



FREY · HAGER · JENSSSEN ·
KIENZLEN · SCHMIDT

Photovoltaik erfolgreich gestalten

Leitfaden für Kommunen

3

Energiewende in Kommunen

Städtetag Baden-Württemberg · Landkreistag Baden-Württemberg ·
KEA Klimaschutz- und Energieagentur Baden-Württemberg ·
Hochschule für öffentliche Verwaltung Kehl (Hrsg.)



FREY · HAGER · JENSSEN ·
KIENZLEN · SCHMIDT

Photovoltaik erfolgreich gestalten

Leitfaden für Kommunen

 BOORBERG

Photovoltaik erfolgreich gestalten

Leitfaden für Kommunen

Herausgeber

Städtetag Baden-Württemberg
Landkreistag Baden-Württemberg
KEA Klimaschutz- und Energieagentur
Baden-Württemberg GmbH
Hochschule für öffentliche Verwaltung Kehl

Schriftleiter

Prof. Dr. Michael Frey

Bearbeiter

Prof. Dr. Michael Frey
Prof. Dr. Gerd Hager
Dr. Till Jenssen
Dr.-Ing. Volker Kienzlen
Maike Schmidt

|BOORBERG

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek | Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über www.dnb.de abrufbar.

ISBN 9783415072206

© 2022 Richard Boorberg Verlag

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt.

Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlages. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Titelfoto: © RBV/lassedesignen – Fotolia

E-Book-Umsetzung: abavo GmbH, Nebelhornstraße 8, 86807 Buchloe

Richard Boorberg Verlag GmbH & Co KG | Scharrstraße 2 | 70563 Stuttgart
Stuttgart | München | Hannover | Berlin | Weimar | Dresden
www.boorberg.de

Vorwort der Herausgeber

Spätestens mit Beginn des brutalen Angriffskriegs der Russischen Föderation auf die Ukraine ist deutlich geworden, dass der Ausbau der Erneuerbaren Energien nicht nur ein wesentlicher Baustein bei der Bewältigung der globalen Klimakrise ist. Vielmehr tragen die Renewables zugleich auch die Chance in sich, uns als Demokratien unabhängiger von Rohstoffimporten aus autokratischen Drittstaaten zu machen, und damit unsere energetische Souveränität im doppelten Wortsinn nachhaltig zu steigern.

Vor diesem Hintergrund erscheint es nur folgerichtig, wenn in der Schriftenreihe „Energiewende für Kommunen“ nach dem ersten Band, in dem die Handlungsfelder von Kommunen im Kontext der Energiewende betrachtet wurden, und dem zweiten Band, der sich mit dem schwierigeren Thema der Erzeugung erneuerbaren Stroms aus Windkraft auseinandersetzt hat, nunmehr im dritten Band die Photovoltaik als zweite große Säule der Erzeugung erneuerbaren Stroms in den Fokus gerückt wird. Wieder werden technische, rechtliche und planerische Fragen diskutiert und zahlreiche Praxisbeispiele beleuchtet. Dabei wird erneut auf dezidierte Anwendungsorientierung und einen konsequent kommunalen Blickwinkel Wert gelegt. Dies ist aus Sicht der Herausgeberschaft – Städtetag Baden-Württemberg, Landkreistag Baden-Württemberg, KEA Klimaschutz- und Energieagentur Baden-Württemberg GmbH und Hochschule für öffentliche Verwaltung Kehl – das Markenzeichen dieser besonderen Schriftenreihe und macht auch ihren eigentlichen Mehrwert aus.

Der Dank der Herausgeber geht zuvorderst an die Autorinnen und Autoren dieses Sammelwerks, nämlich an Prof. Dr. Gerd Hager, Dr. Till Jenssen, Dr. Ing. Volker Kienzlen, Maike Schmidt, Maria-Lena Weiss und natürlich an Prof. Dr. Michael Frey, der zugleich die Schriftleitung verantwortete. Danl

gebührt aber auch und einmal mehr dem Richard Boorberg Verlag namentlich Christine Class, für die umsichtige Begleitung nicht nur dieses Buchprojekts, sondern der gesamten Schriftenreihe.

Über Hinweise, Anmerkungen und Verbesserungsvorschläge aus dem Kreis der Leserinnen und Leser freuen sich Autorinnen und Autoren wie auch die Herausgeberschaft. Gerade bei einem derart dynamischen Thema wie den der Energiewende und ihrer Auswirkungen auf die kommunale Ebene ist Feedback besonders wichtig und hilfreich.

A handwritten signature in black ink, appearing to read "Alexis v. Komorowski". The signature is fluid and cursive, with "Alexis" and "v." on the left, "Komorowski" in the middle, and a small flourish at the end.

Prof. Dr. Alexis von Komorowski
Hauptgeschäftsführer
des Landkreistags Baden-Württemberg

Autoren- und Schriftleiterverzeichnis

Prof. Dr. Michael Frey, Mag. rer. publ.

Professor für Öffentliches Recht an der Hochschule für öffentliche Verwaltung Kehl. Prof. Dr. Frey wurde in Offenburg geboren. Nach Abitur und Wehrdienst im Eurokorps studierte er von 1996–2001 Rechtswissenschaften an der Universität Freiburg und Verwaltungswissenschaften an der Deutschen Hochschule für Verwaltungswissenschaften in Speyer. Rechtswissenschaftliche Promotion an der Universität Freiburg 2009. Nach der Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Wirtschaftsrecht, Arbeits- und Sozialversicherungsrecht an der Universität Freiburg verschiedene Tätigkeiten im Regierungspräsidium Freiburg in der Stabstelle für Grenzüberschreitende Zusammenarbeit und Europäische Angelegenheiten sowie als Koordinierungsreferent und zuletzt Leiter des Kompetenzzentrums Energie. Seit 2013 Tätigkeit als Professor für Öffentliches Recht an der Hochschule für öffentliche Verwaltung Kehl mit den Forschungsschwerpunkten Rechtsfragen der Erneuerbaren Energien und Grenzüberschreitende Zusammenarbeit und Europa. Zahlreiche Veröffentlichungen zu energieverwaltungsrechtlichen Fragestellungen.

Prof. Dr. Gerd Hager

studierte Rechts- und Verwaltungswissenschaften an den Universitäten Heidelberg, Speyer und Konstanz. Er ist Vater von zwei Töchtern. Nach seiner Assistentenzeit und der Promotion mit einem verfassungsrechtlichen Thema bei Professor Dr. Hartmut Maurer in Konstanz arbeitete er im Dienst des Landes Baden-Württemberg bei verschiedenen Landratsämtern, den

Regierungspräsidium Karlsruhe und dem Innenministerium Baden-Württemberg. Er absolvierte den 4. Kurs der Führungsakademie des Landes Baden-Württemberg (1989/90). Auslandsprojekte führten ihn in die Vereinigten Staaten von Amerika, nach Indonesien, Weißrussland und Aserbaidschan. Bis 1997 arbeitete er als Erster Landesbeamter im Enzkreis danach war er stellvertretender Leiter der Bauabteilung des Regierungspräsidiums Karlsruhe. Im Jahr 2001 wurde Gerd Hager zum Direktor des Regionalverbandes Mittlerer Oberrhein gewählt und 2009 sowie 2017 in seinem Amt bestätigt. Gleichzeitig ist er Geschäftsführer der grenzüberschreitenden Touristik-Gemeinschaft Baden-Elsass-Pfalz, des Initiativkreises Metropolitaner Grenzregionen (IMeG) und der Arbeitsgemeinschaft der Regionalverbände in Baden-Württemberg. Gerd Hager lehrt als Honorarprofessor am Karlsruher Institut für Technologie und hat zahlreiche Beiträge zum Gemeinderecht, Baurecht und Raumordnungsrecht veröffentlicht. Er ist u.a. Herausgeber eines Kommentars zum Landesplanungsrecht Baden-Württemberg, Mitherausgeber einer sechsbändigen Baurechtssammlung und Autor von Kommentaren zur Landesbauordnung, zum Raumordnungsgesetz und zum Denkmalrecht Baden-Württemberg.

Dr. Till Jenssen

Till Jenssen ist Leiter des Referats Erneuerbare Energien am Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg. Zuvor war er in der Regionalplanung und -entwicklung (2018 bis 2020), der Umweltverwaltung des Landes Baden-Württemberg (2012 bis 2018), der Energieforschung (2006 bis 2012), der GIS-Analyse (2004 bis 2006) und der Umweltkommunikation (2002 bis 2004) tätig. Herr Jenssen hat das Studium der Raumplanung absolviert und wurde 2009 promoviert. Er hat an de-

Universität Stuttgart, der Technischen Universität Dortmund und der Technischen Universität München Lehraufgaben in den Themenfelder Umwelt- und Infrastrukturplanung, Erneuerbare Energien und Nachhaltigkeit übernommen.

Dr.-Ing. Volker Kienzlen

Dr.-Ing. Volker Kienzlen ist seit 2006 Geschäftsführer der KEA Klimaschutz und Energieagentur Baden-Württemberg GmbH.

Von 1987 bis 1991 war er als Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) in Stuttgart tätig.

Von 1991 bis 1993 Sachgebietsleiter Wärmewirtschaft im Amt für Umweltschutz der Stadt Stuttgart tätig, anschließend bis 2001 Abteilungsleiter Energiewirtschaft am Amt für Umweltschutz der Stadt Stuttgart.

Des Weiteren bekleidete er von 1995 bis 2005 die Position als Stellvertretender Vorsitzender des Arbeitskreises Energieeinsparung im Deutschen Städtetag. 2005 bis 2006 Vorsitzender des Energienetzwerks des Rats der Gemeinden und Regionen Europas (RGRE).

Herr Dr. Kienzlen absolvierte das Studium des Maschinenbaus an der Universität Stuttgart und University of Colorado/USA mit dem Schwerpunkt Technologien zur Energieeinsparung und thermische Solarenergienutzung 1992 promovierte er an der Universität Stuttgart.

Dipl.-Wirt.-Ing. Maike Schmidt

ist seit November 2014 Leiterin des Fachgebiets Systemanalyse im Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg, den sie zuvor seit Januar 2006 als wissenschaftliche Mitarbeiterin angehörte. In

Fachgebiet Systemanalyse des ZSW sind ihre Arbeitsschwerpunkte Potenzial- und Marktanalysen zu erneuerbaren Energien, die Erarbeitung von Energieszenarien, die Entwicklung von Markteinführungsstrategien für neue Technologien, die Ausgestaltung, Evaluierung und Weiterentwicklung von Förderinstrumenten sowie insbesondere die Beobachtung und Bewertung der energiewirtschaftlichen Entwicklung (Monitoring). All diese Aspekte setzt sie zielgerichtet im Rahmen der Politikberatung ein. Frau Schmidt leitete und koordinierte zudem einige große Projekte mit einer hohen Anzahl an Akteuren und hoher politischer Bedeutung, darunter mehrere Vorhaben zur Vorbereitung und Begleitung bei der Erstellung der EEG-Erfahrungsberichte 2007, 2011 und 2014 im Auftrag des BMWi. Hierzu zählten teilweise auch die Spartenvorhaben zur Photovoltaik. Außerdem fungiert sie als Assistenz von Prof. Dr. Frithjof Staiß im Rahmen seiner Funktion als Mitglied der Kommission zum Monitoringprozess „Energie der Zukunft“ und unterstützt die Erarbeitung der Stellungnahmen der Experten-Kommission zu den Monitoring-Berichten bzw. Fortschrittsberichten der Bundesregierung seit 2012.

Ihr Studium zum Wirtschaftsingenieurwesen mit Schwerpunkt Energie- und Umweltmanagement schloss sie an der Universität Flensburg und der North Dakota State University in Fargo, North-Dakota, ab.

Maria-Lena Weiss

Rechtsanwältin Maria-Lena Weiss, mag. rer. publ. wurde in Tuttlingen geboren. Nach dem Abitur studierte sie von 2000–2005 Rechtswissenschaften an der Universität Konstanz und von 2010 bis 2011 Verwaltungswissenschaften an der Universität Speyer. Nach Studium und Referendariat arbeitete Frau Weiss drei Jahre im Büro des Europaabgeordneten Dr. Andreas Schwab im Europäischen Parlament. Sei-

2011 ist sie Rechtsanwältin mit Tätigkeitsschwerpunkt im Energierecht bei spezialisierten Kanzleien in München, Freiburg und Stuttgart. Seit 2020 ist sie neben ihrer Anwaltstätigkeit wissenschaftliche Mitarbeiterin bei Prof. Dr Michael Frey am Kehler Institut für angewandte Forschung (KIAF).

Abkürzungsverzeichnis

Abb.	Abbildung
AWZ	Ausschließliche Wirtschaftszone
BauGB	Baugesetzbuch
BauNVO	Baunutzungsverordnung
BBodSchG	Bundesbodenschutzgesetz
BImSch	Bundesimmisionsschutz
BIPV	Gebäudeintegrierte Photovoltaik (building-integrated photovoltaics)
BNatSchG	Bundesnaturschutzgesetz
B-Plan	Bebauungsplan
B-Planänderung	Bebauungsplanänderung
bspw.	beispielsweise
BVerwG	Bundesverwaltungsgericht
BW	Baden-Württemberg
BWGZ	Die Gemeinde (Organ des Gemeindetags Baden-Württemberg)
bzw.	beziehungsweise
ca.	circa
CdTe	Cadmiumtellurid
CEF-Maßnahmen	Maßnahmen zur dauerhaften Sicherung der ökologischen Funktion (Continuous Ecological Functionality-Maßnahmen)
CIGS	Verbindungshalbleiter aus Kupfer, Indium, Gallium und Selen
cm	Zentimeter
d.h.	das heißt

DirektZahlDurchfV	Direktzahlungen Durchführungsverordnung
DSchG	Denkmalschutzgesetz
e.G.	eingetragene Genossenschaft
e.V.	eingetragener Verein
eea	European Energy Award
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
EVU	Energieversorgungsunternehmen
FNP	Flächennutzungsplan
Fraunhofer ISE	Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme (ISE)
GbR	Gesellschaft bürgerlichen Rechts
GE	Gewerbegebiet
GEG	Gebäudeenergiegesetz
GG	Grundgesetz
ggf.	gegebenenfalls
GI	Industriegebiet
GmbH	Gesellschaft mit beschränkter Haftung
grds.	grundsätzlich
GW	Gigawatt
ha	Hektar
HGÜ	Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung
i.d.R.	in der Regel
i.S. d.	im Sinne des
i.S. v.	im Sinne von
i.V.m.	in Verbindung mit
InnAusV	Innovationsausschreibungsverordnung
jur.	juristisch
KfW	Kreditanstalt für Wiederaufbau
Kfz	Kraftfahrzeug

KSG	Klimaschutzgesetz
kW	Kilowatt
kWp	Kilowatt-Peak
LBO	Landesbauordnung
LEADER	Europäisches Förderprogramm (Liaison entre actions de développement de l'économie rurale)
LEP	Landesentwicklungsplan
LplG BW	Landesplanungsgesetz Baden-Württemberg
LVwVfG BW	Landesverwaltungsverfahrensgesetz Baden-Württemberg
MBO	Musterbauordnung
MD	Dorfgebiet
MDW	dörfliches Wohngebiet
MI	Mischgebiet
MK	Kerngebiet
MU	urbanes Gebiet
MW	Megawatt
MWh	Megawattstunde
NABEG	Netzausbaubeschleunigungsgesetz
OVG	Oberverwaltungsgericht
PlanZV	Planzeichenverordnung (= Verordnung über die Ausarbeitung der Bauleitpläne und die Darstellung des Planinhalts)
PS	Plansatz
PV	Photovoltaik
PV-FFA	Photovoltaik-Freiflächenanlagen
PVT-Kollektor	Photovoltaik-Thermie-Kollektor
Rn.	Randnummer
ROG	Raumordnungsgesetz

RVO	Rechtsverordnung
s.	siehe
Si	Silizium
SO	Sondergebiete, z.B. Solaranlagen als Hauptzweckbestimmung des Baugebiets
sog.	sogenannt
THG	Treibhausgas
TWh	Terawattstunde
u.a.	unter anderem
usw.	und so weiter
UV	Umweltverträglichkeit
UVP	Umweltverträglichkeitsprüfung
VGH	Verwaltungsgerichtshof
VwV TB	Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen
WA	allgemeines Wohngebiet
WB	besonderes Wohngebiet
WN	Waiblingen
WS	Kleinsiedlungsgebiet
z.B.	zum Beispiel
ZSW	Zentrums für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg

Kapitel 1

Technische und energiewirtschaftliche Einordnung der Photovoltaik

Till Jenssen/Volker Kienzlen

Sonne ist Lebensgrundlage

Die Einstrahlung der Sonne ist die Grundlage allen Lebens auf der Erde. Der Anteil der Strahlungsenergie von 1368 W/m^2 , der auf die Erdoberfläche trifft bewirkt die auf der Erde vorherrschenden Temperaturen vor durchschnittlich 15°C . Ohne die Sonnenstrahlung läge die Durchschnittstemperatur der Erde bei -18°C . Die Solarstrahlung ist weiterhin die Energiequelle der Photosynthese und damit für das Wachstum der Pflanzen und sorgt zudem für Wind und Niederschläge. Für Biomasse Windenergie und Wasserkraft ist somit ebenfalls die solare Einstrahlung verantwortlich. In Form von Solarzellen und Solarkollektoren kann die solare Einstrahlung jedoch auch direkt zur Strom- oder Wärmebereitstellung genutzt werden. [1] Der vorliegende Leitfaden konzentriert sich auf photovoltaische Anwendungen, also auf die direkte Erzeugung von Strom aus Sonnenlicht. Die jährliche eingestrahlte Energie der Sonne liegt etwa um das 11.000-Fache über dem weltweiten Jahresprimärenergieverbrauch. Innerhalb Deutschlands fällt das solare Strahlungsangebot in Süddeutschland am höchsten aus. [2]

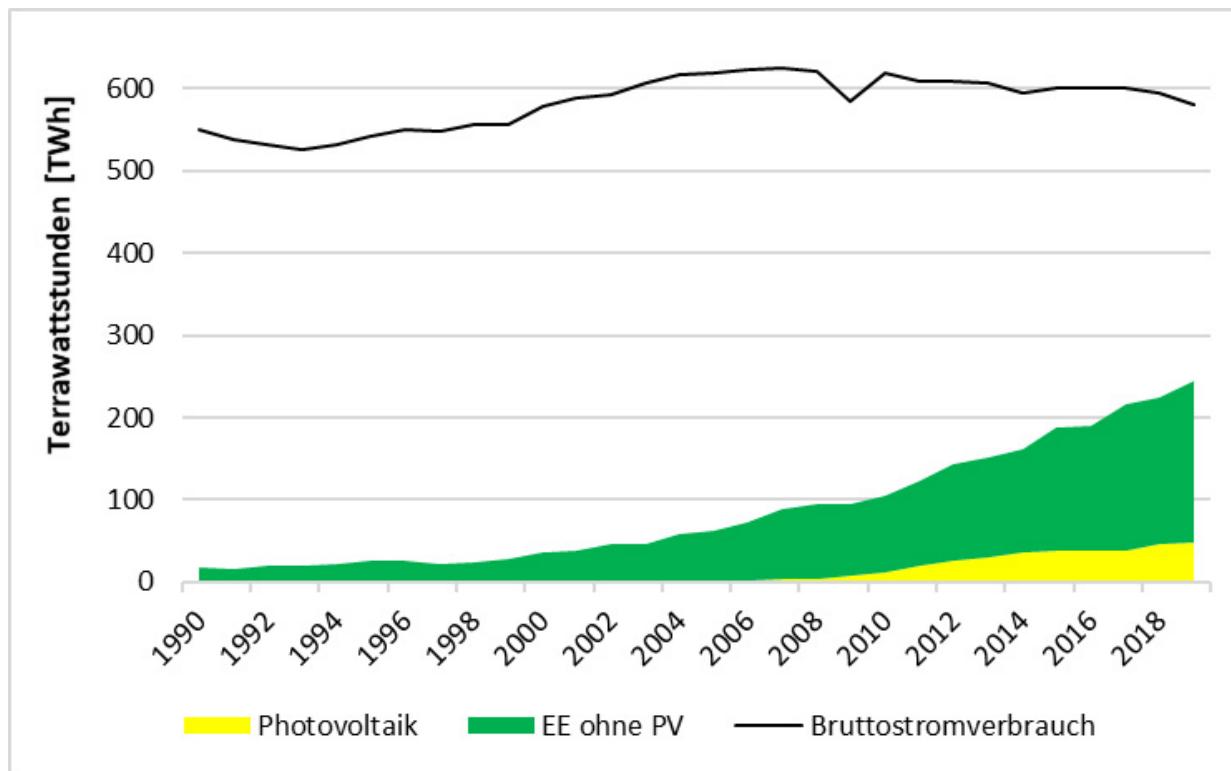


Abb. 1: Zeitreihe zur Entwicklung der Erneuerbaren Energien seit 1990

In den vergangenen drei Dekaden, vor allem aber seit 2010, hat die Bedeutung von Photovoltaik erheblich zugenommen. 1990 leistete die Photovoltaik mit 1 Gigawattstunde Jahresproduktion einen marginalen Beitrag zur Deckung des Stromverbrauches in Deutschland. Mit dem 1.000 Dächer-Programm von 1990 setzte die Bundesregierung einen ersten wichtigen Impuls zum Ausbau, der durch das Stromeinspeisungsgesetz (StromEinspG; ab 1991) und das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG; seit 2000) verstärkt und verstetigt wurde. Wie Abbildung 1 verdeutlicht, hat die Photovoltaik das Nischendasein mittlerweile abgelegt und ist mit einen Beitrag von insgesamt 49.000 Gigawattstunden bzw. 8,6 % an Bruttostromverbrauch zu einer wichtigen Säule der Stromversorgung in Deutschland geworden. [3] [4]

PV ist wichtige Säule der Energieversorgung

Die Nutzung der Photovoltaik kann den Konsistenzstrategien für eine nachhaltige Entwicklung zugeordnet werden. Unter Konsistenz versteht man die Bereitstellung des durch Effizienzmaßnahmen minimierter Energiebedarfs mit erneuerbaren Energien. Konsistenz ergänzt damit die Anstrengungen für mehr Effizienz und Suffizienz. [5] Das Hauptziel der Nutzung erneuerbarer Energien ist es, zur Deckung des Energiebedarfs solche Energieformen zu nutzen, die die natürlichen Lebensgrundlagen des Menschen nicht gefährden. Die Nutzung fossiler Energien ist durch die Emission von CO₂ wesentliche Ursache des Mensch gemachter Klimawandels. Die beginnende Erderhitzung bedroht damit unsere Lebensgrundlagen. Daher muss global die Nutzung fossiler Energieträger beendet werden, die Energieversorgung somit dekarbonisiert, also auf Energieträger umgestellt werden, die keinen zusätzlichen Kohlenstoff in Form von CO₂ in die Atmosphäre entlassen. Die Solarenergie ist hierfür eine technische Lösung mit vielfältigen Vorzügen.

PV mit hoher Flächeneffizienz

Insbesondere beim Vergleich mit Biomasse ist die Flächeneffizienz sehr viel höher. [6] Die Technologie hat zudem den Vorteil, dass Sie während des Betriebs keinerlei Schadstoffemissionen hervorruft. Allerdings treten in den vorgelagerten Prozessen, insbesondere bei der Herstellung der Solarzellen, in einem gewissen Umfang Emissionen auf. Bezuglich der Treibhausgasemissionen (THG) liegt Photovoltaikstrom über den gesamten Lebenszyklus betrachtet bei etwa 67 Gramm pro Kilowattstunde, während sich die THG-Emissionen des Deutschen Strom-Mixes auf 641 Gramm belaufen [7]. Gleichwohl treten bei der Photovoltaiknutzung auch Zielkonflikte auf, die es abzuwägen gilt. Bei Freiflächenanlagen stehen die

Treibhausgasreduktionen etwa den Einwirkungen auf die Kulturlandschaft gegenüber.

Neben der Konsistenzstrategie kann die Photovoltaik-Technologie auch Teil einer Kompensationsstrategie [8] sein, etwa wenn die Solaranlagen an (kosten-)günstigen Orten in einem gemeinsamen System geplant werden. Ein konkretes Beispiel für diese Handlungsstrategie kann etwa in der auf der CSP [9] -Technologie beruhenden Desertec-Initiative gesehen werden.

I. Energiepolitischer Rahmen

Unser Energiesystem befindet sich in einer fundamentalen Umbruchphase. Seit Beginn der Industrialisierung basierte die Struktur auf fossilen oder nuklearen Energieträgern, die zentral bereitgestellt und zum Endkunden geliefert wurden. Bereits in den Siebzigerjahren wuchsen die Zweifel an der Sicherheit der zivilen Kernenergienutzung. Die Kernenergieunfälle von Tschernobyl 1986 und schließlich 2011 in Fukushima führten in Deutschland letztlich zum Kernenergieausstieg.

Daneben ist auch das Bewusstsein über die Probleme gewachsen, die die Nutzung fossiler Energien auf das Weltklima hat. Die Klimaforschung aggregiert in den Berichten des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), macht sehr deutlich, dass der Klimawandel im Wesentlichen von Menschen verursacht ist. Diese Erkenntnis mündete nach zähen Verhandlungen im Weltklimavertrag von Paris, der darauf abzielt, die globale Erwärmung auf 2°, möglichst jedoch auf 1,5° zu begrenzen.

Paris-Ziel braucht PV

Wenn der von 175 Staaten unterzeichnete Vertrag sein Ziel erreichen soll besteht die Notwendigkeit, bis 2050 die Nutzung fossiler Energieträger global vollständig zu beenden. In den kommenden Jahrzehnten wird Deutschland zunächst die Nutzung der Kernenergie beenden, bis spätestens 2038 auch die Nutzung von Kohle. Im Gegenzug soll die regenerative Stromerzeugung schrittweise und deutlich (von 42 % im Jahr 2019) auf einen Anteil von 65 % am Bruttostromverbrauch im Jahr 2030 angehoben werden. Bis 2050 soll die Stromerzeugung schließlich treibhausgasneutral erfolgen. [10] Zu Einhaltung der Klimaziele spricht sich der Koalitionsvertrag der Bundesregierung für einen beschleunigten Ausstieg aus der Kohleverstromung aus. „Idealerweise gelingt das schon bis 2030“ heißt es in Text. Zu erwarten ist, dass nach Anhebung der Ziele der Europäischen Union auch die bundesdeutschen Ziele und die dafür notwendigen Maßnahmen nachgeschärft werden. Die Novellierung des Klimaschutzgesetzes ist ein erster, wichtiger Schritt dazu.

Weniger im öffentlichen Fokus ist die Tatsache, dass nicht nur die Stromerzeugung, sondern auch die Wärmebereitstellung und die Mobilität langfristig ohne fossile Energieträger funktionieren muss. Hier liegen die Zielsetzungen für 2030 jeweils bei 27 %. [11] Limitierender Faktor für die Bereitstellung erneuerbarer Energien ist vielfach – Geothermie und Dachflächenphotovoltaik ausgenommen – die verfügbare Fläche.

Flächenbedarf und Restriktionen

Aus diesem Grund sind einer Ausweitung etwa der Biomassenutzung eng Grenzen gesetzt, auch da je Quadratmeter mit technischen Systemen zur Wärmebereitstellung (Solarkollektoren) oder zur Stromerzeugung (Photovoltaik) rund 50-mal mehr Energie bereitgestellt werden kann als mit der Nutzung von Biomasse. Das Energiesystem der Zukunft wird also sehr viel stärker auf Strom als primären Energieträger angewiesen sein, da andere

erneuerbare Energieformen nicht in ausreichender Menge nachhaltig bereitgestellt werden können. Angesichts dieses limitierten Portfolios gilt es, die Potenziale zur Nutzung der Solarenergie so weit wie möglich auszuschöpfen.

Für den zentralen Nachteil des Energieträgers Strom, nämlich die Schwierigkeit ihn zu speichern, sind technische Lösungen vorhanden. Batteriespeicher werden zunehmend leistungsfähiger, aber auch wirtschaftlich attraktiver. Noch ist die Speicherung einer Kilowattstunde Wärme aber etwa um den Faktor 100 günstiger als der einer Kilowattstunde Strom.

Die nachfolgende Grafik zeigt, dass das sich jetzt entwickelnde Energiesystem sehr viel vermischter sein wird als bisher und nur durch eine Kopplung der Sektoren Strom, Wärme und Mobilität stabil sein kann. Wo immer möglich wird Strom direkt genutzt, in klassischer Stromanwendungen, im Mobilitätssektor mit sehr hohen Wirkungsgraden aber auch im Wärmesektor mithilfe von Wärmepumpen. Daher werden Wärmespeicher Bindeglieder für die Sektorkopplung werden. Steht viel Strom im Netz zur Verfügung, können Wärmespeicher mithilfe von Wärmepumpen beladen werden. Umgekehrt können Blockheizkraftwerke oder langfristig Brennstoffzellen mit hohen Wirkungsgraden dann Strom erzeugen, wenn Sonne und Wind keine Leistung bereitstellen und gleichzeitig Wärmebedarf besteht.

Energiewende erfordert mehr Strom

Schließlich wird langfristig Wasserstoff und daraus erzeugte, synthetische Energieträger (PtG, PtL) einerseits im Schwerlastverkehr und der chemischen Industrie sowie für eine CO₂-freie Stahlerzeugung benötigt, andererseits werden Anlagen zur Kraft-Wärme-Kopplung ebenfalls in Zukunft mit solchen synthetischen, erneuerbaren Energieträgern betrieben („grüne“

Gas“). [12] Unser Energiesystem ist also mitten im Umbau weg von großen zentralen Kraftwerken, die elektrische Energie bereitstellen und in eine Richtung zum Verbraucher transportiert haben hin zu einer sehr vernetzteren Struktur. Da fossile Energieträger per se speicherbar sind, muss die zeitliche Entkopplung von Erzeugung und Bedarf durch Aufbau entsprechender Speicherkapazitäten gewährleistet werden. [13]

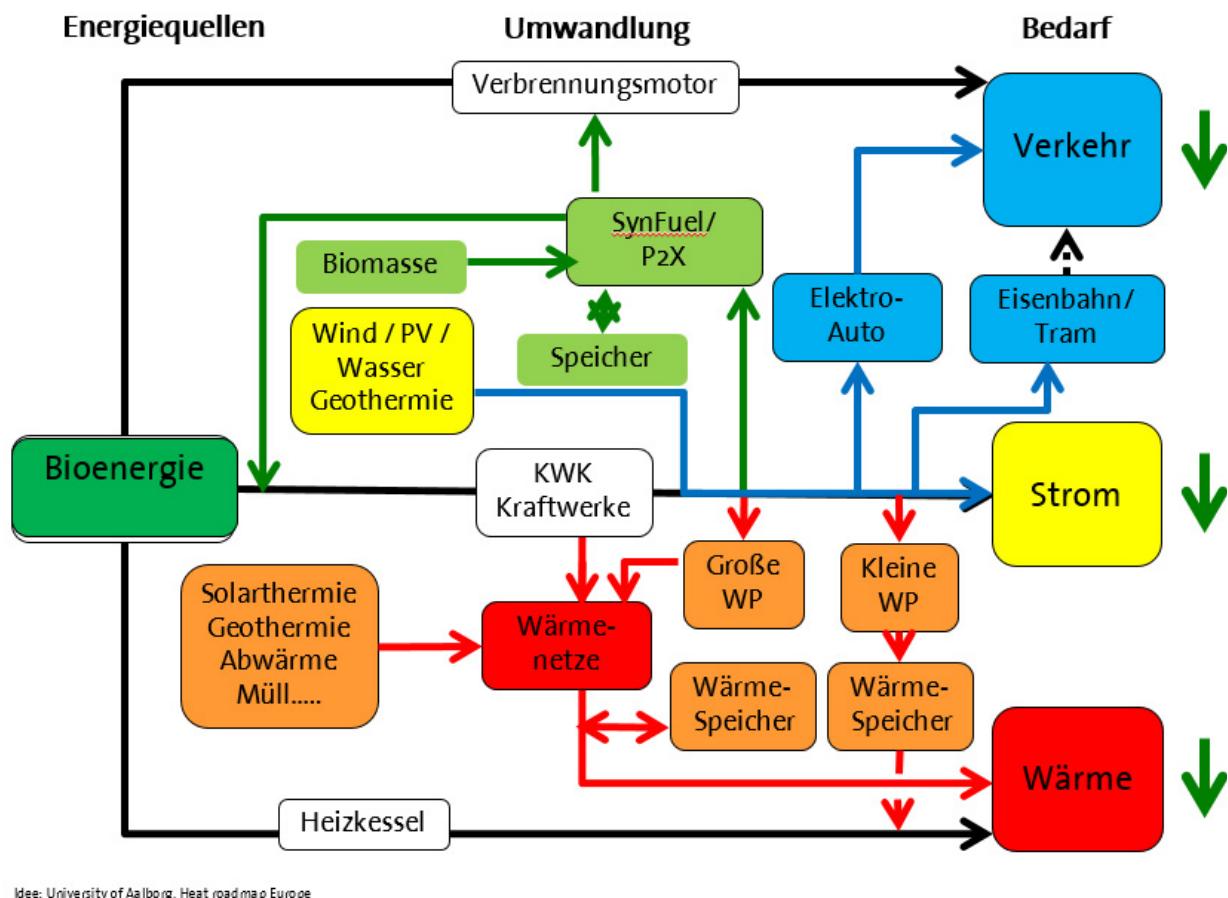


Abb. 2: Vermischte Struktur im Energiesystem der Zukunft13

Dies macht deutlich, dass in der Zukunft der Bedarf an sauberem, CO₂-freiem erzeugtem Strom erheblich zunehmen wird. Mit anderen Worten heißt dies, dass ein massiver Ausbau an Photovoltaikleistung erforderlich ist, damit die

Energiewende gelingen kann. Eine verbrauchernahe Erzeugung ist sinnvoll um einerseits die Versorgungssicherheit zu steigern und andererseit Transportverluste sowie entsprechende Infrastruktur so knapp wie möglich dimensionieren zu können.

PV vermeidet Energieimporte

Jede regional erzeugte oder auch vermiedene Kilowattstunde senkt den Bedarf an Energieimporten und ist damit ein Beitrag zur Steigerung der Resilienz, der Robustheit unseres Energiesystems, gerade in Krisensituationen. Städte und Gemeinden sind daher in ihren verschiedenen Rollen gefordert, selbst in die photovoltaische Stromerzeugung zu investieren, vor allem aber die Rahmenbedingungen dafür zu schaffen, dass Investitionen ermöglicht werden. Letztlich ist dies auch eine Form der Wirtschaftsförderung. Gerade Anlagen auf Gebäuden werden in aller Regel vom örtlichen Handwerk installiert und gewartet. Mithilfe des Wertschöpfungsrechners lässt sich die Auswirkung von Investitionen in Erneuerbare Energien auf die lokale Wirtschaftskraft überprüfen. [\[14\]](#)

In gemeinderätlichen Gremien wird im Zusammenhang mit dem Ausbau erneuerbarer Energien das Ziel diskutiert, als Kommune autark werden zu wollen. Diese Diskussion geht jedoch am Kern der Herausforderung Energiewende vorbei. Ziel des Umbaus unseres Energiesystems ist nicht die Autarkie, also völlige Unabhängigkeit von anderen – egal ob mit dem Betrachtungshorizont Kommune oder Bundesland oder einer Nation. Martin Sawillion bespricht in einem Aufsatz in der BWGZ die Sinnhaftigkeit von Autarkie auf kommunaler Ebene. [\[15\]](#) Autarkie ist für eine Forschungsstation in der Arktis oder eine entlegene Berghütte wichtig, um jederzeit die Versorgung sicherstellen zu können. Dazu sind sehr hohe Speicherkapazitäten erforderlich. Lokale Autarkie auf kommunaler Ebene ist für unser vernetztes Energiesystem kein anzustrebendes Ziel. Sinnvoll ist e

aber durchaus, den letztlich vollständig auf Erneuerbaren Energien basierenden Eigenversorgungsgrad zu steigern.

Hohe Eigenversorgung anstreben

Insbesondere in städtischen Ballungsräumen wird es nicht möglich sein, den Energiebedarf zu wesentlichen Teilen lokal zu erzeugen. Daher werden ländliche Räume die Versorgung von Ballungsräumen mit übernehmen müssen. Auch deswegen ist eine Autarkie des ländlichen Raums kein sinnvolles Ziel. Sie müssen zu Energieexportregionen werden.

II. Bau- und Anlagenformen, Anwendungsbereiche

Bei der Nutzung von Solarenergie wird zwischen solarthermischen Systemen und Photovoltaiksystemen unterschieden. Hier sollen photovoltaische, also Strom erzeugende Systeme behandelt werden, auch wenn Solarwärmesysteme beispielsweise in kommunalen Nahwärmennetzen ebenfalls eine wichtige Rolle für die Energiewende spielen kann.

Wirkungsgrad steigt

Solarzellen wandeln kurzwellige Strahlungsenergie mit dem sog. photovoltaischen Effekt in elektrische Energie um. Unter dem Einfluss von Licht (Photonen) werden bei bestimmten übereinander angeordneten Halbleiterschichten Ladungsträger freigesetzt, die als Elektronen über einer elektrischen Leiter abfließen können. Die Wirkungsgrade von Solarzellen differieren je nach verwendetem Halbleitermaterial. Dünnschichtzellen erreichen 10 bis 12 %, polykristalline Zellen 13 bis 16 % und monokristalline Zellen 18 bis 22 %. Im Labormaßstab können Wirkungsgrade von über 40 %

erreicht werden. Die Solarzellen werden jeweils in Reihe geschaltet zu Solarmodulen verbaut.

Solarmodule haben eine Standardgröße von 100 x 160 Zentimetern mit Abweichungen von wenigen Millimetern je nach Hersteller. Dies hat damit zu tun, dass die Standard-Solarzellen ebenfalls praktisch gleich groß sind. Daneben ist ein Wechselrichter erforderlich, der die Gleichspannung der Solarzellen in die übliche Wechselspannung wandelt. Nur vollständig besonnte Module liefern Strom. Sobald also eine Zelle im Schatten beispielsweise eines Kamins liegt, liefert das gesamte Modul keinen Strom mehr.

Anlage = Modul + Wechselrichter + Zähler

Mithilfe sogenannter Leistungsoptimierer lässt sich verhindern, dass alle Module, die an einem Wechselrichter zu einem String in Reihe geschaltet sind, keinen Strom mehr liefern. Vielfach wird der Wunsch geäußert, mit einer Solaranlage vor Stromausfällen geschützt zu sein. In der Regel sind jedoch Wechselrichter nicht für einen Notstrombetrieb geeignet. Technische Lösungen dafür sind jedoch am Markt vorhanden. Bei der hoher Zuverlässigkeit des deutschen Stromnetzes sind notstromfähige Solaranlagen nur in wenigen Sonderfällen wirtschaftlich vertretbar. In notstromfähigen Systemen wird in der Regel auch ein Stromspeicher integriert.

Hartnäckig hält sich das Gerücht, der Herstellungsenergiebedarf der Solaranlage würde die Energieerzeugung während der Lebensdauer übersteigen. Dies war bei den ersten, im Labormaßstab für die Raumfahrt produzierten Zellen richtig, ist jedoch längst überholt. Die energetische Amortisationszeit von den heute weitverbreiteten monokristallinen Zellen liegt bei unter vier Jahren. [16]

Anlagenüberwachung ist wichtig

Photovoltaiksysteme werden in aller Regel mit einer Anlagenüberwachung ausgerüstet. Viele Hersteller von Wechselrichtern bieten inzwischen eigene Systeme unterschiedlicher Komplexität an. Daneben gibt es unabhängige Überwachungssysteme, die beispielsweise Fehler von Wechselrichtern erkennen und melden. Grundsätzlich sollten zumindest Anlagen mit mehr als 10 kW Leistung mit entsprechenden Überwachungssystemen ausgerüstet werden und diese auch regelmäßig geprüft werden. Ertragsausfälle können so frühzeitig erkannt und deren Beseitigung veranlasst werden. Wirtschaftliche Schäden können so minimiert werden.

Netzgekoppelte Solarstromanlagen bestehen aus Solarmodulen zur Erzeugung von Gleichstrom, einem Wechselrichter zur Umwandlung des Gleichstroms der Solarmodule in Wechselstrom, einer Sicherheitsschnittstelle zur Abregelung sowie einem Stromzähler. Dachanlagen auf den Dächern von Privathaushalten liegen in der Regel im Leistungsbereich bis 10 kW. Photovoltaikanlagen auf gewerblichen Dächern können auch über 1 Megawatt erreichen.

4 kW PV deckt Haushaltsstrombedarf

Schon eine Anlage mit 4 kW kann bilanziell den üblichen Jahresstrombedarf eines Vierpersonenhaushaltes decken. Soll zusätzlich ein Pkw elektrisch betrieben werden, ist PV-Strom wirtschaftlich besonders interessant. Der Jahresstrombedarf eines batterieelektrisch betriebenen Kleinwagens (15 Kilowattstunden pro 100 Kilometer, 20.000 Kilometer Jahresfahrleistung) kann bilanziell mit weiteren 3 kW Photovoltaikleistung gedeckt werden.

3 kW PV decken den Strombedarf eines Kleinwagens

Freiflächenanlagen beginnen in Deutschland typischerweise bei 750 kW Leistung. Größere Anlagen erreichen teilweise bis zu dreistellige Megawatt Leistungen. Neben der Installation auf dem Dach ist auch eine Integration in

die Gebäudefassade denkbar. Dies geht jedoch mit einem geringerer Jahresertrag einher. Des Weiteren kommen Solarzellen in verschiedenen Sonderanwendungen zum Einsatz, etwa im Bereich von Kleinstanwendungen (z.B. Taschenrechner) oder in der Verkehrstechnik (z.B. Parkscheinautomaten). Technologievarianten zur Stromversorgung von Privathaushalten, gewerblichen und industriellen Betrieben oder öffentlicher Einrichtung ohne Netzanbindung haben in Deutschland praktisch keine Bedeutung, sondern bieten sich vor allem zur Versorgung einzelner Einrichtungen, Häuser oder Dörfer in netzfernen Regionen an.

Der Ertrag einer Photovoltaikanlage kann dadurch gesteigert werden, dass die Solarzelle dem Stand der Sonne nachgeführt wird. Die Sonne scheint dann möglichst immer im rechten Winkel aufs Modul. Dies kann entweder in einer Achse (meist also von Ost nach West nachgeführt) erfolgen oder aber in zwei Achsen, wodurch auch die unterschiedliche Höhe der Sonne im Laufe des Jahres kompensiert wird. In der Praxis haben sich nachgeführte Systeme jedoch nicht durchgesetzt, da der technische Aufwand für die Nachführung den Mehrertrag in der Regel nicht rechtfertigt. Bei den seit Jahren sinkenden Modulpreisen werden nachgeführte Systeme zudem wirtschaftlich immer unattraktiver.

Nachführung nicht bewährt

Um einen möglichst hohen Solarstromertrag zu erzielen, zeigten fast installierte Solarmodule bislang immer nach Süden. Energiewirtschaftlich ist es jedoch sinnvoll, Solaranlagen vermehrt nach Osten und Westen auszurichten. Die Ausbeute verteilt sich damit gleichmäßiger über den Tag und vermeidet die steile Mittagsspitze der Solarerzeugung.

Günstig sind mäßig steile Ost- und Westdächer

Auch eine weniger als 45 ° geneigte, nach Osten oder Westen ausgerichtete Anlage erzeugt im Jahresdurchschnitt kaum 10 % weniger Energie als eine nach Süden ausgerichtete Anlage (siehe Ertragsdiagramm). Dies erlaubt beispielsweise auf einem Schulgebäude eine deutlich gleichmäßigeren Stromausbeute über den Tag sowie eine höhere Deckung des Strom Eigenbedarfs. Da der Preis der selbst erzeugten Kilowattstunde deutlich niedriger ist als der aus dem Netz bezogenen Kilowattstunde, sollte möglichst den ganzen Tag selbst erzeugter Strom zur Verfügung stehen. Dies ist mit einer Ausrichtung nach Osten und Westen eher der Fall als bei einer Südausrichtung. Auch die Neigung des Moduls hat Einfluss auf den Jahresertrag. Je flacher geneigt das Modul montiert ist, desto ausgeprägter ist die Sommerspitze. Sinnvoll sind Neigungen zwischen rund 15° und 90°.

Nicht unter 15 Grad Neigung

Unverschattete, fassadenintegrierte Module sind gerade für die winterliche Stromerzeugung sinnvoll. Da inzwischen Solarmodule in verschiedener Farben hergestellt werden können, sind gestalterisch anspruchsvollere Lösungen kaum Grenzen gesetzt. Zu bedenken ist, dass ab ca. 15 ° Neigung eine Selbstreinigung durch Regen funktioniert, flachere Neigungen daher zu vermeiden sind.