

Der Markt für Bioenergie 2021/2022

Sören Mohrmann, Sirkka Schukat und Christian Schaper
Georg-August-Universität Göttingen

Zusammenfassung

Der diesjährige Marktbericht Bioenergie gibt einen Überblick über aktuelle klima- und energiepolitische Themen mit einem Schwerpunkt auf Deutschland. Nach einem starken Rückgang des Weltwirtschaftswachstums und damit des weltweiten Energieverbrauchs im Jahr 2020 in Folge der COVID-19-Pandemie, war das Jahr 2021 durch eine leichte Konjunkturerholung gekennzeichnet, die sich wiederum auf die internationalen Energiemärkte ausgewirkt hat. Vor diesem Hintergrund werden zu Beginn des Berichtes energiepolitisch relevante Ereignisse im Jahr 2021 zusammengefasst, ehe die erneuerbaren Energien in den deutschen und internationalen Energiemix eingeordnet werden. Daran anschließend wird auf die land- und forstwirtschaftliche Produktion von Biomasse für die energetische Verwertung sowie die energetische Nutzung von biogenen Rest- und Abfallstoffen eingegangen. Des Weiteren werden aktuelle Entwicklungen an den Biokraftstoffmärkten sowie die Entwicklung der Strom- und Wärmeerzeugung aus biogenen Festbrennstoffen und der Biogaserzeugung in Deutschland thematisiert. Zum Abschluss des Berichts werden Agri-Photovoltaik-Anlagen als Chance für die Landwirtschaft und die Energiewende in Deutschland diskutiert.

Abstract

This year's Bioenergy Market Report provides an overview of current climate and energy policy issues with a focus on Germany. After a sharp decline in the global economy and energy consumption in 2020 due to the COVID-19 pandemic, 2021 is characterized by a slight economic recovery, which has had a corresponding impact on the international energy markets. After outlining the events from 2021 that are relevant to energy policy, renewable energies are contextualized within the German and international energy mix. Along with a description of biomass production in agriculture and forestry, usage of biogenic residual and waste materials is also described. The section on the energetic use of biomass deals with current developments in German biogas production and biofuels markets, as well as electricity and heat generation from biogenic solid fuels. The report concludes with a

chapter on agrophotovoltaics as an opportunity for agriculture and the energy transition in Germany.

1 Energiewende zwischen Wunsch und Wirklichkeit

Nachdem das Weltwirtschaftswachstum im Jahr 2020 aufgrund der COVID-19-Pandemie und den damit einhergehenden, weltweiten Einschränkungen des öffentlichen Lebens und des wirtschaftlichen Handels um 3,1 % zurückgegangen war, wird für 2021 wieder ein positives Wachstum von 5,9 % gegenüber dem Vorjahr erwartet (IMF, 2022). Eine ähnliche Entwicklung war in Deutschland mit einem Rückgang des Bruttoinlandsprodukts (BIP) um 4,6 % in 2020 gegenüber 2019 zu verzeichnen. Die leichte Konjunkturerholung in 2021 führte zwar zu einer Steigerung des BIP um 2,7 % gegenüber 2020, dennoch lag das BIP 2021 um 2 % unter dem Niveau von 2019 (DESTATIS, 2022). Nachdem infolge der Pandemie in 2020 weniger CO₂ ausgestoßen wurde, geht der Forschungsverbund Global Carbon Project für 2021 von einem Anstieg um 4,9 % gegenüber 2020 aus. Während die CO₂-Emissionen der USA, der EU und dem Rest der Welt rd. 4 % unter dem Niveau von 2019 lagen, war für China und Indien ein Anstieg gegenüber 2019 um 5,5 % bzw. 4,4 % festzustellen. Damit das weltweite Ziel von netto null Kohlendioxidemissionen bis 2050 noch erreicht werden kann, müsste der CO₂-Ausstoß jährlich um 1,4 Mrd. t sinken. Da im „Corona-Jahr“ 2020 nur ein Minus von 1,9 Mrd. t durch den beschriebenen Konjunkturrückgang der globalen Wirtschaft erfolgte, scheint das Ziel aktuell nicht in Reichweite (FRIEDLINGSTEIN et al., 2021).

Auf der im November 2021 stattgefundenen 26. UN-Weltklimakonferenz einigten sich die 197 Mitgliedsstaaten erstmals auf einen globalen Ausstieg aus der Nutzung von Kohle sowie auf den Abbau von Subventionen für fossile Energien. Darüber hinaus verpflichteten sich die Länder ihre Klimaziele bis 2030 in 2022 nachzubessern (BMUV, 2021). Insbesondere der Ausbau der erneuerbaren Energien (EE) zur Reduzierung der Emissionen aus der Produktion von Wärme und Elektrizität, die aktuell mit einem

Anteil von rd. 40 % den größten Anteil an den CO₂-Emissionen ausmacht, stehen im Vordergrund (FRIEDLINGSTEIN et al., 2021). Bei den politischen Entscheidungsträgern auf EU- und nationaler Ebene besteht Einigkeit darüber, dass die COVID-19-Pandemie die Anstrengungen in den Bereichen der EE und des Klimaschutzes nicht ausbremsen darf. Auf EU-Ebene wurde daher bereits im Juni 2021, noch vor der Weltklimakonferenz, das Europäische Klimagesetz verabschiedet, in dem festgelegt wurde, dass die Netto-Treibhausgasemissionen bis 2030 um 55 % gegenüber 1990 gesenkt werden sollen. Hierfür wurde u.a. ein Grenzwert von 225 Mio. t CO₂e. für 2030 eingeführt. Das übergeordnete Ziel stellt somit die Klimaneutralität der EU im Jahr 2050 dar (EUROPÄISCHE KOMMISSION, 2021). An den Zielen des „Green-Deal“ sowie dem Emissionshandel soll trotz extrem stark gestiegener Energiepreise im Jahresverlauf 2021 weiter festgehalten werden (RIEGERT, 2021). Vor diesem Hintergrund wurde Anfang 2022 auf EU-Ebene trotz der Kritik einzelner Mitgliedsländer beschlossen, dass neue Atomkraftwerke bis 2045 als nachhaltig gelten, wenn ein konkreter Plan für die Endlagerung radioaktiver Abfälle ab spätestens 2050 vorliegt. Bis die EE in der EU in ausreichender Kapazität ausgebaut sind, sollen darüber hinaus Investitionen in neue Gaskraftwerke bis 2030 unter bestimmten Bedingungen als nachhaltig gelten (TAGESSCHAU, 2022).

Trotz der Auswirkungen der COVID-19-Pandemie und der fragwürdigen Entscheidungen zur Einstufung von Gaskraftwerken und Atomkraft als „grüne Energie“ ist der weltweite Zubau an „echten“ EE ungebremst. Nachdem bereits 2020 ein Rekordjahr bei der neuinstallierten Leistung weltweit war, wird für 2021 ein neuer Rekord beim Zubau in Höhe von 290 GW prognostiziert. Bis 2026 wird davon ausgegangen, dass die weltweite Erzeugungskapazität auf über 4.800 GW ansteigt – dies entspricht in etwa den aktuellen globalen Stromerzeugungskapazitäten aus fossilen Brennstoffen und Kernenergie zusammen. Neben on- und off-Windkraft ist insbesondere Photovoltaik mit einem Anteil von 60 % am weltweiten Zubau von EE Treiber der globalen Energiewende. Ungeachtet der positiven Entwicklung sollte und könnte der Ausbau der EE nach Einschätzung der International Energy Agency (IEA) deutlich höher sein, das weltweite Ziel von Netto-Null-Emissionen bis 2050 zu erreichen (IEA, 2021).

Entsprechende Ziele hat sich die deutsche Bundesregierung mit der Novelle des deutschen Klimaschutzgesetzes im Jahr 2021 auferlegt. Die Treibhaus-

gasemissionen sollen um 65 % bis 2030 und um 88 % bis 2040 gegenüber dem Niveau von 1990 reduziert werden. Das übergeordnete Ziel der Netto-Treibhausgasneutralität soll bis 2045 erreicht werden (KSG, 2021). Neben den Klimazielen bieten das Wissen über die Endlichkeit fossiler Energieträger sowie die starke Importabhängigkeit Deutschlands bei fossilen Energieträgern Anlass dazu, den Anteil EE in Deutschland weiter auszubauen (COMMERZBANK, 2011; UMWELTBUNDESAMT, 2022). Politische Entscheidungen, wie der für Ende 2022 beschlossene Atomausstieg und der für 2030 (statt 2038) vorzeitig angestrebte Ausstieg aus der Kohleverstromung, erhöhen darüber hinaus den Druck den Ausbau der EE zu beschleunigen (HARTEL et al., 2019; BMWI, 2022a). Realität ist dennoch, dass der Anteil der EE am Bruttostromverbrauch in 2021 nach aktuellen Hochrechnungen von 45,3 % auf rd. 42 % gesunken ist (BMWI, 2021). Insbesondere die witterungsbedingt geringere Stromerzeugung aus Windkraft sowie der insgesamt gestiegene Stromverbrauch in 2021 haben dazu geführt, dass der Anteil an Stromerzeugung aus fossilen Energieträgern (Kohle) und Atomkraft mit den entsprechenden negativen Auswirkungen auf die CO₂-Emissionen höher war als im Vorjahr. Das ursprüngliche Ziel aus den EEG-Novellen 2014/2017/2021, bis 2030 65 % des Bruttostromverbrauchs aus EE bereitzustellen, ist ungeachtet dieses „Rückschlags“ für die Energiewende bei stetigem Ausbau weiterhin möglich (BDEW, 2022). Eine Herausforderung stellt das neu formulierte Ziel der Bundesregierung dar, bereits bis 2030 80 % des Bruttostromverbrauchs aus EE produzieren zu können, zumal der Zubau der EE zuletzt an Dynamik verloren hat (BMWI, 2022a). Daher soll insbesondere ein massiver Ausbau der installierten Leistung von Windkraft- und Photovoltaik-Anlagen in Deutschland gefördert werden. Neben zügigeren Genehmigungsverfahren und der Überprüfung aktueller rechtlicher Hemmnisse, sollen 2 % der Landesfläche für Windkraftanlagen reserviert werden, um eine installierte elektrische Leistung von über 100 GW an Land und 30 GW auf See bis 2030 zu erreichen. Darüber hinaus soll mit einem „Solarbeschleunigungspaket“ 200 GW an Photovoltaik bis 2030 installiert werden. Neben einer Photovoltaik (PV)-Pflicht auf Gewerbeflächen, sollen PV-Anlagen auf Privatbauten die Regel werden und die Flächenkulisse für Freiflächenanlagen geöffnet werden (BMWI, 2022b).

Freiflächenphotovoltaikanlagen (PV-FFA) wurden in Deutschland bereits 2009/2010 vermehrt auf ehemaligen Ackerflächen errichtet, ehe diese Entwick-

lung durch die „PV-Novelle“ 2010 durch Streichung des Vergütungsanspruchs unterbunden wurde (EEG, 2010; KELM et al., 2019). Begründet wurde dies u.a. mit dem Schutz der landwirtschaftlichen Produktion. Seither dürfen PV-FFA ausschließlich auf Konversionsflächen, Flächen, die mit einer Entfernung von bis zu 200 m längs vom Fahrbahnrandern von Autobahnen oder Schienenwegen, bauplanerischen Gewerbe- und Industriegebieten sowie benachteiligten Gebieten, errichtet werden (EEG, 2020; SCHARF, 2021). Da das vorhandene Flächenpotential nicht ausreicht, um die Ziele in den Bereichen Klimaschutz und Ausbau der erneuerbaren Energie zu erreichen, soll der Ausbau trotz der Konkurrenz zur landwirtschaftlichen Nutzung und negativen Einflüssen auf das Landschaftsbild erneut forciert werden (BMWl, 2022). Im Vergleich zur Produktion von Biomasse wird eine höhere Flächeneffizienz, eine geringere Umweltbelastung sowie vergleichsweise niedrige THG-Emissionen als zunehmend vorteilhaft angesehen (RÖSCH, 2016). Mit einem Emissionsfaktor von rd. 62 g CO₂/kWh (primärenergiebezogener Emissionsfaktor) weist Strom aus PV-Anlagen eine deutlich bessere CO₂-Bilanz auf als der aktuelle Strommix in Deutschland mit einem prognostizierten Wert von 401 g CO₂/kWh (2019) (LAUF et al., 2019; ICHA und KUHS, 2020).

Um die gesetzten Ausbauziele der Photovoltaik zu erreichen, sollen im Rahmen des „Osterpaketes“ des Bundeswirtschaftsministeriums in der ersten Jahreshälfte 2022 die Förderbedingungen für PV-FFA unter Berücksichtigung der Landwirtschaft und des Naturschutzes festgelegt werden. Hierbei sollen auch sogenannte Agri-Photovoltaik-Anlagen (APV) zugelassen werden, die die Stromerzeugung und die landwirtschaftliche Nutzung auf ein und derselben Fläche ermöglichen (siehe Kapitel 5) (NEUMANN, 2022).

2 Erneuerbare Energien im Energiemix

Der Begriff Primärenergieverbrauch (PEV) umfasst die Energiemenge aller inländisch eingesetzten Primärenergieträger, wie beispielsweise Braun- und Steinkohle sowie Mineralöl und Erdgas. Im Jahr 2020 lag der PEV in Deutschland mit 11,89 Exajoule (EJ) und einem Rückgang von 6,96 % erneut massiv unter dem Vorjahreswert (2019: 12,78 EJ). Der im Jahr 2017 begonnene rückläufige Trend beim PEV setzte sich somit 2020 noch deutlicher fort. Der Anteil der EE am PEV hat sich bis 2020 auf 16,5 % (1.965 Petajoule

(PJ)) erhöht und liegt mit einer Steigerung von 3,6 % über dem Vorjahreswert (2019: 1.896 PJ). Trotz des deutlichen Rückgangs des PEV von 2019 auf 2020 konnte das politische Ziel des Energiekonzeptes der Bundesregierung, im Jahr 2020 eine Senkung des PEV auf 11,50 EJ zu erreichen, nicht durchgesetzt werden. Der vorläufige PEV für das Jahr 2021 wird auf ca. 12,19 EJ beziffert, was eine Steigerung des PEV um 2,5 % im Vergleich zum Jahr 2020 bedeuten würde (AGEB, 2022a). Mengenmäßig stellten im Jahr 2020, wie bereits in den Vorjahren, Mineralöl mit etwa 34,4 % (4.087 PJ) und Gase mit etwa 26,4 % (3.135 PJ) die größten Energieträgeranteile am PEV. Die Anteile von Mineralöl am PEV von 2021 lagen mit 3.877 Petajoule und einem Rückgang von 5,1 % unter dem Vorjahreswert (2020: 4.087 PJ). Der Anteil von Erdgas am PEV verzeichnete für das Jahr 2021 mit 3.238 PJ einen Zuwachs in Höhe von 3,9 % im Vergleich zum Vorjahr (2020: 3.258 PJ). Gleichzeitig stieg der Verbrauch von Steinkohle von 892 PJ im Jahr 2020 auf 1.052 PJ im Jahr 2021 (AGEB, 2022a).

Die inhomogene Verteilung EE auf die verschiedenen Bereiche des Primärenergieverbrauchs mit einem klaren Schwerpunkt bei der Stromerzeugung hat sich 2020 sowie 2021 erneut verschärft (Abbildung 1). Im Vergleich zu 2019 (42,0 %) hat sich der Anteil der EE am Bruttostromverbrauch für das Jahr 2020 mit 45,3 % weiter erhöht. Für das Jahr 2021 scheint der Aufwärtstrend mit einem geschätzten Anteil von 42,0 % jedoch abzubrechen (UMWELTBUNDESAMT, 2021a). Unter den verschiedenen Energieträgern zur Bruttostromerzeugung in Deutschland stieg die erzeugte Energiemenge 2020 bei den erneuerbaren Energien auf etwa 250,2 Terrawattstunden (TWh) und damit etwa um 3,2 % verglichen mit dem Vorjahreswert (2019: 242,4 TWh). Damit übertraf die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energieträgern im Jahr 2020 erstmals die Stromerzeugung aus fossilen den Energieträgern Braunkohle mit 91,7 TWh, Steinkohle mit 42,5 TWh und Erdgas mit 91,6 TWh (BMWl, 2022). Für das Jahr 2021 wird die erzeugte Energiemenge aus erneuerbaren Energien auf 237,0 TWh geschätzt, was einem Rückgang um 5,3 % bedeuten würde (AGEB, 2022b). Für die Wärme- und Kältebereitstellung konnten die erneuerbaren Energien ihren Anteil 2020 im Vergleich zum Vorjahr auf 15,6 % leicht erhöhen (2019: 15,0 %). Darüber hinaus lag der Anteil erneuerbarer Energien im Bereich Verkehr 2020 mit 7,5 % ebenfalls höher als im Jahr 2019 mit 5,6 % (UMWELTBUNDESAMT, 2021a). Für das Jahr 2021 liegen bisher weder zuverlässige Werte für den Anteil

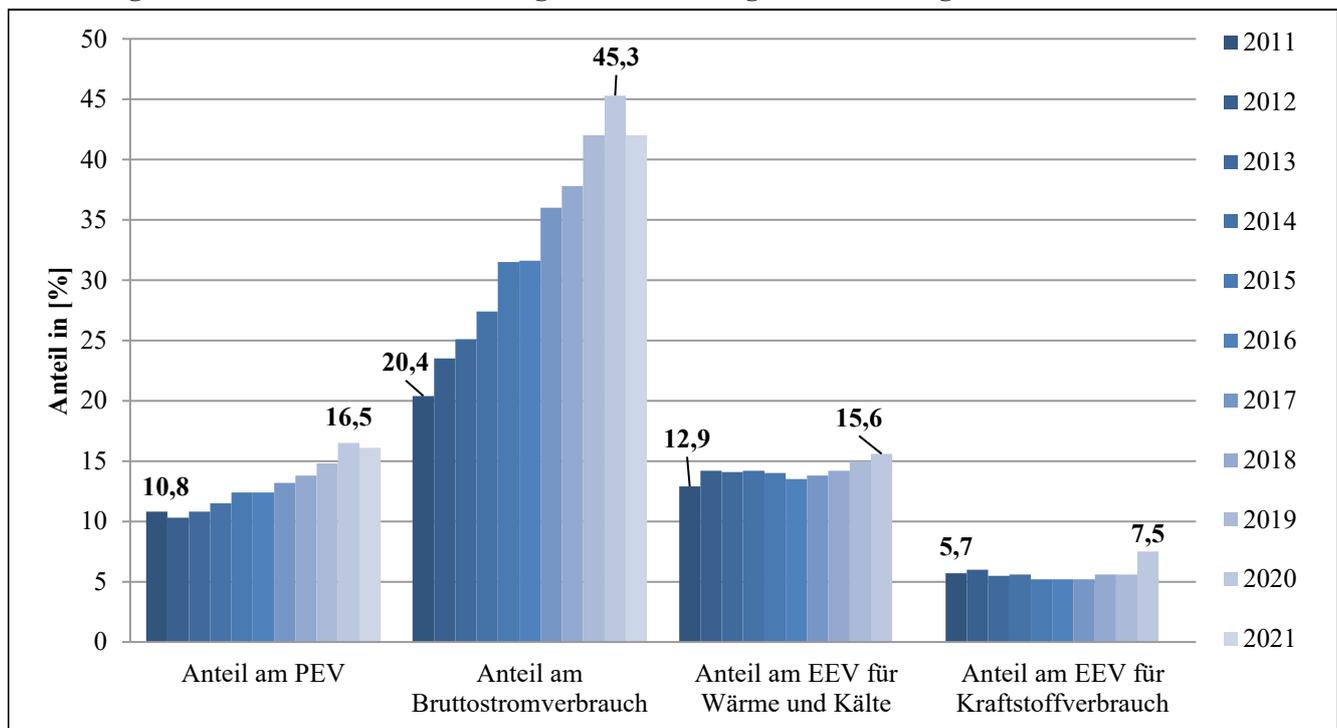
erneuerbarer Energien am Endenergieverbrauch für Wärme und Kälte, noch für den Anteil erneuerbarer Energien am Endenergieverbrauch für Kraftstoffverbrauch vor.

Insgesamt wurden 2020 etwa 470,4 TWh aus erneuerbaren Energieträgern bereitgestellt, was einer Steigerung von 2,3 % zum Vorjahr (2019: 460,2 TWh) entspricht (UMWELTBUNDESAMT, 2021a). Den mit Abstand größten Block bildeten die biogenen Brennstoffe für Wärme (33 %) und Strom (11 %), gefolgt von Windenergie (28 %), Photovoltaik (10 %), Biokraftstoffen (8 %) und Wasserkraft (4 %). Geo- (4 %) und Solarthermie (2 %) hatten, wie in den Vorjahren, nur eine vergleichsweise geringe Bedeutung (Abbildung 2). Die Menge des erzeugten Bruttostroms aus EE betrug 2020 etwa 250,2 TWh, wobei Windenergie (132,1 TWh), Biomasse (50,9 TWh) und Photovoltaik (48,6 TWh) die größten Anteile trugen (AGEB, 2022b). Der Anteil EE am Endenergieverbrauch für Wärme und Kälte lag im Jahr 2020 bei 181,7 TWh und bestand mit 85,0 % primär aus der Nutzung von Biomasse. Im Verkehrssektor erhöhte sich 2020 der Anteil EE auf 43,7 TWh (2019: 36,0 TWh), wobei Biodiesel mit 67,5 % unverändert den größten Energieträgeranteil bereitstellte (BMW, 2021). Im Jahr 2021 wird die Menge des erzeugten Bruttostroms aus EE auf 237 TWh geschätzt, wobei wie in den Vorjahren Windenergie (117,7 TWh), Bio-

masse (50,7 TWh) und Photovoltaik (48,9 TWh) die größten Anteile einnahmen (AGEB, 2022b). Der Anteil EE am Endenergieverbrauch in Deutschland führte im Jahr 2020 zur Vermeidung von 229,7 Mio. t CO₂-Äquivalenten (+13,0 % zum Vorjahr). Die vermiedenen Treibhausgasemissionen resultierten dabei zu 43,6 % aus der Energiegewinnung aus Windenergie, zu 32,9 % aus Biomasse und zu 14,5 % aus Photovoltaik (UMWELTBUNDESAMT, 2021b). Der Anteil der Treibhausgasreduzierung durch EE in der Stromerzeugung hat sich im Jahr 2020 mit 77,8 % Anteil an der Gesamtemissionsreduzierung im Vergleich zum Jahr 2019 nur marginal erhöht, die restlichen Minderungen teilen sich zu 17,8 % auf die Wärme- und Kälteproduktion und zu 4,4 % auf den Verkehrsbereich auf (UMWELTBUNDESAMT, 2021b).

Betrachtet man die wirtschaftliche Bedeutung von EE-Anlagen (EEA), so lag das Investitionsvolumen für die Errichtung dieser Anlagen im Jahr 2020 bei insgesamt 11,0 Mrd. € und damit etwa 4,8 % höher als im Vorjahr (2019: 10,5 Mrd. €). Der leichte Zuwachs der EEA-Investitionen ist auf gestiegene Installationszahlen vor allem bei Photovoltaikanlagen (4,2 Mrd. €), Windenergie an Land (2 Mrd. €) sowie im Bereich Geothermie und Umweltwärme (1,9 Mrd. €) und Biomassewärme (1,87 Mrd. €) zurückzuführen, wodurch der Einbruch bei den Investitionen in Windkraftanlagen auf See (0,1 Mrd. €) mehr als ausgeglichen

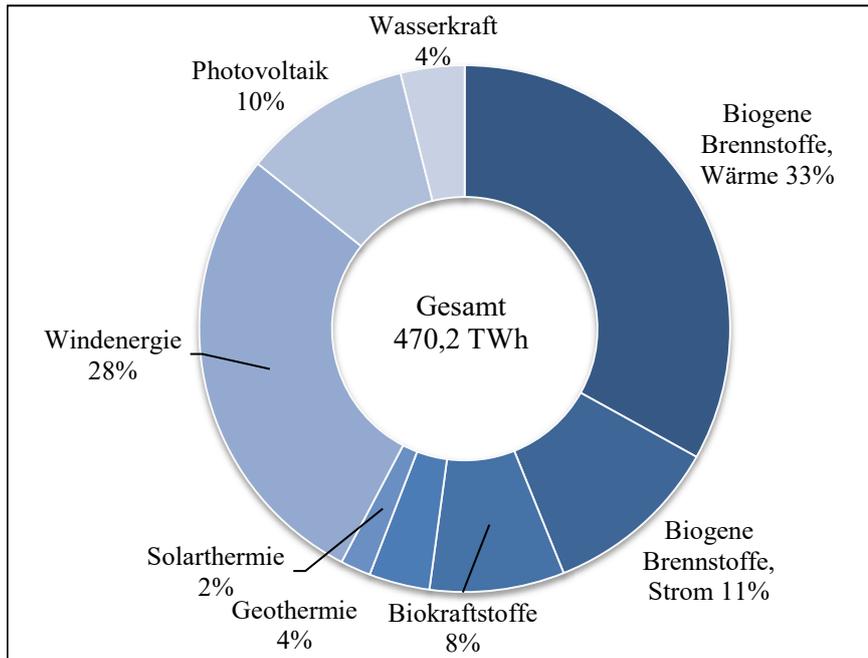
Abbildung 1. Anteile erneuerbarer Energien an der Energiebereitstellung in Deutschland



EEV = Endenergieverbrauch

Quelle: eigene Darstellung nach AGEB (2022a) und UMWELTBUNDESAMT (2021a)

Abbildung 2. Zusammensetzung der erneuerbaren Energien in Deutschland 2020



Quelle: eigene Darstellung nach UMWELTBUNDESAMT (2021a)

werden konnte. Analog zu den Vorjahren war das Investitionsvolumen für die Errichtung von Wasserkraftanlagen mit einem Umfang in Höhe von etwa 0,03 Mrd. € am geringsten (BMW, 2021).

Im Vergleich zu dem leichten Anstieg der Investitionen ergab sich bei der Bruttobeschäftigung ein geringer Rückgang im Jahr 2020. Der seit dem Jahr 2016 rückläufige Trend bei den Beschäftigtenzahlen setzt sich weiterhin fort. Während die Zahl der Beschäftigten im Jahr 2019 bei 311.200 Personen lag, reduzierte sich dieser Wert im Jahr 2020 um etwa 3,7 % auf 299.700 Personen. Der deutlichste Beschäftigungsrückgang fand dabei mit -12,4 % erneut im Bereich Windkraft statt. Dieser Bereich verzeichnet trotz des erneuten Rückgangs mit 105.700 Personen (35,3 %) weiterhin die zweithöchste Anzahl an Beschäftigten in der Branche der EE nach dem Bereich Biomasse (112.100 Personen; 37,4 %). Ihnen folgen die Bereiche Solarenergie (51.700 Personen; 17,3 %), Geothermie (24.500 Personen; 8,2 %) und Wasserkraft (5.700 Personen; 1,9 %) mit nur geringen Veränderungen zum Jahr 2018 (UMWELTBUNDESAMT, 2021c).

Trotz der Auswirkungen der COVID-19-Pandemie verzeichneten die EE im Jahr 2020 einen Rekord beim Zubau von Stromkapazitäten in Höhe von 256 GW und waren die einzige Stromerzeugungsquelle, die einen Nettozuwachs bei der Gesamtkapazität erreichte. Schätzungen zufolge wurden im Jahr 2020

weltweit 7.493 TWh Strom aus erneuerbaren Energien erzeugt (REN21, 2021). Trotz dieses Wachstums betrug der Anteil EE an der gesamten globalen Stromerzeugung weniger als ein Drittel, sodass bei einer globalen Stromerzeugung von 25.850 TWh nur 29,0 % durch EE geliefert wurden. Die größten Anteile an der globalen Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien hatten Wasserkraft (4.342 TWh), Biomasse (594 TWh) sowie Photovoltaik und Windenergie (2533 TWh) (BMW, 2021). Wie in den vergangenen Jahren war der Anteil EE im Elektrizitätssektor am höchsten (26 %); allerdings entfielen auf den elektrischen Endverbrauch nur 17,0 % des gesamten Endenergieverbrauchs. Auf den Verkehrssektor entfielen dage-

gen schätzungsweise 32,0 % des Endenergieverbrauchs und damit der geringste Teil EE (3,3 %). Die verbleibende thermische Energienutzung, zu der Raumheizung und Warmwasserbereitung, Raumkühlung und industrielle Prozesswärme gehören, machte mehr als die Hälfte (51,0 %) des Endenergieverbrauchs aus. Davon entfielen etwa 11,0 % auf EE (REN21, 2021).

Die weltweiten Investitionen in neue Kapazitäten für EE hielten der durch die COVID-19-Pandemie ausgelösten Wirtschaftskrise im Jahr 2020 stand und stiegen im Vergleich zum Vorjahr um 0,6 % auf 303,5 Mrd. \$ an (2019: 301,7 Mrd. \$). Während das chinesische Investitionsvolumen 2020 um 12 % auf 83,6 % gesunken ist (2019: 95,0 Mrd. \$), hat sich die Höhe der Investitionen innerhalb der EU sowie dem Vereinigten Königreich um 61,8 % auf 69,4 Mrd. \$ erhöht (2019: 42,9 Mrd. \$). In den Vereinigten Staaten ist das Investitionsvolumen hingegen von 61,7 Mrd. \$ in 2019 auf 49,3 Mrd. \$ in 2020 und damit um 20,1 % gesunken (REN21, 2021). Bei der Aufteilung von Investitionen auf die verschiedenen Technologien der EE hat Windkraft im Jahr 2020 einen Rückgang in Höhe von 5,7 % auf insgesamt 142,7 Mrd. \$ verzeichnet (2019: 151,3 Mrd. \$). Gleichzeitig erreichten die Investitionen in Photovoltaik im Jahr 2020 einen Wert von 148,6 Mrd. \$ und lagen damit 12,2 % höher als im Vorjahr mit einem Wert von 132,4 Mrd. \$ (REN21, 2021). Die globalen Beschäftigtenzahlen im Bereich

der EE stiegen von 11,5 Mio. im Jahr 2019 auf 12,0 Mio. Beschäftigte im Jahr 2020 (+4,3 %) erneut deutlich an. Die Photovoltaikbranche führt die Beschäftigung mit 3,98 Mio. Beschäftigten auch in 2020 vor der Bioenergiebranche (3,52 Mio. Beschäftigte), der Wasserkraft (2,18 Mio. Beschäftigte) und der Windenergiebranche (1,25 Mio. Beschäftigte) an (IRENA, 2021).

3 Entwicklung der Biomasseerzeugung in Deutschland

3.1 Biomasse aus landwirtschaftlicher Produktion

Die landwirtschaftliche Nutzfläche in Deutschland machte im Jahr 2020 mit 16,6 Mio. Hektar (ha) einen Anteil von 46,4 % an der deutschen Gesamtfläche von 35,8 Mio. ha aus. Rund 15,8 % (2,63 Mio. ha) der landwirtschaftlichen Nutzflächen werden für den Anbau von nachwachsenden Rohstoffen (NawaRo) für die energetische und stoffliche Nutzung verwendet. Die NawaRo-Anbaufläche hat damit im Jahr 2020 im Vergleich zum Vorjahr um rd. 2,3 % abgenommen (2019: 2,57 Mio. ha). Für 2021 wird von einem nahezu unveränderten Anbauumfang von rd. 2,63 Mio. ha ausgegangen (FNR, 2022). Im 5-Jahresmittel der Jahre 2017-2021 liegt die Anbaufläche relativ konstant bei 2,65 Mio. ha mit einer Abweichung von +/-2,5 %.

Die Anbaufläche für Energiepflanzen lag im Jahr 2020 bei 2,35 Mio. ha (2019: 2,31 Mio. ha) und für

Industriepflanzen bei 278.000 ha (2019: 258.000 ha). Für 2021 wird beim Anbau von Energiepflanzen von einer nahezu unveränderten Anbaufläche von 2,34 Mio. ha ausgegangen, während beim Industriepflanzenanbau von einem steigenden Anbauumfang von etwa 5 % auf 293.000 ha gegenüber 2020 ausgegangen wird (siehe Tabelle 1). Der Anbau von NawaRo für die Biogaserzeugung machte nach Angaben der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR) mit 1,6 Mio. ha (2019: 1,57 Mio. ha) erneut den größten Anteil am Energiepflanzenanbau aus. Im Vergleich zu den Vorjahren hat sich die Anbaufläche nahezu nicht verändert und bewegt sich auf einem konstanten Niveau von rd. 1,5 Mio. ha. (FNR, 2022). Nach Einschätzungen des Fachverbandes Biogas ist die Anbaufläche für die Biogaserzeugung insgesamt etwas geringer als nach den Daten der FNR und ging im Jahr 2020 auf 1,34 Mio. ha (2019: 1,43 Mio. ha) zurück (FvB, 2021; FNR, 2022). Die höchste Bedeutung hat trotz einer geringfügigen Abnahme im Anbauumfang weiterhin Maissilage mit einem Anbauumfang von 995.980 ha (2019: 1.015.867 ha). Darüber hinaus hatten Grassilagen aus Ackergras und Dauergrünland 136.914 ha (2019: 169.311 ha), Getreide-Ganzpflanzensilage 112.752 ha (2019: 98.765 ha) und Körnergetreide 32.215 ha (2019: 28.219 ha) eine hohe Bedeutung unter den pflanzlichen Substraten für die Biogaserzeugung (FvB, 2021). Der Energiemaisanbau ist damit erstmalig, nach drei Jahren mit leichter Flächenausdehnung, wieder etwas zurückgegangen. Neben dem Anbau von NawaRo für die Biogaserzeugung

Tabelle 1. Anbau von Energie- und Industriepflanzen in Deutschland (ha)

Rohstoff		2017	2018	2019	2020*	2021**	Anteil an NawaRo-Fläche 2021** (%)
Energiepflanzen	Raps für Biodiesel/Pflanzenöl	589.000	514.000	513.000	471.000	493.000	18,73
	Zucker/Stärke für Bioethanol	269.500	214.500	214.500	265.000	265.000	10,07
	Pflanzen für Biogas	1.570.000	1.580.000	1.570.000	1.600.000	1.570.000	59,65
	Sonstiges (u.a. Agrarholz, Miscanthus)	11.200	11.200	11.200	11.200	11.200	0,43
	Energiepflanzen insgesamt	2.440.000	2.320.000	2.309.000	2.347.000	2.339.000	88,87
Industriepflanzen	Industriestärke	129.000	118.000	129.000	148.000	149.000	5,66
	Industriezucker	12.300	11.000	10.200	12.500	12.600	0,48
	Technisches Rapsöl	138.000	74.000	92.000	87.000	96.000	3,65
	Technisches Sonnenblumenöl	6.390	6.120	7.220	9.730	13.230	0,50
	Technisches Leinöl	3.800	3.400	3.400	3.400	3.400	0,13
	Pflanzenfaser	3.160	4.560	4.560	5.410	6.490	0,25
	Arznei- und Farbstoffe	12.000	12.000	12.000	12.000	12.000	0,46
	Industriepflanzen insgesamt	301.000	229.000	258.000	278.000	293.000	11,13
NawaRo insgesamt		2.707.000	2.727.000	2.567.000	2.625.000	2.632.000	100,00

*vorläufige Werte **geschätzte Werte

Quelle: eigene Darstellung nach FNR (2022); Abweichungen in den Summen ergeben sich durch Runden der Zahlen

gung hat der Anbau von Raps für die Produktion von Biodiesel/Pflanzenöl mit 578.000 ha (22,3 %) weiterhin eine hohe Bedeutung (FNR, 2022). Der deutliche Abwärtstrend beim Anbauumfang von Raps scheint seinen Tiefpunkt mit 471.000 ha im Jahr 2020 (2019: 516.000 ha) erreicht zu haben, so wird für 2021 eine Ausdehnung des Anbauumfangs auf 493.000 ha prognostiziert. Marktseitige Gründe, die in den letzten Jahren für einen Rückgang des Rapsanbaus gesorgt haben, sind neben dem Angebots- und Preisdruck an den Pflanzenölmärkten vor allem sich ändernde förderpolitische Rahmenbedingungen im Biokraftstoffsektor wie die Doppelanrechnung von Biokraftstoffen aus Abfallölen und -fetten im Rahmen der iLUC-Richtlinie 2015 und die CO₂-Bepreisung fossiler Brenn- und Kraftstoffe ab 2021 im Rahmen der europäischen Erneuerbaren-Energie-Richtlinie (RED II) (SEEDLER, 2017; UFOP, 2019). Zum Jahreswechsel 2020/2021 zeigt sich, dass der Rapsmarkt eine Trendwende erreicht hat. Erstmals seit 2012 wurde im ersten Quartal 2021 wieder die Marke von 50 €/t überschritten. Seither stieg der Börsenpreis weiter an und erreicht im Januar 2022 einen Rekordpreis von 80 €/t. Gründe für diese Entwicklung liegen in einem weltweit knappen Angebot bei gleichzeitiger hoher Nachfrage der Ölmühlen. Neben einem knappen Angebot an Soja- und Palmöl wurde der Rapspreis durch den steigenden Rohölpreis, der eng mit dem Biokraftstoffmarkt zusammenhängt, gestützt. Für die Ernte 2022 wird in der EU mit einer steigenden Rapsernte aufgrund einer höheren Aussaatfläche aufgrund des hohen Preises gerechnet (ZINKE, 2022).

Die Anbaufläche an Mais, Getreide und Zuckerrüben für Zucker und Stärke aus Bioethanol betrug im Jahr 2020 265.000 ha, was einer Erhöhung gegenüber dem Vorjahr von 23,5 % entspricht. Für 2021 wird eine unveränderte Anbaufläche in diesem Segment prognostiziert. Im Bereich Agrarholz und Miscanthus ist der Anbauumfang von 11.200 ha auf niedrigem Niveau stagnierend (FNR, 2022).

Der Industriepflanzenanbau ist im Jahr 2020 um etwa 7,8 % auf 278.000 ha (2019: 258.000 ha) angestiegen. In 2021 soll sich die positive Entwicklung des Anbauumfangs mit einer erneuten Zunahme der Anbaufläche um knapp 5,5 % fortsetzen. Insbesondere im Bereich Industriestärke war mit rd. 148.000 ha der Anbau von Weizen, Körnermais und Kartoffeln in 2020 dominierend (2019: 129.000 ha). Raps für die Herstellung von Ölen und Fetten für Industriezwecke wurde auf 87.000 ha angebaut (2019: 92.000 ha). Trotz positiver Prognose für 2021 fällt auf, dass sich die

Anbaufläche von Raps für technische Zwecke im Vergleich zu 2018 deutlich reduziert hat. Der Anbau von Pflanzen für Arznei- und Farbstoffe lag wie in den vergangenen Jahren unverändert bei 12.000 ha. Die Anbaufläche an Zuckerrüben für die Industrie ist in 2020 wieder auf ein Niveau von 12.500 ha (2019: 10.2000 ha) angestiegen. Deutliche Zunahmen der Anbauflächen waren bei Pflanzenfasern für die industrielle Weiterverarbeitung mit 5.410 ha (2019: 4.560 ha) sowie technischem Sonnenblumenöl mit 9.730 ha (2019: 7.220 ha) festzustellen. Dieser Trend soll sich in 2021 mit einer erneut deutlichen Flächenausweitung auf 6.490 ha bzw. 13.230 ha fortsetzen (FNR, 2022).

3.2 Biomasse aus biogenen Reststoffen und Abfällen

Aktuell werden rd. 9 % der landwirtschaftlichen Nutzfläche für den Anbau von NawaRo für die Biogasproduktion genutzt. Trotz anhaltender Diskussion um regionale Flächenkonkurrenz, einseitige Fruchtfolgen und die „Teller oder Tank“-Diskussion werden über 90 % der Biogasanlagen in Deutschland zumindest anteilig mit Anbaubiomasse betrieben (BERNIGAU, 2017; NEU, 2019; SCHOLWIN et al., 2019; DANIELGROMKE et al., 2020). Um dieser Entwicklung entgegenzuwirken, war eine politische Maßnahme zur Regulierung des Anteils an Silomais die Einführung des sogenannten „Maisdeckels“ mit dem EEG 2012 der eine Obergrenze für Mais (Ganzpflanze, Maiskorn-Spindel-Gemisch, Körnermais, Lieschkolbenschrot) und Getreidekorn von zunächst 60 Masseprozent vorsah. Im Laufe der EEG-Novellen 2014, 2017 und 2021 wurde der „Maisdeckel“ weiter herabgesetzt und liegt aktuell bei einem Anteil der genannten Substrate von maximal 40 Masseprozent der eingesetzten Substratmenge (FNR, 2015; EEG, 2020). Mit dieser Anpassungsmaßnahme verdeutlichte die Bundesregierung, dass zukünftig stärker auf den Einsatz von biogenen Rest- und Abfallstoffen bei der Stromerzeugung gesetzt werden soll (FNR, 2015). Darüber hinaus bietet die Europäische-Erneuerbaren-Energien-Richtlinie (RED II), die ursprünglich bis zum 01.07.2021 in nationales Recht umgesetzt sein sollte, einen Anlass dazu, einen stärkeren Fokus auf Alternativsubstrate, wie Rest- und Abfallstoffe, zu richten. Unter anderem ist vorgesehen, dass die Anteile für Biokraftstoffe aus NawaRo gedeckelt und stattdessen steigende Mindestanteile für „fortschrittliche Biokraftstoffe“ festgesetzt werden. Zu diesen zählen auch Kraftstoffe, die aus Reststoffen, wie organischen Abfällen, Gülle und

Stroh, hergestellt werden (WIETSCHER et al., 2019). Nach RED II ergibt sich bei der Berechnung des Standardwertes für die Treibhausgasminde rung für Biomethan aus Gülle ein Wert von $-100 \text{ g CO}_2\text{e/MJ}$. Ebenfalls günstige Emissionswerte haben Bioabfälle und Reststoffe (u.a. Getreidestroh) mit $14 \text{ g CO}_2\text{e/MJ}$ (MAIERHOFER et al., 2018; RAUH, 2020).

Zu den biogenen Reststoffen zählen per Definition Altholz, Industrierestholz, Waldrestholz, biogene Abfall- und Reststoffe aus der Lebensmittelindustrie, Zoomasse-Reststoffe (Tiermehl, Tierfette), die biogenen Anteile des Restmülls und Bioabfälle. Klärschlämme werden ebenfalls dazugerechnet, sofern sie energetisch genutzt werden können. Darüber hinaus wird Stroh, das nicht für die stoffliche Nutzung in der Tierhaltung verwendet wird, den Reststoffen zugeordnet (NELLES, 2009). Im Jahr 2014 wurden mit rd. 541 Petajoule (PJ) an biogene Rest- und Abfallstoffe rund die Hälfte des technischen Potentials aus Rest- und Abfallstoffen energetisch genutzt. Das darüber hinaus ungenutzte, technische Biomassepotential von 448 PJ besteht zu 218 PJ (48,7 %) aus Waldrestholz, 141 PJ (31,5 %) aus Stroh, 70 PJ (15,6 %), aus Gülle/Mist und zu 15 PJ aus Landschaftspflegeholz (3,3 %). Weitere Rest- und Abfallstoffe machen weniger als 2 % des ungenutzten Potentials aus, da diese Stoffe bereits überwiegend verwertet werden (FNR, 2015). Ähnliche Potentiale werden in Hochrechnungen für das Jahr 2020 ermittelt. Das Potenzial von Waldrestholz wird in diesen mit 203,5 PJ, von Stroh mit 178,6-187,2 PJ und von Gülle/Mist mit 46,8-52,8 PJ bzw. 49-72,6 PJ angegeben. Gülle/Mist weisen auf Basis der aktuelleren Berechnungen ein höheres Potenzial als in den Statistiken aus 2014 auf. Ähnliche Prognosewerte werden für 2050 zugrunde gelegt, wobei hier mit 111-185 PJ von einem deutlich geringeren Nutzungspotential ausgegangen wird (FEHRENBACH et al., 2019).

Unter dem Begriff Waldrestholz werden Hölzer mit einem Durchmesser unter 7 cm (Nichtderbholz), sowie nicht verwertetes Derbholz, Äste, Zweige, Schaftholz einschließlich Rinde, Wurzeln, Wurzelstöcke und weitere Erntereste zusammengefasst und macht etwa 28 % der insgesamt geernteten Holzbiomasse aus (MÜHLENHOFF et al., 2014). Die jährlich zur Verfügung stehenden Mengen sind schwer kalkulierbar, da Waldrestholz in offiziellen statistischen Erhebungen nicht erhoben wird und das Schadholzaufkommen und die Nachfrage nach Brennholz volatil sind (MANTAU et al., 2018). Aufgrund der in Kapitel 3.4 beschriebenen Wald-/Holzsituation ist nach wie

vor ein überdurchschnittlich hohes Angebot an Restholz vorhanden.

Bei den landwirtschaftlichen Reststoffen weist Getreidestroh nach Abzug des Strohbedarfs für Futter- und Einstreuzwecke mit etwa 8,5 Mio. t Getreidestroh ein hohes, ungenutztes Potenzial für die stoffliche und energetische Verwertung auf (BROSOWSKI et al., 2015). Das Potenzial zur stofflichen bzw. energetischen Nutzung von Stroh wird trotz der relativ guten Verfügbarkeit bisher kaum ausgenutzt (ANTONCZYK und SCHERER, 2015). In Hinblick auf die Nutzung in Heizwerken stellen im Vergleich zu fossilen Energieträgern technisch höhere Anforderungen, höhere Investitions- und Wartungskosten sowie die Grenzwerte für Schadstoffe in der TA-Luft für strohbasierte Heizwerke in Deutschland ein Hemmnis dar (FNR, 2014; VOGEL, 2019). Entsprechend ist diese Nutzungsform ebenso wenig verbreitet, wie die Verwertung als Rohstoff für die Produktion von Biokraftstoffen aus Stroh (KIT, 2020; VERBIO, 2020). Darüber hinaus spielt auch die Vergärung von Getreidestroh in der Biogas erzeugung bisher kaum eine Rolle (DANIEL-GROMKE et al., 2020; MOHRMANN und OTTER, 2021). Neuere Ansätze in der Forschung befassen sich daher mit der Nutzung von Pellets aus Getreidestroh in Biogasanlagen (SCHWARZ, 2016; SCHWARZ, 2016a; SCHWARZ et al., 2019). Erste Ergebnisse zeigen, dass diese grundsätzlich gute Vergärungseigenschaften aufweisen und verfahrenstechnische Probleme, die bei der Verwendung von Langstroh in der Biogasanlage auftreten können, überwiegend gelöst werden können (LARSSON et al., 2008; KALIYAN und MOREY, 2010; REINHOLD und FRIEDRICH, 2012; REINHOLD, 2014). Darüber hinaus können die Lager- und Transportkosten durch die Pelletierung gesenkt und somit die Abhängigkeit von der räumlichen Verfügbarkeit vermindert werden (THEERARATTANANOON et al., 2012; MØLLER und HANSEN, 2014). Diese ist deutschlandweit unter Berücksichtigung der nachhaltig zu entnehmenden Strohmenge und der Nutzungskonkurrenz mit der Tierhaltung sehr heterogen (ZELLER et al., 2012; KALCHER und BROSOWSKI, 2018). Die größten mengenmäßigen Potentiale für die energetische Strohnutzung liegen im Osten Schleswig-Holsteins, im Nordwesten Mecklenburg-Vorpommerns und im nördlichen Teil Nordrhein-Westfalens bis hinein in das angrenzende Niedersachsen (ZELLER et al., 2012; MÜHLENHOFF und DANNEMANN, 2017).

Von der insgesamt verfügbaren Menge an Gülle/Mist in Deutschland werden aktuell ca. 25-30 % in Biogasanlagen vergoren (HAUPTSTADTBÜRO BIO-

ENERGIE, 2019; SCHOLWIN et al., 2019). Trotz entsprechender Verfügbarkeit kommt es aktuell nicht zu einer Ausweitung der Wirtschaftsdüngernutzung in Biogasanlagen, da genehmigungsrechtliche Anforderungen, die geringe Transportwürdigkeit von flüssigen Wirtschaftsdüngern sowie ein erhöhter Gärrest-Lagerbedarf die Wirtschaftlichkeit des Mehreinsatzes negativen beeinflussen (DANIEL-GROMKE, et al., 2020). Insbesondere die Novellierung der Düngeverordnung 2020 hat u.a. mit der Einführung eines Mindestlagervolumens für Wirtschaftsdünger von neun statt bisher sechs Monaten für flächenlose Betriebe dazu geführt, dass der Lagerraum für Gärreste von Biogasanlagen einen begrenzenden Faktor darstellt (DÜV, 2020; WILKEN, 2020; MOHRMANN und OTTER, 2021). Darüber hinaus führt die geringe Transportwürdigkeit dazu, dass die Vergärung von höheren Anteilen an Wirtschaftsdüngern vornehmlich in Veredelungsregionen und für größere tierhaltende Betriebe in Frage kommt (SCHOLWIN et al., 2019). Die explizite Förderung von reinen Güllevergärungsanlagen nach dem EEG 2014/2017 konnte bisher nicht zu einem wesentlichen Zubau solcher Anlagentypen führen (KRALEMANN, 2018). Vor dem Hintergrund der Tendenz sinkender Tierbestände, die sich mit einer Abnahme der Anzahl an Schweinen um rd. 9,4 % und rd. 2,3 % an Rindern gegenüber dem Vorjahr erneut bestätigt hat, ist aktuell nicht von einem wesentlichen Ausbau der Wirtschaftsdüngervergärung auszugehen (DESTATIS, 2022a, 2022b).

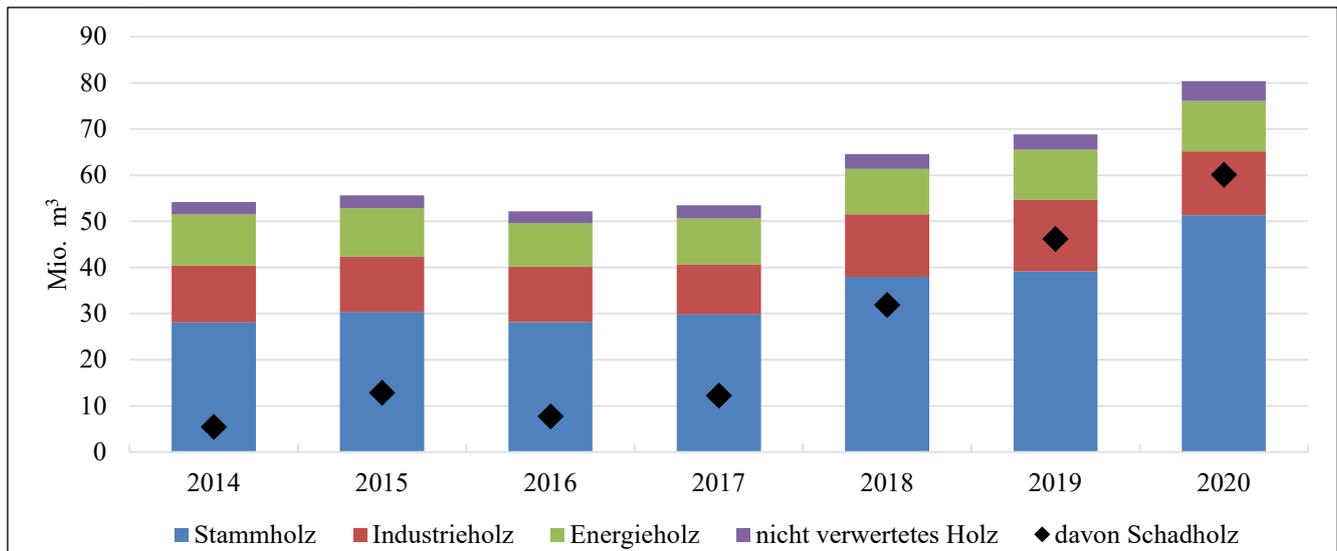
3.3 Biomasse aus forstwirtschaftlicher Produktion

Die Waldfläche in Deutschland macht mit 11,4 Mio. ha einen Anteil von etwa 32 % an der Gesamtfläche Deutschlands aus. Dieser besteht zu 55 % aus Nadelwald und zu 45 % aus Laubwald (BMEL, 2021). Die vier häufigsten Baumarten sind Fichte (25 %), Kiefer (23 %), Buche (15 %) und Eiche (10 %) (TI-WF, 2019; SDW, 2020). Der Großteil der Waldfläche in Deutschland befindet sich in den beiden südlichen Bundesländern Bayern (2,6 Mio. ha) und Baden-Württemberg (1,37 Mio. ha), gefolgt von Niedersachsen (1,2 Mio. ha) und Brandenburg (1,1 Mio. ha). Der Anteil der Waldfläche an der Gesamtfläche der einzelnen Bundesländer variiert dabei zwischen 11 % in Schleswig-Holstein und 42 % in Hessen und Rheinland-Pfalz (SDW, 2020). Im Gegensatz zur weltweit fortschreitenden Vernichtung der Wälder, hat die Waldfläche in Deutschland zwischen 2002 und 2012 um 0,4 % zugenommen (BMEL,

2017). Die Waldzustandserhebung aus dem Jahr 2020 zeigt jedoch, dass die Umweltereignisse in den Jahren 2017 (Sturmschäden), 2018 (Dürre) und 2019 (Dürre) zu massiven Schäden in deutschen Wäldern geführt haben. Insbesondere von Hitze und Trockenheit vorgeschädigte Fichten wurden durch Borkenkäfer geschädigt und starben ab. Die Ergebnisse aus dem Jahr 2020 gehören zu den schlechtesten seit der Einführung der Waldzustandserhebung im Jahr 1984. 37 % alle Bäume weisen Verlichtungen auf, d.h., dass etwa ein Viertel der Blätter oder Nadeln vorzeitig abfallen. Darüber hinaus ist eine deutliche Verschlechterung des Kronenzustandes bei rd. 80 % über alle Baumarten hinweg zu beobachten (BMEL, 2021a). Die Folgeschäden der Witterungsverhältnisse der letzten Jahre spiegeln sich in einem hohen Anteil an Schadholz von etwa drei Viertel des gesamten jährlichen Holzeinschlags in 2020 wider (Abbildung 3). Im Vergleich zum Vorjahr ist dieser um 16,8 % auf 80,42 Mio. m³ angestiegen. Während der Holzeinschlag bei Eichen-, Buchen- und Kiefernholz jeweils erneut etwas zurückgegangen war, stieg die Erntemenge beim Fichtenholz um knapp 30 % gegenüber dem Vorjahr an (DESTATIS, 2022c). Die deutlich erhöhten Erntemengen an Fichtenholz in 2020 hing vor allem mit dem hohen Schadholzaufkommen zusammen, dass zu 78,3 % auf Schäden durch Insekten (v.a. Borkenkäfer) und zu 16,8 % auf Wind-/Sturmschäden zurückzuführen war (BMEL, 2021). Die Rohstoffversorgung mit Holz ist in Deutschland trotz der zunehmenden Schäden der letzten Jahre weiterhin gesichert. Der durchschnittliche Zuwachs an Holz von 10,9 m³ pro Hektar und Jahr lässt nach Abzug von Ernteverlusten und Rinde eine nachhaltige Entnahmemenge von durchschnittlich 78-105 Mio. m³ pro Jahr in Deutschland zu (MANTAU et al., 2018). Um die deutschen Wälder langfristig widerstandsfähiger gegen Witterungs- und Umwelteinwirkungen zu machen, sollen Wälder mit einseitig hohen Anteilen an Fichten und Buchen vermieden werden und mit Fördermaßnahmen zu klimastabileren Mischbeständen mit überwiegend heimischen Baumarten umstrukturiert werden (BMEL, 2021a; BOLTE et al., 2021).

Der hohe Schadholzanfall seit 2018 hat dazu geführt, dass am Markt für Nadel-Rohholz ein Überangebot vorherrschte. Trotz der Reduktion von Holzimporten, einer Erhöhung der Verarbeitungs- und Lagerkapazitäten sowie steigenden Exportmengen, ging der Preis für Rohholz bis Ende 2020 deutlich zurück. Im Gegensatz zu vielen anderen Branchen waren die Holzmärkte nur kurzzeitig negativ durch die COVID-

Abbildung 3. Rohholzeinschlag in Deutschland (ohne Rinde in Mio. m³)



Quelle: eigene Darstellung nach DESTATIS (2022c)

19-Pandemie beeinträchtigt. Die hohe Nachfrage nach Nadelstammholz bei weltweit knappen Lagerbeständen sorgte zum Jahreswechsel 2020/21 dafür, dass die Rohholzpreise relativ schnell wieder anstiegen (BMEL, 2021; DHWR, 2021). Neben einer hohen Inlandsnachfrage für den Bau von Wohnhäusern sorgte insbesondere der stark angestiegene Holzexport in die USA Anfang 2021 für eine Knappheit an Rohholz in Deutschland.

Während die Preise für Stammholz aufgrund mangelnder Verfügbarkeit an guter Holzqualität deutlich stiegen, nahm der Preis für Schadholz aufgrund des Überflusses an Rohholz mit geringer Qualität relativ deutlich ab. Die hohe Verfügbarkeit von Schadholz spiegelte sich auch in der Produktionsmenge von Holzpellets in Deutschland wider, die in 2020 erstmals mehr als 3 Mio. t betrug (DEPV, 2021).

4 Energetische Verwendung von Biomasse

In 2020 lieferte Biomasse mit insgesamt 50,9 TWh (2019: 50,1 TWh) 1,5 % mehr Strom als im Vorjahr. Mit einem Anteil von 20,3 % an der Bruttostromerzeugung aus EE hatte Biomasse nach Windkraft noch vor Photovoltaik die zweithöchste Bedeutung im Betrachtungszeitraum. Der Wärme-Endenergieverbrauch aus Biomasse betrug in 2020 155,6 TWh (2019: 157,6 TWh). Dies entspricht einem Rückgang gegenüber 2019 von -1,3 % (EE insgesamt -0,2 %). Mit einem Anteil von 85,6 % am Wärme-Endenergieverbrauch aus EE lieferte Biomasse trotz der gering

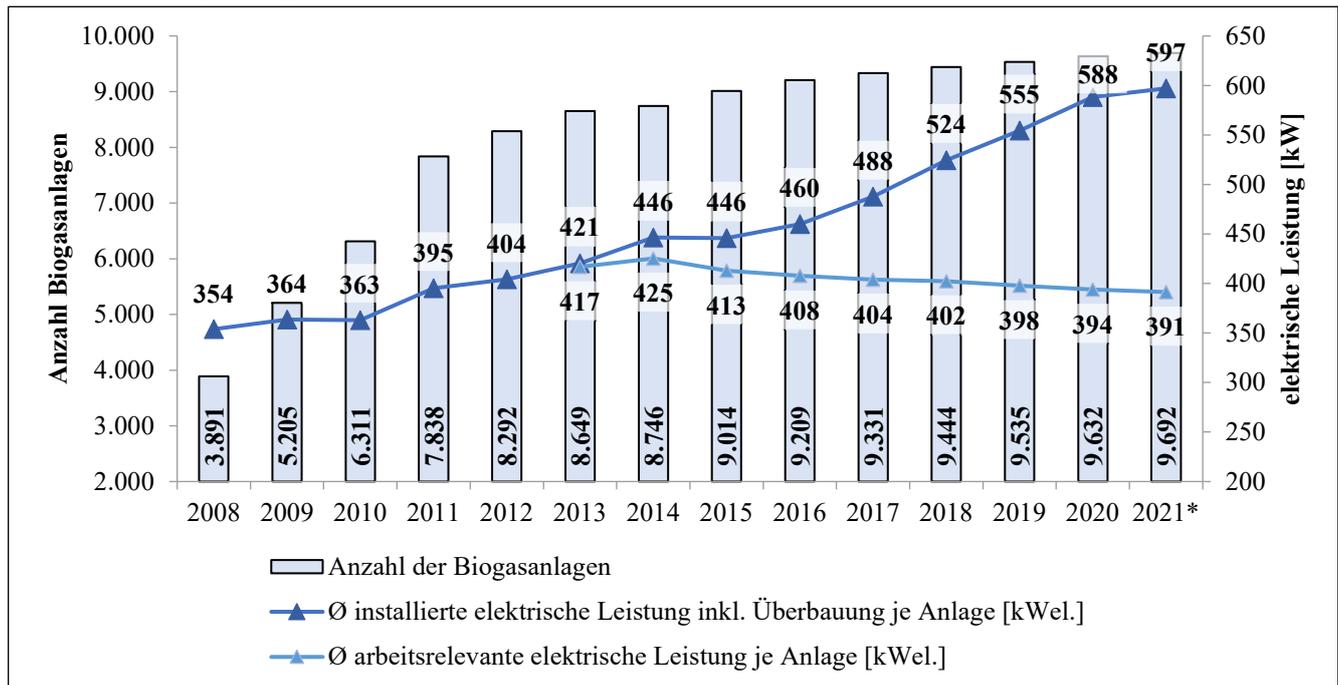
fügigen Abnahme den mit Abstand größten Anteil an erneuerbarer Wärme in Deutschland (BMWl, 2021).

4.1 Entwicklung der Biogasproduktion

Die Biogaserzeugung lieferte in 2020 mit einer Bruttostrommenge von 28.757 Gigawattstunden (GWh) 11,5 % des erzeugten Stroms und mit 13.549 GWh 7,5 % der erzeugten Wärme aus EE. Die produzierte Energiemenge konnte damit um 1,5 % beim Strom und 1,9 % bei Wärme gegenüber dem Vorjahr gesteigert werden (BMWl, 2021). Im Jahr 2020 wurden 9.632 Biogasanlagen (davon 235 Biomethan-Einspeiseanlagen) in Deutschland betrieben (Abbildung 4). Die für 2020 zunächst prognostizierte, erstmalige Abnahme der Anzahl an Biogasanlagen seit Einführung des EEG im Jahr 2000 hat sich damit nicht bestätigt – im Gegenteil die Anzahl an Anlagen konnte in 2020 um 97 Biogasanlagen im Vergleich zum Vorjahr sogar gesteigert werden. Dennoch blieb die arbeitsrelevante Leistung mit 3.793 MW nahezu unverändert (FvB, 2021). Entsprechend der gestiegenen Anzahl an Biogasanlagen betrug die durchschnittliche arbeitsrelevante Leistung je Anlage im Jahr 2020 nur noch 394 kWel. (2019: 398 kWel./Anlage) (FvB, 2020; FvB, 2021). Diese Beobachtung ist damit zu begründen, dass es sich bei den zugebauten Neuanlagen seit 2015 hauptsächlich um Güllekleinanlagen mit einer maximalen elektrischen Leistung in Höhe von 75 kW handelt (MÜLLER-LOHSE, 2019).

Die installierte elektrische Leistung der Biogaserzeugung in Deutschland wurde in 2020 auf 5.666 MW weiter ausgebaut. Entgegen der sinkenden

Abbildung 4. Entwicklung der Anzahl der Biogasanlagen und der elektrischen Leistung je Anlage [kWel.]



*Prognosewerte

Quelle: eigene Darstellung nach FvB (2021)

Tendenz der arbeitsrelevanten Leistung pro Anlage stieg die installierte Leistung auf 588 kWel. pro Biogasanlage an (2019: 555 kWel.). Diese liegt darin begründet, dass Biogasanlagen weiterhin in die Überbauung ihrer Biogasanlagen im Rahmen der Flexibilisierung investieren. Für 2021 wird von einer erneuten Erhöhung der installierten Leistung pro Anlage bei abnehmender Tendenz der durchschnittlichen arbeitsrelevanten Leistung ausgegangen (FvB, 2021). Im neu aufgelegten EEG 2021 wurde die bisherige Deckelung der Flexprämie gestrichen sowie eine Anhebung des Flexibilitätszuschlags von 40 €/kW auf 65 €/kW installierte elektrische Leistung für neu zubezuschlagende Anlagen angehoben. Um die flexible Stromproduktion in der Praxis sicherzustellen, ist im EEG 2021 festgelegt worden, dass an mindestens 4.000 Viertelstunden im Jahr mindestens 85 % der installierten Leistung abgerufen werden muss (EEG, 2020). Unabhängig dieser Qualitätskriterien für den Erhalt des Flexzuschlags, haben die hohen Strompreise an der Börse das Mehrerlöspotential durch eine flexible Fahrweise aufgezeigt. Der Monatsmittelwert ist innerhalb weniger Wochen von 3 ct/kWh auf 18 ct/kWh angestiegen. Nachdem die Mehrerlöse durch die Flexibilisierung in den letzten Jahren bei rd. 1-2 ct/kWh Strom plus Flexprämie lagen, waren durch die Preissteigerung an der Börse Mehrerlöse von bis zu

6 ct/kWh möglich (NEUMANN, 2021). Der Zusammenhang zwischen dem Börsenpreis für Strom und der Stromerzeugung aus Wind und Sonne zeigt, dass die Biogasproduktion als flexible Energiequelle für den Ausgleich der Residuallast benötigt wird (BRAUNER, 2013). Während auf der einen Seite Mehrerlöse bei den Biogasanlagenbetreibern erzielt werden können, bieten diese aus volkswirtschaftlicher Sicht kurzfristig verfügbaren, flexiblen Strom der aufgrund der besseren CO₂-Quote eine kostengünstigere Alternative zum Strombezug aus Gas- und Kohlekraftwerken darstellt (NEUMANN, 2021; RAUH, 2021). Während der Biogaserzeugung durch den Bedarf an flexibler Stromproduktion einerseits neue Chancen eingeräumt werden, kommen andererseits laufend neue Herausforderungen für Anlagenbetreiber hinzu (u.a. Düngerverordnung, Redispatch). Mit der nationalen Umsetzung der RED II durch Inkrafttreten der Biomassestrom-Nachhaltigkeitsverordnung im November 2021 haben Biogasanlagen mit mehr als zwei Megawatt Feuerungswärmeleistung mit einer Übergangsfrist bis zum 30.06.2022 eine Nachhaltigkeitszertifizierung nachzuweisen (OMNICERT UMWELTGUTACHTER, 2021). Hierbei müssen Nachhaltigkeitsanforderungen an die Produktion der genutzten Rohstoffe sowie die Einhaltung von Umwelt- und Sozialstandards und der Schutz von erhaltenen Naturschutzflächen (z.B.

Torfmoore, Grünland, Wälder) sichergestellt werden (FÖSTE, 2021; OMNICERT UMWELTGUTACHTER, 2022).

4.2 Entwicklung der Biokraftstoffproduktion

Im Jahr 2020 wurden weltweit auf rd. 1,4 Mrd. ha landwirtschaftlicher Nutzfläche Kulturpflanzen zur Nahrungsmittel- und Energieproduktion angebaut, wovon rd. 7 % der Anbaufläche zur Erzeugung von Biokraftstoffen genutzt wurden (UFOP, 2022). Laut einer Studie der IEA wird die weltweite Nachfrage nach Biokraftstoffen unter den aktuellen Gegebenheiten zwischen 2021 und 2026 um ca. 41 Mrd. l (28 %) steigen. Die staatliche Politik wird dabei mit der spezifischen Gestaltung der Rahmenbedingungen für Biokraftstoffe (z.B. THG-Emissionsquoten, Positivliste für Rohstoffe) weiterhin Haupttreiber für die voraussichtliche Expansion der Biokraftstoffproduktion sein (IEA, 2021).

In Deutschland belief sich der Gesamtkraftstoffverbrauch im Jahr 2020 durch die COVID-19-Pandemie auf 51,9 Mio. t. Im Jahr 2019 waren es 56,3 Mio. t Kraftstoffe. Dabei entfielen in 2020 rd. 62,6 % auf Diesel- und 30,0 % auf Ottokraftstoffe. Der Anteil an biogenen Kraftstoffen ist dabei weiter angestiegen und lag 2020 bei rd. 6,5 % bzw. 4,19 Mio. t (bezogen auf den Energiegehalt). Im Vergleich dazu lag der Anteil in 2019 bei 4,9 % bzw. 3,5 Mio. t. Im Jahr 2020 ist Biodiesel in Deutschland

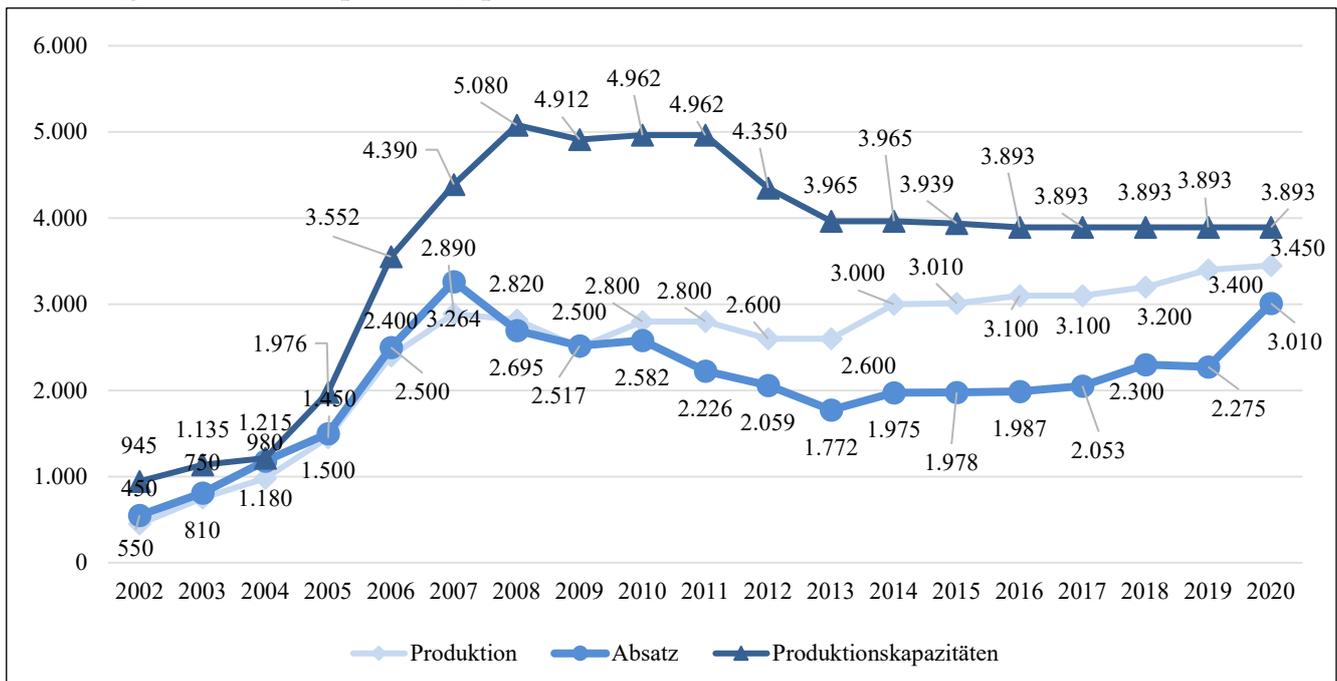
mit rd. 3,0 Mio. t (2019; 2,27 Mio. t) und einem Marktanteil unter den Biokraftstoffen von 71,2 % nach wie vor der wichtigste Biokraftstoff, gefolgt von Bioethanol mit rd. 1,1 Mio. t (26,2 %), Biomethan mit 65.000 t (1,6 %), hydrierten Pflanzenölen mit 42.000 t (1,3 %), und Pflanzenölen mit 1.000 t (0,03 %) (FNR, 2022; DESTATIS, 2022d). In den letzten Jahren spielte v.a. der ökologische Aspekt der Biokraftstoffe eine zunehmend wichtige Rolle. 2019 wurden durch die Nutzung von Biokraftstoffen 7,8 Mio. t CO₂e eingespart. In 2020 waren es bereits 9,3 Mio. t CO₂e (FNR, 2022; UFOP, 2022).

4.2.1 Biodieselproduktion

In 2020 stagnierte die Biodieselproduktion in Deutschland mit 3,45 Mio. t im Vergleich zum Vorjahr mit 3,4 Mio. t (UFOP, 2022; VDB, 2022; FNR, 2022) (Abbildung 5). Die deutschen Produktionskapazitäten verblieben auf dem Vorjahresniveau von rd. 3,9 Mio. t; die Kapazitätsauslastung der Biodieselanlagen betrug nach wie vor rd. 80 %. Der Biodieselaussatz stieg laut der Bundesanstalt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA) von rd. 2,3 Mio. t in 2019 auf 3,01 Mio. t in 2020 an (VDB, 2022; FNR, 2022).

Die EU-27 ist nach wie vor der weltweit größte Hersteller von Biodiesel. Die Erzeugung belief sich in 2020 einschließlich der Produktion von hydrierten Pflanzenölen (HVO) auf rd. 15,53 Mrd. l (2019: 15,78 Mrd. l). Hier sind die Entwicklungen für FAME (Fettsäuremethylester) und HVO jedoch zu unter-

Abbildung 5. Biodieselpkapazitäten, -produktion und -absatz in Deutschland 2002-2020



Quelle: eigene Darstellung in Anlehnung an UFOP (2022); VDB (2022) und FNR (2022)

scheiden, da die FAME-Produktion um 7 % zurückging, während die HVO-Produktion um 23 % angestiegen ist (VDB, 2022). Der Biodieselvebrauch in der EU hat sich dabei wie erwartet aufgrund der durch die COVID-19-Pandemie verursachten Bewegungsbeschränkungen im Verkehrswesen und der wirtschaftlichen Rezession in 2020 gegenüber dem Vorjahr verringert. Für 2021 wird mit einem Anstieg des Verbrauchs auf 16,11 Mrd. l gerechnet (USDA, 2022). Die Biodieselproduktionskapazitäten in der EU stagnierten bei rd. 21,23 Mrd. l. Die Auslastung betrug 56,2 % (2019: 60,8 %). Für 2021 wird mit einer leichten Erhöhung der Auslastung auf 58,1 % gerechnet. Die Schwerpunktländer der europäischen Biodieselnachfrage sind wie auch in den letzten Jahren Deutschland (2020: 3,52 Mrd. l; 2019: 2,78 Mrd. l), Frankreich (2020: 3,20 Mrd. l; 2019: 3,30 Mrd. l), Spanien (2020: 1,90 Mrd. l; 2019: 2,27 Mrd. l), Schweden (2020: 1,6 Mrd. l; 2019: 1,74 Mrd. l), UK (2020: 1,43 Mrd. l; 2019: 1,68 Mrd. l) und Italien (2020: 1,14 Mrd. l; 2019: 1,26 Mrd. l) (USDA, 2022; UFOP, 2022). Für das Jahr 2021 wird ein Anstieg des Verbrauchs um 2,5 % und der Produktion um 3,7 % prognostiziert (USDA, 2022).

Die EU-27 (mit dem Vereinigten Königreich) war in 2020 mit einer Produktion von etwa 46,5 Mio. t bzw. einem Anteil von rd. 33 % an der weltweiten Gesamtproduktion von Biodiesel erneut der größte Biodieselproduzent weltweit. In Europa wird hauptsächlich Rapsöl, auf dem amerikanischen Kontinent in erster Linie Sojaöl und im asiatischen Raum Palmöl zur Biodieselherstellung verwendet. Die Biodieselproduktion konzentriert sich somit auf die EU-27, die USA, Brasilien und Indonesien. Eine zunehmende Bedeutung am Biodieselmärkte haben Indonesien und Malaysia als Haupterzeugerländer von Palmöl erlangt. Durch den starken Ausbau der Produktionskapazitäten zwischen 2017 und 2019 ist Indonesien heute einer der größten globalen Biodieselproduzenten. Diese Produktionssteigerungen sind als Reaktion auf Angebotsüberhänge an den Pflanzenölmärkten und den damit verbundenen Preisdruck zu verstehen. Indonesien und Malaysia heben, im Gegensatz zur EU, ihre nationale Beimischungsverpflichtung stetig an, um die Erzeugerpreise zu stabilisieren und die Devisenausgaben für Erdölimporte zu reduzieren (UFOP, 2022).

Weltweit hat die Produktion von Biodiesel zugenommen und damit auch der Bedarf an Rohstoffen. In 2020 stieg der Verbrauch auf 39,5 Mio. t an (2019: 38,51 Mio. t) (REN21, 2021). Auch der HVO-Verbrauch stieg von 5,4 Mio. t in 2019 auf 7,5 Mio. t in

2020 an (REN21, 2021). Schwerpunktländer der weltweiten Biodieselproduktion im Jahr 2019 sind nach der EU-28 mit 11,85 Mio. t, Indonesien mit 8,00 Mio. t, die USA mit 5,74 Mio. t, Brasilien mit 5,19 Mio. t, Argentinien mit 2,15 Mio. t, Malaysia mit 1,5 Mio. t und Thailand mit 1,47 Mio. t. Neben der EU mit einem Verbrauch von 13,38 Mio. t sind vor allem die USA mit 6,03 Mio. t sowie Indonesien (5,85 Mio. t), Brasilien (5,16 Mio. t) und Thailand (1,45 Mio. t) als größte Verbraucher zu nennen (UFOP, 2020, 2022). Der Rohstoffeinsatz ist 2019 im Vergleich zu 2018 rd. 11 % auf etwa 46 Mio. t gestiegen. Auf Palmöl entfallen 39 % der globalen Rohstoffbasis, Sojaöl (25 %), Rapsöl (14 %), Altspeisefette (11 %) sowie tierische und andere Fette (11 %) (UFOP, 2022). Infolge der nationalen Quoten- bzw. Biokraftstoffpolitik ist zu erwarten, dass v.a. in Nord- und Südamerika sowie Südostasien die Biodieselproduktion aus Soja- bzw. Palmöl weiter anwachsen wird. Für die EU-27 wird prognostiziert, dass sich der Anteil von Biodiesel aus Rapsöl und Abfallölen und -fetten auf Kosten von Palmöl erhöht. Ursache ist die nationale Umsetzung der Erneuerbare Energien-Richtlinie (2018/2001/EG) – RED II. Diese sieht das Auslaufen der Anrechnung von Biokraftstoffen aus Rohstoffen mit hohem Landnutzungsänderungsrisiko (iLUC) vor (MOHRMANN et al., 2021; UFOP, 2022; USDA, 2022).

4.2.2 Bioethanolproduktion

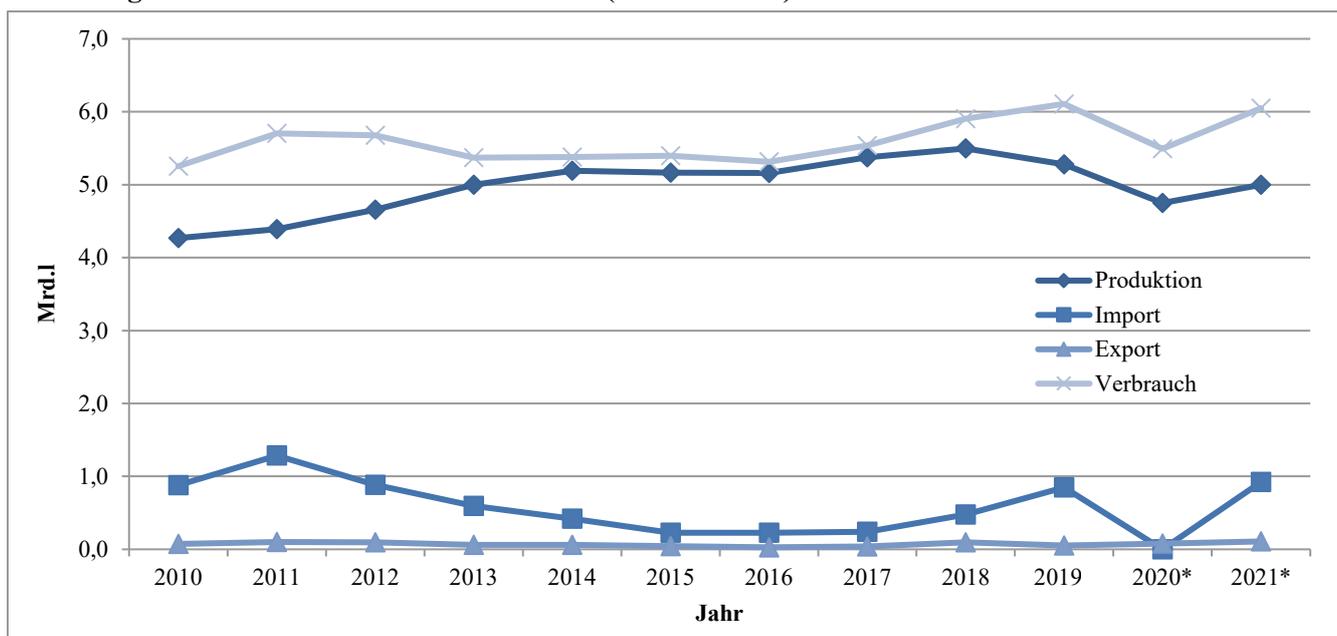
Laut dem Bundesverband der deutschen Bioethanolwirtschaft (BDBE) stieg die Produktion von Bioethanol in Deutschland 2020 auf insgesamt 700.000 t (2019: 652.000 t). Dies entspricht einem Zuwachs gegenüber 2019 um 7,1 % (BDBE, 2022). Aus Melasse und Zuckerrübenstoffen wurden 108.000 t Bioethanol (15 %) und aus Futtergetreide 590.000 t (85 %) hergestellt. Hinzu kommt ein nicht genau quantifizierter Anteil von Bioethanol, der aus Rest- und Abfallstoffen produziert wurde. Dafür wurden rd. 2,5 Mio. t Futtergetreide als Rohstoff eingesetzt. Dies entspricht 5,8 % der deutschen Getreideernte von 43,2 Mio. t im Jahr 2020. Im Jahr 2020 stieg die abgegebene Menge Bioethanol um 22 % auf rd. 920.000 t (2019: 754.000 t) an. Die starke Zunahme ist vor allem auf die um über 27 % gestiegene Abgabe von Bioethanol für Kraftstoffzwecke zurückzuführen (2020: 691.000 t). Auch die abgegebene Menge von Bioethanol mit Bestimmung für die Nahrungsmittel- und Getränkeindustrie (+9,4 %) sowie die chemische und pharmazeutische Industrie (+5,1 %) nahm im Vergleich zum Jahr 2019 zu. In einem 2020 pandemiebe-

dingt stark rückläufigen Ottokraftstoffmarkt, in dem mit 16,2 Mio. t fast 10 % weniger Benzin abgesetzt wurde als im Vorjahr (2019: 18 Mio. t), verringerte sich auch der absolute Verbrauch von Bioethanol um 4 % auf knapp 1,10 Mio. t (2019: 1,14 Mio. t). Zur ETBE-Erzeugung wurden über 125.000 t Bioethanol und damit 42,8 % mehr als im Jahr 2019 (88.000 t) eingesetzt (BDBE, 2022; FNR, 2022).

Der Marktanteil der Benzinsorte Super E10 erhöhte sich leicht auf 14 % (2019: 13,7 %). Die absolute Absatzmenge betrug hier 2,27 Mio. t (2019: 2,46 Mio. t). Super (E5) erzielte mit 13,1 Mio. t in 2020 einen Marktanteil von 80,6 %. Im Vorjahr entsprachen die abgesetzten 14,7 Mio. t Super (E5) einem Marktanteil von 81,7 %. Der Absatz von Super Plus erhöhte sich in 2020 im Vergleich zum Vorjahr um 5,4 % auf fast 878.000 t (2019: 833.000 t). Entsprechend lag der Marktanteil von Super Plus mit 5,4 % über dem Vorjahresniveau (2019: 4,6 %). Die im vergangenen Jahr von 4 % auf 6 % gestiegenen Treibhausgasminderungsvorgaben für die Mineralölkraftwirtschaft sollen in den kommenden Jahren weiter erhöht werden. Das entsprechende Gesetz zur Weiterentwicklung der Treibhausgasminderungs-Quote (THG-Quote) befindet sich zurzeit in den parlamentarischen Beratungen. Geplant ist u.a. die THG-Quote von 6 % auf 22 % im Jahr 2030 anzuheben. Diese Anhebung wird dazu führen, dass der Anteil nachhaltiger Biokraftstoffe im Verkehr mittelfristig weiter steigt (BDBE, 2022; FNR, 2022; USDA, 2022).

Die Bioethanolproduktion in der EU lag im Jahr 2020 mit rd. 4,75 Mrd. l unter dem der Produktionsmenge von rd. 5,28 Mrd. l in 2019 (Abbildung 6). Die Produktionsmengen von Kraftstoffethanol in der EU steigen jedoch nur noch sehr langsam an. Für 2021 wird mit einer Menge von knapp 5 Mrd. l ein leichter Zuwachs prognostiziert (USDA, 2022). In 2020 war Frankreich mit 1,05 Mrd. l weiterhin größter Produzent vor Deutschland mit 875 Mio. l, Ungarn mit 639 Mio. l, den Niederlanden mit 538 Mio. l und Spanien mit 487 Mio. l. Der deutsche Bioethanolverbrauch machte 2020 1,39 Mrd. l aus. Für 2021 wird er auf 1,52 Mrd. l geschätzt. Danach folgen Frankreich (684 Mio. l) und das Vereinigte Königreich (0,557 Mio. l) sowie die Niederlande mit 390 Mio. l. In allen Ländern wird in den nächsten Jahren mit einem steigenden Verbrauch an Bioethanol gerechnet. Nachdem der Gesamtverbrauch in 2020 in der EU mit rd. 5,5 Mrd. l (2019: 6,11 Mrd. l) gegenüber dem Vorjahr abgenommen hatte, wird für 2021 eine Verbrauchssteigerung auf 6,05 Mrd. l prognostiziert (USDA, 2022; FNR, 2022). Der Zuwachs war und ist das Ergebnis einer schrittweisen Erhöhung der Beimischungsziele. Das Potential von Bioethanol in Bezug auf eine schnelle und kostengünstige Senkung von THG-Emissionen wird daher unter den aktuellen Bedingungen nicht weiter ausgeschöpft. Die Kapazitäten zur Produktion von Bioethanol belaufen sich in der EU zurzeit auf rd. 8,9 Mrd. l. Die Produktionskapazitäten haben sich seit 2012 nicht signifikant erhöht

Abbildung 6. Der Bioethanolmarkt in der EU (2010 bis 2021)



*geschätzte Werte

Quelle: eigene Darstellung in Anlehnung an USDA (2022)

(USDA, 2022; ePURE, 2021). Ein weiterer Anstieg des Verbrauchs von Bioethanol wird für 2022 und die folgenden Jahre nicht erwartet, da die Obergrenze für konventionelle Biokraftstoffe und die Erhöhung des Mindestanteils fortschrittlicher Biokraftstoffe, die die Beimischung von erneuerbaren Kraftstoffen begünstigen wird. Ein weiterer wichtiger Faktor ist die zunehmende E-Mobilität und rückläufiger Benzinverbrauch. Weiterhin werden in den Erntesaisons 2021 und 2022 die hohen Rohstoffpreise die Wettbewerbsfähigkeit von Ethanol im Vergleich zu fossilen Kraftstoffen beeinträchtigen (USDA, 2022; BDBE, 2022).

Die Welt-Ethanolproduktion lag in 2020 bei 99,97 Mrd. l (2019: 109,8 Mrd. l). Für 2021 wird die Produktion auf 103,80 Mrd. l geschätzt. Im Jahr 2020 entfielen auf die USA 52,77 Mrd. l (2019: 59,72 Mrd. l), auf Brasilien 30,59 Mrd. l (2019: 32,52 Mrd. l), auf Europa 4,77 Mrd. l (2019: 5,19 Mrd. l), auf China 3,5 Mrd. l (2019: 3,78 Mrd. l) und auf Kanada 1,63 Mrd. l (2019: 1,97 Mrd. l) (RFA, 2020). In 2020 verringerte sich die globale Ethanolproduktion von 109,77 Mrd. l um rd. 9,8 Mrd. l auf 99,73 Mrd. l. Für 2021 wird für alle Länder wieder eine Ausweitung der Mengen auf 103,38 Mrd. l prognostiziert. Der Verbrauch von Getreide und Zucker zur globalen Herstellung von Bioethanol wächst weiter an, neben den USA sind hier vor allem China und Südamerika zu nennen. Der Einsatz von Getreide (insbesondere Mais) als Rohstoff soll 2021/22 um weitere 3 % auf 168,4 Mio. t steigen (UFOP, 2022).

4.3 Strom- und Wärmeerzeugung aus biogenen Festbrennstoffen

Bei biogenen Festbrennstoffen handelt es sich in erster Linie um organische Brennstoffe, die zum Zeitpunkt der energetischen Nutzung in fester Form vorliegen (KALTSCHMITT et al., 2016; BEER et al., 2018). Neben holzartiger Biomasse (Waldrest- und Schwachholz, Holzkohle, Altholz sowie Industrie-, Verpackungs- und Bauholz) spielen zunehmend nachwachsenden Rohstoffen, wie Agrarhölzer bzw. Kurzumtriebsplantagen (KUP), eine wichtige Rolle in der Kategorie der biogenen Festbrennstoffe (FNR, 2014; BEER et al., 2018). Darüber hinaus werden halmartige (z.B. Stroh, Grünabfälle) und sonstige Brennstoffe (z.B. Mindergetreide, Getreideausputz) hinzugezählt (FNR, 2014).

Bei der Stromerzeugung aus Biomasse haben biogene Festbrennstoffe mit 11,23 TWh (2019:

11,04 TWh) nach Biogas die zweithöchste Bedeutung. Dies entspricht einem Anteil von 4,5 % an der Stromerzeugung aus EE. Die Zunahme gegenüber dem Vorjahr war mit 1,5 % im Vergleich zur Zunahme der Stromerzeugung aus EE mit 4,1 % vergleichsweise niedrig (BMWl, 2021). Bei der Wärmeerzeugung nehmen biogene Feststoffe für die Nutzung als Endenergie (z.B. Fernwärme), Nutzenergie (z.B. Strahlungswärme eines Ofens), Sekundärenergie (z.B. Dampf, der in elektrische Energie umgewandelt wird) und Kälteanwendungen verglichen mit der Stromerzeugung eine gewichtigere Rolle ein (KALTSCHMITT et al., 2016; BMWl, 2021). Biogene Festbrennstoffe inkl. des Anteils des Abfalls, Klärschlamm und Holzkohle lieferten trotz eines Rückgangs um 2,3 TWh gegenüber dem Vorjahr mit 116,1 TWh den Großteil der Wärme aus EE. Flüssige und gasförmige Biomasse machten zusammen rd. 32,3 TWh aus. Biogene Festbrennstoffe werden mit 67,9 TWh vornehmlich im Privatbereich als Brennholz, Holzpellets und Holzkohle genutzt. In diesem Bereich war die Abnahme gegenüber dem Vorjahr mit knapp 4,9 % relativ deutlich. Im Bereich Gewerbe, Handel und Dienstleistungssektor ist die Wärmeerzeugung mit 18,9 TWh nahezu gleichgeblieben. Im Industriesektor war nach dem Rückgang im Vorjahr eine Zunahme auf 24,1 TWh festzustellen. Die Erzeugung von Wärme aus biogenen Festbrennstoffen in Heizwerken und Heizkraftwerken spielt weiterhin eine eher untergeordnete Rolle (BMWl, 2021). Ein besonderes Interesse bei den biogenen Feststoffen galt in 2020 Holz- und Pelletheizungen (Pelletkaminöfen, Pelletkessel). Neben der Förderung durch die Bundesförderung für effizientes Bauen (BEG) führten die günstigen Brennstoffkosten von Holzpellets mit 4,75 ct/kWh zu einem starken Interesse bei Handwerkern und Verbrauchern. Für 2021 rechnen Branchenvertreter mit einer Steigerung des Zubaus von Pelletfeuerungsanlagen von rd. 10 % gegenüber 2020 gerechnet (DEPV, 2021). Für Unsicherheit sorgen hingegen die Forderungen des Umweltbundesamtes Anfang 2022, auf das Heizen mit Holz und die Förderung von Pellet-Heizungen zu verzichten, da diese trotz ausgeglichener CO₂-Bilanz zu einer erhöhten Feinstaubbelastung führen (MÜLLER, 2022). Bei den weiteren Wärmeerzeugenden, erneuerbaren Energiequellen fällt auf, dass Wärmepumpen (darunter insb. Luft/Wasser-Wärmepumpen) weiter an Bedeutung gewinnen. Dies bestätigt auch die erneute Zunahme der Wärmeerzeugung um 1,4 TWh auf 17,4 TWh im Jahr 2020 (BMWl, 2021).

5 Agri-PV – eine Chance für Landwirtschaft und Energiewende?

Ziel der neuen Bundesregierung in Deutschland ist es, die installierte elektrische Leistung von PV-Anlagen bis 2030 auf 200 GW zu erhöhen. Zur Erreichung dieser Vorgabe muss die derzeit bestehende installierte elektrische PV-Leistung von rd. 54 GW in weniger als zehn Jahren nahezu vervierfacht werden (BMWl, 2021). Hierfür spielt insbesondere die Ausschöpfung des Potentials an landwirtschaftlichen Flächen zur Energieproduktion eine entscheidende Rolle (BMWl, 2022). Neben der hohen Effizienz von PV-FFA, die je nach Standort und Ausrichtung bis zu 1,54 Mio. kWh pro ha an Strom produzieren können (vgl. Mais für die Biogasproduktion = rd. 15.000 kWh/ha (SÜß, 2021; WIRTH, 2022)), sprechen auch die vergleichsweise niedrigen Stromgestehungskosten von 3-5,5 ct/kWh für den Ausbau von PV-FFA (WIRTH, 2022). Aktuell befinden sich mit rd. 15,8 GW nur rd. 30 % der installierten Leistung an PV-FFA auf Ackerflächen, während rd. 70 % als PV-Dachanlagen realisiert sind (AEE, 2021). Die regionale Verteilung ist dabei sehr heterogen, insbesondere in Ostdeutschland und Bayern sind PV-FFA vorzufinden, während im West bzw. Südwesten bisher nur wenige Anlagen solcher Bauart installiert sind (siehe Tabelle 2).

Simultan zu der geführten Debatte um die Nutzung von Ackerflächen zur Energiepflanzenenerzeugung

(vgl. Kapitel 3.2) stellt die Nutzung von Ackerflächen mit PV-FFA eine ähnliche Problematik aufgrund der Konkurrenz zur Nahrungsmittelherstellung dar (RÖSCH, 2016; BADELDT et al., 2020; GONZÁLEZ-GARCÍA et al., 2020; TROMMSDORFF et al., 2021). Aus diesem Grund ist die gesellschaftliche Akzeptanz gegenüber PV-FFA im Vergleich zu PV-Dachanlagen deutlich eingeschränkt (HOLNBURGER et al., 2010; NASPETTI et al., 2016; WOLF et al., 2020). Auch in der Landwirtschaft werden PV-FFA konträr diskutiert. Während einerseits die Chance auf eine zusätzliche Einnahmequelle für die Landwirtschaft besteht, stellen andererseits die regionale Flächenknappheit und das hohe Interesse von außerlandwirtschaftlichen Investoren ein hohes Risiko dar (MICHEL, 2021; WEDEMEYER und REINERT, 2022). Bei einem aktuellen, durchschnittlichen Pachtflächenanteil von rd. 60 % besteht bei dem überwiegenden Teil der Betriebe eher die Gefahr, dass Bewirtschaftungsfläche verloren geht, als das auf den eigenen Flächen von PV-FFA profitiert werden kann. Das seit Jahren steigende Pachtpreinsniveau erreichte in 2020 ein Preisniveau von 481 €/ha für Ackerland und 246 €/ha für Grünland bei Neuverpachtungen (PASCHER et al., 2021). Von Projektierern von PV-FFA werden Pachten zwischen 1.500 bis 3.000 €/ha für die Dauer von 20 bis 40 Jahren gezahlt und sind ungeachtet rechtlicher und steuerlicher Unwägbarkeiten für Verpächter von landwirtschaftlichen Flächen entsprechend lukrativer als die landwirtschaftliche Produktion (MICHEL, 2021). Eine an-

Tabelle 2. Installierte elektrische Leistung von PV-Anlagen nach Bundesland

Bundesland	2018	2019	2020	Anteil PV-FFA 2020	
	GWp	GWp	GWp	GWp	Anteil in %
Baden-Württemberg	5,877	6,320	6,934	0,574	8,3
Bayern	12,357	13,243	14,560	3,677	25,3
Berlin	0,106	0,116	0,135	0,002	1,6
Brandenburg	3,703	4,007	4,450	3,124	70,2
Bremen	0,044	0,048	0,052	0,001	1,9
Hamburg	0,045	0,051	0,060	0,001	1,8
Hessen	2,054	2,215	2,441	0,368	15,1
Mecklenburg-Vorpommern	1,878	2,099	2,477	1,453	58,7
Niedersachsen	3,930	4,268	4,679	0,665	14,2
Nordrhein-Westfalen	4,917	5,404	6,004	0,304	5,1
Rheinland-Pfalz	2,196	2,336	2,519	0,574	22,8
Saarland	0,465	0,488	0,525	0,155	29,5
Sachsen	1,878	2,120	2,367	1,12	47,3
Sachsen-Anhalt	2,503	2,841	3,149	1,839	58,4
Schleswig-Holstein	1,667	1,794	1,920	0,590	30,7
Thüringen	1,464	1,654	1,856	0,830	44,7
Deutschland	45,158	49,047	53,848	15,837	29,4

Quelle: eigene Darstellung nach AEE (2021)

dere Möglichkeit, das Potential für PV-FFA auf Ackerflächen nachhaltiger zu nutzen, könnte der Einsatz von sogenannten Agri-Photovoltaik-Anlagen (APV) darstellen (TROMMSDORFF et al., 2021; DBV, 2022). Die Akzeptanz solcher Anlagentypen ist wie auch bei PV-FFA durch den Eingriff in das Landschaftsbild und den Eingriff in den Boden durch Fundamente bei hoch aufgeständerten APV vorbelastet (SÁNCHEZ-PANTOJA et al., 2018). Nach ersten Erkenntnissen aus dem Projekt APV-RESOLA hängt die Akzeptanz für APV wesentlich von der jeweiligen Anspruchsgruppe, der Nutzung, der Höhe der Aufständigung und der Größe der Anlage ab (KETZER et al., 2019). Erste Studien zeigen, dass Landwirte ein grundsätzliches Interesse an APV haben, wobei diese von dem erwarteten Nutzen sowie von ökonomischen sowie produktionsbezogenen Einflussfaktoren abhängt (KETZER et al., 2020).

Während PV-FFA derzeit die Technologie mit den günstigsten Stromgestehungskosten unter den erneuerbaren Energien ist, gilt dies für Agri-PV nicht. Alle APV-Anlagentypen haben gegenüber PV-FFA abweichende Konstruktionsformen, die zu deutlich höheren Stromgestehungskosten führen. Neben teureren Solarmodulen sind aufwendigere Verankerungen und/oder wesentlich mehr Verkabelungen nötig. Auch der Installationsaufwand gestaltet sich komplizierter, teilweise bedingt durch die Flächenlage, den Flächenzuschnitt und die -größe (SCHARF et al., 2021). Insbesondere in Verbindung mit klassischen Ackerbausystem ergibt sich für die APV aufgrund der Höhe der Aufständigung und des damit verbundenen Mehraufwandes derzeit keine Wirtschaftlichkeit (BADELDT et al., 2020). Für APV werden Stromgestehungskosten zwischen 7 ct/kWh und 12 ct/kWh angegeben (SCHINDELE et al., 2020). Bei klassischen Ackerbausystemen liegt der Durchschnitt der Stromgestehungskosten für APV bei 9,9 ct/kWh auf Ackerland und bei 7,1 ct/kWh auf Dauerkulturen und Grünland (TROMMSDORFF et al., 2020). Die Stromgestehungskosten von APV sind damit fast doppelt so hoch wie bei klassischen PV-FFA, aber immer noch rd. 20 % niedriger als bei kleineren Dachanlagen (STEINHUESER, 2021). Der ökonomische Nachteil von APV gegenüber PV-FFA lässt sich durch eine zusätzliche landwirtschaftliche Nutzung auf der Fläche in der Regel nicht ausgleichen (BADELDT et al., 2020), obwohl erste Ergebnisse aus dem APV-RESOLA gezeigt haben, dass sich die Gesamtproduktivität der Fläche um ca. 60-90 % steigern lässt (STEINHUESER, 2021). Neben der PV-Erzeugung bringt der Ackerbau

noch rd. 80 % des Ertrags, der bei alleiniger Flächennutzung ohne APV erwirtschaftet werden würde (TROMMSDORFF et al., 2020). Während klassische Ackerbaukulturen, wie Weizen oder Mais, im Ertrag überproportional negativ auf die Beschattung reagieren, eignen sich nach aktuellem Kenntnisstand v.a. schattentolerante Kulturen, wie z.B. Kartoffeln, Salate sowie verschiedene Obst- und Sonderkulturen. Insbesondere bei Sonderkulturen können weitere Synergieeffekte durch Schutz vor Regen, Hagel und Wind genutzt werden. Auch in Dürre Jahren hat dieses System weitere Vorteile, da die Verdunstung je nach Grad der Beschattung und der entsprechenden Kultur, um 14-29 % abnimmt und den Wasserbedarf senkt (TROMMSDORFF et al., 2020; SCHARF et al., 2021).

Nach aktuellen rechtlichen Rahmenbedingungen können EEG-geförderte PV-FFA im Rahmen der Ausschreibung ausschließlich auf versiegelten Flächen, Konversionsflächen, in Randstreifen entlang von Autobahnen und Schienenwegen und je nach Bundesland in benachteiligten Gebieten errichtet werden (HANNEN, 2021). Diese Lenkungswirkung zum Schutz von Ackerflächen entfällt bei Großanlagen, die ohne EEG-Förderung wirtschaftlich gebaut werden können (TROMMSDORFF et al., 2020). Entsprechend sollen neue politische Rahmenbedingungen auf Ebene der EU, des Bundes, der Länder und der Kommunen für PV-FFA und APV-Anlagen geschaffen werden. Aktuell zählen beide Bauformen nicht zu den privilegierten Bauvorhaben nach §35 Abs. 1 oder Abs. 2. Entsprechend ist eine gemeindliche Bauleitplanung mit Aufstellung eines Bebauungsplans und die entsprechende Änderung des Flächennutzungsplans notwendig (STMB, 2021).

Um den Ausbau von PV-Anlagen in der Fläche voranzubringen, soll mit dem „Osterpaket“ im Frühjahr 2022 eine EEG-Förderung für APV neu beschlossen werden. Die Flächenprämie über die GAP soll bei der kombinierten Nutzung ermöglicht werden, sofern die landwirtschaftliche Nutzung zu max. 15 % durch die APV-Anlage beeinträchtigt wird. Ausgeschlossen sind bisher aus Gründen des Natur- und Klimaschutzes Schutzgebiete, Grünland, naturschutzrelevante Ackerflächen und Moorböden. Eine Ausnahme soll die PV-Stromerzeugung bei der Wiedervernässung von Mooren darstellen. Hierfür soll eine neue Flächenkategorie im EEG geschaffen werden. Darüber hinaus können die einzelnen Bundesländer „benachteiligte Gebiete“ freigeben. Weiterhin können PV-FFA-Anlagen nach wie vor auf Konversionsflächen und Seitenrandstreifen errichtet werden (BUNDESRE-

GIERUNG, 2022). Zur Sicherstellung eines nachhaltigen Ausbaus sollen Kommunen Kriterien und Anforderungen zum Naturschutz bei Anlagen vorschreiben können (BMWI, 2022). Wie die aktuellen Länderprogramme zeigen, haben einige Bundesländer die Bedingungen für PV-FFA konkretisiert und z.T. auch APV-Systeme bereits dabei berücksichtigt. In benachteiligten Gebieten können nach aktueller Rechtslage der Länder in Bayern, Baden-Württemberg, Hessen, Rheinland-Pfalz und Sachsen in den benachteiligten Gebieten landwirtschaftlichen Flächen gemäß der Länderöffnungsklausel errichtet werden (HANNEN, 2021). Dass die Regelungen z.T. schon länger so angewandt wurden, spiegelt sich auch im Ausbau der PV-FFA in Tabelle 2 wider. Das Saarland hat bereits im Dezember 2018 eine Verordnung zur Errichtung von PV-Anlagen auf Agrarflächen (VOEPV) bis 2025 beschlossen, die das Errichten von PV-FFA nach dem EEG 2017 in den „benachteiligten Gebieten“ ermöglichte. Bis 2025 sollen jährlich 50 MW PV-FFA zugebaut werden (MINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT, ENERGIE UND ARBEIT, 2021). Ab 2023 sollen Landwirte auch für Flächen mit APV Flächenprämien beantragen können – die entsprechende Bundesverordnung wurde angepasst. Darüber hinaus ist im Landesentwicklungsplan Saarland vorgesehen, dass die Installation von APV im Vorranggebiet Landwirtschaft zulässig wird (MINISTERIUM FÜR VERBRAUCHERSCHUTZ UND UMWELT, 2022)

Baden-Württemberg sieht vor, 2 % der Landesfläche in den Regionalplänen für die Nutzung von Windenergie und Photovoltaik auf Freiflächen bis 2040 vorzusehen (KLIMASCHUTZGESETZ BADEN-WÜRTTEMBERG, 2021). Hessen sieht vor innerhalb der einzelnen Gebietskörperschaften die Fläche der Vorrang- und Vorbehaltsgebiete für PV-FFA auf 2 % der landwirtschaftlichen Flächen zu begrenzen. Hessen hat bereits seit 2017 ein Vorbehaltsgebiet für Photovoltaik im Teilregionalplan Energie Mittelhessen. Hierbei wurde bereits erwähnt, dass PV-FFA mit dem Vorranggebiet Landwirtschaft vereinbar sein sollen (BADELT et al., 2020; WYDRA, 2021). Die Länder Bayern und Baden-Württemberg wollen entsprechende Forschungsprojekte aktiv fördern und weitere Versuchs- und Pilotanlagen errichten. APV soll über das EEG in einer separaten Ausschreibung für Agri-PV berücksichtigt werden. Die feste Etablierung von Agri-PV bei Sonderkulturen soll durch Klarstellung rechtlicher Fragen ohne Nachteile auf die EU-Zahlungen an Landwirte erfolgen (BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN UND CDU-BADEN WÜRTTEMBERG, 2021;

STMWI, 2022). Bayern setzte sich darüber hinaus für eine Erhöhung des Ausschreibungsvolumens von 50 MW auf 150 MW im Rahmen der Bundesinnovationsausschreibung für „Besondere Solaranlagen“ (Agri-, Floating- und Parkplatz-PV) ein (STMWI, 2022). Bayern verfolgt im Rahmen seines Aktionsplans Bioenergie aus dem Jahr 2019 einen jährlichen Zubau von 0,8 GWp PV auf Acker pro Jahr bis 2022 (STMWI, 2019). Auch das Land Brandenburg hat in der Energiestrategie 2040 die Installation von 6 GW an PV-FFA bis 2030 und 7,2 GW PV-FFA bis 2040 festgelegt. Das Potential an Flächen nach Definition des EEG beläuft sich insgesamt auf 21 GW PV-FFA. Zusätzlich werden in der Potentialanalyse PV-FFA für ertragsschwächeren Standorte vorgeschlagen, während auf weiteren landwirtschaftlichen Flächen APV vorgesehen wird (ENERGIEAGENTUR BRANDENBURG, 2021).

Im Energiewende- und Klimaschutzgesetz Schleswig-Holstein ist die Nutzung von PV-FFA und APV-Anlagen durch Grundsätze zur Planung von großflächigen Solar-Freiflächenanlagen im Außenbereich geregelt (Gültigkeit bis 2025). APV wird so definiert, dass die Bewirtschaftung mit üblichen landwirtschaftlichen Maschinen möglich ist. Die Fläche sollte sowohl bei PV-FFA als auch APV maximal bis zu 80 % belegt sein und eine Fläche von 20 ha nicht überschreiten. Darüber hinaus sind Naturschutzkriterien sowie eine Rückbauverpflichtung verankert (MILIG, 2021).

Eine ähnliche Definition bezüglich der Bewirtschaftung unter APV mit herkömmlicher Technik verfolgt das Land Niedersachsen im aktuellen Entwurf des Landes-Raumordnungsprogramms. In Vorbehaltsgebieten Landwirtschaft soll die Errichtung von APV-Anlagen möglich sein, wenn der Flächenverlust dadurch höchstens 15 % der landwirtschaftlichen Fläche beträgt. Ziel ist es, in Niedersachsen bis 2040 65 GW an Photovoltaikleistung zu installieren, wovon 15 GW als PV-FFA in geeigneten Gebieten umgesetzt werden sollen. Für PV-FFA und APV sollen die Gemeinden mit den landwirtschaftlichen Fachbehörden regionale Energiekonzepte erstellen (ML, 2021). In Nordrhein-Westfalen sollen im Rahmen der Energieversorgungsstrategie 2021 18-24 GW (davon 12-15 GW PV-FFA) an Photovoltaik bis 2030 installiert werden. Durch Nutzung der Länderöffnungsklausel sollen PV-FFA in benachteiligten Gebieten auf Ackerland zukünftig ermöglicht werden. Auch die Förderung von APV und Floating-PV ist geplant. Neben dem landeseigenen Förderprogramm progres.nrw-

Klimaschutztechnik sollen geförderte Beratungsleistungen zu einem Ausbau beitragen (MWIDE, 2021).

In Mecklenburg-Vorpommern wurden die Kriterien für PV-FFA in 2021 im Vergleich zu den anderen Bundesländern sehr detailliert geregelt. Insgesamt sollen 5.000 ha Ackerland für PV-FFA freigegeben werden. Hierfür wurde ein Kriterienkatalog mit A (obligatorisch zu erfüllen) und B Kategorien (Auswahlkriterien) entwickelt (EM MV, 2021). Für APV wurden bisher keine gesonderten Regeln festgelegt. Das Bundesland Sachsen hat im Rahmen des Energie- und Klimaschutzprogrammes 2021 festgelegt, dass ehemalige Bergbauregionen und landwirtschaftliche Flächen in benachteiligten Gebieten genutzt werden sollen. Hierfür wurde der Entwurf für eine „Sächsische Photovoltaik-Freiflächenverordnung“ (PVFVO) auf den Weg gebracht, die PV-FFA mit 750 KW bis 20 MW auf Grün- und Ackerland in benachteiligten Gebieten (ausgenommen Natura-2000-Gebiete und Nationale Naturmonumente) zulässt (HANNEN, 2021, SMEKUL, 2021). APV werden als künftige Form von PV-FFA erwähnt. Auch in Sachsen-Anhalt ist Anfang des Jahres 2022 eine neue Freiflächenanlagenverordnung (FFAVO) beschlossen worden, die unter Wahrung des Natur- und Landschaftsschutzes auf Ackerflächen mit geringer Bodenqualität sowie in landwirtschaftlich nur schwer nutzbaren Höhen- und Hanglagen in Sachsen-Anhalt künftig PV-FFA zulässt. Pro Jahr sind maximal 100 MW (ca. 100 ha) in benachteiligten Gebieten zulässig (MWU, 2022).

In den einzelnen Bundesländern haben einige bereits Regeln für Raumordnungsprogramme festgelegt, andere Bundesländer verfügen über noch keine länderspezifischen Regeln (SCHINDELE et al., 2020; WESELEK et al., 2019). Dieser Status lässt sich auch anhand der aktuellen Rechtslage bestätigen. Während, wie das Beispiel Mecklenburg-Vorpommern zeigt, spezifische Regeln für PV-FFA erarbeitet wurden liegen in anderen Bundesländern, wie z.B. in den Stadtstaaten Berlin, Bremen und Hamburg eher allgemeine oder keine gesonderten Regelungen zu PV-FFA vor. APV wird mit wenigen Ausnahmen nicht explizit definiert. Um Einheitlichkeit und eine Grundlage für künftige Förderprogramme zu schaffen, wird aktuell die DIN Spec 91434 als Vorläufer einer regulären Norm entwickelt, die Kriterien und Anforderungen an die landwirtschaftliche Hauptnutzung festlegen und so die Akzeptanz von APV sicherstellen soll (BSW SOLAR, 2021). Neben der Weiterentwicklung der rechtlichen Rahmenbedingungen von APV sind auch die Wirtschaftlichkeit der verschiedenen Konzepte sowie Auswirkungen auf die Umwelt (z.B. Bio-

diversität, Bodenfunktionen, Wasserhaushalt, Vegetation und Erträge) weiter zu validieren. Auch die Erhebung der Flächenpotenziale für APV ist in Deutschland noch nicht vollständig erfolgt. Das vielerorts vorhandene Solarkataster in den Ländern bietet hierfür jedoch bereits eine Grundlage.

Weitere Fragen, die beim großflächigen Ausbau von PV-FFA und APV zu beantworten sind, sind die Netzauslastung an sonnenreichen Tagen, insbesondere in Sommermonaten sowie die Speicherung von großen Strommengen im Megawattbereich, um diese in solchen Phasen nicht vom Netz nehmen zu müssen (WEDEMEYER und REINERT, 2022). Denkbar wäre eine Kombination mit der Produktion von Wasserstoff mit kostengünstigem Strom aus PV-Anlagen in Ergänzung mit Windkraft als sogenanntes „Solar-Wind-Hybridkraftwerk“ (NIEPELT und BRENDDEL, 2020). Darüber hinaus können flexible Biogasanlagen zur Netzstabilisierung ins System eingebunden werden (VILLADSEN et al., 2019).

Literatur

- AEE (Agentur für erneuerbare Energien) (2021): Bundesländer mit neuer Energie. Datenblatt: Solar. <https://www.foederal-erneuerbar.de/uebersicht/bundeslaender/BW|B|BB|HB|HH|HE|MV|NI|NRW|RLP|SL|SN|ST|SH|TH|D/kategorie/solar/ausgabe/download>, Abrufdatum: 20.02.2022.
- AGEB (Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V.) (2022a): Primärenergieverbrauch in der Bundesrepublik Deutschland. Stand: Februar 2022. Berlin. Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V. <https://ag-energiebilanzen.de/date-n-und-fakten/primaerenergieverbrauch/>, Abrufdatum: 15.02.2022.
- AGEB (2022b): Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien nach Monaten (2020 und 2021). Stand: Dezember 2021. Berlin. Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V. https://ag-energiebilanzen.de/wp-content/uploads/2021/10/EE-UBA-AGEE-Stat_Praesentation_2021-Q4_fuer_AGEB.pdf, Abrufdatum: 16.02.2022.
- ANTONCZYK, S. und P. SCHERER (2015): Entwicklung einer anorganisch synthetischen Gülle zur definierten Bilanzierung der Strohvergärung. In: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (Hrsg.): Biogas in der Landwirtschaft - Stand und Perspektiven. FNR/KTBL-Kongress FNR/KTBL-Kongress vom 22. bis 23. September 2015, Potsdam. KTBL Schrift 508, Darmstadt.
- BADEL, O., R. NIEPELT, J. WIEHE, S. MATTHIES, T. GEWOHN, M. STRATMANN, R. BRENDDEL und C. VON HAAREN (2020): Integration von Solarenergie in die niedersächsische Energielandschaft (INSIDE). https://www.researchgate.net/profile/Julia-Wiehe/publication/346940983_Integration_von_Solarenergie_in_die_niedersachsische_Energielandschaft_INSIDE/links/5fd32a7045851568d154e65a/Integration-von-Solarenergie-

- in-die-niedersaechsische-Energielandschaft-INSIDE.pdf, Abrufdatum 26.02.2022.
- BDBE (Bundesverband der deutschen Bioethanolwirtschaft e.V.) (2022): Marktdaten Deutschland. <https://www.bdbe.de/daten/marktdaten-deutschland>, Abrufdatum: 28.02.2022.
- BDEW (Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V.) (2022): Die Energieversorgung 2021. Jahresbericht, Berlin.
- BEER, L., C. SCHAPER und L. THEUVSEN (2018): Agrarholzanbau in der deutschen Landwirtschaft: Ergebnisse einer empirischen Erhebung. Vortrag anlässlich der 58. Jahrestagung der GEWISOLA, 12. bis 14. September 2018, Kiel.
- BERNIGAU, S. (2017): Die Nachhaltigkeit von Biokraftstoffen. In: Bernigau, S. (Hrsg.): Eine Marketing-Strategie für nachhaltigere Biokraftstoffe in Deutschland: Ein Ansatz zur Verbesserung der Konsumentenakzeptanz? Springer Gabler, Wiesbaden: 63-98.
- BMEL (Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft) (2017): Ergebnisse der Bundeswaldinventur 2012. Berlin.
- BMEL (2021): Waldbericht der Bundesregierung 2021. Bonn.
- BMEL (2021a): Waldstrategie 2050. Nachhaltige Waldbewirtschaftung – Herausforderungen und Chancen für Mensch, Natur und Klima. Bonn.
- BMUV (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz) (2021): 26. Weltklimakonferenz: Fossiles Zeitalter geht zu Ende. Pressemitteilung Nr. 275/21. <https://www.bmuv.de/pressemitteilung/26-weltklimakonferenz-fossiles-zeitalter-geht-zu-ende>, Abrufdatum: 20.01.2022.
- BMWi (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie) (2021): Erneuerbare Energien in Zahlen. Nationale und internationale Entwicklung im Jahr 2020. https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/erneuerbare-energien-in-zahlen-2020.pdf?__blob=publicationFile&v=12, Abrufdatum: 18.02.2022.
- BMWi (2022): Bestehende Flächenpotenziale besser nutzen: Mehr Photovoltaik-Anlagen auf landwirtschaftlichen Flächen bei gleichbleibend hohem Naturschutz. <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Pressemitteilungen/2022/02/20220210-bestehende-flaechenpotenziale-besser-nutzen-mehr-photovoltaik-anlagen-auf-landwirtschaftlichen-flaechen-bei-gleichbleibend-hohem-naturschutz.html>, Abrufdatum: 20.02.2022.
- BMWi (2022a): Jahreswirtschaftsbericht 2022: Transformation innovativ gestalten. <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Schlaglichter-der-Wirtschaftspolitik/2022/02/11-jwb-2022.html>, Abrufdatum: 10.02.2022.
- BMWi (2022b) Eröffnungsbilanz Klimaschutz. https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/Energie/220111_eroeffnungsbilanz_klimaschutz.pdf?__blob=publicationFile&v=22, Abrufdatum: 01.02.2022.
- BOLTE, A., M. HÖHL, P. HENNIG, T. SCHAD, F. KROIHER, B. SEINTSCH, H. ENGLERT und L. ROSENKRANZ (2021): Zukunftsaufgabe Waldanpassung. In: AFZ-DerWald 76 (2): 12-16.
- BRAUNER, G. (2013): Die Bedeutung flexibler Kraftwerke für die Energiewende. In: Elektrotechnik & Informationstechnik 130 (3): 87-92.
- BROSOWSKI, A., P. ADLER, G. ERDMANN, W. STINNER, D. THRÄN, U. MANTAU, C. BLANKE, B. MAHRO, T. HERING und G. REINHOLDT (2015): Biomassepotenziale von Rest- und Abfallstoffen. Status Quo in Deutschland. Schriftenreihe nachwachsende Rohstoffe, Heft 36. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR), Gülzow-Prüzen.
- BSW SOLAR (2021): Neuer Hybrid-Standard für Land- und Solarwirtschaft. https://www.solarwirtschaft.de/datawall/uploads/2021/04/bsw_pm_agri_pv_norm.pdf, Abrufdatum: 20.01.2022.
- BUNDESREGIERUNG (2022): Ausbau der Photovoltaik auf Freiflächen im Einklang mit landwirtschaftlicher Nutzung und Naturschutz Eckpunktepapier BMWK, BMUV und BMEL. 10. Februar 2022, Berlin.
- BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN UND CDU-BADEN WÜRTTEMBERG (2021): Jetzt für Morgen. Erneuerungsvertrag für Baden-Württemberg, Stuttgart.
- COMMERZBANK AG (2011): Rohstoffe und Energie: Risiken umkämpfter Ressourcen. Unternehmensperspektiven, Frankfurt am Main.
- DANIEL-GROMKE, J., N. RENSBERG, V. DENYSENKO, T. BARCHMANN, K. OEHMICHEN, M. BEIL, W. BEYRICH, B. KRAUTKREMER, M. TROMMLER, T. REINHOLZ, J. VOLLPRECHT und C. RÜHR (2020): Optionen für Biogas-Bestandsanlagen bis 2030 aus ökonomischer und energiewirtschaftlicher Sicht. Abschlussbericht. Texte 24/2020. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.
- DBV (Deutscher Bauernverband) (2022): Position zum flächenschonenden Ausbau der Photovoltaik. https://www.bauernverband.de/fileadmin/user_upload/dbv/pressemitteilungen/2022/KW_01_bis_KW_20/KW_06/VR_Position_Photovoltaik_EEG.pdf, Abrufdatum: 26.02.2022.
- DESTATIS (2022): Bruttoinlandsprodukt im Jahr 2021 um 2,7% gestiegen. https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2022/01/PD22_020_811.html, Abrufdatum: 20.01.2022.
- DESTATIS (2022a): Schweinebestand 2021 im Vergleich zum Vorjahr gesunken. <https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Landwirtschaft-Forstwirtschaft-Fischerei/Tiere-Tierische-Erzeugung/schweine.html;jsessionid=E9A596EB74C346EC9D092AA975E49AD5.live742>, Abrufdatum: 10.01.2022.
- DESTATIS (2022b): Zahl der Rinder erneut gesunken. <https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Landwirtschaft-Forstwirtschaft-Fischerei/Tiere-Tierische-Erzeugung/rinder.html;jsessionid=E9A596EB74C346EC9D092AA975E49AD5.live742>, Abrufdatum: 10.01.2022.
- DESTATIS (2022c): Holzeinschlag nach Holzartengruppen, Holzsorten ausgewählter Besitzarten. <https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Landwirtschaft-Forstwirtschaft-Fischerei/Wald-Holz/Tabellen/holzeinschlag-deutschland.html>, Abrufdatum: 16.01.2022.
- DESTATIS (2022d): Biokraftstoffstatistiken. <https://de.statista.com/statistik/suche/?q=biokraftstoffe&qKat=search&newSearch=true>, Abrufdatum: 26.02.2022.
- DEPV (Deutscher Energieholz- und Pellet-Verband) (2021): Pelletmarkt in Deutschland zieht spürbar an – Hoher

- Absatz an Feuerungen und erstmals mehr als 3 Mio. Tonnen Produktion. <https://depv.de/p/Pelletmarkt-in-Deutschland-zieht-spurbar-an-Hoher-Absatz-an-Feuerungen-und-erstmals-mehr-als-3-Mio-Tonnen-Produktion-ja6jklfSq8WrB4aVVmipgaj>, Abrufdatum: 15.01.2021.
- DHWR (Deutscher Holzwirtschaftsrat e.V.) (2021): Effekte von Pandemie und Nachfrageboom auf den nationalen Holzmarkt. Ausgewählte Daten zum Marktgeschehen 2020. https://www.lohn-abbund.de/wp-content/uploads/2021-05-06_DHWR_Holzmarktzahlen.pdf, Abrufdatum: 20.01.2022.
- DÜV (Düngeverordnung) (2020): Verordnung über die Anwendung von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln nach den Grundsätzen der guten fachlichen Praxis beim Düngen (Düngeverordnung - DüV) vom 26. Mai 2017 (BGBl. I S. 1305), die durch Artikel 1 der Verordnung vom 28. April 2020 (BGBl. I S. 846) geändert worden ist.
- EEG (Erneuerbare-Energien-Gesetz) (2010): Erstes Gesetz zur Änderung des Erneuerbare-Energien-Gesetzes. Das erneuerbare Energien-Gesetz vom 25. Oktober 2008 (BGBl. I S. 2074), das zuletzt durch Artikel 6 des Gesetzes vom 11. August 2010 (BGBl. I S. 1163) geändert worden ist.
- EEG (2020): Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz - EEG 2021) vom 21. Juli 2014 (BGBl. I S. 1066), das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 21. Dezember 2020 (BGBl. I S. 3138) geändert worden ist.
- EM MV (Ministerium für Energie, Infrastruktur und Digitalisierung) (2021): Pegel & Backhaus: Mehr Photovoltaik wagen! / Kriterien für breitere Nutzung <https://www.regierung-mv.de/Landesregierung/em/Aktuell/?id=170882&processor=processor.sa.pressemitteilung>, Abrufdatum: 25.02.2022.
- ENERGIEAGENTUR BRANDENBURG (2021): Durchführung einer Potenzialanalyse über nutzbare Flächen für solartechnische Anlagen im Land Brandenburg. https://energieagentur.wfbb.de/de/system/files/media-downloads/ak_kem_02.12.21_ea_solarpotenzialanalyse.pdf, Abrufdatum: 20.02.2022.
- EPURE (2021): Resources and Statistics 2021. <https://www.epure.org/resources-statistics/statistics-info-graphics/>, Abrufdatum: 26.01.2022.
- EUROPÄISCHE KOMMISSION (2021): Europäisches Klimagesetz. https://ec.europa.eu/clima/eu-action/european-green-deal/european-climate-law_de, Abrufdatum: 28.01.2022.
- FEHRENBACH, H., J. GIEGRICH, S. KÖPPEN, B. WERN, J. PERTAGNOL, F. BAUR, K. HÜNECKE, G. DEHOUST, W. BULACH und K. WIEGMANN (2019): BioRest: Verfügbarkeit und Nutzungsoptionen biogener Abfall- und Reststoffe im Energiesystem (Strom-, Wärme- und Verkehrssektor). Abschlussbericht. Texte 115/2019. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.
- FNR (Fachagentur für nachwachsende Rohstoffe) (2014): Leitfaden Feste Biobrennstoffe. Gülzow.
- FNR (2015): Potenziale Biogener Rest- und Abfallstoffe für eine nachhaltige Energie- und Rohstoffbereitstellung. Handout. Gülzow.
- FNR (2022): Basisdaten nachwachsende Rohstoffe. <https://basisdaten.fnr.de>, Abrufdatum: 15.02.2022.
- FÖSTE, C. (2021): Brauchen Betreiber von Biogasanlagen bald Nachhaltigkeits-Zertifikat? <https://www.agrarheute.com/energie/brauchen-betreiber-biogasanlagen-bald-nachhaltigkeits-zertifikat-586987>, Abrufdatum: 10.02.2021.
- FvB (Fachverband Biogas) (2020): Branchenzahlen 2019 und Prognose der Branchenentwicklung 2020, Stand: Juli 2020. [https://www.biogas.org/edcom/webfwb.nsf/id/DE_Branchenzahlen/\\$file/20-07-23_Biogas_Branchenzahlen-2019_Prognose-2020.pdf](https://www.biogas.org/edcom/webfwb.nsf/id/DE_Branchenzahlen/$file/20-07-23_Biogas_Branchenzahlen-2019_Prognose-2020.pdf), Abrufdatum: 20.12.2021.
- FvB (2021): Branchenzahlen 2020 und Prognose der Branchenentwicklung 2021, Stand: Juli 2021. [https://www.biogas.org/edcom/webfwb.nsf/id/DE_Branchenzahlen/\\$file/21-10-14_Biogas_Branchenzahlen-2020_Prognose-2021.pdf](https://www.biogas.org/edcom/webfwb.nsf/id/DE_Branchenzahlen/$file/21-10-14_Biogas_Branchenzahlen-2020_Prognose-2021.pdf), Abrufdatum: 20.12.2021.
- FRIEDLINGSTEIN, P., M.W. JONES, M. O'SULLIVAN, R.M. ANDREW, D.C.E. BAKKER, J. HAUCK, C. LE QUÉRÉ, G.P. PETERS, W. PETERS, J. PONGRATZ, S. SITCH, J.G. CANADDELL, P. CIAIS, R.B. JACKSON, S.R. ALIN, P. ANTHONI, N.R. BATES, M. BECKER, N. BELLOUIN, L. BOPP, T.T.T. CHAU, F. CHEVALLIER, L.P. CHINI, M. CRONIN, K.I. CURRIE, B. DECHARME, L. DJEUTCHOUANG, X. DOU, W. EVANS, R.A. FEELY, L. FENG, T. GASSER, D. GILFILLAN, T. GKRTZALIS, G. GRASSI, L. GREGOR, N. GRUBER, Ö. GÜRSES, I. HARRIS, R.A. HOUGHTON, G.C. HURTT, Y. IIDA, T. ILYINA, I.T. LUIJKX, A.K. JAIN, S. D. JONES, E. KATO, D. KENNEDY, K. KLEIN GOLDEWIJK, J. KNAUER, J.I. KORSBARKEN, A. KÖRTZINGER, P. LANDSCHÜTZER, S.K. LAUVSET, N. LEFÈVRE, S. LIENERT, J. LIU, G. MARLAND, P.C. MCGUIRE, J.R. MELTON, D.R. MUNRO, J.E.M.S. NABEL, S.-I. NAKAOKA, Y. NIWA, T. ONO, D. PIERROT, B. POULTER, G. REHDER, L. RESPLANDY, E. ROBERTSON, C. RÖDENBECK, T.M. ROSAN, J. SCHWINGER, C. SCHWINGSHACKL, R. SÉFÉRIAN, A.J. SUTTON, C. SWEENEY, T. TANHUA, P.P. TANS, H. TIAN, B. TILBROOK, F. TUBIELLO, G. VAN DER WERF, N. VUICHARD, C. WADA, R. WANNINKHOF, A. WATSON, D. WILLIS, A.J. WILTSHIRE, W. YUAN, C. YUE, X. YUE, S. ZAEHLE and J. ZENG (2021): Global Carbon Budget 2021, Earth System Science Data [preprint]. <https://doi.org/10.5194/essd-2021-386>.
- GONZÁLEZ-GARCÍA, A., I. PALOMO, J.A. GONZÁLEZ, C.A. LÓPEZ und C. MONTES (2020): Quantifying spatial supply-demand mismatches in ecosystem services provides insights for land-use planning. In: Land Use Policy 94 (C).
- HANNEN, P. (2021): Sachsen will Photovoltaik auf benachteiligten Ackerflächen ermöglichen. <https://www.pv-magazine.de/2021/05/12/sachsen-will-photovoltaik-auf-benachteiligten-ackerflaechen-ermoeglichen/>, Abrufdatum: 15.01.2022.
- HARTEL, R., V. SLEDNEV, H.Ü. QILMAZ, A. ARDONE, D. KELES, W. FICHTNER, A. EBER, M. KLOBASA, M. KÜHNBACH, P. MANZ, J. GLOBISCH, R. ELSLAND und M. WIETSCHEL (2019): Dekarbonisierung des Energiesystems durch verstärken Einsatz erneuerbaren Stroms im Wärme-, Verkehrs-, und Industriesektor bei gleichzeitigen Stilllegung von Kraftwerken. Auswirkungen auf die Versorgungssicherheit in Süddeutschland. Produktion und Energie, Band 31. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.
- HAUPTSTADTBÜRO BIOENERGIE (2019): Gemeinsame Stellungnahme: Maßnahmen zum Ausbau der Güllever-

- gärung. Mehr Klimaschutz und Erneuerbare Energien mit einer nachhaltigen Tierhaltung verbinden. [https://www.biogas.org/edcom/webfvb.nsf/id/BFPB7X-DE-Massnahmen-zum-Ausbau-der-Guellevergaerung/\\$file/19-08-28%20BBE%20et%20al%20Ma%20C3%9Fnahmen%20zum%20Ausbau%20der%20G%20C3%BCIleverg%20C3%A4rung%20update_final.pdf](https://www.biogas.org/edcom/webfvb.nsf/id/BFPB7X-DE-Massnahmen-zum-Ausbau-der-Guellevergaerung/$file/19-08-28%20BBE%20et%20al%20Ma%20C3%9Fnahmen%20zum%20Ausbau%20der%20G%20C3%BCIleverg%20C3%A4rung%20update_final.pdf), Abrufdatum: 20.12.2021.
- HOLNBURGER, M., A. HUBER, C. HÖLZL, J. NALEPA, N. RIMMEL und F. RINAGE (2010): Sustainability Marketing. Umfrage über die Akzeptanz von Freilandflächenphotovoltaik am Beispiel einer Gemeinde in Bayern. Wissenschaftszentrum Straubing.
- ICHA, P. und G. KUHS (2020): Entwicklung der spezifischen Kohlenstoffdioxid-Emission des deutschen Strommix in den Jahren 1990 - 2019. Nr. 13. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.
- IEA (International Energy Agency) (2021): Renewables 2021. Analysis and forecasts to 2026. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/5ae32253-7409-4f9a-a91d-1493ffb9777a/Renewables2021-Analysisandforecastto2026.pdf>, Abrufdatum 29.01.2022.
- IMF (International Monetary Fund) (2022): World Economic Outlook Update. Rising Caseloads a Disrupted Recovery and Higher Inflation. <https://www.imf.org/-/media/Files/Publications/WEO/2022/Update/January/English/text.ashx>, Abrufdatum: 25.02.2022.
- IRENA (International Renewable Energy Agency) (2021): Renewable Energy and Jobs. Annual Review 2021. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2021/Oct/IRENA_RE_Jobs_2021.pdf, Abrufdatum: 22.02.2022.
- KALCHER, J. und A. BROSIOWSKI (2018): Flächenbezogene Berechnung von Biomassopotentialen. In: Meinel, G., U. Schumacher, M. Behnisch und T. Krüger (Hrsg.): Flächennutzungsmonitoring X. Flächenpolitik – Flächenmanagement – Indikatoren. IÖR Schriften 76: 257-260. Rhombos, Berlin.
- KALIYAN, N. und R. V. MOREY (2010): Natural binders and solid bridge type binding mechanisms in briquettes and pellets made from corn stover and switchgrass. In: *Bioresource Technology* 101 (3): 1082-1090.
- KALTSCHMITT, M., H. HARTMANN und H. HOFBAUER (2016): Energie aus Biomasse. Grundlagen, Techniken und Verfahren. 3. Kelm, T., J. Metzger, H. Jachmann et al.: Vorbereitung und Begleitung bei der Erstellung eines Erfahrungsberichts gemäß § 97 Erneuerbare-Energien-Gesetz. Teilvorhaben II c: Solare Strahlungsenergie. Stuttgart, 2018. https://www.erneuerbareenergien.de/EE/Redaktion/DE/Downloads/bmwi_de/bericht-ceg-4-solar.pdf?__blob=publicationFile&v=4Auflage. Springer, Heidelberg.
- KELM, T., J. METZGER, A.-L. FUCHS, S. SCHICKETANZ, D. GÜNEWIG und M. THYLMANN (2019): Untersuchungen zur Wirkung veränderter Flächenrestriktionen für PV-Freiflächenanlagen. Kurzstudie im Auftrag der innogy SE. Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZWS), Bosch & Partner GmbH.
- KETZER, D., N. WEINBERGER, C. RÖSCH und S.B. SEITZ (2019): Land use conflicts between biomass and power production – citizen's participation in the technology development of Agrophotovoltaics. In: *Journal of Responsible Innovation* 7 (2): 193-216.
- KETZER, D., P. SCHLYTER, N. WEINBERGER und C. RÖSCH (2020): Driving and restraining forces for the implementation of the Agrophotovoltaics system technology – A system dynamics analysis. In: *Journal of Environmental Management* 270 (110864).
- KIT (Karlsruher Institut für Technologie) (2020): Synthetische Biokraftstoffe. <https://www.bioliq.de/28.php>, Abrufdatum: 18.12.2020.
- KLIMASCHUTZGESETZ BADEN-WÜRTTEMBERG (2021): Das Klimaschutzgesetz Baden-Württemberg vom 23. Juli 2013 (GBl. S. 229), das durch Artikel 1 des Gesetzes vom 15. Oktober 2020 (GBl. S. 937) geändert worden ist.
- KRALEMANN, M. (2018): Erzeugung von Biomethan – Perspektiven und Potenziale. Vortrag 2. Plenarsitzung 2018 des Niedersächsischen Biogasforums, Hannover.
- KSG (Bundes-Klimaschutzgesetz) (2021): Bundes-Klimaschutzgesetz vom 12. Dezember 2019 (BGBl. I S. 2513), das durch Artikel 1 des Gesetzes vom 18. August 2021 (BGBl. I S. 3905) geändert worden ist.
- LARSSON, S.H., M. THYREL, P. GELADI und T.A. LESTANDER (2008): High quality biofuel pellet production from pre-compacted low density raw materials. In: *Bioresource Technology* 99 (15): 7176-7182.
- LAUF, T., M. MEMMLER und S. SCHNEIDER (2019): Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger. Bestimmung der vermeidbaren Emissionen im Jahr 2018. Nr. 37. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.
- MAIERHOFER, H., S. RAUH und M. STROBL (2018): Biomechan als Kraftstoff und Treibhausgas (THG)-zertifizierung, Teil 1: Basiswissen. In: *Biogas Forum Bayern bif2*, Hrsg. ALB Bayern e.V. <https://www.biogas-forum-bayern.de/bif2>, Abrufdatum: 05.01.2021.
- MANTAU, U., P. DÖRING, H. WEIMAR, S. GLASENAPP, D. JOCHEM und K. ZIMMERMANN (2018): Rohstoffmonitoring Holz. Erwartungen und Möglichkeiten. FNR, Gülzow.
- MICHEL, F.-C. (2021): Freiflächen-Photovoltaik: Geldsegen mit Tücken. In: *top agrar* 6/2021: 52-54.
- MILIG (Ministerium für Inneres, ländliche Räume, Integration und Gleichstellung des Landes Schleswig-Holstein) (2021): Gesetz zur Änderung des Energiewende- und Klimaschutzgesetzes Schleswig-Holstein*) vom 2. Dezember 2021.
- MOHRMANN, S. und V. OTTER (2021): Substratalternativen für die landwirtschaftliche Biogaserzeugung vor den Hintergrund der Novellierung der Düngeverordnung und des Erneuerbare-Energien-Gesetzes 2021. In: *KTBL* (Hrsg.): *Biogas in der Landwirtschaft – Stand und Perspektiven*. 7. FNR/KTBL-Kongress. Onlinetagung 29.-30.09.2021. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL), Darmstadt: 262-266.
- MOHRMANN, S., M. DEUTSCH und C. SCHAPER (2021): Der Markt für Bioenergie. In: *German Journal of Agricultural Economics (GJAE) Volume 70 (Supplement)*: 103-127.
- MÖLLER, H.B. und M.M. HANSEN (2014): Briquettes of straw and dry grass double bio-gas production. In: *FiB* no. 47 (1): 3-5.
- MÜHLENHOFF, J., R. KAJIMURA, N. BOENIGK, D. ZIEGLER und J. WITT (2014): Holzenergie in Deutschland. Status

- Quo und Potenziale. In: AEE (Agentur für erneuerbare Energie): *Renews Spezial Sonderausgabe/Februar 2014*.
- MÜHLENHOFF, J. und B. DANNEMANN (2017): Biogene Test- und Abfallstoffe. Flexibler Baustein der Energiewende. In: AEE (Agentur für Erneuerbare Energien): *Renews Spezial 81*.
- MÜLLER-LOHSE, L. (2019): Biogas in Deutschland und Frankreich – ein Vergleich. https://energie-fr-de.eu/de/bioenergien/nachrichten/leser/memo-zu-biogas-in-deutschland-und-frankreich-ein-vergleich.html?file=files/ofaenr/04-notes-de-synthese/02-acces-libre/03-bioenergies/2019/DFBEW_Memo_Biogas_Deutschland_Frankreich_1902.pdf, Abrufdatum: 17.12.2021.
- MÜLLER, K. (2022): Umweltbundesamt will jetzt Holz-Aus - das macht deutsches Heizungs-Chaos perfekt. https://www.focus.de/immobilien/bauen/noch-ein-verzicht-heizen-mit-holz-vor-dem-aus-das-wuerde-deutsches-heizungschaos-perfekt-machen_id_54065217.html, Abrufdatum: 15.03.2022.
- MINISTERIUM FÜR VERBRAUCHERSCHUTZ UND UMWELT (2022): Minister Jost: Ausbau von Solarenergie auf landwirtschaftlichen Flächen ist konfliktfrei möglich – Know-how aus dem Saarland zeigt, wie es geht. https://www.saarland.de/muv/DE/portale/landwirtschaft/aktuelles/aktuelle-meldungen/2022/q1/pm_2022-02-10_021_Solarenergie.html, Abrufdatum: 20.02.2022.
- MINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT, ENERGIE UND ARBEIT (2021): Energiefahrplan für das Saarland 2030. Ausbau der Erneuerbaren Energien in der Stromerzeugung. https://www.saarland.de/mwaev/DE/downloads/energie/dld_Energiefahrplan_Erneuerbare.pdf?__blob=publicationFile&v=5, Abrufdatum: 20.02.2022.
- MWIDE (Ministerium für Wirtschaft, Innovation, Digitalisierung und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen) (2021): Fortschreibung Energieversorgungsstrategie NRW. https://www.wirtschaft.nrw/sites/default/files/asset/document/2021-12-16_fortschreibung_evs_nrw_veroeffentlichung.pdf, Abrufdatum: 20.02.2022.
- ML (Niedersächsisches Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz) (2021): Aktualisierung des Landes-Raumordnungsprogramms Niedersachsen. https://www.lrop-online.de/2020/php/modules_global/module_main.php, Abrufdatum: 15.02.2022.
- MWU (Ministerium für Ministerium für Wissenschaft, Energie, Klimaschutz und Umwelt des Landes Sachsen-Anhalt) (2022): Energieministerium erleichtert den Photovoltaik-Ausbau in Sachsen-Anhalt. <https://mwu.sachsen-anhalt.de/startseite-mwu/artikel-detail/news/energie-ministerium-erleichtert-den-photovoltaik-ausbau-in-sachsen-anhalt/>, Abrufdatum: 26.02.2022.
- NASPETTI, S., S. MANDOLESI und R. ZANOLI (2016): Using visual Q sorting to determine the impact of photovoltaic applications on the landscape. In: *Land Use Policy 57*: 564-573.
- NELLES, M. (2009): Energie aus organischen Abfällen und Reststoffen – ein Beitrag zur nachhaltigen Energieversorgung. In: *Müll und Abfall 05/2009*: 225.
- NEU, C. (2019): Dorf und Ernährung. In: Nell, W. und M. Weiland (Hrsg.): *Dorf. Ein interdisziplinäres Handbuch*. J.B. Metzler: 212-219.
- NEUMANN, H. (2021): Strommarkt verspricht goldene Zeiten für flexible Anlagen. <https://www.topagrar.com/energie/news/strommarkt-verspricht-goldene-zeiten-fuer-flexible-anlagen-12772238.html>, Abrufdatum: 06.01.2022.
- NEUMANN, H. (2022): Bundesregierung will mehr Solarparks auf landwirtschaftlichen Flächen. <https://www.topagrar.com/energie/news/bundesregierung-will-mehr-solar-parks-auf-landwirtschaftlichen-flaechen-12846909.html>, Abrufdatum: 12.02.2022.
- NIEPELT, R. und R. BRENDEL (2020): Erneuerbarer Wasserstoff mit Solar-Wind-Hybridkraftwerken. https://h2-news.eu/wp-content/uploads/2020/10/gwf-ge_07-08_2020_Niepelt.pdf, Abrufdatum: 20.02.2022.
- OMNICERT UMWELTGUTACHTER (2022): Renewable Energy Directive - RED II. <https://www.umweltgutachter.de/umweltgutachten/renewable-energy-directive-red-ii>, Abrufdatum: 20.01.2022.
- PASCHER, P., U. HEMMERLING und S. STORK (2021): Situationsbericht 2021/22. Trends und Fakten zur Landwirtschaft, Deutscher Bauernverband (DBV), Berlin.
- RAUH, S. (2020): Aktueller Stand EEG-Novelle und Chancen durch RED-II für die Stroh-Vergärung. 12.02.2020. In: Pro_Fair Consult+Projekt GmbH (Hrsg.): *Tagungsband: Stroh, Gras, Biogas 2020. Innovative Verfahren zur Nutzung von Ernterest in Biogasanlagen*. Dingolfingen: 7-16.
- RAUH, S. (2021): Erlösoptionen am Strommarkt für flexible Biogasanlagen. Web-Seminar des Fachverband Biogas am 15.12.2021. [https://www.biogas.org/edcom/webfvb.nsf/id/DE-Vortraege-Webseminar-Erloesoptionen-am-Strommarkt-fuer-flexible-Biogasanlagen/\\$file/21-12-15_Erl%C3%B6soptionen%20Flex_FvB.pdf](https://www.biogas.org/edcom/webfvb.nsf/id/DE-Vortraege-Webseminar-Erloesoptionen-am-Strommarkt-fuer-flexible-Biogasanlagen/$file/21-12-15_Erl%C3%B6soptionen%20Flex_FvB.pdf), Abrufdatum: 12.02.2021.
- REINHOLD, G. und E. FRIEDRICH (2012): Vergärung von Stroh - Stand und Perspektiven. 2. Internationale Stroh-Tagung, 29.-30. März 2012, Berlin.
- REINHOLD, G. (2014): Standpunkt zur Vergärung von Stroh in landwirtschaftlichen Biogasanlagen. TLL, Jena 2014.
- REN21 (2021): *Renewables 2021 Global Status Report*. Paris. https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2021_Full_Report.pdf, Abrufdatum: 18.02.2022.
- RFA (Renewable Fuels Association (2020): *Annual Fuel Ethanol Production*. <https://ethanolrfa.org/statistics/annual-ethanol-production/>, Abrufdatum: 25.01.2022.
- RIEGERT, B. (2021): Energiepreise: EU denkt über gemeinsames Handeln nach. <https://p.dw.com/p/41HjC>, Abrufdatum: 20.02.2022.
- RÖSCH, C. (2016): Agrophotovoltaik - die Energiewende in der Landwirtschaft. In: *GAIA - Ecological Perspectives for Science and Society 25 (4)*: 242-246.
- SMEKUL (Sächsisches Staatsministerium für Energie, Klimaschutz, Umwelt und Landwirtschaft) (2021): *Energie- und Klimaprogramm Sachsen 2021*. <https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/37830/documents/60600>, Abrufdatum: 20.02.2022.
- SÁNCHEZ-PANTOJA, N., R. VIDAL und M.C. PASTOR (2018): Aesthetic perception of photovoltaic integration within new proposals for ecological architecture. In: *Sustainable Cities and Society 39*: 203-214.

- SCHARF, J., M. GRIEB und M. FRITZ (2021): Berichte aus dem TFZ. Agriphotovoltaik. Stand und offene Fragen. Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe, Straubing.
- SCHINDELE, S., M. TROMMSDORFF, A. SCHLAAK, T. OBERGFELL, G. BOPP, C. REISE, C. BRAUN, A. WESELEK, A. BAUERLE, P. HÖGY, A. GOETZBERGER und E. WEBER (2020): Implementation of agriphotovoltaics: Techno-economic analysis of the price-performance ratio and its policy implications. In: *Applied Energy* 265 (114737).
- SCHOLWIN, F., J. GROPE, A. CLINKSCALES, J. DANIELGROMKE, N. RENSBERG, V. DENYSENKO, W. STINNER, F. RICHTER, T. RAUSSEN, M. KERN, T. TURK und G. REINHOLD (2019): Aktuelle Entwicklung und Perspektiven der Biogasproduktion aus Bioabfall und Gülle. Abschlussbericht. Texte 41/2019. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.
- SCHWARZ, B. (2016): Schlussbericht Vorhaben EFFIGEST, FKZ 03KB081. Fraunhofer IKTS, Dresden.
- SCHWARZ, B. (2016a): Stroh - Strohpellets – Biogaspellets. Alternative Möglichkeiten zur verbesserten Biomethanproduktion. SpreuStroh Innovationsforum, 2. Workshop, 14.03.2016, Leipzig.
- SCHWARZ, B., D. PFEUFER, N. BALLING, J. PAPENDIECK, P. SCHNEIDER, M. HÜLSMANN, R. ADAM und N. SONNENBERG (2019): Verwertung strohbasierter Energiepellets und Geflügelmist in Biogasanlagen mit wärmeautarker Gärrestveredlung - STEP. Fraunhofer IKTS, Dresden.
- SDW (Schutzgemeinschaft Deutscher Wald) (2020): Waldanteil in Deutschland. <https://www.sdw.de/waldwissen/wald-in-deutschland/waldanteil>, Abrufdatum: 21.12.2021.
- SEEDLER, G. (2017): Antidumpingzölle auf argentinische Ware. In: *Raiffeisen Magazin* 5/2017: 10f.
- STEINHUESER, A. (2021) Agri-Photovoltaik. Chance für Landwirtschaft und Energiewende. Online Seminar Freiflächen-PV und Landwirtschaft, 16.03.2021.
- STMB (Bayerisches Staatsministerium für Wohnen, Bau und Verkehr) (2021): Bau- und landesplanerische Behandlung von Freiflächen-Photovoltaikanlagen. https://www.stmb.bayern.de/assets/stmi/buw/baurechtundtechnik/25_rundschreiben_freiflaechen-photovoltaik.pdf, Abrufdatum: 20.02.2022.
- STMWI (Bayrisches Staatsministerium für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie) (2022): Aiwanger: „Agri-PV ist Riesenchance für Landwirtschaft und Energiewende. Wertschöpfung auf Bauernhöfen statt bei Ölscheichs“. Pressemitteilung-Nr. 61/22, München.
- STMWI (2019): Bayerisches Aktionsprogramm Energie. Information zur Regierungserklärung von Staatsminister Huber Aiwanger, Mdl, München.
- SÜß, H. (2021): Strom von Dach und Feld. <https://www.wochenblatt-dlv.de/feld-stall/energie/strom-dach-feld-564632>, Abrufdatum: 20.01.2022.
- TAGESSCHAU (2022): EU stuft Atomkraft und Erdgas als nachhaltig ein. <https://www.tagesschau.de/ausland/europa/taxonomie-atomkraft-eu-kommission-101.htm>. Abrufdatum: 26.01.2022.
- THEERARATTANANON, K., F. XU, J. WILSON, S. STAGENBORG, L. MCKINNEY, P. VADLANI, Z. PEI und D. WANG (2012): Effects of the pelleting conditions on chemical composition and sugar yield of corn stover, big bluestem, wheat straw, and sorghum stalk pellets. In: *Bioprocess Biosyst Engineering* 35 (4): 615-623.
- TI-WF (Thünen-Institut für Internationale Waldwirtschaft und Forstökonomie) (2019): Wald in Deutschland – Wald in Zahlen. Ergebnisse der Kohlenstoffinventur 2017. Braunschweig.
- TROMMSDORFF, M., S. GRUBER, T. KEINATH, M. HOPF, C. HERMANN, F. SCHÖNBERGER, P. HÖGY, S. ZIKELI, A. EHMANN, A. WESELEK, U. BODMER, C. RÖSCH, D. KETZER, N. WEINBERGER, S. SCHINDELE und J. VOLLPRECHT (2020): Agri-Photovoltaik: Chance für die Landwirtschaft und Energiewende. Ein Leitfaden für Deutschland. Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, Freiburg.
- TROMMSDORFF, M., J. KANG, C. REISE, S. SCHINDELE, G. BOPP, A. BAUERLE, A. WESELEK, P. HÖGY und T. OBERGFELL (2021): Combining food and energy production: Design of an agrivoltaic system applied in arable and vegetable farming in Germany. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 140 (110694).
- UFOP (Union zur Förderung von Oel- und Proteinpflanzen) (2019): Biodiesel 2018/2019 Sachstandsbericht und Perspektive – Auszug aus dem UFOP-Jahresbericht 10/2019. Berlin.
- UFOP (2020): Biodiesel & Co. 2019/2020. Sachstandsbericht und Perspektive – Auszug aus dem UFOP-Jahresbericht. Berlin.
- UFOP (2022) Bericht zur globalen Marktversorgung 2021/2022. https://www.ufop.de/files/8416/4457/6563/RZ_UFOP_2022_Versorgungsbericht_A5_D_21_22_Web_110222.pdf, Abrufdatum: 26.02.2022.
- USDA (U.S. Department of Agriculture) (2022): Gain Report. Biofuels Annual. Nr. E42021-0053. https://apps.fas.usda.gov/newgainapi/api/Report/DownloadReportByFileName?fileName=Biofuels%20Annual_The%20Hague_European%20Union_06-18-2021.pdf, Abrufdatum: 25.01.2022.
- UMWELTBUNDESAMT (2021a): Erneuerbare Energien in Zahlen. Stand: November 2021. Dessau-Roßlau. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/erneuerbare-energien/erneuerbare-energien-in-zahlen?sprungmarke=strom#emissionsbilanz>, Abrufdatum: 16.02.2022.
- UMWELTBUNDESAMT (2021b): Erneuerbare Energien – Vermiedene Treibhausgase. Stand: Dezember 2021. Dessau-Roßlau. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/erneuerbare-energien-vermiedene-treibhausgase#undefined>, Abrufdatum 16.02.2022.
- UMWELTBUNDESAMT (2021c): Indikator: Beschäftigte im Bereich Erneuerbare Energien. Stand: Juni 2021. Dessau-Roßlau. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/umweltindikatoren/indikator-beschaeftigte-im-bereich-erneuerbare#die-wichtigsten-fakten>, Abrufdatum: 18.02.2022.
- UMWELTBUNDESAMT (2022): Primärenergiegewinnung und -importe. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/primaenergiegewinnung-importe>, Abrufdatum: 20.01.2022.
- VDB (Verband der deutschen Biokraftstoffindustrie) (2022): 2020 Rekordjahr für Klimaschutz durch Biokraftstoffe, aber Ausblick ungewiss. <http://www.biokraftstoffver>

- band.de/index.php/detail/items/id-2020-rekordjahr-fuer-klimaschutz-durch-biokraftstoffe-aber-ausblick-ungewiss.html, Abrufdatum: 28.01.2022.
- VERBIO (Vereinigte Bioenergie AG) (2020): Biomethan aus Stroh. EU-Förderprojekt „DE BIOH VERBIO-STRAW“ Produktion von Biomethan aus 100 % Stroh. <https://www.verbio.de/produkte/verbiogas/verbiogas-aus-stroh/>, Abrufdatum: 27.12.2021.
- VILLADSEN, S.N.B., P.L. FOSBØL, I. ANGELIDAKI, J.M. WOODLEY, L.P. NIELSEN und P. MØLLER (2019): The Potential of Biogas; the Solution to Energy Storage. In: *ChemSusChem* 12 (10): 2147-2153.
- VOGEL, T. (2019): Wirtschaftlichkeit verschiedener Wertschöpfketten von halmgutbasierten Heizwerken mit Nahwärmenetzen (WWHH). Landesforschungsanstalt für Landwirtschaft und Fischerei Mecklenburg-Vorpommern, Gülzow-Prüzen.
- WEDEMEYER, H. und C. REINERT (2022): PV-Freiflächenanlagen. Vortrag Landvolk Kreisverband Diepholz., 09.02.2022, Online.
- WESELEK, A., A. EHMANN; S. ZIKELI, I. LEWANDOWSKI, S. SCHINDELE und P. HÖGY (2019): Agrophotovoltaic systems: applications, challenges, and opportunities. A review. In: *Agronomy for Sustainable Development* 39 (4): 1-20.
- WIETSCHEL, M., C. MOLL, S. OBERLE, B. LUX, S. TIMMERBERG, U. NEULING, M. KALTSCHMITT und N. ASHLEY-BELBIN (2019): Klimabilanz, Kosten und Potenziale verschiedener Kraftstoffarten und Antriebssysteme für Pkw und Lkw. Endbericht. Fraunhofer ISI, Karlsruhe.
- WILKEN, D. (2020): Düngeverordnung: Novelle schränkt organische Düngung noch stärker ein. In: *Biogas Journal* 4: 68-70.
- WIRTH, H. (2022) Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland. Fassung vom 04.02.2022. Fraunhofer ISE, Karlsruhe.
- WOLF, I., T. STADLER und D.L. PINTO (2020): Soziales Nachhaltigkeitsbarometer der Energiewende 2019. Institut für transformative Nachhaltigkeitsforschung (ISAS), Potsdam. https://www.iass-potsdam.de/sites/default/files/2020-12/IASS_N-barometer_21x21cm_DE_201207.pdf, Abrufdatum: 11.01.2022.
- WYDRA, K. (2021): Agrar-Photovoltaik: Landwirtschaft Schützen – PV-Ausbauziele erreichen. https://umwelt.thueringen.de/fileadmin/001_TMUEN/Aktuelles/Topthem/en/EEK2021/Vortraege/Workshop_3_Agrarphotovoltaik/Kerstin_Wydra_APV_Vortrag_ThEEK_2021.pdf, Abrufdatum: 25.02.2022.
- ZELLER, V., D. THRÄN, M. ZEYMER, B. BÜRZLE, P. ADLER, J. PONITKA, J. POSTEL, F. MÜLLER-LANGER, S. RÖNSCH, A. GRÖNGRÖFT, C. KIRSTEN, N. WELLER, M. SCHENKER, H. WEDWITSCHKA, B. WAGNER, P. DEUMELANDT, F. REINICKE, A. VETTER, C. WEISER, K. HENNEBERG UND K. WIEGMANN (2012): Basisinformationen für eine nachhaltige Nutzung von landwirtschaftlichen Reststoffen zur Bioenergiebereitstellung (DBFZ Report Nr. 13). DBFZ, Leipzig.
- ZINKE, W. (2022): Rapspreise peilen 800 Euro an – Preisexplosion im neuen Jahr. <https://www.agrarheute.com/markt/marktfruechte/rapsreise-peilen-800-euro-preisexplosion-neuen-jahr-589031>, Abrufdatum: 10.01.2022.

Kontaktautor:

DR. CHRISTIAN SCHAPER

Georg-August-Universität Göttingen

Department of Agricultural Economics and

Rural Development, Agribusiness Management

Platz der Göttinger Sieben 5, 37073 Göttingen

E-Mail: christian.schaper@agr.uni-goettingen.de