



## Der neue Modultest startet

Themenschwerpunkt neue Technologien für die Energiewende

Themenschwerpunkt Ballastierung von Gewerbeanlagen

Speichervergleich – die nächsten Tests | Agro-Photovoltaik | pv magazine award



## Panorama

- 6 Elektroauto mit Solardach**  
pv magazine award: Drei junge Studenten bauen ein Elektroauto in der Garage, laden jetzt zu Testfahrten ein und wollen bald das große Rad drehen.
- 10 Einfach mal ausprobieren**  
pv magazine award: Senkrecht aufgeständerte bifaziale Module versöhnen Landnutzung mit Photovoltaik. Das eröffnet neue Flächen und kann sich sogar lohnen.
- 14 BYD und LG Chem (Niedrigvolt) im Test**  
Leser haben entschieden, welche zwei weiteren Batterien für den pv magazine Speichervergleich getestet werden. Die ersten Ergebnisse liegen vor.
- 18 Noch schnell die Welt retten**  
Technikphilosoph Bruno Gransche erklärt, dass wir vieles bedenken müssen, bevor wir alle Menschen zu Prosumenten machen.
- 24 Wie sinnvoll ist der Strom vom Acker?**  
Mit Agro-Photovoltaik lässt sich gleichzeitig Nahrung anbauen und Strom erzeugen. Bürokratie und Politik bauen aber Hürden auf.
- 30 Boden noch nicht erreicht**  
In der zweiten Ausschreibungsrunde des Jahres sanken die Zuschlagswerte so deutlich wie nie zuvor. Das hat auch mit den Ackerflächen zu tun.
- 34 Liebe Industrie, es geht besser**  
Anschlussdosen könnten verlässlicher und wartungsfreundlicher werden, was viel Geld sparen würde. Ein Diskussionsbeitrag über Ärgernisse und Chancen.

## Neue Technologien

- 38 Die vier Phasen der Energiewende**  
Die Vernetzung von Technologien und Anlagen rückt in den Blickpunkt.
- 44 Positiv überrascht**  
Inno Energy investiert in Start-ups und Innovationsprojekte. Dirk Bessau, Leiter des Berliner Büros, berichtet über seine Erfahrungen und erläutert die Förderbedingungen.
- 46 Investieren statt Strom bezahlen**  
Die StromDAO hat eine Energie-Blockchain für alle aufgesetzt. Mit ihr wird man Anteile an Solarkraftwerken kaufen und zur Eigenversorgung nutzen können.
- 52 Communities machen Energiewende**  
Hinter Community-Modellen steht zum Beispiel die IT von Lumenaza. Gründer Christian Chudoba erklärt, warum das Konzept die Energiewende voranbringt.
- 55 Solarstrom zu Wasserstoff**  
Photovoltaikanlagen mit Elektrolyseuren zu kombinieren kann schon heute ein funktionierendes Geschäftsmodell sein.
- 58 Sektorkopplung im Reallabor**  
Ein Forschungsverbund will das Zusammenspiel neuer Energietechnologien im großen Maßstab testen.
- 60 Gut kombiniert**  
Solarparks an Standorten von bestehenden Windparks zu installieren kann für Entwickler große Vorteile mit sich bringen.
- 62 Neue Hürden für Balkonmodule**  
Marcus Vietzke von PVplug erklärt, wie die Netzbetreiber im aktuellen Normungsprozess für Stecker-Solarmodule agieren.



- 64 Gleichstromnetze für Gebäude**  
Belgische Wissenschaftler könnten den Stromkrieg zwischen Gleich- und Wechselstrom neu entfachen – mit DC-Hausnetzen, die Kosten sparen.
- 67 Die Energiewelt wird smarter**  
Wir stellen innovative Unternehmen und Produkte vor.
- pv magazine test**
- 72 Der neue Modultest**  
pv magazine startet einen Modultest, der Kunden hilft, eine Vorauswahl zu treffen, und Herstellern, sich zu verbessern.
- 73 Der Test-Aufseher**  
Interview mit George Touloupas, Direktor für Technologie und Qualität bei CEA. Er kontrolliert die Tests und erläutert, was die Ergebnisse bedeuten.
- 77 Ein hochmodernes Modul**  
Eines der ersten Module, das den pv magazine test durchlaufen hat, ist das JW-D6oN-305 des Herstellers Jollywood.
- 78 Die Testmethoden im Überblick**  
So geht der der pv magazine test, erklärt anhand der ersten Ergebnisse.

## Ballastierung von Flachdachanlagen

- 84 Nicht blind vertrauen**  
Eine Checkliste des Windlastexperten Thorsten Kray macht es möglich, Herstellerangaben zur Ballastierung besser einzuschätzen.
- 88 Die Steifigkeit ist entscheidend**  
Peter Grass, Geschäftsführer von PMT, hat verschiedene Unternehmen den Ballast für die gleiche Dachanlage ausrechnen lassen. Das Ergebnis lässt staunen.
- 91 Antworten auf Teilnehmerfragen**  
Wie ballastiert man richtig? Was bringen Bautenschutzmatten? Diese und weitere Fragen stellten Teilnehmer eines pv magazine Webinars.
- 94 Produktneuheiten**  
Module, Wechselrichter, Speicher
- 95 Inserentenliste**
- 96 Impressum**

# Ballastangaben nicht blind vertrauen

**Flachdachmontage:** Ob eine Ballastauslegung korrekt ist, können Laien oft nur schwer erkennen. Der Windlastexperte Thorsten Kray hat eine Checkliste erstellt, mit der Bauherren und andere Projektbeteiligte die Ballastangaben von Herstellern besser einschätzen können.

Fotos: I.F.I. Institut für Industrieaerodynamik GmbH



Modell eines Gebäudes mit Flachdach, Attika und Photovoltaikfeld im Maßstab 1:100 im großen Grenzschichtwindkanal des I.F.I.

In meiner Arbeit geschehen immer wieder kuriose Dinge. Neulich flatterten einmal mehr Ballastauslegungen verschiedener Hersteller von Photovoltaik-Montagesystemen für ein und dasselbe Gebäude auf den Tisch. Ein Systemhersteller (1) hatte ein 13-Grad-Ost-West-System angeboten, ein weiterer Hersteller (2) die Zehn-Grad-Version seines Ost-West-Systems. Das Eigengewicht der Module und der Unterkonstruktion war in beiden Fällen jeweils nahezu identisch. Die jeweiligen Ballastberechnungen erfolgten für ein etwa zwölf Meter hohes und großflächiges Hallendach an der Nordseeküste. Der berechnete Gesamtballast von Hersteller (1) lag bei ungefähr 4.000 Kilogramm, der von Hersteller (2) bei rund 23.000 Kilogramm.

Wie ist dies möglich, wo doch beide Systeme in ihrer Systemgeometrie sehr ähnlich sind? Der Bauherr hinterfragte diese äußerst unterschiedlichen Ergebnisse nicht. Offensichtlich war er glücklich mit dem vermeintlich besseren Ergebnis von Hersteller (1). Im Rahmen meiner beruflichen Tätigkeit habe ich sowohl System (1) als auch System (2) auf ihre aerodynamischen Eigenschaften hin analysiert – in einem Grenzschichtwindkanal, der den Spezifikationen der Windtechnologischen Gesellschaft (WtG) entspricht. Das Ergebnis war wie erwartet: Beide Systeme sind aerodynamisch in etwa gleichwertig. Es liegt somit nahe, dass Systemhersteller (1) bewusste Ballastreduzierungen vorgenommen hatte, um sich einen Vorteil bei der Auftragsvergabe zu ergattern.

## Unterschiede bei Verschieben und Abheben

Grundsätzlich sind die meisten Photovoltaik-Montagesysteme für zwei potenzielle Versagensmechanismen aufgrund von Windwirkung anfällig. Im Fachjargon haben sich dafür die Begriffe „Abheben“ und „Verschieben“ eingebürgert. Um diesen Versagensmechanismen entgegenzuwirken, wird eine Ballastierung benötigt, die für die Fälle Abheben und Verschieben jeweils separat berechnet werden muss. Ein Solarfeld kann sich häufig nur als Ganzes verschieben, wenn seine Elemente miteinander verbunden sind (zum Beispiel bei über Schienen verbundenen Systemen). In einem solchen Fall ist aufgrund der horizontal wirkenden Kräfte auch eine Umverteilung von Ballast innerhalb eines Feldes möglich. Beim Lastfall Abheben kann Ballast allerdings häufig nur geringfügig oder auch gar nicht umverteilt werden, da die vertikal wirkenden Windkräfte

### Das Wichtigste in Kürze

Als Windlastexperte stößt Thorsten Kray häufig auf fehlerhafte Berechnungen für die Ballastierung von Flachdachmontagesystemen. In einigen Fällen ist er davon überzeugt, dass Absicht dahintersteckt.

Es gibt Möglichkeiten, wie Anwender die Glaubwürdigkeit der Ballastangaben von Herstellern relativ leicht prüfen können. Dafür stellt Kray einen Zehn-Punkte-Katalog auf.

Um die Herstellerangaben prüfen zu können, sind ein paar wichtige Kennwerte nötig, dazu zählen zum Beispiel Sicherheitsbeiwerte für Windlasten und ständige Lasten, Eigengewicht der Module und der Unterkonstruktion, die Druckbeiwerte oder Kraftbeiwerte, der Modulstellwinkel, der Anstellwinkel der Rückwand, der Böenstaudruck, die Modul- und Rückwandfläche sowie der Haftreibungsbeiwert.

| Ballast gegen Abheben                  |                      |       |       |       |       |
|--|----------------------|-------|-------|-------|-------|
| Parameter                              | Einheit              | 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  |
| Modulfäche                             | [m <sup>2</sup> ]    | 1,64  | 1,64  | 1,64  | 1,64  |
| Von Hersteller (3) berechneter Ballast | [kg]                 | 102,6 | 57,2  | 26,9  | 0     |
| Von I.F.I. berechneter Ballast         | [kg]                 | 110,8 | 74,9  | 48,3  | 17,1  |
| Unterschied Hersteller (3) zu I.F.I.   | [%]                  | -7,4  | -23,6 | -44,4 | -100  |

Tabelle 1: 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.)

eine Lastübertragung zu Nachbarmodulen aufgrund der meist nur geringen vertikalen Systemsteifigkeit in nur sehr begrenztem Maße ermöglichen.

Beim Lastfall Verschieben spielt zudem der Haftreibungsbeiwert eine wichtige Rolle. Je höher die Haftreibung, desto schwerer lässt sich ein Körper aufgrund einer horizontal auf ihn einwirkenden Kraft aus der Ruheposition heraus in Bewegung setzen. Der sogenannte Böenstaudruck ist wiederum keine Systemeigenschaft, sondern kommt aus der Windstatistik, die in die jeweils gültige Windlastnorm vereinfacht eingearbeitet ist. Er wird für konventionelle Bauten in der Regel derart berechnet, dass er gemäß den statistischen Daten einmal innerhalb von 50 Jahren auftritt.

## Manche rechnen schön

Über die Gleichungen zur Berechnung von Ballast herrscht in der Fachwelt Einigkeit. Es ist auch davon auszugehen, dass große Player dabei anerkannte Experten zurate ziehen. Daher liegt für mich der Schluss nahe, dass der folgende namhafte Hersteller von Photovoltaik-Montagesystemen (3) Ballastierungswerte bewusst schönrechnet und Windschäden infolge von Verschieben und Abheben von Photovoltaikanlagen billigend in Kauf nimmt. 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. Bei der im Folgenden beschriebenen Nachprüfung einer Ballastauslegung dieses Herstellers konnte der rechnerische Nachweis einer Ballastschönrechnung aus meiner Sicht erbracht werden – sowohl beim Lastfall Verschieben als auch beim Lastfall Abheben. Denn der Hersteller hat alle Variablen genannt, sodass eine Nachrechnung anhand der in der Fachwelt bekannten Ballastformeln nur zu einem einzigen Ergebnis für jeden der beiden Lastfälle führen kann.

| Ballast gegen Verschieben              |                      |       |       |       |       |
|--|----------------------|-------|-------|-------|-------|
| Parameter                              | Einheit              | 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  |
| Modulfäche                             | [m <sup>2</sup> ]    | 1,65  | 1,65  | 1,65  | 1,65  |
| Reibbeiwert                            | [-]                  | 0,51  | 0,51  | 0,51  | 0,51  |
| Von Hersteller (3) berechneter Ballast | [kg]                 | 50,2  | 32,4  | 20,9  | 6,6   |
| Von I.F.I. berechneter Ballast         | [kg]                 | 66,9  | 46,8  | 33,8  | 17,5  |
| Unterschied Hersteller (3) zu I.F.I.   | [%]                  | -25   | -30,7 | -38,1 | -62,3 |

Tabelle 2: Ballast gegen Verschieben basierend auf den Angaben des Montagesystemherstellers (3) im Vergleich zu einer Nachrechnung seitens I.F.I. (Zur Erklärung der Zonen siehe Tabelle 1.)

Der Anbieter (3) hat außerdem einen Haftungsausschluss, sodass der Installationsbetrieb haftet, auch wenn der Schaden an fehlerhaften Berechnungen des Auslegungstools des Herstellers liegt. Das dreiste Vorgehen dieses Herstellers wird im Folgenden chronologisch und mit Kommentaren versehen wiedergegeben:

Seitens des Montagesystemherstellers (3) wurde zunächst nur ein sogenannter Abhebenachweis geführt, bei dem der Ballast berechnet wird, der nötig ist, um ein Abheben der Photovoltaikanlage zu verhindern. 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. Ballast gegen ein Verschieben der Anlage wurde zunächst ignoriert und nicht ausgewiesen. Die Nachrechnung des Ballasts gegen Abheben seitens des I.F.I. ergab jedoch große Ungereimtheiten (siehe Tabelle 1). Die Unterschätzung beträgt zwischen sieben Prozent in der gelben Zone und 100 Prozent in der grauen Zone.

Da trotz der vorgenommenen Reduktion 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 eine nicht näher aufgeschlüsselte „Gruppenwirkung“. Hiermit waren mindestens mehrere zusammenhängende Reihen gemeint, wahrscheinlich sogar größere Felder. Trotzdem wurde die „Gruppenwirkung“ auch für einzeln stehende Reihen angesetzt.

Erneut ergab die Nachrechnung des Ballasts seitens I.F.I. große Ungereimtheiten (siehe Tabelle 2). Der Systemhersteller (3) unterschätzte den Verschiebeballast zwischen 25 Prozent in der gelben Zone und 62 Prozent in der grauen Zone.

## Ballastauslegungen selbst überprüfen

Das Rechenbeispiel im vorangegangenen Abschnitt verdeutlicht, dass sich die Ballastangaben mancher Montagesystemhersteller sehr einfach nachrechnen lassen. Das dafür nötige Mathematikwissen beschränkt sich auf die Grundrechenarten. 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:

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 qp), die Modul- und Rückwandfläche sowie der Haftreibungsbeiwert. Es können aber weitere Parameter relevant sein.
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 oder 1,0 gewählt. In Deutschland sind in der Praxis beide Varianten gängig. Im Ausland wird allerdings fast immer mit einem Wert von 0,9 gearbeitet.
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. Diese Druckbeiwerte sind jedoch so hoch, dass der errechnete Ballast fast immer die vorhandene Tragfähigkeit des Daches übersteigt.
5. Für welchen Systemverbund, im Fachjargon auch als „Lasteinflussfläche“ bezeichnet, 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 kann dagegen häufig die gesamte Photovoltaik-Feldgröße angesetzt werden, sofern horizontale Kräfte über einen Schienenverbund großflächig im Feld übertragen werden können. Systeme mit Click-Verbindungen weisen allerdings häufig nur sehr geringe Steifigkeiten aus, die sogar dazu führen können, dass Module keine Lasten mit ihren Nachbarmodulen teilen und damit quasi als alleinstehend betrachtet werden müssen.
6. Falls ein Windkanalversuch vorliegt: Wurden die Untersuchungen und Auswertungen nach dem Merkblatt der Wind-



Großaufnahme des modellierten Photovoltaikfeldes. Im Hintergrund ist die ebenfalls modellierte Attika zu sehen.

- technologischen Gesellschaft (WtG) durchgeführt? Dieser Punkt ist für Laien nicht ganz einfach zu prüfen. Man kann aber explizit darauf achten, ob die atmosphärische Grenzschicht im Windkanal modelliert wurde. Auch ein verkleinertes Gebäudemodell, typischerweise im Maßstab 1:40 bis 1:100, sollte Bestandteil der Windkanaluntersuchungen gewesen sein. Das Bild oben zeigt ein typisches Gebäudemodell mit Photovoltaikanlage im großen I.F.I.-Grenzschichtwindkanal. Im Bild ist das modellierte Photovoltaikfeld vergrößert dargestellt.
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.
  8. Wurde der Böenstaudruck  $q_p$ , der nach DIN EN 1991-1-4 auch als Spitzengeschwindigkeitsdruck bezeichnet wird, 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. Welches Wiederkehrintervall liegt dem berechneten Böenstaudruck  $q_p$  zugrunde? Photovoltaikanlagen werden häufig für Lebensdauern von ungefähr 25 Jahren errichtet.
  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. Idealerweise sollte der jeweilige Systemhersteller die Reibkombination seiner Unterkonstruktion samt Bautenschutzmatte und der Dachbahn unter Laborbedingungen im trockenen und nassen Zustand getestet haben.
  10. Bestehen nach der Überprüfung der Punkte 1 bis 9 weiterhin Zweifel an der Richtigkeit einer Ballastberechnung, sollte ein spezialisierter Windingenieur zurate gezogen werden.



### Der Autor

Thorsten Kray leitet seit dem Jahr 2010 die Abteilung für Aerodynamik und Photovoltaik-Windlasten des I.F.I. Institut für Industrieaerodynamik in Aachen. Er berät heute schwerpunktmäßig Hersteller von Photovoltaik-Montagesystemen hinsichtlich aerodynamischer Fragestellungen. Kontakt: [kray@ifi-aachen.de](mailto:kray@ifi-aachen.de)