
**Ermittlung von geometrischen Formbeiwerten für
Flachdächer mit aufgeständerten Photovoltaikanlagen
anhand eines physikalischen Analogiemodells**

Developing of snow coefficients for
flat roofs with elevated photovoltaics
using a physical analogy model

Vom Fachbereich Bau- und Umweltingenieurwissenschaften
der Technischen Universität Darmstadt

zur

Erlangung des akademischen Grades eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte

Dissertation

von

Dipl.-Ing. Natascha Grammou

aus Darmstadt

Darmstadt 2014

D 17

Referent: Prof. Dr.-Ing. J. Schneider
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. B. Lehmann

Einreichung: 29.09.2014
Prüfung: 17.12.2014

Berichte aus dem Bauwesen

Natascha Grammou

**Ermittlung von geometrischen
Formbeiwerten für Flachdächer mit
aufgeständerten Photovoltaikanlagen anhand
eines physikalischen Analogiemodells**

D 17 (Diss. TU Darmstadt)

Shaker Verlag
Aachen 2015

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Darmstadt, Techn. Univ., Diss., 2014

Copyright Shaker Verlag 2015

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

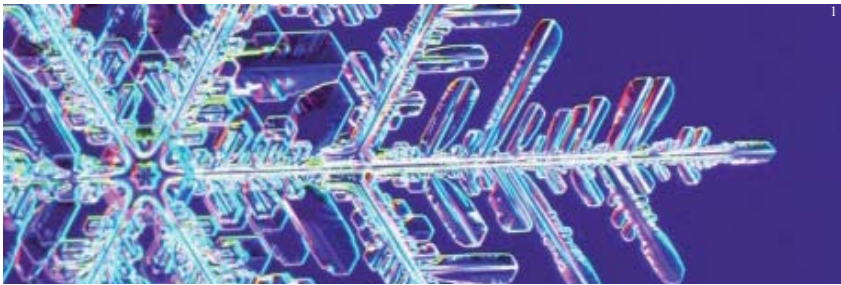
Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-3608-4
ISSN 0945-067X

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen
Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9
Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Τὸ δὲ σκολάζειν ἔχειν αὐτὸ δοκεῖ τὴν
ἡδονὴν καὶ τὴν εὐδαιμονίαν καὶ τὸ ζῆν
μακαρίως.

Aristoteles (384 – 322 v. Chr.)



Aus der Ferne gesehen hat Schnee eine rein, majestätische Schönheit. Aus der Nähe betrachtet offenbart sich jede einzelne Flocke als winziges geometrisches Juwel – ein unentbehrlicher Schlüssel zur Kompliziertheit und Schönheit der Muster der Natur.

Ian Stewart (2002)

aus „Das Rätsel der Schneeflocke“

¹ Quelle: LIBBRECHT (2014) (Bild zugeschnitten)

Kurzfassung



Mit der Entwicklung von aufgeständerten Photovoltaikanlagen auf Flachdächern entstand eine bisher nicht genormte Dachgeometrie, für die aufgrund bisher fehlender fundierter Beobachtungen und Untersuchungen keine Schlüsse auf geeignete Lastannahmen für statische Nachweise unter Schneebelastung aus Schneeverwehungen gezogen werden konnten. Da Flachdächer mit aufgeständerten Photovoltaikanlagen inzwischen häufig zur Anwendung kommen, wurde im Rahmen dieser Arbeit ein physikalisches Analogiemodell entwickelt, anhand dessen geometrische Formbeiwerte für windinduzierte Schneelastfälle ermittelt werden können. Zur Ermittlung eines geeigneten Versuchskonzepts, das quantitative Ergebnisse liefert, war vorab eine umfangreiche Parameterstudie zu den Schnee-Eigenschaften und die Betrachtung relevanter physikalischer Ähnlichkeitsgesetze erforderlich. Für den betrachteten Fall, nämlich Verwehungslastfälle von Schnee auf Dächern, zeichnete sich heraus, dass kleinskalige Versuche in einer Wasserrinne mit Sand als Schneemimitat das Naturgeschehen realitätsgetreu abbilden können. Um die Relevanz der Versuchsergebnisse in Bezug auf die weit verbreitete gemäßigte Schneeklimaregion Deutschlands bewerten zu können, wurden während der Forschungszeit zusätzlich In-Situ-Beobachtungen mittels Webcams ausgewertet. Darüber hinaus wurden zwölf Wetterstationen des Deutschen Wetterdiensts hinsichtlich bestehender Zusammenhänge zwischen Schnee und weiteren Klimadaten untersucht, sowie die Dauer der Schneefallereignisse analysiert.

Anhand der Untersuchungen im kleinskaligen Modell und der Naturbeobachtungen konnten neben dem verwehungsfreien Lastfall drei weitere Verwehungslastfälle als bemessungsrelevant eruiert werden, die im Rahmen von statischen Nachweisen berücksichtigt werden sollten. Darüber hinaus stellte sich für die untersuchten freistehenden Gebäude im Rahmen der Versuche heraus, dass sich entgegen gängiger Meinung auf Flachdächern mit aufgeständerten Photovoltaikanlagen in Summe nicht mehr Schnee auf dem Dach ansammeln kann als auf einer vergleichbaren Grundrissprojektion des Gebäudes auf dem Boden.

Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Versuchskonzept hat hinsichtlich des Ziels der Ermittlung geometrischer Formbeiwerte allgemeingültigen Charakter und kann folglich für beliebige Gebäudegeometrien, für die unzureichende Informationen zu windinduzierten Schneelasten existieren, Einsatz finden.

Abstract



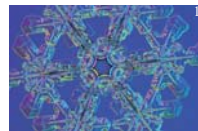
Developing of snow coefficients for flat roofs with elevated photovoltaics using a physical analogy model

Due to the fact that it becomes more and more common to elevate photovoltaics on flat roofs the geometry of the roof shape changes. This kind of new geometry is not yet covered by standards. Therefore, no fundamental specification exists how to design the structure of such buildings due to snow drifting. The lack of existing field observation required an experimental set-up that behaves close to reality. To get quantitative accuracy it was necessary to research the parameters of snow and to consider essential modelling procedures. An approach with water using sand as imitation for snow particles leads to realistic snowfall and snow drifting conditions. So, it was possible to determine coefficients for snow load patterns induced by wind. To evaluate the results of the scaled model in relation to the snow conditions in Germany field observations were carried out using webcams. Furthermore, data of 12 meteorological stations of the German Weather Service were analyzed. The 12 stations are located in regions within the largest snow zone of Germany, which has a moderate climate. The focus was placed on the climatic conditions during snowy days and the duration of snow fall was analyzed as well.

The experiments and the observation of nature showed that three load conditions due to snow drifting should be taken into account for the structural design of buildings with elevated photovoltaics. Furthermore, they revealed that the snow mass on such photovoltaic roofs does not exceed the mass on the ground for a free standing building.

The experimental set-up that was developed during this research has general character. Therefore it can be used to get information about snow loads due to snow drifting for further buildings with non-standardized roofs or for buildings with unknown their coefficients for snow loads induced by wind.

Résumé



Détermination par analogie des charges de neige pour les toitures-terrasses supportant des panneaux photovoltaïques inclinés

Avec le développement des panneaux photovoltaïques inclinés sur les toitures-terrasses est apparue une nouvelle forme de toits, non traitée dans les normes définissant les effets de la formation de congères de neige sur les constructions. En l'absence d'observations sur le terrain et de recherches plus approfondies, la charge de neige supportée par ces toitures de plus en plus répandues ne peut pas être définie. Un modèle analogique a été développé afin de calculer les coefficients de forme pour la charge de neige sur la toiture après redistribution par le vent.

Dans un premier temps, une étude paramétrique détaillée permettant de caractériser la neige a été réalisée, suivie d'une étude des lois de similitude. Ces données ont été nécessaires au développement d'un dispositif expérimental pouvant livrer des résultats quantitatifs. Des essais en laboratoire d'hydraulique à l'aide de sable (représentant la neige) ont permis de représenter fidèlement la formation de congères sur ce type de toits. Afin de permettre l'analyse de ces essais en prenant en compte les caractéristiques de la zone climatique de neige la plus répandue en Allemagne (climat tempéré), des observations in situ par webcams ont également été réalisées. Enfin, les données climatiques issues de 12 stations météorologiques allemandes ainsi que les statistiques sur la durée des épisodes neigeux ont été analysées.

La combinaison des essais en laboratoire et des observations in situ ont permis de déterminer 4 différents cas d'accumulation de neige (1 cas de répartition uniforme de la neige et 3 différents cas de formation de congères) devant impérativement être pris en compte lors du dimensionnement de ce type de toits. De plus, il s'est avéré que ce type de toits ne retient pas plus de neige qu'une surface équivalente au sol.

Le modèle analogique développé dans cette étude a un caractère général, et peut donc être utilisé pour d'autres géométries de bâtiments et ainsi permettre de caractériser les effets de la formation de congères de neige dans des cas non prévus dans les normes.

Περίληψη



Υπολογισμός συντελεστών χιονιού για επίπεδες στέγες με φωτοβολταϊκά υπό κλίση, χρησιμοποιώντας ένα φυσικό μοντέλο αναλογίας

Η εξέλιξη και διάδοση τοποθέτησης φωτοβολταϊκών υπό κλίση σε επίπεδες στέγες, έχει ως αποτέλεσμα την αλλαγή της γεωμετρίας του σχήματος των στεγών. Αυτό το είδος της καινούριας γεωμετρίας δεν καλύπτεται ακόμη από πρότυπα. Ως εκ τούτου, δεν υπάρχει θεμελιώδης προδιαγραφή για το πώς πρέπει να σχεδιάζεται η δομή των κτιρίων αυτών στην περίπτωση χιονοπτώσεων υπό επήρεια ανέμου. Η έλλειψη παρατήρησης και μελέτης αυτής της περίπτωσης στη φύση απαιτεί ένα πειραματικό set-up που να είναι πιστή αναπαράσταση των κλιματικών συνθηκών στη φύση. Για την ποσοτική ακρίβεια ήταν αναγκαία η έρευνα των παραμέτρων του χιονιού και η ουσιώδη εξέταση των διαδικασιών μοντελοποίησης. Η χρησιμοποίηση νερού και άμμου για την μίμηση των σωματιδίων χιονιού ως φυσικό μοντέλο αναλογίας, αποδείχθηκε ρεαλιστική αναπαράσταση χιονόπτωσης και διασκόρπισης χιονιού. Έτσι, ήταν δυνατόν να προσδιοριστούν και οι συντελεστές για το φορτίο του χιονιού που προκαλείται από τον άνεμο. Για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων του μοντέλου έγιναν κάποιες παρατηρήσεις σε σύγκριση με τις συνθήκες χιονιού στην Γερμανία, μέσω καμερών. Επιπλέον αναλύθηκαν τα δεδομένα από 12 μετεωρολογικούς σταθμούς της Γερμανικής μετεωρολογικής Υπηρεσίας. Οι 12 σταθμοί βρίσκονται σε περιοχές εντός της μεγαλύτερης ζώνης χιονιού στη Γερμανία, η οποία έχει ήπιο κλίμα. Η μελέτη επικεντρώθηκε τόσο στις κλιματικές συνθήκες κατά τις ημέρες με χιονόπτωση όσο και τις ημέρες ύπαρξης χιονιού στην επιφάνεια του εδάφους. Επίσης ταυτοχρόνως μελετήθηκε η χρονική διάρκεια των χιονοπτώσεων.

Τα πειράματα και η παρατήρηση της φύσης έδειξαν ότι τρεις προϋποθέσεις φορτίου λόγω χιονόπτωσης υπό επήρεια ανέμου θα πρέπει να ληφθούν υπόψη για το δομικό σχεδιασμό των κτιρίων με φωτοβολταϊκά υπό κλίση. Επιπλέον, αποκάλυψαν ότι η μάζα χιονιού σε αυτές τις φωτοβολταϊκές στέγες, ενός ανεξάρτητου κτιρίου, δεν υπερβαίνει τη μάζα του αντίστοιχου εδάφους.

Αυτό το πειραματικό, αντίστοιχο φυσικού μοντέλου, set-up που αναπτύχθηκε κατά τη διάρκεια αυτής της μελέτης έχει γενικό χαρακτήρα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να συλλεχθούν πληροφορίες σχετικά με τα φορτία χιονιού κατά τη διάρκεια χιονοπτώσεων για κτίρια με μη τυποποιημένες στέγες ή για κτίρια με άγνωστους συντελεστές φορτίων χιονιού που προκαλούνται από τον άνεμο.

Inhaltsverzeichnis



KURZFASSUNG	V
ABSTRACT	VII
RESUME	IX
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	XI
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	XVII
TABELLENVERZEICHNIS	XXIII
SYMBOLE UND ABKÜRZUNGEN	XXV
1 EINLEITUNG	1
1.1 MOTIVATION	2
1.2 GLIEDERUNG DER ARBEIT	3
2 STAND DER WISSENSCHAFT UND TECHNIK ZU SCHNEELASTANSÄTZEN	5
2.1 STAND DER TECHNIK	5
2.1.1 US-Amerikanische Norm	5
2.1.2 Kanadische Norm	7
2.1.3 Japanisches Regelwerk	9
2.1.4 Europäische Norm	10
2.2 STAND DER WISSENSCHAFT	12
2.3 ZUSAMMENFASSUNG	16
3 PHYSIKALISCHE EIGENSCHAFTEN DES SCHNEES	19
3.1 ENTSTEHUNG VON SCHNEE	19
3.2 FORM UND FALLGESCHWINDIGKEIT	20
3.3 METAMORPHOSE VON SCHNEE	22
3.4 SCHNEEDICHTE	24
3.5 ZUSAMMENFASSUNG	27
4 VERWEHUNGSMECHANISMEN UND BEEINFLUSSENDE FAKTOREN	29
4.1 VERWEHUNGSMECHANISMEN	29
4.2 WIND	36
4.2.1 Windgeschwindigkeit	36
4.2.2 Windrichtung	42
4.3 TEMPERATUR	42
4.4 REGEN	43
4.5 ZUSAMMENFASSUNG	44

¹ Schneesäulen in Nord-Chile, Höhe: ca. 1,5 m; (ZWEIFEL, 1999)

5	METEOROLOGISCHE DATEN	47
5.1	DATEN DES DEUTSCHEN WETTERDIENSTS UND IHRE AUSWERTUNG	48
5.2	NEUSCHNEE UND SCHNEEHÖHE	53
5.2.1	<i>Vorgehensweise</i>	53
5.2.2	<i>Neuschnee</i>	54
5.2.3	<i>Schneehöhe</i>	54
5.3	SCHNEE UND WEITERE KLIMADATEN	55
5.3.1	<i>Allgemeine Betrachtungen und Korrelationsanalyse</i>	55
5.3.2	<i>Schnee und Temperatur</i>	59
5.3.3	<i>Schnee und Windgeschwindigkeit</i>	59
5.4	SCHNEEKONZENTRATION	60
5.5	ZEITLICHE BETRACHTUNG VON SCHNEEFALLEREIGNISSEN	61
5.6	ZUSAMMENFASSUNG	63
6	EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN	67
6.1	GEWÄHLTER UNTERSUCHUNGSANSATZ	67
6.1.1	<i>Physikalische Ähnlichkeitsgesetze</i>	67
6.1.2	<i>Festlegung der Naturparameter</i>	71
6.1.3	<i>Physikalische Analogiemodelle - Windkanal vs. Wasserrinne</i>	73
6.1.4	<i>Partikelrecherche und Partikelwahl</i>	76
6.1.5	<i>Physikalische Ähnlichkeit – Wasserrinne vs. Natur</i>	81
6.2	KALIBRIERUNG DER WASSERRINNE	82
6.2.1	<i>Beschreibung der Wasserrinne</i>	82
6.2.2	<i>Messeinrichtung zur Erfassung der Strömungsverhältnisse</i>	83
6.2.3	<i>Wahl des geometrischen Maßstabs</i>	85
6.2.4	<i>Strömungsprofil</i>	89
6.3	VERSUCHSDURCHFÜHRUNG	96
6.3.1	<i>Allgemeines</i>	97
6.3.2	<i>Erfassung der Sandablagerungen</i>	99
6.4	VALIDIERUNG DES VERSUCHSAUFBAUS	103
6.5	ABLAGERUNGSVERHALTEN DES SANDS AUF PHOTOVOLTAIK-MODELLEN IN ABHÄNGIGKEIT DER GESCHWINDIGKEIT	105
6.5.1	<i>Versuchseinstellungen</i>	105
6.5.2	<i>Süd-Anströmung</i>	106
6.5.3	<i>Nord-Anströmung</i>	112
6.5.4	<i>Ost-Anströmung / West-Anströmung</i>	119
6.5.5	<i>Süd-Ost-Anströmung / Süd-West-Anströmung</i>	122
6.5.6	<i>Nord-Ost-Anströmung / Nord-West-Anströmung</i>	123
6.6	ZUSAMMENFASSUNG	124
7	AUSWERTUNG UND BEWERTUNG DER VERSUCHE	127
7.1	LASTBILDER DER EINZELNEN ABLAGERUNGSBILDER	127
7.2	IN-SITU BEOBACHTUNGEN	133
7.3	GEGENÜBERSTELLUNG DER IN-SITU-BEOBACHTUNGEN UND VERSUCHE	136
7.4	ZUSAMMENFASSUNG	137

8	LASTANSÄTZE	139
9	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	145
10	LITERATURVERZEICHNIS	149
	ANHANG	157
	ANHANG A: WIND-KARTEN DWD	157
	ANHANG B: PHOTOGRAMMETRISCHE AUFNAHMEN	160
	ANHANG C: TYPISCHES ABTAUVERHALTEN AUF FLACHDÄCHERN MIT AUFGESTÄNDERTEN PV-ANLAGEN	164
	<i>Industriegebäude – geschlossene PV-Konstruktion</i>	164
	<i>Kleinwerkstatt – hinterlüftete PV-Konstruktion</i>	165
	ANHANG D: SCHNEEAUFNAHMEN VON PV-ANLAGEN AUF FLACHDÄCHERN	167
	KURZVITA	171