

Anfrage Nr. 147 zur Flächeneffizienz erneuerbarer Energien zur Stromerzeugung

Frage

Welche Technologie zur Erzeugung erneuerbaren Stroms weist die höchste Flächeneffizienz auf? Gibt es belastbare Untersuchungen, die den Energieertrag von Windenergie, Photovoltaik und Biomasse ins Verhältnis zum Flächenbedarf setzen?

Antwort

Zunächst ist festzuhalten, dass sowohl bei der Windenergie als auch bei der Solarenergie – und auch bei der Erzeugung von Strom aus Anbaubiomasse – durch technologische Entwicklungen in den letzten Jahren Leistungs- bzw. Effizienzgewinne erreicht werden konnten.

Effizienzsteigerungen in der Stromerzeugung durch Biomasse

Silomais ermöglicht den höchsten Methanertrag im Vergleich zu anderen Energiepflanzen, wie beispielsweise Zuckerrüben oder Grünlandbiomasse (FNR 2023). Durch verbesserte Anbautechniken konnten für Silomais bereits vor zehn Jahren deutliche Ertragssteigerungen erreicht werden (Fachverband Biogas 2013). Zudem konnte durch technische Weiterentwicklungen, beispielsweise beim Wirkungsgrad von Blockheizkraftwerken, der Flächenbedarf für den gleichen Energieertrag gesenkt werden (umgerechnet 20 % innerhalb eines Fünfjahreszeitraums) (ebd.).

Das Delinat-Institut für Agro-Ökologie- und Klimafarming kam 2012 zu dem Ergebnis, dass pro Hektar angebaute Silomais durchschnittlich 14.000 Kilowattstunden (kWh) Strom erzeugt werden können (Schmidt 2012). Aktuelle Zahlen finden sich sowohl bei der Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe (FNR 2023) mit einem Stromertrag von 18.731 kWh pro Hektar als auch beim Thünen-Institut (Böhm et al. 2023) mit einem Stromertrag auf 23.000 kWh pro Hektar.

Effizienzsteigerung von PV-Modulen

Durch die Steigerung des Wirkungsgrades von PV-Modulen konnte der durchschnittliche Flächenbedarf von PV-Anlagen von rund 3,6 Hektar pro Megawatt Nennleistung bis zum Jahr 2010 bereits auf rund 2,3 Hektar pro Megawatt in den Jahren 2011 bis 2013 reduziert werden (Kelm et al. 2014, S. 76). Die Bundesnetzagentur gibt für 2014 einen Durchschnittswert von rund 1,9 Hektar und für 2015 von 1,6 Hektar an (BNetzA 2016).

Aus Angaben zur Nennleistung von PV-Modulen von 170 bis 200 Watt pro Quadratmeter und der Faustformel, dass für PV-Freiflächenanlagen (PV-FFA) zirka das 2 bis 2,5-Fache an Fläche benötigt wird (Wirth 2018, S. 40), ließen sich für 2018 Flächenbedarfe von knapp unter 1,5 Hektar bis sogar nur einem Hektar errechnen.

Nach Badelt et al. (2020) können PV-FFA mit zirka 1,5 Megawatt installierter Leistung pro Hektar umgesetzt werden, was umgerechnet nur noch rund 0,7 Hektar pro Megawatt entspricht. Das Fraunhofer ISE (2023, S. 39) gibt für Solarparks mit „reduzierten Neigungswinkeln (ca. 20-25 Grad) und Reihenabständen“ umgerechnet rund einen Hektar pro Megawatt Leistung an. Durch weiter gesteigerte Nennleistungen von 210 Watt pro Quadratmeter Modulfläche (Wirth et al. 2023, S. 36) liegt der Flächenbedarf pro Megawatt installierter Leistung wiederum knapp unter einem Hektar.

Leistungssteigerung und Flächenbedarf von Windenergieanlagen

In den letzten Jahren ist eine zunehmende Differenzierung der angebotenen Produktpalette nach Stark- und Schwachwindanlagen zu beobachten, die die Windenergienutzung an mehr Standorten rentabel macht. Zudem erzeugt eine heute übliche Anlage durch höhere Türme bzw. größere Rotordurchmesser wesentlich mehr Energie als Anlagen, die vor 20 Jahren errichtet wurden. Gemäß Hengster et al. (2021) waren Windenergieanlagen (WEA) im Jahr 2000 durchschnittlich 71 Meter hoch, hatten einen durchschnittlichen Rotordurchmesser von 58 Metern und kamen auf eine Nennleistung von etwa 1,1 Megawatt (MW). Im Jahr 2021 waren Anlagen durchschnittlich bereits fast doppelt so hoch, wiesen einen durchschnittlichen Rotordurchmesser von 118 Metern auf und erreichten eine durchschnittliche Nennleistung von rund 3,2 MW (ebd.).

Nach Angaben der FA Wind für das Jahr 2022 lag die bundesweite durchschnittliche Generatorleistung der neu in Betrieb genommenen WEA bereits bei 4,4 MW, für neu genehmigte Anlagen sogar bereits bei knapp über 5 MW (FA Wind 2023, S. 5 bzw. S. 22). Der Rotordurchmesser der 2022 neu in Betrieb genommenen WEA bei bereits 137 Metern (ebd., S. 7). Der Trend hin zu größeren Anlagenleistungen setzt sich zudem weiter fort (ebd., S. 22).

Die dauerhaft in Anspruch genommene Fläche wird von der FA Wind (für WEA auf Waldstandorten inklusive Kranstellfläche und Zuwegung) mit durchschnittlich 0,5 Hektar angegeben (FA Wind 2022, S. 15). Zur Entwicklung der Flächeninanspruchnahme mit fortschreitendem Größen- und Leistungszuwachs liegen dem KNE derzeit keine Quellen vor. Allerdings dürfte die Flächeninanspruchnahme bei weitem nicht in dem Maße zugenommen haben, wie die Leistung der Anlagen bzw. die damit erzeugbaren Strommengen.

Herausforderungen bei der Vergleichbarkeit von Studienergebnissen

Die Leistung pro Fläche, aber auch die in der Frage ebenfalls adressierte erzeugbare Strommenge pro Fläche hängen zum einen von den Leistungsparametern der Anlagen und zum anderen jedoch bei Photovoltaik und Windenergie maßgeblich auch vom standortabhängigen und (über-)regional sehr unterschiedlichen Dargebot an Wind bzw. Sonneneinstrahlung ab. Darüber hinaus gibt es – insbesondere bei PV-FFA – unterschiedliche Technologievarianten und Bauweisen, die einen Einfluss auf den jeweils erzielbaren Energieertrag, aber auch auf den Flächenbedarf pro Leistung haben. Im Hinblick auf die Flächenbedarfe kommt es weiterhin wesentlich darauf an, nach welchen Kriterien diese ermittelt werden. Ein wesentlicher Unterschied besteht in den Festlegungen, welche Flächen bei der Berechnung des Flächenbedarfs mit einbezogen werden. Vorliegende Studien basieren diesbezüglich auf unterschiedlichen Grundannahmen und Daten, wenden unterschiedliche Methoden an und die Ergebnisse werden in nicht direkt vergleichbaren Einheiten angegeben.

Bei der **Windenergie** können beispielsweise ausschließlich die versiegelte Fundamentfläche, die dauerhaft vorzuhaltende Kranstellfläche sowie ggf. die Flächen der zusätzlich erforderlichen

Zuwegung mit einbezogen werden. Für diesen Ansatz spricht, dass die Flächen zwischen den einzelnen WEA – auch ein Großteil der vom Rotor überstrichenen Fläche – in der Betriebsphase weitestgehend uneingeschränkt land- und forstwirtschaftlich bzw. anderweitig genutzt werden können. Ein davon abweichender Berechnungsansatz bezieht die vom Rotor überstrichene Fläche und die Abstandsflächen zu Gebäuden ein oder legt gar die gesamte für die Windenergienutzung planerisch festgelegte Fläche zugrunde, was zu höheren Flächenbedarfswerten führt, obwohl es eben nicht zu einer Nutzungseinschränkung in gleichem Maße kommt.

Bei der Bewertung der Flächeneffizienz der **Photovoltaik** muss berücksichtigt werden, dass es verschiedene Bauweisen und Ausrichtungen von Solarmodulen gibt, die einen unterschiedlichen Energieertrag bzw. eine unterschiedlich hohe installierte Leistung pro Fläche ermöglichen. Bei Freiflächenanlagen sind durchschnittlich drei Prozent der Fläche versiegelt und 32 Prozent der Fläche überbaut. 65 Prozent stehen grundsätzlich für eine eingeschränkte (Grünland-)Nutzung zur Verfügung (Fehrenbach et al. 2021a, S. 70). Neue Konzepte der Agri-Photovoltaik, die sich noch in der praktischen Erprobung befinden, verwenden senkrecht montierte bzw. sehr hoch aufgeständerten waagrecht montierte PV-Module, die weiterhin eine landwirtschaftliche Nutzung von Flächen unter bzw. zwischen den Modulen ermöglichen. Auch hier muss beachtet werden, ob nur die versiegelte bzw., die überdachte Fläche oder das gesamte Gelände einer PV-FFA als Berechnungsgrundlage dient.

Nachfolgend werden die Ergebnisse ausgewählter Studien zusammengefasst, die sich dem Vergleich von Windenergie (an Land), PV-FFA sowie der Stromerzeugung durch Anbaubiomasse hinsichtlich Leistung bzw. Stromertrag pro Fläche bzw. den mit den Technologien verbundenen flächenbezogenen Auswirkungen auf verschiedene Art und Weise näherten.

Studie von 2012 zur Windenergie und Photovoltaik (DLR et al. 2012)

In einer im Auftrag des Bundesumweltministeriums erstellten Studie, in der Langfrist-Szenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien untersucht wurden, verglichen die Autorinnen und Autoren bei unterschiedlichen erneuerbaren Energieerzeugungsarten die jährlichen Erträge in Kilowattstunden pro Quadratmeter. Für die Biomasse gab die Studie einen Energieertrag von 2 bis 6 kWh/m² an, gefolgt von der Windenergie (an Land) mit rund 40 kWh/m² und – am ertragreichsten – die Photovoltaik mit 100 kWh/m² (DLR et al. 2012, S. 80). Nach Einschätzung des Umweltbundesamtes (UBA) dürften hierbei allerdings die Abstandsflächen der Windenergie mit eingerechnet worden sein, was die geringere Effizienz der Windenergie gegenüber der Photovoltaik erklären würde.

UBA-Studie zu Flächenrucksäcken von Gütern und Dienstleistungen (Fehrenbach et al. 2021)

Ein Forschungsvorhaben des UBA geht bei der Bewertung vom sogenannten Hemerobie-Konzept aus, bei dem die Flächeninanspruchnahme von verschiedenen Energieträgern (und Baustoffen) anhand des „Naturfernepotenzials“ bewertet wird (Fehrenbach et al. 2021b). In der Studie wird unter anderem ein Flächenbedarf pro erzeugter Megawattstunde (MWh) erneuerbaren Stroms in Form einer Flächennutzungsänderung in Quadratmetern pro Jahr berechnet. Die Windenergie an Land benötigt laut der Studie pro MWh eine Fläche von 1,43 m², eine PV-FFA eine Fläche von 22 m² pro Jahr. Bei der Stromerzeugung durch Biomasse sind je nach Pflanzenart und Technologie pro MWh eine Fläche von 442 m² bis 519 m² nötig (Fehrenbach et al. 2021a, S. 19).

Studie des Thünen-Instituts zum Vergleich der Flächenenergieerträge verschiedener erneuerbarer Energien (Böhm et al. 2023)

Jonas Böhm vom Thünen-Institut bilanzierte in einer Studie Flächenenergieerträge erneuerbarer Energien auf landwirtschaftlichen Flächen, unter anderem in Bezug auf die Stromerzeugung. Zur Veranschaulichung der Ergebnisse wurden die ermittelten Flächenenergieerträge jeweils auf die Anzahl der Haushalte umgerechnet, deren Jahresstrombedarf damit gedeckt werden kann.

Die Flächenenergieerträge von PV-FFA wurden anhand von vier Standorten und fünf Anlagengrößen berechnet, wobei die gesamte Anlagengröße als Berechnungsgrundlage gewählt wurde und Speicherverluste berücksichtigt wurden. Im Ergebnis können pro Hektar PV-FFA umgerechnet 230 Haushalte ein Jahr lang mit Strom versorgt werden. Bei der Windenergie wurden ausschließlich die versiegelten Flächen berücksichtigt. Pro Hektar durch Windräder versiegelter Fläche können demnach 6.000 Haushalte versorgt werden. Über die Verstromung (inklusive der Abwärmenutzung) von Biogas aus Mais von einem Hektar Anbaufläche kann hingegen lediglich der Strombedarf von sieben Haushalten gedeckt werden (Böhm 2023a S. 22 ff. bzw. 2023b, S. 4).

Zusammenfassung und Einordnung

Durch die technologische Entwicklung bei der Photovoltaik sowie bei der Windenergie haben insbesondere diese Technologien in den letzten Jahren erhebliche Effizienzgewinne erzielen können. In allen Studien, die sich mit der Leistung bzw. dem Energieertrag pro Fläche bzw. den flächenbezogenen Auswirkungen beschäftigen, wird – unabhängig von deren Berechnungsmethodik und zugrundeliegenden Rahmenbedingungen – deutlich, dass die Flächeneffizienz der Stromerzeugung durch Windenergienutzung und durch PV-FFA weit über der Stromerzeugung aus Biomasse liegt.

Bezieht man bei der Windenergie nicht die zwischen den Anlagen liegenden Abstandsflächen bzw. gar die planerisch für die Windenergienutzung festgelegte Flächenkulisse mit ein, sondern beschränkt sich auf die Flächen mit einer dauerhaften Flächeninanspruchnahme durch Versiegelung, so weist die Windenergie eine deutlich größere Flächeneffizienz bzw. deutlich kleinere „Flächenrucksäcke“ auf als herkömmliche PV-FFA.

Unabhängig von der Flächeneffizienz besteht Konsens, dass zum Erreichen der Energiewendeziele ein Mix aus verschiedenen Erzeugungstechnologien erforderlich ist, um die Schwankungen und regionalen Unterschiede des Dargebots der Primärenergiequellen Wind und Sonneneinstrahlung und zugleich der zeitlich und regional unterschiedlichen Strombedarfe ausgleichen zu können. Eine ausschließliche Ausrichtung auf „die flächeneffizienteste“ Technologie ist daher nicht zielführend.

Im Vergleich zu Windenergiestandorten weisen PV-FFA aus Naturschutzsicht jedoch einen (potenziellen) Vorteil auf: durch weite Reihenabstände und Integration von Freiflächen sinkt zwar die Flächeneffizienz, zugleich verbessern sich aber die Möglichkeiten, zumal bei gezielter Förderung der Biodiversität, den naturschutzfachlichen Wert der Flächen zu fördern.

Literaturverzeichnis

- Badelt, O., Niepelt, R., Wiehe, J., Matthies, S., Gewohn, T., Stratmann, M., Brendel, R., Haaren, C. Von (2020): Integration von Solarenergie in die niedersächsische Energielandschaft (INSIDE). Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie, Bauen und Klimaschutz, Hannover. 129 S. [Link zum Dokument](#) (letzter Zugriff: 24.10.2023).
- BNetzA - Bundesnetzagentur (2016): Bericht über die Flächeninanspruchnahme für Freiflächenanlagen nach § 36 Freiflächenausschreibungsverordnung (FFAV). Stand Dezember 2016. Bonn. 17 S. [Link zum Dokument](#) (letzter Zugriff: 24.10.2023).
- Böhm, J. (2023a): Vergleich der Flächenenergieerträge verschiedener erneuerbarer Energien auf landwirtschaftlichen Flächen – für Strom, Wärme und Verkehr. Berichte über Landwirtschaft 101 (1). S. 35. [Link zum Dokument](#) (letzter Zugriff: 24.10.2023).
- Böhm, J. (2023b): Energie vom Acker: Was liefert den meisten Strom? ECOVIS agrar (3). S. 4–6. [Link zum Dokument](#) (letzter Zugriff: 24.10.2023).
- DLR – Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Fraunhofer IWES – Fraunhofer Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik, IFNE – Ingenieurbüro für neue Energien (2012): Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global. Studie im Auftrag vom BMU (FKZ 03MAP146). Stand 29. März 2012. Schlussbericht. Stuttgart-Kassel-Teltow. 331 S. [Link zum Dokument](#) (letzter Zugriff: 24.10.2023).
- Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR) (2023): Basisdaten Bioenergie 2024. Gülzow-Prüzen. 55 S. [Link zum Dokument](#) (letzter Zugriff: 24.10.2023).
- Fachverband Biogas e.V. (2013): Position des Fachverbandes Biogas e.V. zur Rolle von Biogas im künftigen Stromversorgungssystem. – Stand 16.08.13. Fachverband Biogas e.V., Freising. 5 S. [Link zum Dokument](#) (letzter Zugriff: 24.10.2023).
- FA Wind – Fachagentur Windenergie an Land e. V. (2022): Entwicklung der Windenergie im Wald. 7. Auflage, 2022. 51 S. [Link zum Dokument](#) (letzter Zugriff: 24.10.2023).
- FA Wind – Fachagentur Windenergie an Land e. V. (2023): Ausbausituation der Windenergie an Land im Jahr 2022 - Auswertung windenergiespezifischer Daten im Marktstammdatenregister für den Zeitraum Januar bis Dezember 2022. Berlin. 47 S. [Link zum Dokument](#) (letzter Zugriff: 24.10.2023).
- Fehrenbach, H., Grahl, B., Busch, M., Bürck, S., Bischoff, M., Theis, S., Reinhardt, J., Blömer, J. (2021a): Flächenrucksäcke von Gütern und Dienstleistungen. Ermittlung und Verifizierung von Datenquellen und Datengrundlagen für die Berechnung der Flächenrucksäcke von Gütern und Dienstleistungen für Ökobilanzen – Teilbericht I: Methoden. Teilbericht I: Methoden. Texte 168/2021. UBA – Umweltbundesamt (Hrsg.). 157 S. [Link zum Dokument](#) (letzter Zugriff: 24.10.2023).
- Fehrenbach, H., Grahl, B., Busch, M., Bürck, S., Bischoff, M., Theis, S., Reinhardt, J., Blömer, J. (2021b): Flächenrucksäcke von Gütern und Dienstleistungen. Ermittlung und Verifizierung von Datenquellen und Datengrundlagen für die Berechnung der Flächenrucksäcke von Gütern und Dienstleistungen für Ökobilanzen – Teilbericht II: Fallbeispiele –. Teilbericht II: Fallbeispiele. Texte 169/2021. UBA – Umweltbundesamt (Hrsg.). 112 S. [Link zum Dokument](#) (letzter Zugriff: 24.10.2023).

Hengster, J., Russ, M., Stoffregen, A., Hendrich, A., Weidner, S., Held, M., Briem, A.-K. (2021): Aktualisierung und Bewertung der Ökobilanzen von Windenergie- und Photovoltaikanlagen unter Berücksichtigung aktueller Technologieentwicklungen. Abschlussbericht. Im Auftrag des Umweltbundesamtes. 2021. 392 S. [Link zum Dokument](#) (letzter Zugriff: 24.10.2023).

Kelm, T., Schmidt, M., Taumann, M., Püttner, A., Jachmann, H., Capota, M. (2014): Vorbereitung und Begleitung der Erstellung des Erfahrungsberichts 2014 gemäß § 65 EEG. Vorhaben IIc: Stromerzeugung aus Solarer Strahlungsenergie. Wissenschaftlicher Bericht. Stuttgart. 171 S. [Link zum Dokument](#) (letzter Zugriff: 24.10.2023).

Schmidt, H.-P. (2012): Klimabilanz für Biogas aus Maismonokulturen. Ithaka Journal (1). S. 57–60. [Link zum Dokument](#) (letzter Zugriff: 24.10.2023).

Wirth, H. (2023): Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland. Fraunhofer ISE, Freiburg. 97 S. [Link zum Dokument](#) (letzter Zugriff: 24.10.2023).

Haftungsausschluss

Alle Angaben in diesem Dokument wurden nach bestem Wissen zusammengestellt. Sie geben den zum Antwortzeitpunkt aktuellen Kenntnisstand wieder. Das KNE schließt eine Haftung für die Richtigkeit und Vollständigkeit der Informationen – außer für Fälle von Vorsatz und grober Fahrlässigkeit – aus. Dies betrifft insbesondere die Haftung für eventuelle Schäden, die durch die Nutzung der Informationen entstehen.

Zitervorschlag:

KNE (2023): Anfrage Nr. 147 zur Flächeneffizienz erneuerbarer Energien zur Stromerzeugung. Antwort vom 24. Oktober 2023.