

Windlastansätze für Agrivoltaiksysteme

Daniel Markus, Rolf-Dieter Lieb

I.F.I. Institut für Industrieaerodynamik GmbH, Institut an der Fachhochschule Aachen

Zusammenfassung: Neuartige Agrivoltaiksysteme rücken zunehmend in den Fokus, gleichzeitig bewegen sie sich in Bezug auf die Windlasten häufig außerhalb der durch Normen abgedeckten Geometrien, was die effiziente und sichere Bemessung erschwert. Dieser Artikel soll für das Thema sensibilisieren und beispielhafte Herausforderungen und Lösungsansätze aufzeigen.

1 Einführung

Im Zuge der Energiewende ist der großflächige Ausbau erneuerbarer Energiequellen und insbesondere von Photovoltaikanlagen notwendig. Neben der klassischen Montageweise auf Hausdächern rücken zunehmend Freiflächenanlagen in den Fokus. Schon heute sind Photovoltaik-Freiflächenanlagen (PV-FFA) die günstigste Art, Strom zu erzeugen [1]. Insbesondere ist es durch diese Systeme möglich, Flächen nutzbar zu machen, die sonst brach lägen, wie beispielsweise in Wüstenregionen. Wo jedoch große Flächen für die Landwirtschaft genutzt werden, tritt unweigerlich ein Nutzungskonflikt zu Tage.

Aus diesem Dilemma erwuchs das Konzept der Agrar-Photovoltaik, auch als Agrivoltaik, Agri-PV oder seltener Agro-Photovoltaik bekannt. Dabei handelt es sich um die *gleichzeitige* Nutzung von Freiflächen für die Landwirtschaft und die Stromerzeugung mittels aufgeständerten Photovoltaikanlagen, die auch die Flächennutzung der Landwirtschaft erlauben. Dabei kann es je nach Ausführung und Typ zu Synergieeffekten in dem Sinne kommen, dass nicht nur Strom erzeugt wird, sondern auch die landwirtschaftlichen Erträge steigen: wenn zum Beispiel bodennahe Solarmodule den bodennahen Wind abbremsen und so für weniger Bodenerosion sorgen oder hoch montierte Module für eine teilweise Beschattung der darunter liegenden Pflanzen sorgen und so helfen, den auch in Deutschland zunehmenden Sonnen-Trocken- und Hitzestress zu reduzieren. Zu guter Letzt stellen die Unterkonstruktionen für Agrivoltaik auch mögliche Rankhilfen für Pflanzen dar oder erlauben die Verlegung von Leitungen zur automatischen Bewässerung. In Summe ist die Agrivoltaik also ein interessantes Konzept mit viel Potential. Gleichwohl stellt sie aber in ihrer Besonderheit die Hersteller von Montagesystemen und die Statiker vor neue Herausforderungen.

2 Arten von Agrivoltaiksystemen

Zunächst ist es sinnvoll, sich bestehende, gängige PV-Freilandsysteme zu vergegenwärtigen. Dabei handelt es sich zumeist um festaufgeständerte (fixed-tilt) oder nachgeführte Systeme (Tracker), siehe Abbildung 1. Der Bodenabstand beträgt an der Traufkante meist mindestens 800 mm, damit Schafe und Ziegen noch darunter weiden können und Pflanzen die Module nicht verschatten. Der Anstellwinkel bei festaufgeständerten Systemen liegt meist zwischen 10° und 30° nach Süden, bei nachgeführten Systemen variiert er prinzipbedingt zwischen $\pm 60^\circ$ nach Osten und Westen. Die Tischbreite bzw. aerodynamische Sehnenlänge variiert zwischen 2 m und 8 m, wobei der Markttrend zu größeren Modulen auch größere Sehnenlängen bewirkt. Die mittlere Bauhöhe beträgt in der Regel 2 m bis 3 m. Die einzelnen Reihen werden häufig nah beieinander gebaut, um den Flächendeckungsgrad (ground-coverage ratio, GCR) und damit die Ausbeute pro Grundstücksfläche zu erhöhen.

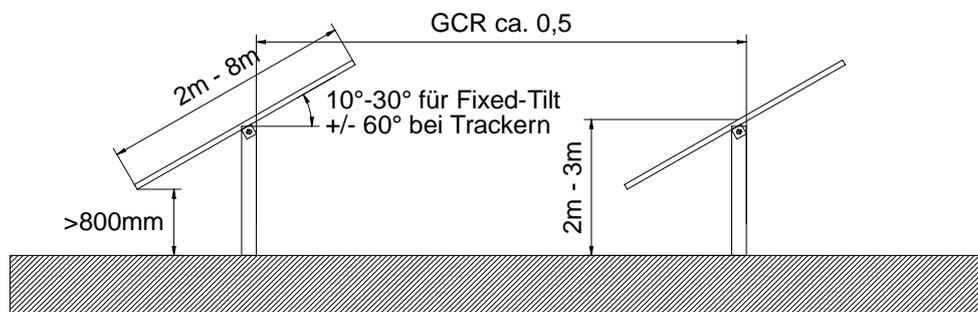


Abbildung 1: Skizze und typische Abmessungen eines herkömmlichen PV-Freilandsystems

Agrivoltaiksysteme weichen von diesem bekannten Muster je nach Zielsetzung und Anwendungsgebiet mehr oder weniger stark ab. Haupttreiber ist dabei die angestrebte gleichzeitige Nutzung der Flächen für die Landwirtschaft, sodass auch der Einsatz großer Maschinen möglich sein muss, oder die Anlagen über den Früchten platziert werden sollen, was im Hopfenanbau Höhen von 7 m entsprechend kann. Daraus haben sich im Wesentlichen zwei Gruppen von Systemen herausgebildet: bodennahe Systeme mit zumeist senkrecht stehenden Modulen und großem Reihenabstand einerseits sowie Systeme mit deutlich größerer Aufständerungshöhe dann oft aber eher flach angestellten Modulen andererseits.

2.1 Bodennahe Systeme

Bodennahe Systeme zeichnen sich durch die Einfachheit der Unterkonstruktion aus, die aufgrund der geringen Bauhöhe auch nur wenige Verankerungen im Boden benötigt. Bodennahe Systeme sind entweder Aufdach-Systeme, die nun auf dem Boden platziert werden, oder auch herkömmliche Freilandsysteme, in jedem Fall aber mit einem vergrößerten Reihenabstand, damit landwirtschaftliches Gerät dazwischen passieren kann, siehe Abbildung 2 links.

Eine andere Systemart sind „Solarzäune“ also Systeme, bei denen die Module vertikal mit einem geringen Abstand zum Boden montiert werden. Zunehmend wird dies auch mit bifazialen Modulen kombiniert, siehe Abbildung 2 rechts.



Abbildung 2: herkömmliches Freilandssystem der BayWa r.e. (links, Bild ©BayWa r.e.) und senkrechter „Solarzaun“ der Next2Sun GmbH (rechts, Bild ©Next2Sun GmbH)

2.2 Systeme mit großer Bauhöhe

Eine weitere Möglichkeit, den Flächennutzungskonflikt aufzulösen, besteht darin, PV-Module soweit anzuheben, dass landwirtschaftliche Geräte darunter anstatt dazwischen fahren können, vergleiche Abbildung 3. Auch hier kommen zumeist Geometrien zum Einsatz, die aus dem Aufdach- oder Freilandbereich bekannt sind. Ihnen ist jedoch gemein, dass der Bodenabstand deutlich größer ist. Statt der oben genannten 2 m bis 3 m mittlerer Bauhöhe bei herkömmlichen Freilandssystemen sind eher Bauhöhen von 3 m bis 5 m oder auch über 7 m im Hopfenbau gefragt. Mit der Höhe nehmen aber die Momente aus Horizontalkräften stark zu, sodass entweder massivere Fundamente benötigt werden oder eine großflächigere Aussteifung innerhalb der Reihen oder Gitter der PV-Anordnung auf ihren Stützen. Darüber hinaus verändert der große Bodenabstand die Umströmung selbst und damit auch die einwirkenden Windlasten auf diese Systeme, wie weiter unten dargestellt wird.

Daneben gibt es auch noch Ideen, die mit einer kostengünstigeren Unterkonstruktion auskommen sollen, indem handelsübliche Solarmodule auf Seilen montiert werden und über große Weiten gespannt werden. Eine Abwandlung davon ist das Verspannen von röhrenförmigen Solarmodulen, wie sie von der Firma TubeSolar AG vertrieben werden, siehe Abbildung 4.



Abbildung 3: Geometrie herkömmlicher Freilandsysteme mit großer Bauhöhe (Bilder: links ©Sun'Agri SAS, rechts ©voestalpine Sadef)



Abbildung 4: Gespannte Systeme von TubeSolar AG und sbp sonne GmbH links (Bild ©sbp sonne GmbH) sowie vom chinesischen Hersteller CETCsolar (Bild ©CETCsolar)

3 Herausforderungen bei der Bemessung gegen Wind

Die Herausforderungen in der Bemessung gegen Wind beginnen schon bei den herkömmlichen Freilandanlagen. Da in DIN EN 1991-1-4 PV-Freilandssysteme nicht explizit behandelt werden, werden diese Strukturen in der Regel als freistehende Dächer betrachtet und die Windkräfte nach Abschnitt 7.3 der DIN EN 1991-1-4 berechnet. Dieser Ansatz ist jedoch aus aerodynamischer wie windingenieurtechnischer Sicht aus mehreren Gründen problematisch. Zum einen basieren die angegebenen Druckbeiwerte größtenteils auf Arbeiten von Cook aus den 1970er Jahren [2] und entsprechen mithin nicht mehr dem aktuellsten Stand der Technik. Zum anderen wurden in den Studien eben gerade freistehende Dächer betrachtet, die sich von PV-Freilandanlagen hinsichtlich ihrer Seitenverhältnisse unterscheiden. Neuere Untersuchungen zeigen jedoch, dass gerade dieses Seitenverhältnis Einfluss auf die Druckbeiwerte hat. Zum anderen ist es naheliegend, dass die Bodenfreiheit einen Einfluss auf die Druckbeiwerte haben muss, allerdings macht Abschnitt 7.3 der DIN EN 1991-1-4 dazu keinerlei Aussage. Neben einigen weiteren Aspekten kann dieser Ansatz aber vor allem die besondere Situation von PV-Freilandanlagen nicht erfassen, dass nämlich nicht nur ein einzelner Tisch gebaut wird, sondern über ein großes Areal eine Vielzahl von Reihen hintereinander. Daraus ergeben sich aerodynamisch und lastrelevante Themen wie Windschatteneffekte im Feldinneren, Wirbelablösung stromauf gelegener Reihen, dynamische Anregung stromab gelegener Reihen und weiteres. Eigene Windkanaluntersuchungen an solchen Systemen zeigen eine vielschichtige Abhängigkeit der statischen Lasten und dynamischen Anregungen je nach Position innerhalb des Feldes, Lasteinzugsfläche, Anstellwinkel und Reihenabstand.

Der Schwerpunkt der bauaufsichtlich eingeführten Windlastnorm DIN EN 1991-1-4 liegt natürlich bei geschlossenen Gebäuden in freier Anströmung. Zwar gibt es weitergehende Ansätze für benachbarte Hindernisse, Bauten auf Hängen oder Kuppen und eben auch freistehende Dächer, dennoch sind die Ausgangsdaten stark selektiv aus der Literatur zusammengestellt worden und nicht automatisch miteinander kompatibel nutzbar. Daran wird sich absehbar auch mit der Neufassung der EN 1991-1-4 wenig ändern, die derzeit in der finalen Abstimmung auf europäischer Ebene steht.

Häufig lohnt sich daher der Blick in ausländische Normen, die im Bereich der PV-Systeme teilweise deutlich weiter sind. So werden herkömmliche PV-Freilandanlagen inzwischen in der aktuellen amerikanischen Baunorm ASCE 7-22 auf Basis großer Parameterstudien normativ relativ detailliert erfasst.

Im Folgenden sollen die oben vorgestellten Systemtypen mit Blick auf ihre normative Erfassung bezüglich der Windeinwirkungen betrachtet und kommentiert werden. Es wird auf Probleme der Ansätze nach DIN EN 1991-1-4 hingewiesen und Alternativen werden vorgestellt oder Hinweise zu bekannten Abweichungen gegeben.

3.1 Vertikal montierte Module, „Solarzäune“

Bodennahe Systeme, bei denen die Module vertikal montiert werden, wie beispielsweise von den Firmen Next2Sun GmbH oder voestalpine Sadef nv entsprechen in ihrer Geometrie Zäunen oder freistehenden Wänden und können als solche nach Abschnitt 7.4 der DIN EN 1991-1-4 behandelt und bemessen werden. Sehr häufig gibt es allerdings bei diesen Systemen auch einen Spalt zwischen Boden und der Unterkante der Module. Dies ließe sich entweder vernachlässigen oder gegebenenfalls durch die Ansätze für Anzeigetafeln berücksichtigen. Allerdings weisen Anzeigetafeln selten eine vergleichbare horizontale Erstreckung auf und sind meist auch höher über dem Boden positioniert. Entsprechend ist es kaum möglich die beiden verwandten Ansätze durch Interpolation sinnvoll ineinander überführen. Immerhin kann im Rahmen der Ansätze für Mauern und Zäune bereits eine stromauf gelegene Reihe günstig berücksichtigt werden.

Wohl wird die unvollständige Völligkeit der Systeme so nicht betrachtet: aufgrund der winddurchlässigen Struktur der Unterkonstruktion ist aber davon auszugehen, dass die Windlasten deutlich reduziert werden. Darüber hinaus liegen auch im Bereich der freistehenden Wände neuere Untersuchungen vor [3], die die Einflüsse des Seitenverhältnisses sowie des Bodenabstandes deutlich genauer darstellen, als in DIN EN 1991-1-4. Diese Untersuchungen sind in den Normen der USA ASCE 7-22 sowie für Australien und Neuseeland AS/NZS 1170.2:2021 eingearbeitet worden und ermöglichen eine genauere und mitunter spürbar günstigere Bemessung, als dies nach DIN EN 1991-1-4 mit den dort vereinfachten Ansätzen möglich wäre. Natürlich bleiben durch die Regelung des Kapitels 1.5 der DIN eine gutachterliche Bewertung oder der Nachweis mit (Windkanal-)Versuchen als Alternativen zugänglich.

3.2 Herkömmliche Geometrien mit großer Bauhöhe

Bei den Auswirkungen des vergrößerten Bodenabstandes auf die Windlasten gegenüber Freilandsystemen mit herkömmlicher Geometrie handelt es sich um eine für die Agrivoltaik spezifische Fragestellung, die noch in keiner Norm erfasst ist. Würde man bei dem Ansatz freistehender Dächer nach DIN EN 1991-1-4 bleiben, so gäbe es überhaupt keinen Unterschied zwischen Agrivoltaiksystemen und herkömmlichen Geometrien, da die Bodenfreiheit dort keine Beachtung bzw. keinen Eingang in die Berechnungen findet.

Im Rahmen eines internen Forschungsvorhabens haben wir erste Modellmessungen im Windkanal durchgeführt [4]. Untersucht wurde dabei zunächst ein herkömmliches PV-Trackersystem mit einer Sehnellänge von etwa 4,1 m und einer Bauhöhe von etwa 2 m. Dann wurde die mittlere Bauhöhe auf 4,1 m bzw. 8,5 m erhöht und Messungen für verschiedene Anstellwinkel zwischen 0° und 60° sowie verschiedene Reihenabstände durchführt. Die Auswertung zeigte dann, dass die auf die Module einwirkenden Normalkräfte gegenüber dem Referenzfall bei einer mittleren Bauhöhe von 4,1 m und 8,5 m um 17% bzw. 43% im Mittel zunahm. Diese Zunahme ist allein durch die veränderte Aerodynamik begründet. Aufgrund

der größeren Bauhöhe und dadurch längeren Hebelarme weisen die Einspannmomente der Pfosten noch deutlich größere Zunahmen auf.

Auch wenn diese Messungen keinen Anspruch auf Allgemeingültigkeit haben, so zeigt sich doch gut, dass derlei Themen eine signifikante Rolle spielen und rein normbasierte Ansätze zu einer deutlichen Unterbemessung führen können, obwohl die Normansätze normalerweise (für den gedachten Anwendungsbereich) deutlich auf der sicheren Seite liegen.

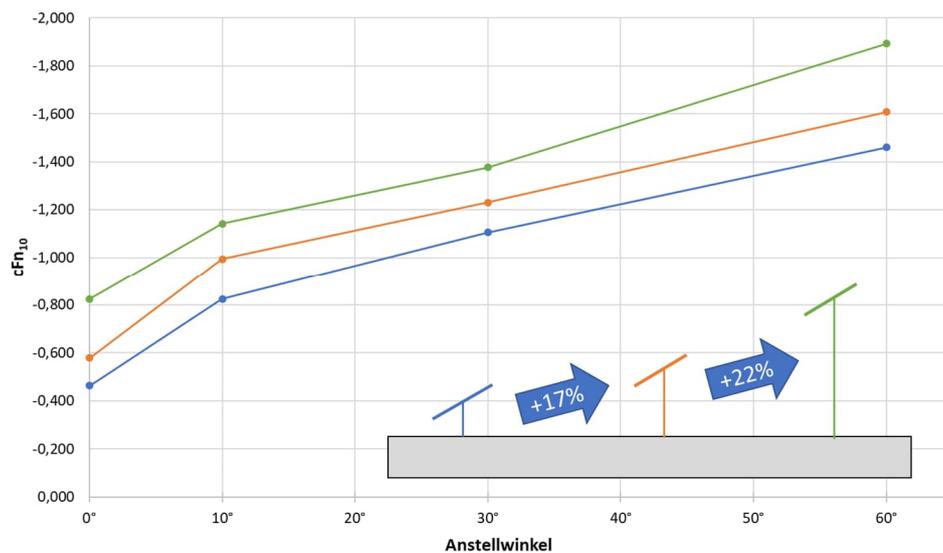


Abbildung 5: Zunahme der einwirkenden Normalkraft mit der Bauhöhe für ein herkömmliches Trackersystem

3.3 Gespannte Systeme

Bei den gespannten Systemen spielen aufgrund der hohen Flexibilität und geringen Dämpfung der verspannten Elemente insbesondere dynamische Effekte und damit aeroelastische Anregungen eine Rolle. Beispielhaft dafür untersuchten He et al. [8] in einem Modellversuch das durch Wind induzierte Schwingungsverhalten von PV-Modulen, die von (Stahl-)Seilen gestützt waren. Bei diesem aeroelastischen Modell wurden Spannweiten von ca. 35 m in einer noch moderaten Höhe von 3,5 m untersucht. Die Module wurden um 15° geneigt, die erste vertikale Eigenfrequenz und die Torsionsfrequenz der Konstruktion betragen 0,88 Hz bzw. 1,6 Hz. Es zeigte sich, dass von Seilen gestützte PV-Konstruktionen anfällig für starke Resonanzschwingungen vor allem bei Seitenwinden sind, wobei leeseitige Module im Vergleich zu luvseitigen Modulen aufgrund der Abschattung besser geschützt waren. Die kritische Windgeschwindigkeit, ab der es zu Schwingungen aufgrund des Windes kam, war hierbei mit ca. 4 m/s bei einer Anströmung aus 0° (von links in Bild 4.3) und mit ca. 3 m/s bei einer Anströmung aus 180° (von rechts in Bild 4.3) überraschend niedrig und die Schwingungsamplitude stieg mit der Windgeschwindigkeit weiter an. Des Weiteren waren Torsionsschwingungen der ungekoppelten Reihen noch deutlich stärker als die vertikalen Schwingungen. Bei einer Windgeschwindigkeit von 8 m/s lagen die Standardabweichungen

der vertikalen und die der Torsionsbeschleunigung bei bis zu 23 m/s^2 bzw. 323 rad/s^2 , die größte (nahezu immer wiederkehrende) vertikale Auslenkung trat bei dieser Windgeschwindigkeit bei einer Anströmung aus 180° in der vordersten Reihe (auf die exponierte Modulunterseite) auf und betrug rund 6 cm.

Bei größeren Höhen und damit verbunden größeren Anströmgeschwindigkeiten des Windes auf die Konstruktion sind dann sowohl häufiger schwingfähige Situationen als auch größere Schwingungsamplituden zu erwarten.

4 Nebenaspekte

Neben der Windlast auf die Solarmodule, die in die Unterkonstruktion eingeleitet wird, kommen mitunter weitere Lasten hinzu. So bietet es sich an, die vorhandene Unterkonstruktion oder daran befestigte Kletterseile als Rankhilfe für Pflanzen zu nutzen. In diesem Fall erfahren dann die Pflanzen selbst auch eine Windlast, welche gegebenenfalls in die Unterkonstruktion eingeleitet wird. In jedem Fall verändert Vegetation unterhalb der Solarmodule jedoch die Versperrung und damit wiederum das Strömungsverhalten an den Modulen.

Weiterhin lässt sich die Unterkonstruktion nutzen, um Bewässerungssysteme zu installieren. Wasserleitungen stellen aber nicht unerhebliche zusätzliche Massen dar, die bei einer Schwingungsanregung zu kleineren Eigenfrequenzen und geringerer Dämpfung beitragen. Das wiederum erhöht die Anregbarkeit durch den Wind, die unter 0,5 Hz am größten wird.

5 Zusammenfassung

Die Agrivoltaik ist ein neues Anwendungsgebiet der solaren Stromerzeugung mit viel Potential. Ihre neuen, mitunter unüblichen Konstruktionen bereiten bei der Ermittlung der einwirkenden Windlasten jedoch häufig Probleme, während es gerade diese Lasten sind, die im Allgemeinen die Auslegung dominieren.

Die DIN EN 1991-1-4 bietet hier häufig nur unzureichende Ansätze, doch sind die Effekte bspw. eines erhöhten Bodenabstandes auf die Windlasten signifikant. Daher lohnt eine tieferegehende Recherche und Betrachtung unter anderen auch in ausländischen Normen, sowie nicht zuletzt direkte Windkanaluntersuchungen, um die tatsächlichen Windlasten zu ermitteln und eine sichere sowie ökonomische Auslegung zu ermöglichen.

Literatur

- [1] KOST, C., ET AL. Stromerzeugungskosten Erneuerbare Energien. Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, Freiburg, 2021.
- [2] COOK, N. J. The designer's guide to wind loading of building structures, Part 2 – static structures. Butterworths, 1990

- [3] GIANNOULIS, A.; STATHOPOULOS, T.; BRIASSOULIS, D.; MISTRITIS, A. Wind loading on vertical panels with different permeabilities. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 107-108 (2012), S. 1-16.
- [4] MARKUS, D.; WEIHBRECHT, T. Der Einfluss einer erhöhten Bodenfreiheit auf die Spitzenwindlast eines einachsigen Solar-Tracker-Systems. In: Vortragsband der 18. Dreiländertagung D-A-CH 2023 der Windtechnologischen Gesellschaft e. V., Aachen, 2023