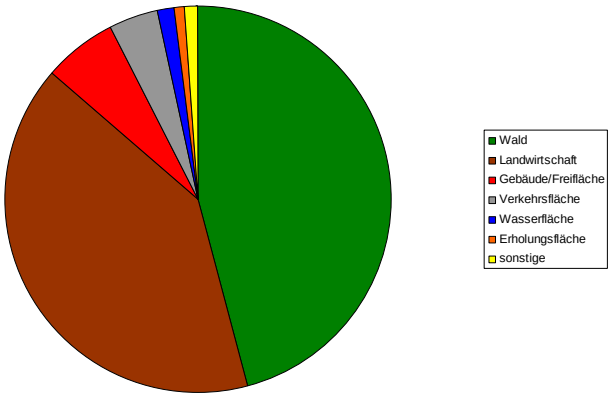


Abb. 5: Flächennutzung im Landkreis Emmendingen nach [SDEM]

Energieverbrauch

Im Rahmen der Klimaschutzplanung [KSKEM] hat der Landkreis eine Erhebung des Endenergiebedarfs durchgeführt und nach Sektoren und Energieträgern aufgeschlüsselt. Das Ergebnis ist in Tab. 6 zusammengefasst. Die Verteilung des Endenergieverbrauchs auf die verschiedenen Sektoren und Energieträger ist ähnlich wie im Falle des LK BHS mit einem etwas höheren Anteil der Haushalte. Die Energieträger Erdgas, Holz, Heizöl und Kraftstoffe sind wieder unter einer Rubrik Brennstoffe zusammengefasst, weil sie sich in ihrer Funktion weitestgehend gegenseitig ersetzen können. Sie werden für Haushalt und Gewerbe in erster Linie zur Erzeugung von Wärme eingesetzt. Nur etwa 16% der Endenergie werden als Strom bereitgestellt. Der gesamte Primärenergiebedarf liegt gegenwärtig jährlich bei ca. 4,5 TWh oder 27 MWh pro Einwohner.

Tab.6: Endenergiebedarf des LK Emmendingen für die vier Sektoren Haushalt, Gewerbe, Industrie und Verkehr nach den Energieträgern Strom und Brennstoff/Kraftstoff/ Wärme (Referenzjahr 2009). Die roten Zahlen kennzeichnen Bereiche, in welchen allein durch Elektrifizierung direkt Endenergie eingespart werden kann.

TWh	**Haushalt**	**Gewerbe**	**Industrie**	**Verkehr**	Summe Endenergie	Primär-energie
Strom	**0,25**	**0,18**	**0,19**	**0,01**	**0,63**	**1,13**
BS/KS/W	**1,20**	**0,67**	**0,13**	**1,32**	**3,32**	**3,32**
Endenergie	**1,46**	**0,85**	**0,32**	**1,33**	**3,96**	**4,45**

Energie- und Strombedarf bei einer 100% EE Versorgung

Bei der Abschätzung des Endenergiebedarfs bei einer Energieversorgung mit 100% EE wird analog wie bei der Erstellung von Tab.5 vorgegangen.

Tab. 7: Angenommener Energiebedarf für eine Versorgung des LK Emmendingen mit 100% Erneuerbaren Energien nach vollzogener vollständiger Elektrifizierung des Verkehr- und Wärmesektors.

TWh	**Haushalt**	**Gewerbe**	**Industrie**	**Verkehr**	Summe Endenergie	Primär-energie
Strom	**0,25**	**0,18**	**0,19**	**0,01**	**0,63**	**0,63**
Strom für WBK	**0,4**	**0,22**	**0,13**	**0,44**	**1,19**	**1,19**
Endenergie	**0,65**	**0,40**	**0,32**	**0,45**	**1,82**	**1,82**

Eine angenommene vollständige Elektrifizierung des Verkehrssektors lässt den Endenergiebedarf von 1,33 auf 0,45 sinken. Der flächendeckende Einsatz von Wärmepumpen reduziert den Endenergiebedarf zur Wärmebedarfsdeckung von Haushalt-und Gewerbesektor von 1,87 TWh auf 0,62 TWh.

Die vorgenommene Abschätzung für den Wärmesektor mag zu optimistisch sein, denn sicher werden nicht alle Gebäude mit Wärmepumpen beheizt werden. Andererseits bleiben anzustrebende energetische Sanierungen bei vielen Bestandsgebäuden in dieser Abschätzung unberücksichtigt. Diese beiden gegenläufigen Effekte werden sich daher zumindest teilweise kompensieren. Auch ist Heizen mit Holz (im Rahmen der Nachhaltigkeit) und der mögliche Einsatz von Wärme aus Tiefengeothermie noch nicht berücksichtigt.

Der dritter Spareffekt der Energiewende betrifft die Verluste der Primärenergie: der vor Ort erzeugte EE-Strom ist – wie oben erläutert – nicht mit enormen Primärenergie-verlusten belastet. In der Folge des Zusammenwirkens dieser drei Spareffekte beträgt der prognostizierte Endenergiebedarf nur noch 46% und der Primärenergiebedarf nur noch 41% vom heutigen Wert. Aus der Sicht eines einzelnen Bürgers im Landkreis Emmendingen fällt der Primärenergiebedarf von etwa 27 MWh pro Jahr auf ca. 11 MWh pro Jahr, wobei der Strombedarf um einen Faktor 2,8 ansteigt.

Notwendige Kapazitäten und Ressourcen

Der Jahresbedarf an Energie, der sich nach Umstellung auf 100% EE für den Landkreis Emmendingen ergibt, kann auf verschiedene Weisen gedeckt werden. Wieder ist es zweckmäßig, die saisonale Inkompatibilität von Erzeugung und Bedarf zunächst außen vor zu lassen und nur die Jahresbilanz zu betrachten. Soll der Jahresstrombedarfs von 1,8 TWh ausschließlich durch Photovoltaik gedeckt werden, so müsste eine Leistung von 1,8 GWp installiert werden. In Form von Freiflächenanlagen wäre hierfür eine Fläche von 18 km² bereitzustellen, was wie beim Landkreis BHS einem Flächenanteil von 2,6% entspräche. Zur Deckung des Heizbedarfs fallen 0,6 TWh an Wärmepumpenstrom an. Da dieser Strom während der Wintersaison bereitzustellen ist, kann er nicht durch PV gedeckt werden. Wieder nehmen wir an, dass er vollständig durch Windkraft erzeugt werden muss. Daraus ergibt sich eine Zahl von etwa 60 Windkraftanlagen.

Es verbleiben in der Endenergiebilanz 1,2 TWh, die durch Sonnenstrom erbracht werden müssen. Davon sollten Aufdachanlagen einen möglichst großen Teil beitragen. Geht man davon aus, dass im Endausbau 90% des Potentials genutzt werden, so können etwa 0,9 TWh durch Aufdachanlagen gedeckt werden. Auch in diesem Fall korrespondiert dieser Wert etwa mit der Hälfte des Wärmebedarfs von knapp 1,9 TWh. In der Gesamtbilanz verbleiben damit 0,3 TWh für FFPV Anlagen. Somit müssten etwa 4,5 km² an Dachfläche und 3 km² an Freifläche für Photovoltaik zur Verfügung gestellt werden. Die Siedlungsfläche im Kreis Emmendingen beträgt etwa 41,5 km², womit (wie im Fall des Landkreises BHS) die Aufdach-PV Fläche etwas mehr als 10% der Siedlungsfläche einnimmt.

Zusammenfassend ergibt sich, dass eine bilanzielle Selbstversorgung des Landkreises Emmendingen im Rahmen der 2% Flächenvorgabe des Landes prinzipiell möglich ist.

Für die einzelnen Kommunen bedeuten diese Anforderungen, dass jede Gemeinde im Durchschnitt zwei bis drei Windräder auf ihrer Gemarkung erforderlich sind und zusätzlich gute 10 Hektar für den Bau von PV Freiflächenanlagen bereitzustellen sind.

Stadt Freiburg

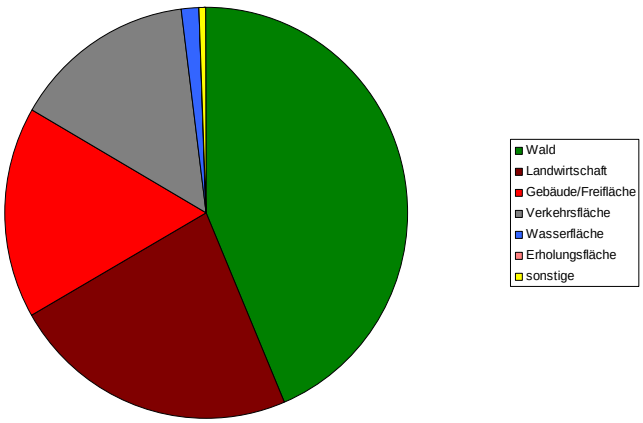


Abb. 6: Flächennutzung für die Stadt Freiburg nach [SDFR]

Flächennutzung

Die Stadt Freiburg unterscheidet sich in vielerlei Hinsicht sehr stark von den beiden Landkreisen. Die Gesamtfläche ist klein (153 km2) und die Einwohnerdichte hoch (1509 Einwohner pro km2). Dabei ist der Anteil der Waldfläche vergleichbar mit den Landkreisen. Siedlungsfläche (17,1%) und Verkehrsfläche (14,9%) machen zusammen aber fast ein Drittel der Gesamtfläche aus. Der Windatlas weist für die Gemarkung der Stadt Freiburg insgesamt 60 mögliche Standorte für WKA aus, welche theoretisch jährlich 0,64 TWh an Windenergie produzieren könnten. Würden 2% der Gemarkungsfläche mit Freiflächen-PV Anlagen belegt, so ließen sich damit lediglich ca. 0,3 TWh Strom erzeugen. Das Aufdach-Potential gibt der Energieatlas mit 0,67 TWh an.

Energieverbrauch

Der Energieverbrauch der Stadt Freiburg wurde im Rahmen der Fortschreibung des Klimaschutzkonzepts 2018 in einer Kooperation von Ökoinstitut und IFEU [KSKFR] neu erhoben. Wie bei den beiden Landkreisen haben zwar die privaten Haushalte den größten Anteil am Endenergieverbrauch, Gewerbe und Industrie haben in der Stadt allerdings einen deutlich höheren Energiebedarf. Die Endenergien der einzelnen Sektoren summieren sich auf einen Gesamtbetrag von 5 TWh pro Jahr. Dies entspricht einem Primärenergieverbrauch von 25 MWh pro Person und Jahr.

Tab.8: Endenergiebedarf der Stadt Freiburg für die vier Sektoren Haushalt, Gewerbe, Industrie und Verkehr nach den Energieträgern Strom und der Summe von Wärme, Brennstoffen und Kraftstoffen (nach Ökoinstitut/IFEU Forschreibung Klimaschutzkonzept 2018, Referenzjahr 2014). Die roten Zahlen kennzeichnen Bereiche, in welchen allein durch Elektrifizierung direkt Energie eingespart werden kann.

TWh	**Haushalt**	**Gewerbe**	**Industrie**	**Verkehr**	Summe Endenergie	Primär-energie
Strom	**0,27**	**0,44**	**0,27**	**0,03**	**1,01**	**1,82**
Brennstoffe	**1,30**	**0,92**	**0,76**	**1,08**	**4,06**	**4,06**
Endenergie	**1,57**	**1,36**	**1,03**	**1,11**	**5,07**	**5,88**

Energie- und Strombedarf bei einer 100% EE Versorgung

Bei einer vollständigen Elektrifizierung des Verkehrssektors und des Wärmesektors ergeben sich aus Tab.8 die folgenden Zahlen für den Endenergiebedarf (Tab.9). Für Gewerbe und Haushalt wurde wieder von einer Reduktion des Endenergiebedarfs zur Deckung von Wärme und Brennstoffen um einen Faktor 3 ausgegangen, wie sie sich bei einer Umstellung sämtlicher Heizungen auf Wärmepumpen mit einer Jahresarbeitszahl von 3 ergeben würde. Für die Industrie wird angenommen, dass die erforderlichen Brenn- und Kraftstoffe mit Hilfe von Strom durch elektrochemische Verfahren synthetisch hergestellt werden und dass die hierbei auftretenden Energieverluste in der Summe durch Einsparungen kompensiert werden können. Nach dieser großen Transformation wird die Industrie zum größten Sektorverbraucher. Der Endenergiebedarf sinkt um 43%. Der Primärenergiebedarf pro Einwohner und Jahr fällt von 25,5 MWh auf 12,5 MWh, wobei der Strombedarf um einen Faktor 2,8 zunimmt.

Tab.9: Endenergiebedarf der vier Sektoren Haushalt, Gewerbe, Industrie und Verkehr nach den Energieträgern Strom und Strom für Wärme und die Erzeugung von Brenn- und Kraftstoffen bei einer Versorgung mit 100% EE.

TWh	**Haushalt**	**Gewerbe**	**Industrie**	**Verkehr**	Summe Endenergie	Primär-energie
Strom	**0,27**	**0,44**	**0,27**	**0,03**	**1,01**	**1,01**
Strom für WBK	**0,43**	**0,31**	**0,76**	**0,36**	**1,86**	**1,86**
Endenergie	**0,70**	**0,75**	**1,03**	**0,39**	**2,87**	**2,87**

Notwendige Kapazitäten und Ressourcen

Im folgenden werden die verschiedenen Ressourcen der Stadt Freiburg untersucht, welche zur Deckung ihres Energiebedarfs beitragen können.

Der geschätzte Jahresstrombedarf von 2,9 TWh würde Freiflächen PV mit einer Nennleistung von 2,9 GWp erfordern und eine Fläche von 29 km^2 einnehmen. Dies entspräche einem Anteil von 19% der Gemarkungsfläche von Freiburg. Der Wärmebedarf der Stadt liegt bei 2,2 TWh. Die der Wärme-Dach-Regel führt auf einen Stromertrag von 1,1 TWh durch Aufdachanlagen. Dieser Wert liegt deutlich über dem Wert aus Tab 0, obwohl die nutzbare Dachfläche sogar bei 13% der Siedlungsfläche liegt. Ein Grund für diese Abweichung liegt darin, dass in der Stadt Gebäude mit mehr als drei Geschossen dominieren, für welche die Wärme-Dach-Regel (ohne Wärmesanierung) nicht mehr erfüllt werden kann.

Zur Deckung der Raumwärme wären 0,74 TWh an Windstrom erforderlich, welche von mehr als 70 Windkraftanlagen zu liefern wären.

Im Ergebnis zeigt sich, dass sich in einem 100% EE Szenario die Stadt Freiburg selbst unter Ausnutzung aller verfügbaren Flächen und Windkraftstandorten nicht selbst vollständig mit Energie versorgen kann, sondern auf das Umland angewiesen ist.

100% EE Versorgung innerhalb eines Regionalverbundes

Flächennutzung und Energieverbrauch

Der Grund für die Probleme bei einer energetischen Selbstversorgung der Stadt liegt darin, dass der Energiebedarf mit der Bevölkerungszahl steigt, die Verfügbarkeit für EE vergrößert sich hingegen mit der Fläche eines Gebiets. Offensichtlich benötigt die Stadt für eine Vollversorgung mit EE das Umland. Im folgenden werden die Landkreise BHS und Emmendingen sowie die Stadt Freiburg gemeinsam als Regionalverbund betrachtet.

Die Eckdaten dieses Kommunalverbunds sind in folgender Tabelle zusammengefasst.

Tab.10 : Eckdaten eines Regionalverbunds aus zwei Landkreisen und einer Stadt

	Freiburg	Breisgau-HSW	Emmendingen	Summe/ Durchschnitt
Einwohnerzahl	231 000	265 000	167 000	663 000
Fläche [km2]	153	1379	680	2212
EW/km2	1509	192	245	300
Waldfläche %	43	48	46	47
Gebäude/Freifläche %	17,1	5,3	6,1	6,4
Zahl der Gemeinden	1	50	24	75
Endenergie [TWh]	5,1	7,1	4,0	16,2
Endenergie pro EW [MWh/Kopf]	22,1	26,8	24,0	24,4

Quellen: Endenergiedaten 120731_Landkreis_EM_Klimaschutzkonzept.pdf
Breisgau Hochschwarzwald 20201103 Ergebnisse Klimaschutzkonzept_V3.pdf
Fortschreibung Klimaschutzkonzept Freiburg Öko Insastitut/Ifeu 2018
Übrige Daten: Wikipedia

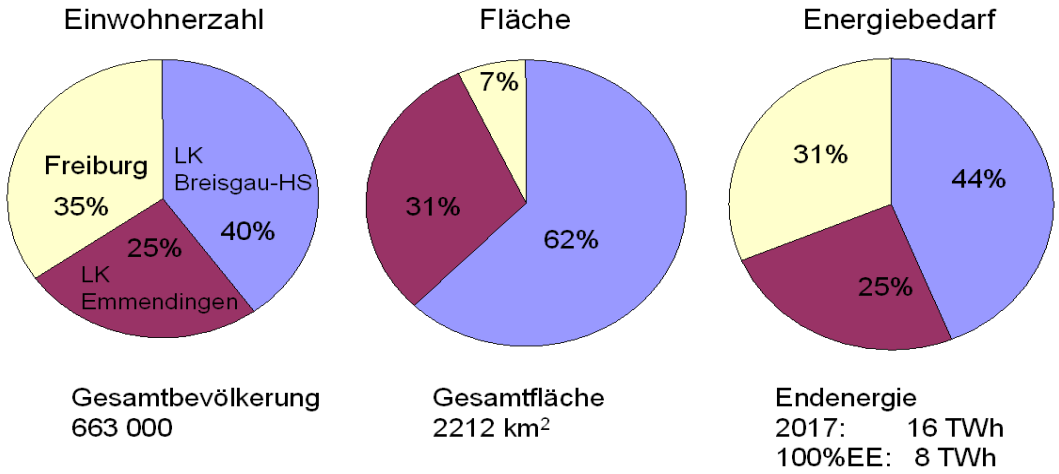
Die in der Tabelle angegebenen Zahlen für die Endenergie wurden nach unterschiedlichen Methoden erhoben und sind deshalb nur in Grenzen direkt vergleichbar. Pro Einwohner gerechnet ergeben sich für alle drei Kreise ähnliche Werte für die pro Jahr benötigte Endenergie. Zum Vergleich: für das Land Baden-Württemberg beträgt der Endenergieverbrauch pro Kopf und Jahr 26,2 MWh. Die Vergleichbarkeit dieser Werte ist eine gute Grundlage für die Verlässlichkeit der in Tab. 4 , Tab. 6, Tab. 8 verwendeten sektorspezifischen Energiedaten.

Abbildung 3 veranschaulicht die unterschiedlichen Beiträge der drei Partner am gedachten Regionalverbund. Während sich bei Einwohnerzahlen und Energiebedarf

vergleichbare Anteile an der Gesamtmenge ergeben, trägt die Stadt zur Gesamtfläche nur wenig bei.

Nach Sektoren ergibt sich aus den Tabellen Tab.2, Tab.4 und Tab.6 für den Verbund der drei Gebietskörperschaften die Energiebedarfstabelle Tab. 11.

Abb. 7: Anteile der drei Verbundpartner an Einwohnerzahl, Fläche und Endenergiebedarf.



Tab.11 : Energiebedarf des Regionalverbunds nach Sektoren

TWh	**Haushalt**	**Gewerbe**	**Industrie**	**Verkehr**	Summe Endenergie	Primär-energie
Strom	**0,82**	**0,81**	**0,95**	**0,06**	**2,64**	**4,75**
BS/KS/W	**4,56**	**2,58**	**1,71**	**4,61**	**13,46**	**13,46**
Endenergie	**5,38**	**3,39**	**2,66**	**4,67**	**16,1**	**18,21**

Für welchen Endenergiebedarf wäre zu planen?

Unter Berücksichtigung der Einsparungen bei der Endenergie für die Sektoren Wärme und Verkehr ergibt sich die Tab.12 für den Energiebedarf nach Elektrifizierung der Energiewirtschaft wie bereits wiederholt diskutiert. In der Industrie werden die eingesetzten Kraftstoffe durch synthetische Kraftstoffe ersetzt. Energetische Verluste bei der Herstellung werden dabei durch Effizienzsteigerungen in anderen Bereichen näherungsweise kompensiert. Allein durch die Umstellung sinkt der Energiebedarf substantiell ab, ohne dass Einschnitte am gewohnten Konsumverhalten angenommen werden müssen. Der jährliche Endenergiebedarf des Kommunalverbundes läge dann bei etwa 8,3 TWh. Der Primärenergiebedarf pro Einwohner sinkt von 27,5 MWh auf 12,5 MWh ab.

Tab.12 : Energiebedarf des Regionalverbunds nach Umstellung auf 100% EE

TWh	**Haushalt**	**Gewerbe**	**Industrie**	**Verkehr**	Summe Endenergie	Primär-energie
Strom	**0,82**	**0,81**	**0,95**	**0,06**	**2,64**	**2,64**
Strom f. WBK	**1,52**	**0,86**	**1,71**	**1,54**	**5,63**	**5,63**
Endenergie	**2,34**	**1,67**	**2,66**	**1,60**	**8,27**	**8,27**

Entscheidend für eine 100% Versorgung mit Erneuerbaren ist insbesondere die hinreichende Bereitstellung von Flächen für die wesentlichen Energieerzeuger, d.h. die Windanlagen und Photovoltaikanlagen.

Notwendige Kapazitäten und Ressourcen

Aus den Abschätzungen der vorhergehenden Abschnitte ergibt sich für Aufdachanlagen ungefähr eine Fläche von 15 km2. Werden diese mit PV-Modulen vollständig belegt, so ergibt sich ein Ertrag von jährlich etwa 3 TWh, der zur Deckung des heutigen Strombedarfs ausreichen würde. Allerdings entsteht durch die Elektrifizierung des Wärme- und Verkehrssektors ein zusätzlicher Strombedarf von 5,6 TWh.

Gemäß Klimaschutzgesetz sind 2% der Verbundfläche für EE auszuweisen. Dies entspricht einer Fläche von 44 km². Freiflächen-PV-Anlagen, die auf dieser Fläche installiert würden, würden allerdings nur 4,4 TWh pro Jahr an Ertrag bringen und könnten den Endenergiebedarf von 8,3 TWh nur teilweise abdecken. Gemäß Windatlas verfügt der Regionalverbund aber über genügend Windkraftstandorte, um einen Stromertrag von 10 TWh pro Jahr zu generieren (Tab.1). Für 8,3 TWh müssten etwa 700 Windkraftanlagen errichtet werden. Insgesamt würden diese eine Fläche von 14 km2 beanspruchen, so dass die ausgewiesene Fläche prinzipiell für eine vollständige Versorgung mit Windkraft ausreichen würde. Wenn wegen der saisonalen Abhängigkeit angenommen wird, dass mindestens der Wärmepumpenstrom in Höhe von 2,4 TWh durch Windkraft abzudecken ist, müssen im Verbundsgebiet etwa 190 Windräder zum Einsatz kommen.

Zur Abdeckung des nach Berücksichtigung des Aufdach-PV-Beitrags verbleibenden Restbedarfs von 5,3 TWh mittels Windkraft wären über 400 WKA erforderlich. Alternativ könnte unter maximaler Ausnutzung des Flächenziels von 2% FFPV Anlagen gebaut werden, welche unter diesen Voraussetzungen auf einen Ertrag von 4 TWh ausgelegt werden können. Die verbleibenden 1,3 TWh in der Endenergiebilanz könnten dann mittels etwa 100 WKA produziert werden. Werden hingegen zur Deckung des Wärmebedarfs 190 WKA gebaut, so reichen 28 km² Fläche aus, um den verbleibenden Betrag von 2,8 TWh mittels FFPV zu decken.

Wärme aus Holz

Im Regionalverbund gibt es knapp 1000 km2 Waldfläche. Bei nachhaltiger Bewirtschaftung lässt sich dem Wald jährlich Brennholz mit einem Heizwert von etwa 0,8 TWh entnehmen. Nach Tab. 11 beträgt der Wärmebedarf im Regionalverbund 7,1 TWh, so dass sich nachhaltig etwa 11% durch Holz als Brennstoff abdecken lassen. In Tab. 12 führt die Berücksichtigung von Holz als Brennstoff zu einer Reduktion des Endenergiebedarfs von lediglich 0,27 TWh oder 3%.

Strom aus Biogas

Der Anteil von Energiepflanzen an der landwirtschaftlichen Fläche beträgt in BW 8%. Übertragen auf den Regionalverbund würde dies eine Fläche von knapp 70 km^2 oder mehr als 3% der Gesamtfläche bedeuten, welche einen Stromertrag von lediglich 0,18 TWh beiträgt (Tab.1). Dieselbe Fläche würde, mit FFPV belegt, fast 7 TWh erzeugen und nahezu den gesamten Energiebedarf abdecken können! Dennoch können Biogasanlagen sinnvoll genutzt werden, sofern sie sich auf die Verwertung von Gülle und Grünschnitt beschränken. Vorteilhaft ist ihre jederzeitige Verfügbarkeit zur Absicherung von Angebotslücken bei Sonne und Wind. Eine grobe Schätzung geht für das Verbundsgebiet von etwa 20000 Milchkühen aus, aus deren Gülle durch Methangewinnung im Jahr etwa 30 GWh an Strom erzeugt werden könnte [BGLW].

Tiefengeothermie

Das Potential der Tiefengeothermie in der Breisgauer Bucht wird gegenwärtig eingehend untersucht. Ins Auge gefasst ist zunächst eine Anlage mit 20 MW, die für die Stadt Freiburg im Jahr 0,16 TWh an Wärme zu Verfügung stellen könnte. Optimistisch kann davon ausgegangen werden, dass langfristig ein Wärmebedarf von jährlich 0,8 TWh in den Städten der Breisgauer Bucht durch Tiefengeothermie gedeckt werden könnte.

Solarthermie

Solarthermie kann einen wichtigen Beitrag zur Warmwasserversorgung leisten. Geht man davon aus, dass etwa 10% des Wärmebedarfs auf Warmwasser entfallen, so ergibt sich ein Beitrag von 0,7 TWh. Hiervon könnte über das Jahr gesehen etwa die Hälfte durch Solarthermie abgedeckt werden, sofern durchweg alle Gebäude mit Solarthermie ausgestattet wären. Wenn aber bereits eine Wärmepumpe und eine Aufdach-PV Anlage vorhanden sind, macht eine zusätzliche Anschaffung von Solarthermie keinen Sinn.

Wärmedämmung

Durch eine Wärmedämmung kann der Wärmebedarf eines Gebäudes halbiert oder noch stärker reduziert werden. Oft ist aber eine Dämmung von Bestandsgebäuden aufwendig und kostspielig. Wird das Gebäude weiterhin konventionell, z.B. mit einer Gastherme (in Zukunft mit synthetisch hergestelltem Gas) beheizt, so ist die Einsparung an bereitzustellender Endenergie u.U. geringer, als bei einer Heizungsumstellung auf Wärmepumpe. In die Abschätzung des Endenergiebedarfs sind Effizienzgewinne durch Dämmung und konventionelle Beheizung z.B. durch BHKWs grob einbezogen.

Abschätzung unter Einbeziehung weiterer Energiequellen

Unter Berücksichtigung von Solarthermie, Geothermie und Holz als Biomasse ergibt sich ein differenzierteres Bild für den Wärmebedarf, der jetzt zu etwa einem Viertel durch diese erneuerbaren Wärmequellen gedeckt wird. An Stelle von 7,14 TWh müssen Wärmepumpen nur noch 5,19 TWh beitragen, für deren Betrieb nunmehr nur noch 1,73 TWh an Strom erforderlich sind. Die Einsparung schlägt bei der Primärenergie allerdings nur mit 0,65 TWh zu Buche, da gleichzeitig als Umweltwärme 1,3 TWh nicht mehr genutzt werden können. Die zusätzliche Berücksichtigung von Wasserkraft (nach Tab. 3) mit 0,039 TWh und Biogas mit 0,03 TWh würde den primär bereitzustellenden Strom um 9% von 8,27 TWh auf 7,62 TWh reduzieren. Diese Einsparung könnte z.B. zur Verringerung der Freifläche für PV eingesetzt werden.

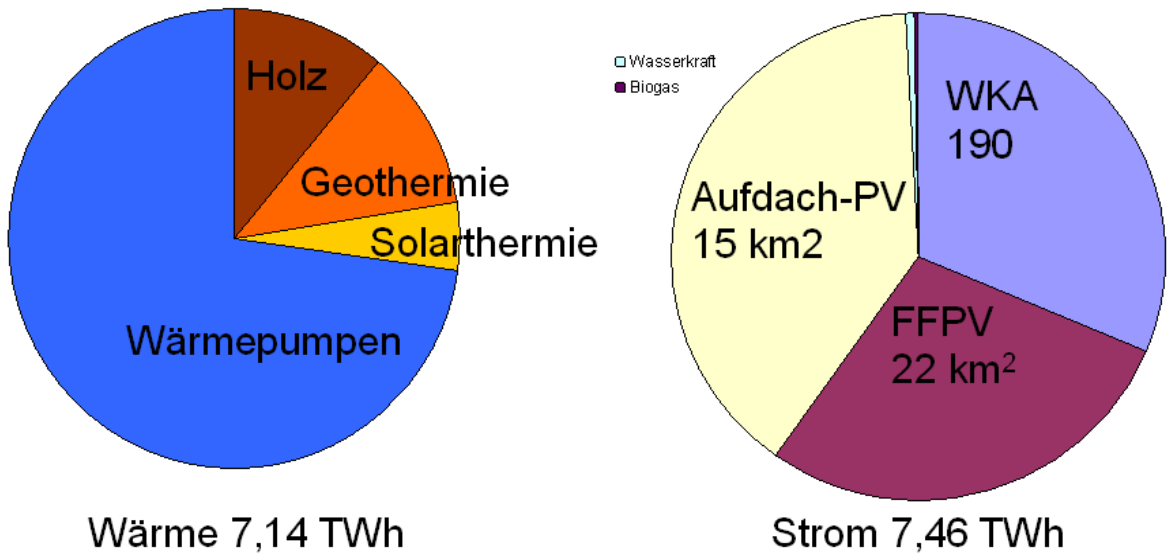


Abb. 8: mögliche Aufteilung einer 100% EE Versorgung des Regionalverbunds bei Einbeziehung weiterer erneuerbarer Energiequellen.

Graue Energie
Graue Energie und die damit verbundene CO2 Emission entsteht vor allem in Verbindung mit Bautätigkeiten (0,6 Tonnen CO2 pro Tonne Zement, in Deutschland ca. 0,24 Tonnen pro Einwohner und Jahr). Aber auch für die Herstellung von Autos und ihren Batterien, Solarzellen und Heizungen sind gewaltige Mengen an grauer Energie aufzubringen. Diese graue Energie und andere Energieverbraucher und CO2 Emissionsquellen wie die Landwirtschaft, Nahrungsmittelindustrie oder Textilindustrie bleiben hier unberücksichtigt. Ebenso ist der Energieaufwand für die Bereitstellung aller Konsumgüter in dieser Abschätzung nicht berücksichtigt worden.

Eine 100% EE Versorgung im landesweiten Stromnetz

Ein hinreichend großer Zubau von Windkraft und PV im beschriebenen Umfang ermöglicht es, eine ausgeglichene Jahresbilanz von Endenergieverbrauch und Stromerzeugung durch EE zu erreichen. Im Normalbetrieb innerhalb des landesweiten Verbundnetzes ist ein regionaler „energieautarker" Inselbetrieb nur begrenzt sinnvoll. Obwohl in der Bilanz eine hinreichende Menge regional bereitgestellt wird, wird eine Momentaufnahme im praktischen Versorgungsbetrieb eine energetische Vernetzung von Gebieten zeigen, in denen wechselnde Überschussgebiete im ständigen Austausch mit sich ändernden Importgebieten stehen.

Investitionskosten

Die Investitionskosten für Photovoltaik liegen bezogen auf 1 kWp gegenwärtig bei etwa 400 € für eine Freiflächenanlage und bei etwa 1200 € für eine Aufdachanlage. Bei Windkraft betragen die Investitionskosten ca. 1500 € pro kW installierte Nennleistung.

Überschlagsmäßig ergeben sich bei einer Aufteilung von 950 MW für WKA, 3 GW für Aufdach-PV und 2,8 GW für FFPV Investitionsbeträge von 1,43 Mrd €, 3,6 Mrd € und 1,12 Mrd. €, woraus sich eine Gesamtinvestitionssumme von etwas über 6 Mrd. € ergibt. Anders als bei Brennstoffen für konventionelle Kraftwerke fallen für Sonne und Wind keine laufenden Kosten an.

Zum Vergleich: Für die Bereitstellung von 8,3 TWh Strom bezahlt der Endkunde bei einem kWh-Preis von 30 ct jährlich eine Summe von 2,5 Mrd €. Der Heizölpreis liegt gegenwärtig bei 1,4 € pro Liter. In Form von Heizöl kosten 8,3 TWh an Energie demnach 1,2 Mrd €. Für den gegenwärtigen Primärenergiebedarf müssten sogar mehr als das Doppelte aufgewendet werden.

Zwar enthalten diese Summen erhebliche staatlich induzierte Komponenten, es zeichnet sich jedoch ab, dass sich die für den Umbau der Energieversorgung notwendigen Investitionsmittel in wenigen Jahren amortisiert haben können. Bei einer belastbaren Gesamtkostenbetrachtung müssen zusätzlich auch die vorhandenen Umweltschadens-kosten, die in steigendem Ausmaß insbesondere durch den fortschreitenden Klimawandel anfallen, berücksichtigt werden.

Energieversorgung unter Berücksichtigung der saisonalen Abhängigkeiten

Bei den bisherigen Untersuchungen wurde von einem bilanziellen Ausgleich zwischen Endenergiebedarf und Endenergieerzeugung ausgegangen. Dabei wurde die saisonale Bedarfsabhängigkeit über Plausibilitätsbetrachtungen nur qualitativ über einen bevorzugten Ausbau der Windenergie berücksichtigt. Für die Industrie wurde angenommen, dass elektrische Energie in chemische Energie in Form von synthetischen Brennstoffen umgewandelt werden kann und dabei entstehende energetische Verluste vernachlässigt werden können. Diese Brennstoffe können dann ebenso als saisonale Speicher dienen. Wenn umgekehrt auch eine Rückwandlung von chemischer Energie in elektrische Energie gelänge (beispielsweise durch eine perfekte Brennstoffzelle) hat der Einsatz von Speichern keinen Einfluss auf die Energiebilanz.

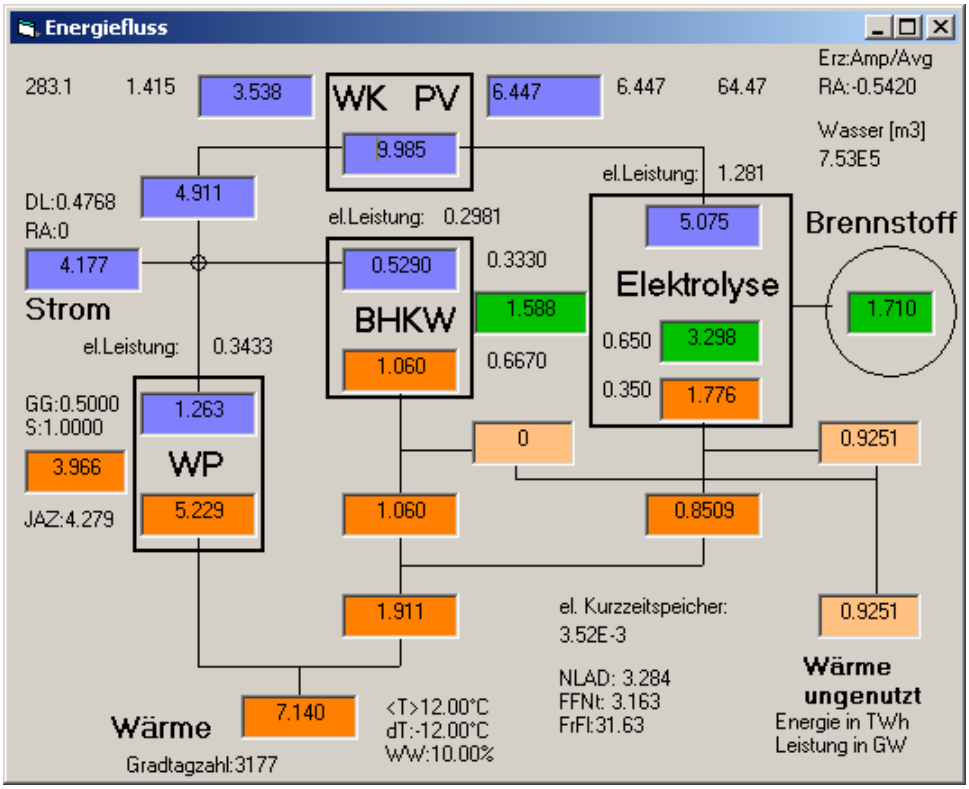
Batteriespeicher zeigen tatsächlich nur relativ kleine Verluste beim Be- und Entladen (etwa 5-10%), sind aber wegen ihrer geringen Speicherkapazität als saisonale Speicher ungeeignet. Ein Prozess zur chemischen Speicherung elektrischer Energie besteht in der Elektrolyse von Wasser, wobei Wasserstoff entsteht. Die „grüne“ Herstellung weiterer synthetischer Kraft- und Brennstoffe beruht auf dem elektrolytisch erzeugten Wasserstoff als Ausgangsstoff. Unter energetischen Gesichtspunkten kann „Wasserstoff“ ganz allgemein als synonym zu „synthetischen Brennstoffen“ verwendet werden. Die energetischen Wirkungsgrade bei der Herstellung von Wasserstoff und seiner Rückverstromung sind nicht besonders hoch und es wird bei diesen Umwandlungsprozessen in erheblichen Mengen Wärme freigesetzt. Um im Sommer erzeugten Strom im Winter für Wärmepumpen verfügbar zu machen, muss wegen der Umwandlungsverluste ein deutlich höherer Betrag an erneuerbarer Energie eingesetzt werden, als wenn der Strom ohne den Umweg über einen Speicher verwendet werden kann. Zwar kann die Abwärme der Umwandlungsprozesse ebenfalls zumindest teilweise genutzt werden, es fällt aber der Hebel der Wärmepumpe zur zusätzlichen Gewinnung von Umweltwärme aus. Der Verwendung von Direktstrom ist daher in jedem Fall Vorzug zu geben.

Um den Einfluss von Speichern auf den Primärenergiebedarf zu analysieren, wurde ein einfaches Computerprogramm entwickelt, das im Anhang genauer beschrieben wird. Während Photovoltaik ihren Ertrag überwiegend im Sommer einfährt, weht der Wind bevorzugt in den kalten Jahreszeiten. Für den Betrieb der Wärmepumpen ist aber erneuerbarer Strom erforderlich, der im Winter nur von der Windkraft (oder von relativ

ineffizienten Blockheizkraftwerken (BHKW) in Verbindung mit Langzeitspeichern) geliefert werden kann.

In einem ersten Szenario wurde die Versorgung des Verbundgebiets mit 100% EE unter der Annahme eines Ertragsanteils von 65% durch PV und 35% durch Windenergie unter Berücksichtigung der saisonalen Abhängigkeit des Wärmebedarfs und der Leistungszahl der Wärmepumpen untersucht. Das Ergebnis ist in dem Energieflussdiagramm von Abb.8 dargestellt, wobei drei Arten von Energie unterschieden werden (Strom: blau, Wärme: orange und Brennstoff: grün). Als Langzeitspeicher wird Wasserstoff elektrolytisch erzeugt und bei der Rückverstromung als Brennstoff verwendet.

Abb. 9: Energieflussdiagramm für das 100% EE Versorgungsszenario 1



Die benötigte Primärenergie zur vollständigen Energieversorgung des Verbundgebiets mit EE erhöht sich von 8,2 TWh auf 10 TWh. Dies ist u.a. auf Verluste bei der Wasserstoffherstellung für den industriellen Sektor zurückzuführen. Bei Vorgabe eines Ertragsanteils von 35% werden 283 Windräder mit einer Nennleistung von insgesamt 1,4 GW benötigt (Zahlen oben links). Zur Erzeugung der Primärenergie sind PV Module mit einer gesamten Nennleistung von 6,5 GWp erforderlich, die als FFPV eine Fläche von 65 km² erfordern würden (Zahlen oben rechts). Für das vorgegebene Verhältnis von Wind- und Sonnenertrag hat die Erzeugungsrate ihr Maximum im Juli. Sie sinkt im Winter auf ca. 30% ihres Maximums ab. Nach der Wärme-Dach-Faustregel können etwa die Hälfte (3,3 TWh) der Sonnenenergie durch Aufdachanlagen geliefert werden (Nennleistung NLAD), so dass nur noch 32 km² (FrFl) für FFPV Anlagen (Nennleistung FFNt) vorzusehen sind.

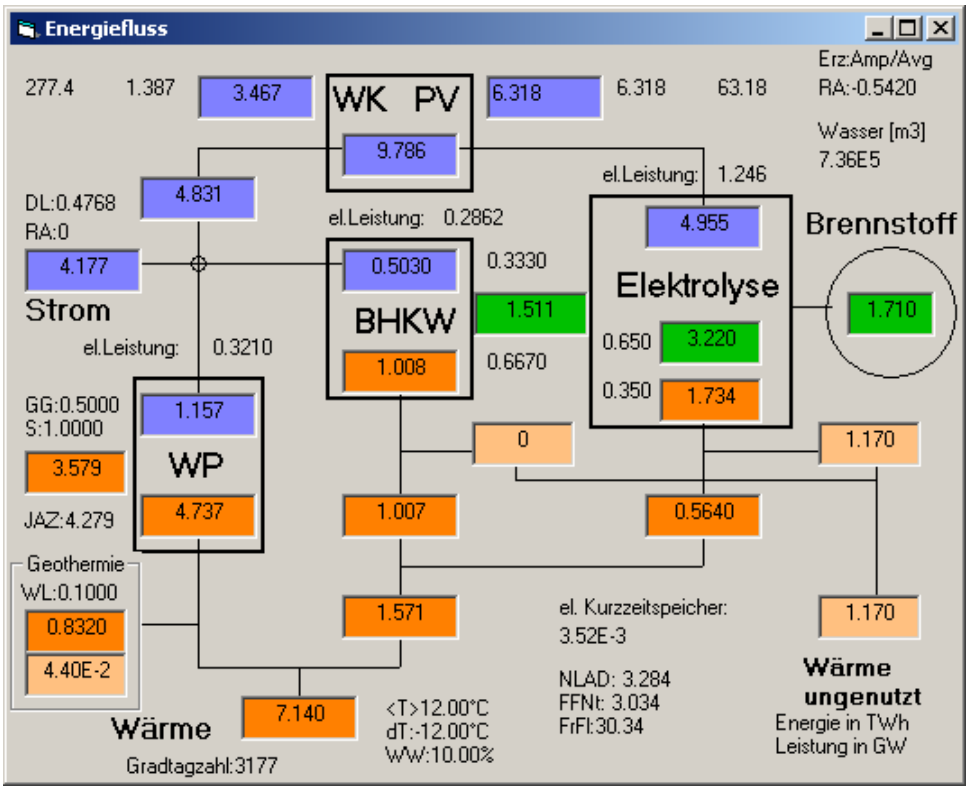
Aus Abb. 9 ist ersichtlich, das von der erzeugten Primärenergie etwa die Hälfte als Direktstrom nutzbar ist. Die andere Hälfte geht in die Elektrolyse (angenommener Wirkungsgrad zur Wasserstofferzeugung 65%). Von dieser Hälfte geht etwa ein Drittel bei der Elektrolyse durch Umwandlung in Wärme verloren. Die Elektrolyse wird in

erster Linie durch den Überschussstrom im Sommer betrieben. Von ihrer Abwärme kann knapp die Hälfte (z.B. für die Warmwasserbereitung) genutzt werden. Die andere Hälfte (immerhin 0,93 TWh) geht mangels Wärmenachfrage ungenutzt verloren (hell orangene Felder rechts unten).

Der erzeugte Wasserstoff geht zur Hälfte an die Industrie. Die andere Hälfte wird in der kalten Zeit für Blockheizkraftwerke benötigt, welche dann durch Rückverstromung (angenommene elektrische Effizienz 33%) den Strombedarf decken müssen. Zwei Drittel vom Energieinhalt des Brennstoffs werden in Form von Wärme freigesetzt. Obwohl diese Abwärme im Winter vollständig genutzt werden kann, bedeutet dies ein Verlust für die Nutzbarkeit von Umweltwärme, denn der verlorene Strom steht nicht als WP-Strom mit Hebelwirkung zur Verfügung. Wärmepumpen liefern etwa 73% des Wärmebedarfs. Das verbleibende Viertel wird durch Abwärme der BHKW und in geringerem Umfang der Elektrolyseure abgedeckt.

Das Programm bestimmt außerdem die Leistungsparameter für die eingesetzten Anlagen. Zur Saisonalen Versorgung im Winter sind BHKWs mit einer Gesamtleistung von 300 MW zu installieren. Die Wärmepumpen haben eine elektrische Leistung von 340 MW. Die Elektrolyseure benötigen eine Gesamtleistung von 1,28 GW. Zur Wasserstofferzeugung sind etwa 750 000 Kubikmeter Wasser bereitzustellen. Kurzzeitspeicher in Höhe von 3,5 GWh dienen zum Nachtausgleich des Solarstroms im Sommer. Im Winter können wasserstoffbetriebene BHKWs diese Ausgleichsfunktion mitübernehmen.

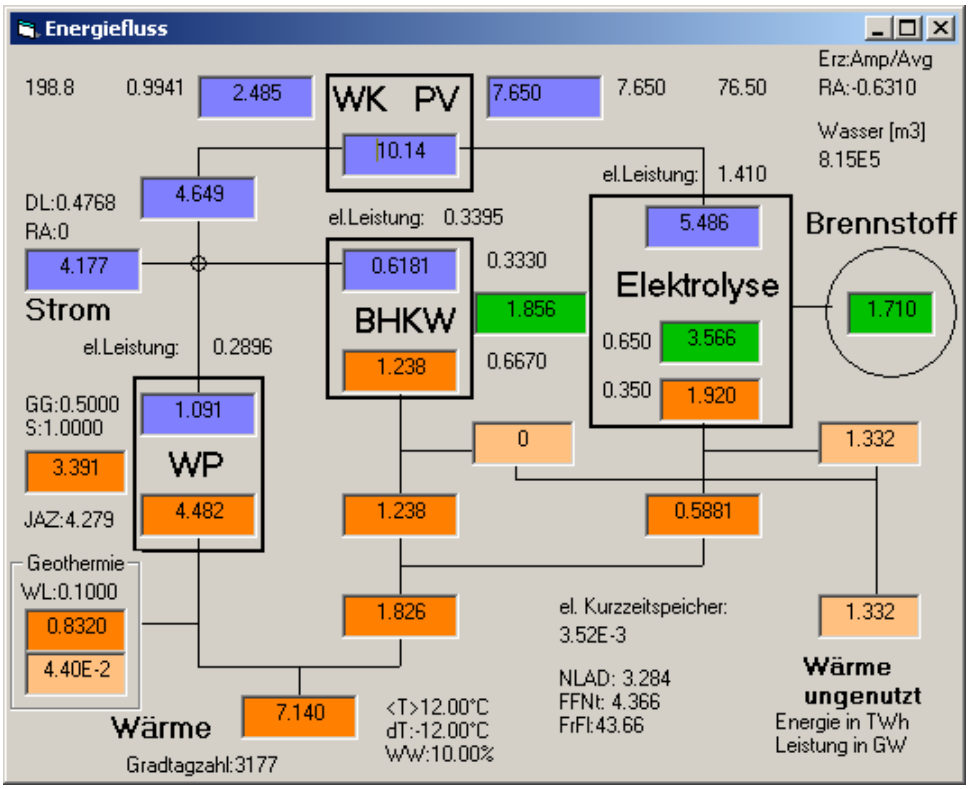
Abb. 10: Energieflussdiagramm für das 100% EE Versorgungsszenario 2



In einem zweiten Szenario wurde das erste Szenario durch eine 100 MW Wärmeversorgung über Tiefengeothermie ergänzt (ohne sonstige Veränderungen). Das Ergebnis ist in Abb. 10 dargestellt. Interessanterweise führt die Bereitstellung von 0,8 TWh über Geothermiewärme nur zu einer Reduktion von 0,2 TWh beim

Primärenergiebedarf. Der Grund liegt darin, dass zusätzliche Bereitstellung von Wärme Wärmepumpen ersetzt und damit nur zu einem Bruchteil bei einer Einsparung von Wärmepumpenstrom führt.

Abb. 11: Energieflussdiagramm für das 100% EE Versorgungsszenario 3



Ein drittes Szenario ergibt sich, wenn der Anteil der FFPV soweit erhöht wird, dass das 2% Flächenziel von 44 km2 durch FFPV ausgeschöpft wird (Abb.11). Auch unter diesen Bedingungen sind im Verbundsgebiet noch 199 Windräder erforderlich. Die Erhöhung des PV Anteils bewirkt praktisch keine Erhöhung des Primärenergiebedarfs, zu dem in diesem Fall Windenergie immer noch zu einem Viertel und Aufdach-PV zu einem Drittel beitragen.

In einem vierten Szenario wird modellhaft untersucht, welche Bedingungen bei einer vollständigen Versorgung mit PV ohne Windenergie vorliegen würden (Abb.12). Im Vergleich zu Szenario 2 steigt der Primärenergiebedarf um 10%. Der Elektrolyseur muss im Sommer etwa 1/3 mehr an Wasserstoff für die Winterversorgung herstellen. Von der Abwärme der Elektrolyse können etwa 0,5 TWh zusätzlich nicht mehr genutzt werden. Für dieses Szenario ohne Windkraft wären allerdings etwa 3,5 % der Fläche des Regionalverbunds für FFPV auszuweisen.

Zum Vergleich wurde modellhaft der andere Extremfall einer ausschließlichen Versorgung mit Windenergie untersucht (Abb. 13). Dieses Szenario 5 kommt mit der niedrigsten Primärenergie von 8,5 TWh aus, da alle Verbraucher zu jedem Zeitpunkt mit Direktstrom bedient werden können. Dieser Wert kommt dem aus der einfachen Abschätzung gewonnenen Wert von 8,2 TWh sehr nahe. Verluste entstehen allein bei der Elektrolyse, wobei in diesem Fall auch diese Abwärme vollständig genutzt werden kann. Dieses Szenario erfordert allerdings eine hohe Zahl von 682 Windrädern, die

jedoch immer noch unterhalb der maximalen Zahl der Standorte nach dem Windatlas bleibt.

Abb. 12: Energieflussdiagramm für das 100% EE Versorgungsszenario 4

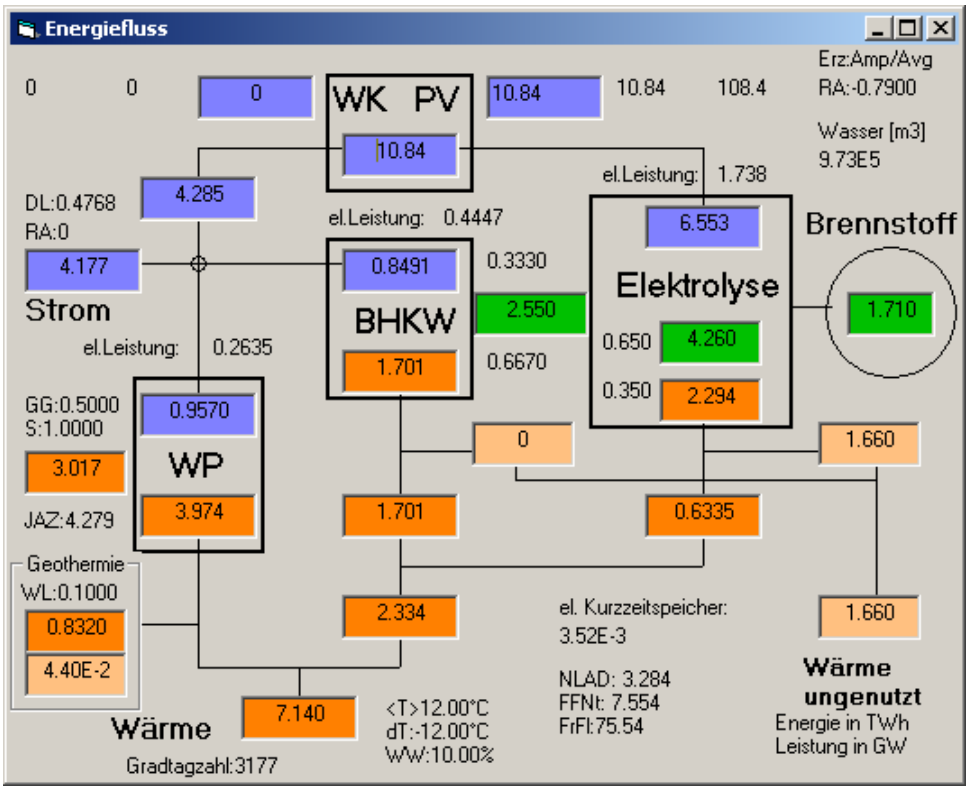
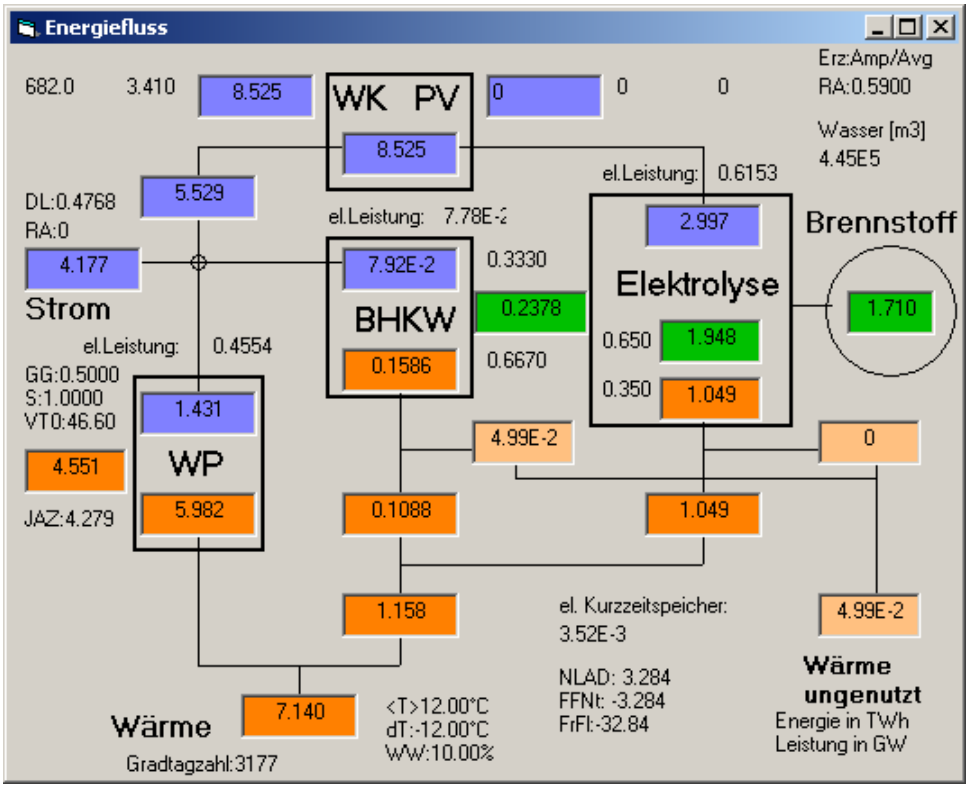


Abb. 13: Energieflussdiagramm für das 100% EE Versorgungsszenario 5



Zusammenfassung

Diese Studie geht von vorliegenden Zahlen für die Endenergie und ihre sektorspezifische Aufteilung aus, wohl wissend, dass für deren Erhebung in den verschiedenen Gebietskörperschaften unterschiedliche Verfahren angewendet wurden. Durch Zusammenführung dieser Daten ergibt sich für den Verbund aus den drei Gebietskörperschaften Stadt Freiburg, Landkreis Emmendingen und Landkreis Breisgau-Hochschwarzwald ein Endenergieverbrauch von 16 TWh. Der heutige Primärenergieverbrauch wird auf 18 TWh geschätzt (28,5 MWh pro Einwohner und Jahr). Eine regionale Versorgung durch EE würde zum heutigen Zeitpunkt eine die Erzeugung einer exorbitanten Menge von synthetischen Kraft- und Brennstoffen erfordern. Eine Deckung eines unverändert hohen Primärenergiebedarfs durch regionale Erneuerbaren Energieanlagen ist praktisch auszuschließen.

Wesentliche Verringerungen des Endenergiebedarfs verbunden mit einer deutlichen Erhöhung des Strombedarfs treten durch die Elektromobilität und Wärmepumpen als neue Großverbraucher auf. Für die hier vorgenommene Abschätzung wird davon ausgegangen, dass keine grundsätzliche Änderungen der Lebensgewohnheiten eintreten werden. Elektrifizierung von Verkehrs- und Wärmesektor (und die Aktivierung von Umweltwärme) können aber einen „System Change“ bewirken und zu substantiellen Ersparnissen bei der Endenergie führen. Durch eine Energieversorgung vor Ort werden sich außerdem die Aufwendungen für „Primärenergie“ (heute fossile Energieträger) Primärenergieverluste bei der Stromerzeugung erheblich reduzieren lassen. Die vorgenommene Abschätzung fußt deshalb auf der Annahme einer **vollständigen Elektrifizierung** der Energieversorgung , insbesondere des Verkehrssektors und des Wärmesektors.

Weitere Ersparnisse sind möglich und wünschenswert, allerdings vom Maß der Einschränkungen abhängig, welche damit verbunden sind. Sie sind aber schwer abzuschätzen, zumal die fortschreitende Digitalisierung eher zu einem weiteren Anstieg des Energieverbrauchs führen wird.

Es wird für den Regionalverbund ein Primärenergiebedarf von 8,5 TWh abgeschätzt, der als erneuerbarer Strom zur Verfügung zu stellen ist. Er kann im Rahmen des Flächenziels der Landesregierung auch innerhalb des Verbundgebiets bereitgestellt werden, obwohl die dann benötigte Strommenge das rund dreifache der gegenwärtigen Stromnachfrage (2,64 TWh) beträgt.

Für die Bürgerinnen und Bürger bedeutet diese Prognose einen durchschnittlichen Energieverbrauch von knapp 14 MWh pro Jahr. Die Detailanalyse zeigt, dass dieser Wert eine Untergrenze darstellt, da synthetische Brennstoffe als Langzeitspeicher benötigt werden und deren Herstellung mit Verlusten verbunden ist.

Als Grundlage für die Analyse dienen umfangreiche und regional detaillierte Daten aus dem Energieatlas Baden-Württemberg. Demnach ist eine 100% EE Energieversorgung der Stadt Freiburg ausschließlich durch Anlagen auf ihrer eigenen Gemarkung nicht möglich, in anderen Worten, die Stadt ist auf Unterstützung durch das Umland angewiesen.

Die Analyse zeigt weiter, dass eine energetische Vollversorgung des Regionalverbunds ausschließlich mit Wind- und Solarstrom im Rahmen eines 2% Flächenziels möglich und auf Grund der Klimaschutznovelle §4b des Landes Baden-Württemberg auch dringend

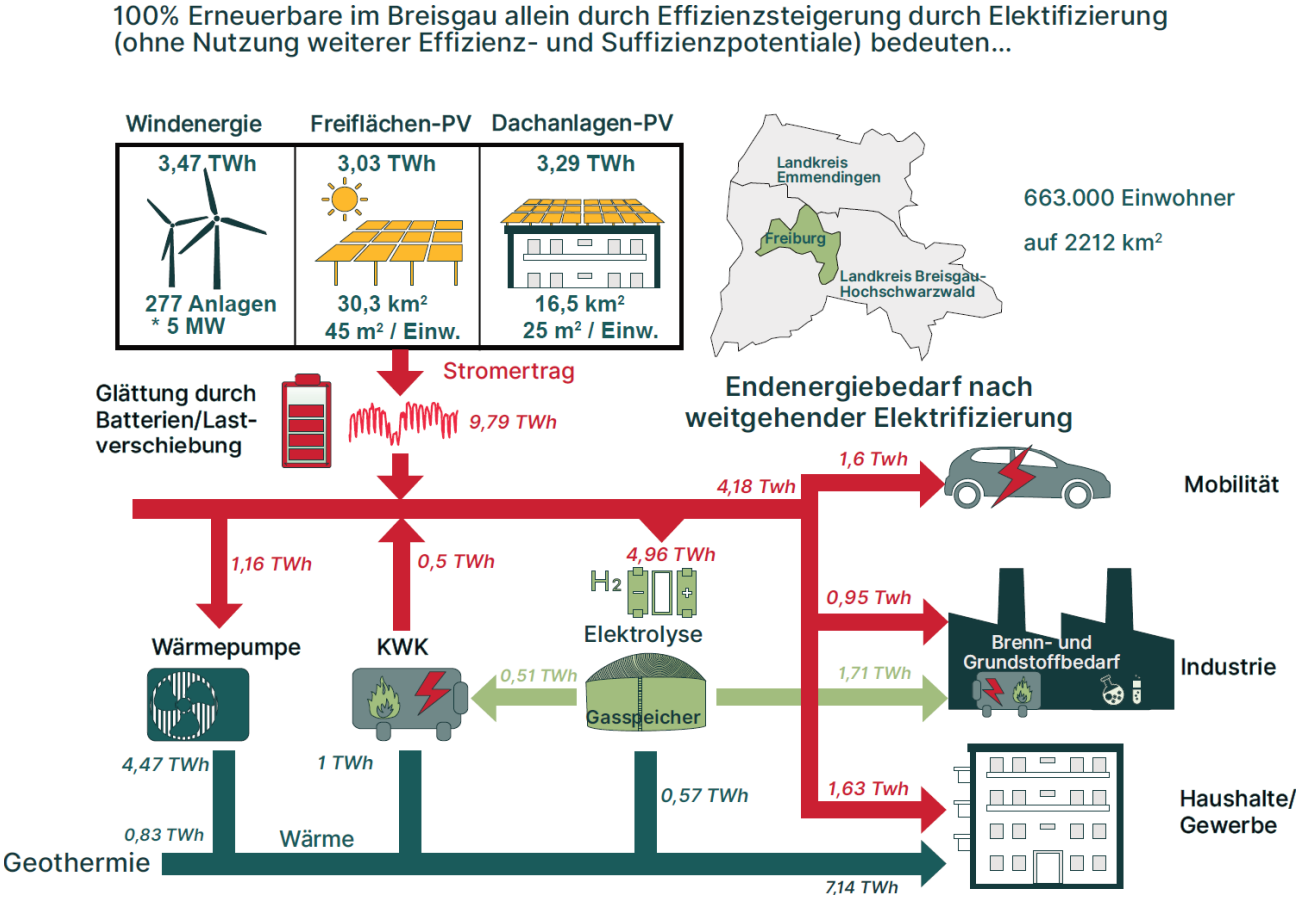
geboten ist. Dieses Gebot ist in Anbetracht der aktuellen Abhängigkeit von Energieimporten aus Russland besonders dringlich. Energieimporte von erneuerbarer Energie sind nur dann Teil einer Lösung, wenn die in Frage kommenden „Überschussgebiete“ friedlich und zum Nutzen aller gemeinschaftlich genutzt werden. Für Energieimporte eröffnen sich bestenfalls langfristig eine Perspektive, von der wir derzeit leider noch recht weit entfernt sind.

Eine Versorgung mit 100% EE erfordert das Ausweisen großer Gebiete für Freiflächen PV und (für die saisonale Deckung des Wärmebedarfs) hinreichend vieler Windkraftstandorte. Eine (vorübergehende) Umnutzung von landwirtschaftlicher Fläche für Freiflächen PV darf dabei kein Tabu sein. Bei einer möglichst wenig invasiven Aufteilung der Energieversorgung wird der Energiebedarf zu je einem Drittel durch Windkraft, Aufdach-PV und Freiflächen PV gedeckt. Damit die gewünschte Einsparung an Endenergie eintritt, muss der Gebäudebestand mit Wärmepumpen beheizt und der Verkehrssektor vollständig elektrifiziert werden. Der rasche und deutlich zu beschleunigende Ausbau der Erneuerbaren Energien sollte dabei aber immer an erster Stelle stehen, denn ohne einen entsprechenden Ausbau der Erneuerbaren führt Elektromobilität und Wärmepumpen zur Erhöhung der Stromnachfrage aus fossilen Kraftwerken und damit zu einer Erhöhung der Treibhausgasemissionen.

Gewinn

Die vorgeschlagene Umsetzung ermöglicht den Verzicht auf Energieimporte und garantiert eine resiliente, weitgehend autarke Versorgung des betrachteten regionalen Gebiets. CO_2 Emission aus dem Energiebereich lässt sich so vollständig vermeiden. Die Sichtbarkeit der benötigten Energieerzeuger (WKA und FF PVA) führt uns Bürgerinnen und Bürgern in der Region dabei deutlich vor Augen, dass Energiebereitstellung in jeder Form mit Eingriffen in die Umwelt verbunden ist und dass daher ein möglichst effizienter Einsatz von Energie zu jeder Zeit eine hohe Priorität haben muss. Fossile Energieimporte haben es bis heute ermöglicht, dass dies weitgehend verdrängt werden konnte.

Graphische Zusammenfassung für ein Versorgungsszenario mit 65% Solar- und 35% Windstrom



Anregungen für den Bürgerrat

Der Bürgerrat kann den tatsächlichen Flächen- und Standortbedarf für eine Versorgung mit 100% EE offenlegen und öffentlich diskutieren.

Für das Einhalten des 1,5 Grad Ziels ist ein rechtzeitiges Gelingen der Energiewende essentiell und damit vor allem ein rasches Ausweisen der Ressourcen wichtig. Der Bürgerrat kann konkrete Standorte für die Windkraftanlagen oder Flächen für Freiflächen- und Agri-PV-Anlagen diskutieren und dem Regionalverband Südlicher Oberrhein als zuständiger Behörde vorschlagen.

Der Bürgerrat kann einen Appell an den Regionalverband Südlicher Oberrhein richten, die vorgeschriebenen Flächen schnell auszuweisen. Der Bürgerrat kann Kommunen ermuntern, bereits im Flächennutzungsplan vorgesehene Standorte und Flächen über Projektierer zu entwickeln. Der Bürgerrat kann den Kommunen Vorschläge zur Erschließung von Flächen und zur Standortfindung für EE unterbreiten.

Es gilt einen fairen Ausgleich zwischen Stadt und Land und zwischen den Kommunen bei Übernahme von Ausbaukapazitäten zu finden.

Spätestens bis 2026 steht ein Verbot von Öl- und Gasheizungen an. Kalte und warme Wärmenetze sind eine Lösungsmöglichkeit. Werden die Kommunen nicht aktiv, so werden in Zukunft Luft-Wasser Wärmepumpen vor allen Häusern stehen. Erdwärmepumpen können hingegen in fast allen Heizungskellern aufgestellt werden und haben eine deutlich höhere Jahresarbeitszahl.

Maßnahmen können vorgeschlagen werden, die sicherstellen, dass die Installation von Wärmepumpen mit der Installation einer hinreichend großen PV Anlage gekoppelt wird.

Aufdachanlagen können den gegenwärtigen Strombedarf vor allem in kleinen Kommunen theoretisch (noch) vollständig decken. Wirksame Maßnahmen sollten ergriffen werden, PV Anlagen schnell und flächendeckend auf allen Gebäuden zu installieren.

„Mein Ausgangspunkt sind nicht die Erneuerbaren Energien, sondern die Gesellschaft – aus der Erkenntnis, welche elementare Bedeutung der Energiewechsel für deren Zukunftsfähigkeit hat. Der Wechsel zu erneuerbaren Energien hat eine zivilisationsgeschichtliche Bedeutung. Deshalb müssen wir wissen, wie wir ihn beschleunigen können. Knapp sind nicht die erneuerbaren Energien, knapp ist die Zeit."
Hermann Scheer

„Für den Fortschritt gibt es keine Heilung. Die einzig mögliche Sicherheit ist relativ, und liegt in der alltäglichen Anwendung intelligenten Urteils."
Janos (John) von Neumann

Quellenverzeichnis

[PROG] „Modell Deutschland- Klimaschutz bis 2050: Vom Ziel her denken“ Studie Prognos/Ökoinstitut e.V für den WWF,2009

[EAW1] Potentialanalyse Wind
https://www.energieatlas-bw.de/wind/potenzialanalyse/uberblick

[EAW2] Potential für Windanlagen in den Kreisen im Verbund
https://udo.lubw.baden-wuerttemberg.de/projekte/api/processingChain?repositoryItemGlobalId=energie_winddaten.energie%3Aeebw_wind_pot_gebiet.sel&conditionValuesSetHash=1F99B93&selector=energie_winddaten.energie%3Aeebw_wind_pot_gebiet.sel&sourceOrderAsc=false&orderByColumn=3&orderAsc=true

[WEEC] Saisonaler Gang der Winderzeugung
https://energy-charts.info/charts/power/chart.htm?l=de&c=DE&stacking=stacked_absolute_area&year=2020&source=sw&legendItems=0000010000&interval=year

[PVE] Bundesweite Aufnahme der monatlichen Solarertragsdaten, SFV Deutschland,2020
https://www.pv-ertraege.de/cgi-bin/pvdaten/src/region_uebersichten.pl/kl

[EAPV] Potentialanalyse PV-Aufdachanlagen
https://www.energieatlas-bw.de/wind/potenzialanalyse/uberblick

[SDFR] Statistische Daten Freiburg
https://de.wikipedia.org/wiki/Freiburg_im_Breisgau

[SDBHS] Statistische Daten Kreis Breisgau-Hochschwarzwald
https://de.wikipedia.org/wiki/Landkreis_Breisgau-Hochschwarzwald

[SDEM] Statistische Daten Kreis Emmendingen
https://de.wikipedia.org/wiki/Landkreis_Emmendingen

[KSKFR] Fortschreibung Klimaschutzkonzept 2018, Öko-Institut/IFEU
https://www.freiburg.de/pb/site/Freiburg/get/params_E-1430614942/1323913/Fortschreibung%20Klimaschutzkonzept%202018_1.pdf

[KSKEM] Klimaschutzkonzept Landkreis Emmendingen
https://www.landkreis-emmendingen.de/fileadmin/Dateien/Webseite/Bilder/Landkreis_Politik/Klimaschutz/120731_Landkreis_EM_Klimaschutzkonzept.pdf

[KSKBHS] Klimaschutzkonzept Landkreis Breisgau-Hochschwarzwald
https://www.breisgau-hochschwarzwald.de/pb/site/Breisgau-Hochschwarzwald/get/params_E687924383/30706/35902/1981177/1947742/1947745/1947746/2295912/2295931/KSK%20LK%20BH_Bericht_final_Juli2021.pdf

[PEEBW] Plattform Erneuerbare Energien Baden-Württemberg
„Baden-Württemberg Klimaneutral 2040: Erforderlicher Ausbau der Erneuerbaren Energien“, J.Nitsch, M. Magosch, Oktober 2021

[NKSG] Klimaschutzgesetz des Landes Baden-Württemberg, Novelle vom 12. Oktober 2021 , www. landesrecht-bw.de/portal

[BVTG] Tiefengeothermie, https://www.geothermie.de/bibliothek/lexikon-der geothermie/o/oberrheingraben.html

[EAWSK] Energieatlas BW

https://udo.lubw.baden-wuerttemberg.de/projekte/api/processingChain?repositoryItemGlobalId=energie_wasser.Ermitteltes+Wasserkraftpotenzial.energie%3Aeebw_wasser_pot_gebietsebene.sel&conditionValuesSetHash=A9B99DD&selector=energie_wasser.Ermitteltes+Wasserkraftpotenzial.energie%3Aeebw_wasser_pot_gebietsebene.sel&sourceOrderAsc=false

[BGLW] Biogas

https://lazbw.landwirtschaft-bw.de/pb/site/pbs-bw-new/get/documents/MLR.LEL/PB5Documents/lazbw_2017/lazbw_gl/Gr%C3%BCnlandwirtschaft_und_Futterbau/Biogas/Dokumente_Biogas/G%C3%BCllebiogasanlagen-Wirtschaftlichkeit.pdf?attachment=true

[HBW] https://www.hausjournal.net/brennwert-holzarten

[BTSP] https://www.sfv.de/artikel/biotop-solarparks_

Anhang

Erläuterungen zum Modell zur Beschreibung eines 100% EE Versorgungsszenarios

Vorgegeben werden zunächst der saisonale lokale Temperaturverlauf (über Durchschnittstemperatur und Temperaturamplitude) und der Jahresheizbedarf sowie der Anteil, der davon auf die Warmwasserbereitung entfällt. Aus diesen Daten lässt sich der Jahresgang des Wärmebedarfs und die Gradtagszahl berechnen, die von der Zimmertemperatur und der Grenztemperatur als zusätzliche Parameter abhängt. Steigt die mittlere Tagestemperatur über die Grenztemperatur, wird die Heizung ganz abgeschaltet.

Für die Wärmepumpen ist der Gütegrad und der Typ (Luft-Wasser bzw. Erdwärme) anzugeben. Für die Heizung wird die Steilheit der Heizkurve (bzw. die Vorlauftemperatur bei 0°C Aussentemperatur) benötigt, damit die (durchschnittliche) Leistungszahl der Wärmepumpen berechnet werden kann, aus der sich die Jahresarbeitszahl und der zeitabhängige Strombedarf zur Deckung der Heizleistung ergibt.

In den Rechnungen wurde für die Wärmepumpen ein Gütegrad von 0,5 angenommen, wie er von „State of the Art“ Wärmepumpen erfüllt wird. Für die Steilheit der Heizkurve wurde ein Wert von 1,0 eingesetzt (Vorlauftemperatur 47°C bei 0°C Aussentemperatur). Eine Beheizung nach dieser Heizkurve lässt sich im Altbestand i.a. entweder durch Dämmung oder durch Erhöhung der Heizkörperfläche erreichen.

Die saisonale Abhängigkeit der Windenergie wird über eine Sinuskurve und das Verhältnis von Amplitude und Durchschnittswert beschrieben. Für dieses Verhältnis wurde hier der Wert 0,59 angenommen. Weitere Kenngrößen sind die Nennleistung pro Windrad und die Volllaststundenzahl. Analoge Parameter werden für die Solarenergie benutzt. Für das Verhältnis von Amplitude und Durchschnittswert wird hier der Wert -0,79 verwendet. Zur Berechnung der benötigten Fläche wird der Kennwert Nennleistung pro m^2 herangezogen. Als weiterer Parameter wird der Anteil von PV an der Nennleistung benutzt, welcher das Verhältnis von Windenergie und Solarenergie festlegt. Hieraus ergibt sich für den Jahresgang ein effektives Verhältnis von Amplitude und Durchschnittswert. Mit den angenommenen Werten kann für einen PV Anteil von 43% an der Nennleistung die saisonale Variation des Ertrags ganz zum Verschwinden gebracht und eine über das ganze Jahr (im Mittel) konstante Erzeugungsleistung bereitgestellt werden. Schwankungen der EE innerhalb eines Tages können durch Batterien als Kurzzeitspeicher ausgeglichen werden. Deren Kapazität wird durch die maximale Energie abgeschätzt, welche im Jahresverlauf an einem Tag erzeugt wird.

Eine kontinuierliche Stromversorgung über das ganze Jahr hinweg wird durch die Verwendung von Brennstoff gewährleistet, der durch Umwandlung von elektrischer in chemische Energie produziert wird. Dieser Brennstoff dient als saisonaler Speicher. Ein weiterer Eingabeparameter ist der externe Bedarf an Brennstoffenergie, der in einem Jahr (über den saisonalen Speicherbedarf hinaus) produziert werden muss. Ein technisch erprobter Prozess für diese Umwandlung ist die Elektrolyse von Wasser. Elektrolyseure bilden unter Verwendung von Überschussstrom Wasserstoff, welcher in Jahreszeiten mit Stromunterdeckung durch Rückverstromung in Blockheizkraftwerken den sonst auftretenden Strommangel ausgleicht. Die Menge an Wasser, die für die Elektrolyse bereitzustellen ist, wird im Programm berechnet.

Der Elektrolyseur wird über den Wirkungsgrad für die Umwandlung von elektrischer in chemische Energie charakterisiert. Entsprechend wird die Rückverstromung durch den elektrischen Wirkungsgrad des BHKW beschrieben. Bei der Umwandlung und Rückwandlung geht Energie in Form von Wärme verloren. Für die Umwandlung in Wärme lassen sich thermische Wirkungsgrade definieren, die technische Einschränkungen für die Nutzbarkeit der Abwärme berücksichtigen. In den vorgenommenen Rechnungen wird vereinfacht angenommen, dass solche Einschränkungen nicht bestehen und die Abwärme in vollem Umfang genutzt wird, solange Verbraucher da sind. Das Programm versucht so entstehende Abwärme bevorzugt und in vollem Umfang zu nutzen, bevor andere Wärmeerzeuger (Wärmepumpen) zur Deckung des Wärmebedarfs zugeschaltet werden. Ebenso bevorzugt wird die Verwendung von Direktstrom gegenüber dem Einsatz zur Elektrolyse.

Für Elektrolyseure, BHKWs und Wärmepumpen wird angenommen, dass sie in vollem Umfang modulierbar sind. Diese Annahme bedeutet keine Einschränkung, denn technisch kann die Modulierbarkeit auch über eine Taktung in Kombination mit elektrischen oder Wärmespeichern realisiert werden. Das Programm bestimmt durch Analyse des Jahresgangs die maximalen Anforderungen für die genannten Typen von Anlagen und gibt diese als erforderliche Nennleistung aus.

Das eigentliche Ziel der Rechnung besteht aber darin, diejenige Auslegung der Nennleistungen für die EE zu berechnen, welche Wärmebedarf, Strombedarf und Brennstoffbedarf exakt abdecken.

Die berechneten Kenngrößen für die Szenarien 1 bis 4 sind in Tab. A1 aufgelistet. Die berechneten Verlaufskurven für die beschriebenen Größen sind für Szenario 1 in den Abb. A1 bis Abb. A4 gezeigt.

Ergebnisse der Szenarien-Rechnungen

Tab. A1: Eingabedaten (P) und Ergebnisse (X) für verschiedene Szenarien

Kenngröße	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3	Szenario 4	Szenario 5	
WG Elektrolyse	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	P
WG Rückverstromung	0.333	0.333	0.333	0.333	0.333	P
WG Gesamt	0.216	0.216	0.216	0.216	0.216	P
Wärmepumpe Typ	0 Luft-Wasser	0 Luft-Wasser	0 Luft-Wasser	0 Luft-Wasser	0 Luft-Wasser	P
WP Gütegrad	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	P
Steilheit	1	1	1	1	1	P
JAZ	4.279	4.279	4.279	4.279	4.279	X
Jahresverbrauch	7.14	7.14	7.14	7.14	7.14	X
Gebäudekennzahl	9.36E-05	9.36E-05	9.36E-05	9.36E-05	9.36E-05	X
Zimmertemperatur	20	20	20	20	20	P
Grenztemperatur	20	20	20	20	20	P
Warmwasseranteil%	10	10	10	10	10	P
A.Temperatur Avg	12	12	12	12	12	P
A.Temperatur Amp	-12	-12	-12	-12	-12	P
Gradtagzahl	3177.436	3177.436	3177.436	3177.436	3177.436	X
PV Amp/Avg	-0.79	-0.79	-0.79	-0.79	-0.79	P
PV_VLstd	1000	1000	1000	1000	1000	P
FL_p_GWp	10	10	10	10	10	P
WK Amp/Avg	0.59	0.59	0.59	0.59	0.59	P
WK_VLstd	2500	2500	2500	2500	2500	P

NL_p_WR	5	5	5	5	5	P
Anteil NL PV	0.82	0.82	0.885	1	0	P
Eff Amp/Avg	-0.542	-0.542	-0.631	-0.79	0.59	X
Geoth NL	0	0.1	0.1	0.1	0	P
Geoth VLstd	8760	8760	8760	8760	8760	P
Strom p.Jahr	4.177	4.177	4.177	4.177	4.177	P
Strom amp/avg	0	0	0	0	0	P
Energie als H2	1.71	1.71	1.71	1.71	1.71	P
Ergebnis						
Strom als PE	9.985	11.95	10.14	10.84	8.525	X
Energie aus WK	3.538	4.234	2.485	0	8.525	X
Nennleistung für WK	1.415	1.693	0.9941	0	3.41	X
Anzahl der Windräder	283.1	338.7	198.8	0	682	X
Energie aus PV	6.447	7.715	7.65	10.84	0	X
Nennleistung für PV	6.447	7.715	7.65	10.84	0	X
Fläche km2 FFPV	64.47	77.15	76.5	108.4	0	X
PV/Heizlast						
Klimaneutrale Geb.	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46	X
Nennleistung AufDach	3.284	3.284	3.284	3.284	3.284	X
verb.Nennleistung FFPV	3.163	4.43	4.366	7.554	-3.284	X
Kurzzeitspeicher	3.52E-03	3.52E-03	3.52E-03	3.52E-03	3.52E-03	X
H2 Überschuss	1.71	1.71	1.71	1.71	1.71	X
H2 für BHKW	1.588	3.645	1.856	2.55	0.2378	X
H2 Elektrolyse	3.298	5.355	3.566	4.26	1.948	X
Elys el.Leistung	1.281	2.251	1.41	1.738	0.6153	X
Wasserbedarf	7.53E+05	1.22E+06	8.15E+05	9.73E+05	4.45E+05	X
Strom Leistung DS	0.4768	0.4768	0.4768	0.4768	0.4768	X
Strom Direkt	4.911	3.71	4.649	4.285	5.529	X
Strom Elektrolyse	5.075	8.239	5.486	6.553	2.997	X
Strom aus BHKW	0.529	1.214	0.6181	0.8491	7.92E-02	X
Strom für Wärme	1.263	0.747	1.091	0.957	1.431	X
BHKW el.Leistung	0.2981	0.6084	0.3395	0.4447	7.78E-02	X
WP Leistung	0.3433	0.2476	0.2896	0.2635	0.4554	X
Waerme tot(real)	7.14	7.14	7.14	7.14	7.14	X
Wärme Elektrolyse	1.776	2.884	1.92	2.294	1.049	X
Wärme aus BHKW	1.06	2.431	1.238	1.701	0.1586	X
Waerme durch Strom	5.229	3.18	4.482	3.974	5.982	X
Abwaerme genutzt	1.911	3.128	1.826	2.334	1.158	X
Abwaerme ungenutzt	0.9251	2.187	1.332	1.66	4.99E-02	X
Abwärme Elektrolyse genutzt	0.8509	0.6977	0.5881	0.6335	1.049	X
Abwärme Elektrolyse ungenutzt	0.9251	2.187	1.332	1.66	0	X
Abwärme BHKW genutzt	1.06	2.43	1.238	1.701	0.1088	X
Abwärme BHKW ungenutzt	0	0	0	0	4.99E-02	X
Geothermie genutzt	0	0.832	0.832	0.832	0	X
Geothermie ungenutzt	0	4.40E-02	4.40E-02	4.40E-02	0	X
Rückstrombedarfsfaktor A	1.208	1.364	1.226	1.311	1.031	X
Ber. H-Erzeug./Rückverstr	(56/308)	(62/302)	(57/307)	(60/304)	(148/216)	X
Bereich Wärmeüberschuss	(116/248)	(104/260)	(110/254)	(108/256)	(161/203)	X
Energieeinheit	TWh	TWh	TWh	TWh	TWh	P
Leistungseinheit	GW	GW	GW	GW	GW	P

Saisonale Verläufe

Abb. A1: Zeitverlauf von Aussentemperatur (in °C) und Arbeitszahlen für Szenario 1

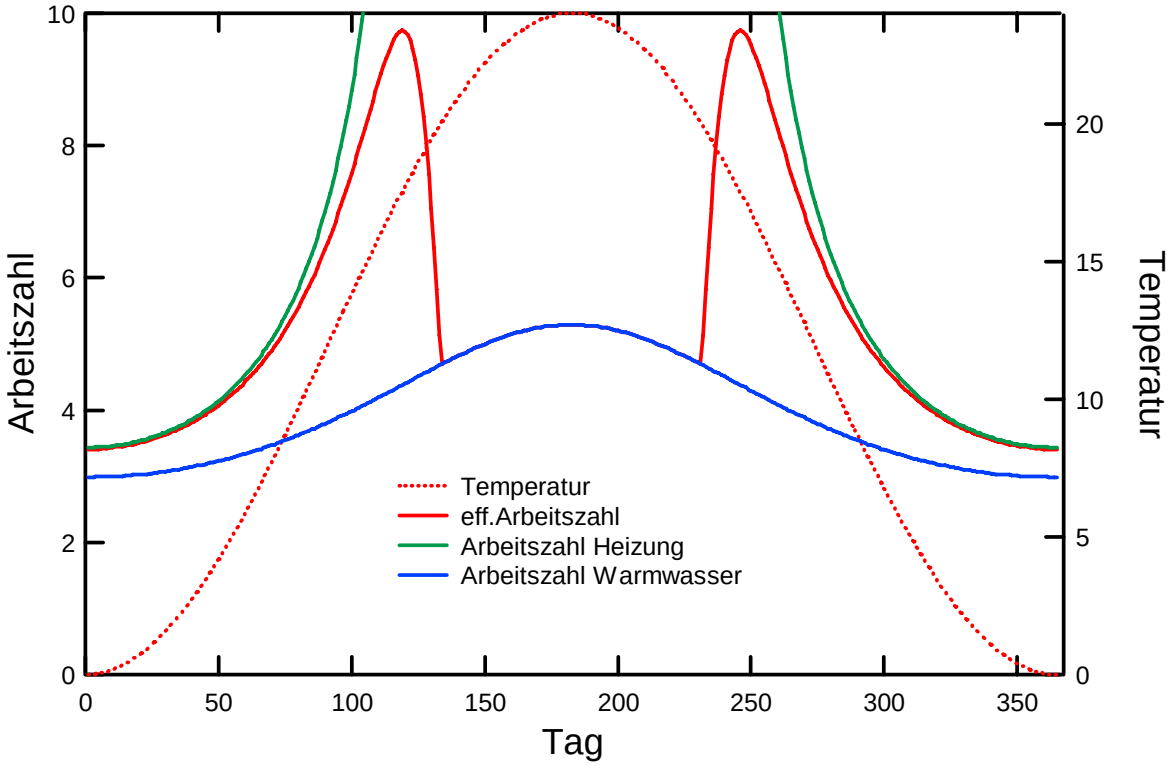


Abb. A2: Zeitverlauf von Erzeugungs- und Bedarfskurven (in GW) für Strom von Szenario 1

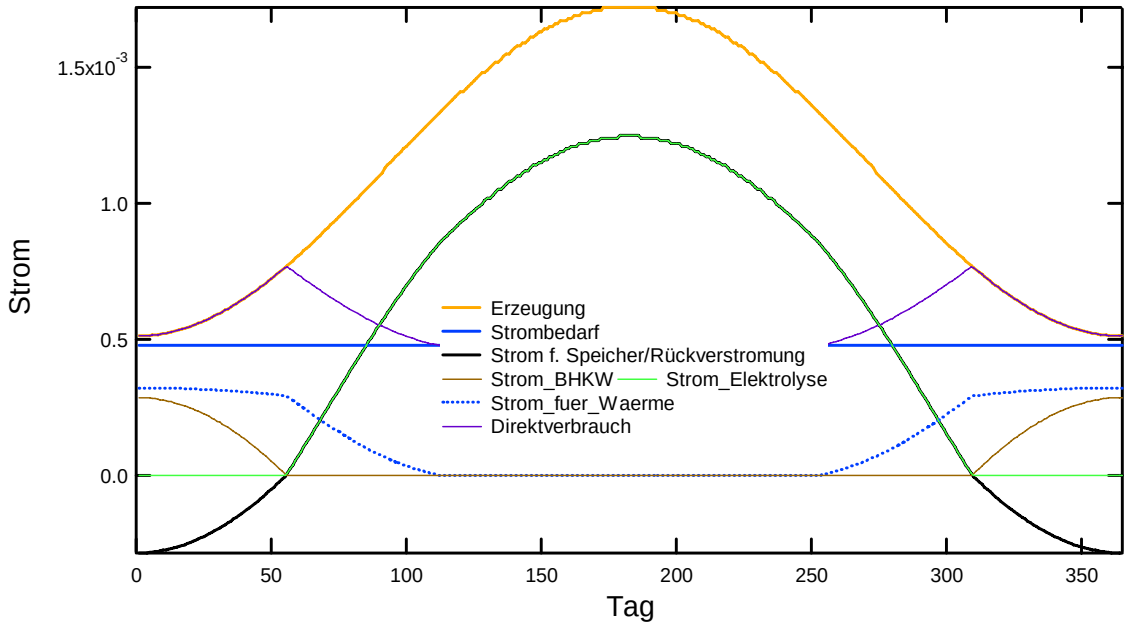


Abb. A3: Zeitverlauf von Erzeugungs- und Bedarfskurven (in GW) für Wärme von Szenario 1. Jahresbedarf Warmwasser ist 10% vom Heizbedarf. Die Heizung ist abgestellt, wenn die Aussentemperatur über 20°C steigt. Die Innentemperatur wird konstant mit 20°C angenommen.

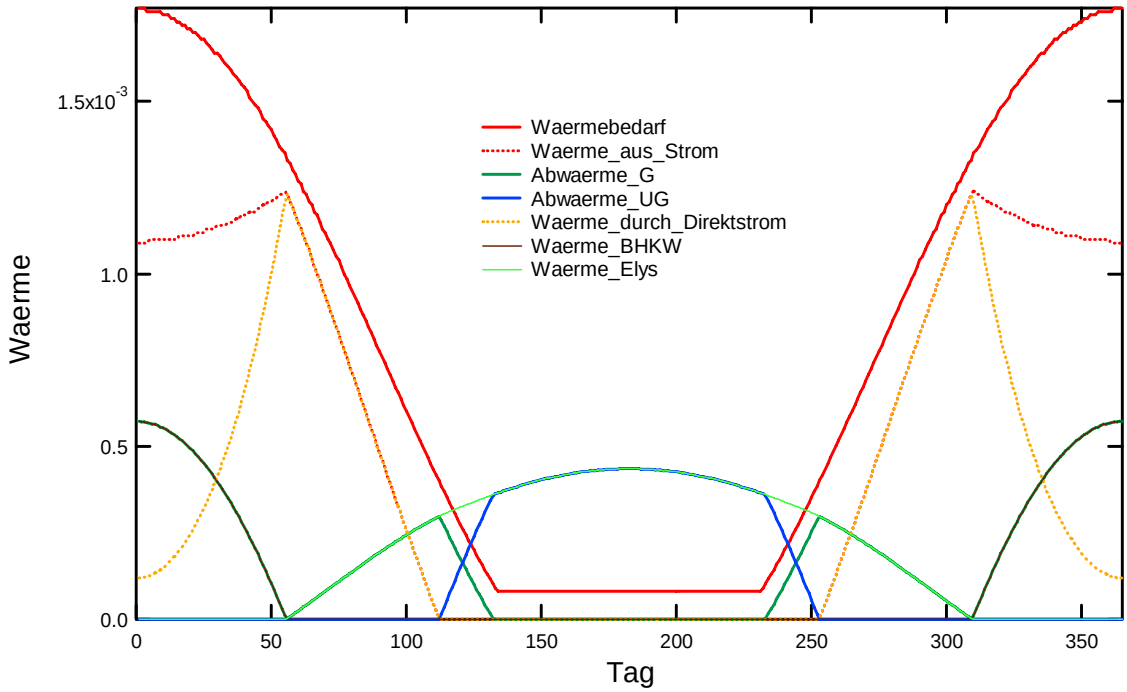
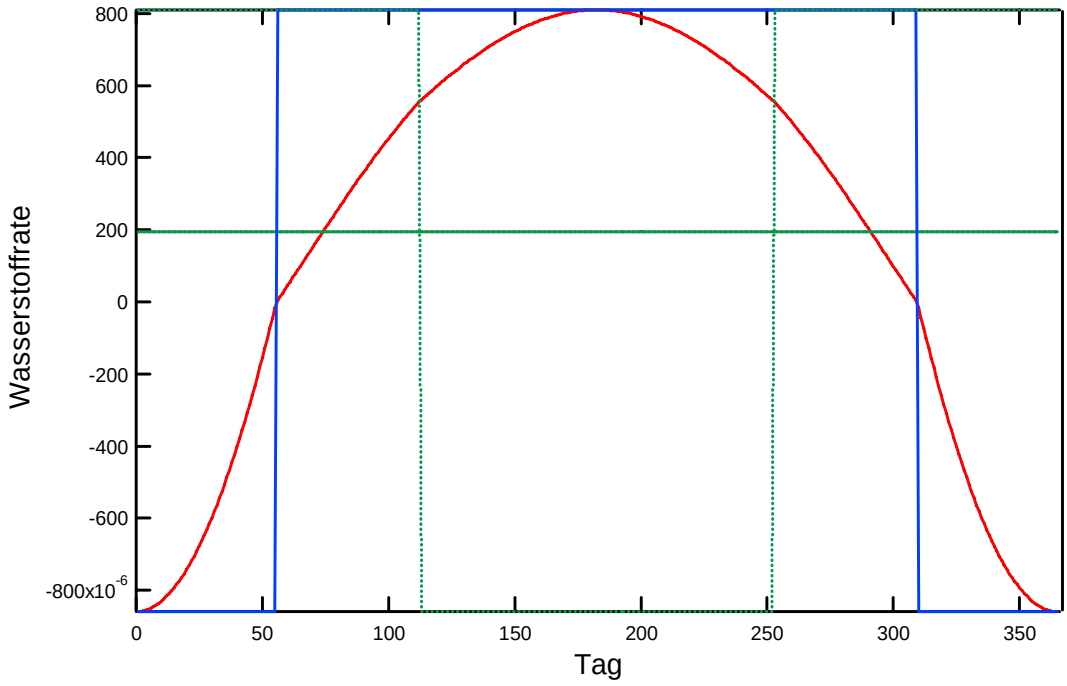



Abb. A4: Zeitverlauf der Erzeugungsrate von Wasserstoff (in GW) von Szenario 1. Die senkrechten Linien zeigen die Zeitpunkte an, an denen der Wechsel von Direktstrom zu Rückverstromung vorgenommen wird (blau) bzw. an denen Abwärme nicht mehr genutzt werden kann (grün). Die grüne waagrechte Linie zeigt die vorgegebene Rate (in GW) an, mit welcher Wasserstoff zusätzlich (nach aussen) als Brennstoff zur Verfügung zu stellen ist.