



# I.F.I. Institut für Industrieraerodynamik GmbH

---

Ballastangaben nicht blind vertrauen

Dr.-Ing. Thorsten Kray  
I.F.I. Institut für Industrieraerodynamik GmbH  
Welkenrather Straße 120  
52074 Aachen

# Einleitung

---



- ❑ Startpunkt: Viele Anfragen von Kunden hinsichtlich Ballastierungsangaben konkurrierender PV-Montagesystemhersteller
- ❑ Beispiel: Ein Systemhersteller (1) hatte ein 13-Grad-Ost-West-System angeboten, ein weiterer Hersteller (2) die 10-Grad-Version seines Ost-West-Systems.
- ❑ Die jeweiligen Ballastberechnungen erfolgten für dasselbe exponierte großflächige Hallendach an der Nordseeküste.
- ❑ Das Eigengewicht der Module und der Unterkonstruktion war in beiden Fällen jeweils nahezu identisch.

# Einleitung

- Beide Systeme (1) und (2) wurden seitens I.F.I. auf ihre aerodynamischen Eigenschaften hin analysiert – in einem Grenzschichtwindkanal, der den Spezifikationen der WtG entspricht.



Foto: Modell eines Gebäudes mit Flachdach, Attika und mit dem PV-Feld im 1:100-Maßstab im großen I.F.I.-Grenzschichtwindkanal

# Einleitung

---



- ❑ Das Ergebnis war wie erwartet: System (1) ist aerodynamisch um etwa 20% ungünstiger als System (2).
- ❑ Der berechnete Gesamtballast von Hersteller (1) lag jedoch bei ungefähr 4.000 kg, der von Hersteller (2) bei rund 23.000 kg.
- ❑ Es liegt somit nahe, dass Systemhersteller (1) bewusste Ballastreduzierungen vorgenommen hatte, um sich einen Vorteil bei der Auftragsvergabe zu verschaffen.

# Unterschiede bei Verschieben und Abheben



- Zwei potentielle Versagensmechanismen aufgrund von Windwirkung: „Abheben“ und „Verschieben“. Die Ballastierung ist für jeden Lastfall separat zu berechnen.
- Liegt eine gute horizontale Systemsteifigkeit vor, kann Ballast gegen „Verschieben“ innerhalb eines Feldes umverteilt werden.
- Ballast gegen „Abheben“ kann allerdings nur geringfügig oder auch gar nicht umverteilt werden. Dies liegt an der meist nur geringen vertikalen Systemsteifigkeit, die die eine Umverteilung von vertikal wirkenden Windkräften zu Nachbarmodulen stark begrenzt.

## Manche rechnen schön

---

- Chronologie einer Ballastschönrechnung: Seitens des Montagesystemherstellers (3) wurde zunächst nur ein sogenannter Abhebenachweis geführt. Hierbei wurde ein recht hoher Ballast ermittelt. Es war allerdings unklar, inwiefern die Systemverbundwirkung berücksichtigt wurde. Denn allein aufgestellte Reihen wurden genauso bemessen wie solche mit allseitigen Nachbarreihen.

# Manche rechnen schön



		Zone			
		gelb	blau	rot	grau
$\gamma_q$ (Sicherheitsbeiwert)	[-]	1,5	1,5	1,5	1,5
$\gamma_g$ (Sicherheitsbeiwert)	[-]	0,9	0,9	0,9	0,9
Eigengewicht	[kg]	37,51	37,51	37,51	37,51
$c_{p,vi}$ (Druckbeiwert)	[-]	-0,5	-0,42	-0,35	-0,25
$c_{p,vs}$ (Druckbeiwert)	[-]	-0,45	-0,3	-0,2	-0,1
Modulanstellwinkel	[°]	15	15	15	15
$q_p$ (Böenstaudruck)	[kN/m <sup>2</sup> ]	0,58	0,58	0,58	0,58
Modulfläche	[m <sup>2</sup> ]	1,64	1,64	1,64	1,64
seitens IFI errechneter Ballast	[kg]	110,8	74,9	48,3	17,1
Ballast seitens Hersteller (3)	[kg]	102,6	57,2	26,9	0
Unterschied Hersteller (3) zu IFI	[%]	-7,4	-23,6	-44,4	-100,0

Ballast gegen „Abheben“ basierend auf den Angaben des Montagesystemherstellers (3) im Vergleich zu einer Nachrechnung seitens I.F.I.  
 (Die Zonen auf dem Dach sind in den Berechnungen des Montagesystemherstellers (3) farblich gekennzeichnet und reichen von der exponiertesten gelben Zone über die blaue und rote Zone hin zu der am wenigsten exponierten grauen Zone; hierbei liegt die gelbe Zone in den Dachecken und die graue Zone im Dachinneren.)

## Manche rechnen schön

---

- ❑ Da trotz der vorgenommenen Reduktionen die Tragreserve des Daches übertroffen wurde, trat in der Folge herstellerseitig (3) ein neuer Ballastnachweis auf den Plan, der eine weitere Ballastreduktion versprach.
- ❑ Diesmal wurde allerdings nur ein Verschiebenachweis geführt, der den ersten auf dem Versagensmodus Abheben basierenden Ballastplan ersetzen sollte.
- ❑ Der gelieferte Verschiebenachweis galt aber nur für mehrere statisch verbundene Reihen. Trotzdem wurden auch einzeln stehende Reihen wie im Verbund bemessen.



# Manche rechnen schön



		Zone			
		gelb	blau	rot	grau
$\gamma_q$ (Sicherheitsbeiwert)	[-]	1,5	1,5	1,5	1,5
$\gamma_g$ (Sicherheitsbeiwert)	[-]	0,9	0,9	0,9	0,9
Eigengewicht	[kg]	37,51	37,51	37,51	37,51
ca,dyn (Kraftbeiwert)	[-]	-0,28	-0,22	-0,18	-0,13
cw,dyn (Kraftbeiwert)	[-]	0,021	0,02	0,02	0,02
Modulanstellwinkel	[°]	15	15	15	15
qp (Böenstaudruck)	[kN/m <sup>2</sup> ]	0,58	0,58	0,58	0,58
Modulfläche	[m <sup>2</sup> ]	1,65	1,65	1,65	1,65
Reibbeiwert	[-]	0,51	0,51	0,51	0,51
seitens IFI errechneter Ballast	[kg]	66,9	46,8	33,8	17,5
Ballast seitens Hersteller (3)	[kg]	50,2	32,4	20,9	6,6
Unterschied Hersteller (3) zu IFI	[%]	-25,0	-30,7	-38,1	-62,3

Ballast gegen  
 „Verschieben“ basierend  
 auf den Angaben des  
 Montagesystemherstellers  
 (3) im Vergleich zu einer  
 Nachrechnung seitens  
 I.F.I.

## Manche rechnen schön

---

- ❑ Fazit: Ein namhafter Hersteller von Photovoltaik-Montagesystemen (3) nimmt Windschäden infolge von Verschieben und Abheben aufgrund von zu niedrigen Ballastangaben billigend in Kauf.
- ❑ Ich denke auch deswegen Absicht unterstellen zu können, da ich von diesem Hersteller in den letzten fünf Jahren knapp zehn Ballastberechnungen nachgeprüft habe und alle ergaben, dass der berechnete Ballast deutlich zu niedrig ausfiel.
- ❑ Der Anbieter (3) hat außerdem einen Haftungsausschluss, so dass der Installationsbetrieb haftet, auch wenn der Schaden an fehlerhaften Berechnungen des Auslegungstools des Herstellers liegt.

# Ballastauslegungen selbst überprüfen

---



- ❑ Das Rechenbeispiel im vorangegangenen Abschnitt verdeutlicht, dass sich die Ballastangaben mancher Montagesystemhersteller sehr einfach nachrechnen lassen.
- ❑ Bei der großen Mehrzahl der herstellerseitigen Ballastberechnungen fehlen jedoch ein oder mehrere Parameter, um die Ballastangaben nachvollziehen zu können.
- ❑ In solchen Fällen sollten Kunden darauf bestehen, dass diese nachgeliefert werden. Im Einzelnen kann eine Ballastberechnung anhand der folgenden Zehn-Punkte-Checkliste überprüft werden:

# Ballastauslegungen selbst überprüfen

---



- 1. Sind alle für eine Ballastberechnung benötigten Parameter in der Ballastauslegung des Herstellers von Photovoltaik-Montagesystemen angegeben?
- Unbedingt benötigt werden die Sicherheitsbeiwerte für Windlasten und ständige Lasten (Eigengewicht), das Eigengewicht der Module und der Unterkonstruktion, die Druckbeiwerte oder Kraftbeiwerte, der Modulanstellwinkel, der Anstellwinkel der Rückwand (sofern vorhanden), der Böenstaudruck (Spitzengeschwindigkeitsdruck  $q_p$ ), die Modul- und Rückwandfläche sowie der Haftreibungsbeiwert. Es können aber weitere Parameter relevant sein.

# Ballastauslegungen selbst überprüfen

---



- 2. Sind Formeln zur Ballastberechnung angegeben? Hinweis: Für Abheben und Verschieben sind separate Formeln anzugeben. Der Haftreibungsbeiwert wird nur für den Lastfall Verschieben benötigt. Auf geneigten Dächern spielt auch der Hangabtrieb eine Rolle, der sich erhöhend auf den Verschiebeballast auswirkt.
- 3. Sind die Sicherheitsbeiwerte für Windlasten und ständige Lasten normkonform gewählt? Nach DIN EN 1990/NA:2010-12 sollte die Sicherheit für Windlasten 1,5 betragen. Die Sicherheit für ständige Lasten wird in der Regel zu 0,9 gewählt.

# Ballastauslegungen selbst überprüfen

---



- 4. Woher stammen die gewählten Druck- oder Kraftbeiwerte? Bei sogenannten aerodynamischen Montagesystemen gehen diese auf Windkanaluntersuchungen nach dem Merkblatt der Windtechnologischen Gesellschaft (WtG) zurück. Falls kein entsprechendes Windgutachten vorliegt, sind Druckbeiwerte nach DIN EN 1991-1-4:2010-12 und DIN EN 1991-1-4/NA:2010-12 zu wählen.
- 5. Für welchen Systemverbund wurden die Druck- oder Kraftbeiwerte ermittelt? Für den Lastfall Abheben können nur kleine Lasteinflussflächen angesetzt werden, die selten mehr als 15 Module beinhalten. Bei dem Lastfall Verschieben kommt es auf den horizontalen Systemverbund an.

# Ballastauslegungen selbst überprüfen

- 6. Wurden die Untersuchungen und Auswertungen nach dem Merkblatt der Windtechnologischen Gesellschaft (WtG) durchgeführt? Dieser Punkt ist für Laien nicht ganz einfach zu prüfen. Man kann aber explizit darauf achten, ob die atmosphärische Grenzschicht und ein Gebäudemodell, typischerweise im Maßstab 1:40 bis 1:100, modelliert wurden.



# Ballastauslegungen selbst überprüfen

---



- 7. Windkanaluntersuchungen in Automobilwindkanälen ohne Turbulenz sind unzulässig. Genauso sind Windkanaluntersuchungen an originalgroßen Photovoltaikmodulen ungeeignet, da selbst in Windkanälen mit großen Querschnitten nur sehr kleine Felder ohne Gebäude untersucht werden können. Auch die Verwendung von Ergebnissen numerischer Strömungssimulationen (Englisch: CFD = Computational Fluid Dynamics) ist nach dem Merkblatt der WtG unzulässig.



# Ballastauslegungen selbst überprüfen

---



- 8. Wurde der Böenstaudruck  $q_p$  nach DIN EN 1991-1-4 korrekt ermittelt? Ein in der Praxis häufig anzutreffender Fall ist, dass die Geländekategorie III für städtische Bebauung angesetzt wird, obwohl normativ eine Anströmung über freie Felder mit wenigen Hindernissen entsprechend Geländekategorie II anzusetzen wäre. Der Ansatz einer zu günstigen Geländekategorie führt zu einer Unterschätzung der tatsächlichen Lasten von etwa zehn Prozent.
- Des Weiteren muss geprüft werden, ob die angesetzte Windzone und die angesetzte Dachhöhe (inklusive Attika) korrekt gewählt wurden. Auch Topographie kann eine Rolle spielen.

# Ballastauslegungen selbst überprüfen

---



- 9. Wurde ein sinnvoller Ansatz für den Haftreibungsbeiwert getroffen? Auf Bitumen-Dachbahnen ist häufig ein Wert von 0,5 realistisch. Auf Foliendächern sind aber in der Regel niedrigere Werte von 0,3 oder 0,4 anzutreffen. Lediglich bei speziellen Reibkombinationen sind Haftreibungsbeiwerte größer als 0,6 gerechtfertigt.
- 10. Bestehen nach der Überprüfung der Punkte 1 bis 9 weiterhin Zweifel an der Richtigkeit einer Ballastberechnung, sollte ein spezialisierter Windingenieur zu Rate gezogen werden.

# Ausblick

---



- Zur normativen Absicherung erfolgt derzeit eine Einarbeitung von Anforderungen an Windkanalversuche zur Bestimmung von Windlasten auf Photovoltaikanlagen (Dach, Freiland) in die Neufassung des Merkblatts der Windtechnologischen Gesellschaft (WtG).
- Hierdurch werden eine Reduktion der Diskrepanzen zwischen Ballastberechnungen verschiedener Hersteller und die Verringerung des „Gestaltungsspielraums“ bei selbigen angestrebt.



# I.F.I. Institut für Industrieraerodynamik GmbH

---

Ballastangaben nicht blind vertrauen

Dr. Thorsten Kray  
I.F.I. Institut für Industrieraerodynamik GmbH  
Welkenrather Straße 120  
52074 Aachen