

PV-Anlagen – Fehler erkennen und bewerten



PV-Anlagen – Fehler erkennen und bewerten

Die Inhalte dieses Werks wurden von Autor und Verlag nach bestem Wissen und Gewissen erarbeitet und zusammengestellt. Eine rechtliche Gewähr für die Richtigkeit der einzelnen Angaben kann jedoch nicht übernommen werden. Gleiches gilt auch für Websites, auf die verwiesen wird. Es wird betont, dass wir keinerlei Einfluss auf die Inhalte und Formulierungen der verlinkten Seiten haben und auch keine Verantwortung für sie übernehmen. Grundsätzlich gelten die Wortlaute der Gesetzestexte und Richtlinien sowie die einschlägige Rechtsprechung.

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.

ISBN: 978-3-8249-1501-9 (Print)

ISBN: 978-3-7406-0252-9 (E-Book)

Gesamtherstellung: TÜV Media GmbH

Das Werk und seine Teile sind urheberrechtlich geschützt. Jede Verwendung in anderen als den gesetzlich zugelassenen Fällen bedarf deshalb der vorherigen schriftlichen Einwilligung des Verlags.

® TÜV, TUEV und TUV sind eingetragene Marken. Eine Nutzung und Verwendung bedarf der vorherigen Zustimmung.

© by TÜV Media GmbH, TÜV Rheinland Group, Köln 2015

Vorwort	7
1 Grundlagen Photovoltaik	9
1.1 Elektrotechnik	10
1.1.1 Strom	10
1.1.2 Spannung	10
1.1.3 Leistung	10
1.1.4 Parallel- und Reihenschaltung	12
1.1.5 Checkliste	12
1.2 Statik	12
1.2.1 Wie wird aus einer Masse/einem Gewicht eine Kraft?	13
1.2.2 Wie wird aus einer Kraft eine Last?	13
1.2.3 Wie wird aus einer Kraft ein Moment?	14
1.2.4 Welche Lasten müssen berücksichtigt werden?	14
1.2.5 Umstellung auf Eurocode	15
1.2.6 Schneelasten	16
1.2.7 Windlasten	17
1.2.8 Was tut der Statiker?	19
1.2.9 Systemstatik und Gebäudestatik	22
1.2.10 Checkliste Statik	23
2 Montage	25
2.1 Unterkonstruktionen	26
2.1.1 Dachhaken	26
2.1.2 Stockschrauben	29
2.1.3 Trapezblechmontage	31
2.1.4 Freifeldfundamentierungen	32
2.1.5 Checkliste Befestigungen	35
2.1.6 Profilmontage	35
2.2 Potenzialausgleich	39
2.2.1 Normative Grundlagen	39
2.2.2 Beispiele aus der Praxis: so nicht!	40
2.2.3 So wird's gemacht	41
2.2.4 Elektrochemische Spannungsreihe	41
2.2.5 Blitzschutzpotenzialausgleich	42
2.2.6 Potenzialausgleich bei Freifeldanlagen	43
2.2.7 Checkliste Schutzpotenzialausgleich	44
2.3 Modulmontage	44
2.3.1 Montageanleitungen	44
2.3.2 Modulbefestigung: Klemmen	45
2.3.3 Erdung der Module	47
2.3.4 Checkliste Modulmontage	49
2.4 DC-Verkabelung	49
2.4.1 Allgemeine Anforderungen	49
2.4.2 Verlegung: Anforderungen, Normen und Richtlinien	50
2.4.3 Praxisbeispiele: kurz- und erdschluss sichere Verlegung	50
2.4.4 Praxisbeispiele: eis- und schneesichere Verlegung	51
2.4.5 Praxisbeispiele: mechanisch geschützte Verlegung	53
2.4.6 Praxisbeispiele: UV-geschützte Verlegung	54

2.4.7	Praxisbeispiele: Sonderfall Verlegung von Solarleitungen im Wasser	55
2.4.8	Zusammenfassung und Checkliste DC-Verkabelung	58
2.5	Generatorenanschlusskasten	59
2.5.1	Allgemeine Anforderungen	59
2.5.2	Sichere Installation im Freien	59
2.5.3	Sichere Leitungsklemmung, sichere Leitungseinführung	60
2.5.4	Sicheres Trennen und Abschalten	61
2.5.5	Schutz vor Kondenswasser, thermische Stabilität	62
2.5.6	Checkliste Generatoranschlusskästen	62
2.6	Wechselrichtermontage	63
2.6.1	Welche Wechselrichterarten gibt es?	63
2.6.2	Vorschriften und Anforderungen	63
2.6.3	DC-Trennvorrichtung	64
2.6.4	Temperaturmanagement	64
2.6.5	Eignung für den jeweiligen Aufstellort und IP-Schutzklassen	64
2.6.6	Netzmanagementfunktionen	66
2.6.7	Stabile Montage und Erreichbarkeit	66
2.6.8	Checkliste Wechselrichtermontage	69
2.7	Wechselrichteranschluss	69
2.7.1	Welche Vorschriften müssen beachtet werden?	69
2.7.2	Anschluss der Gleichspannungsseite	69
2.7.3	Anschluss der Wechselstromseite	71
2.7.4	Praxisbeispiel	71
2.7.5	Checkliste Wechselrichteranschluss	73
2.8	Wechselstromseite	73
2.8.1	Normative Vorgaben	73
2.8.2	Kabel und Klemmen, Dimensionierung und Besonderheiten, Sicherheit	73
2.8.3	Checkliste AC-Verkabelung	75
2.9	Fehlerstromschutzschalter	76
2.9.1	Normen, Richtlinien, Regeln	76
2.9.2	Einsatzzweck und Typen	76
2.9.3	Checkliste Fehlerstromschutzschalter	77
2.10	Überspannungsschutz	78
2.10.1	Normative Anforderungen	78
2.10.2	Überspannungsquellen und betroffene Netze	78
2.10.3	Risiken und Schadenspotenzial: zwei Fallbeispiele	79
2.10.4	Blitzschutz und Überspannungsschutz	81
2.10.5	Normative Grundlagen Blitzschutz	81
2.10.6	Entscheidungsmatrix	81
2.10.7	Schutzeinrichtungen im Schutzbereich	83
2.10.8	Schutzeinrichtungen im blitzgefährdeten Bereich	83
2.10.9	Beispiele aus der Praxis	83
2.10.10	Checklisten Überspannungsschutz/Blitzschutz	85
2.11	Brandschutz	86
2.11.1	Informationsquellen	86
2.11.2	Ein Fall von Falschinformation	86
2.11.3	Was muss die Feuerwehr im Brandfall wissen und beachten?	86
2.11.4	Der Feuerwehrscharter	87
2.11.5	Bausteine des Brandschutzkonzepts	87
2.11.6	Brandwände	88
2.11.7	Checkliste Brandschutz	89

3	Inbetriebnahme	91
3.1	Normative Grundlagen	92
3.2	Durchzuführende Messungen in der Praxis – AC-Seite	92
3.2.1	Erdungsmessung	92
3.2.2	Messung der niederohmigen Verbindung von Schutz- und Potenzialausgleichsleitern	93
3.2.3	Isolationswiderstandsmessung	93
3.2.4	Nachweis der Abschaltbedingung (Schleifenimpedanzmessung)	94
3.2.5	Funktionsprüfung von Fehlerstromschutzeinrichtungen	94
3.2.6	Polaritäts- und Phasenlagetest	94
3.3	Durchzuführende Messungen in der Praxis – DC-Seite	94
3.4	Sicherheitsregeln	96
3.5	Dokumentation	97
3.6	Checkliste Inbetriebnahme und Dokumentation	98
4	Wartung	99
4.1	Wartung ist sinnvoll und notwendig	100
4.2	Normative Vorgaben und Richtlinien	100
4.3	Fristen und Verantwortlichkeiten	101
4.4	Durchführung der Wartung	102
4.5	Wartung als spezialisierter Service/Wartungsvertrag	103
4.6	Ertragskontrolle	104
4.7	Weitere vorbeugende Prüfungen	106
4.8	Checkliste Wartung	107
5	Reinigung	109
5.1	Geltende Vorschriften	110
5.2	Warum Reinigung und wann?	110
5.3	Reinigungsmethoden	110
5.4	Was bringt eine Reinigung?	111
5.5	Zusammenfassung und Checkliste Reinigung	113
6.	Service und Werkzeuge	115
6.1	Ausstattung für Servicetechniker und Sachverständige	116
6.2	Isolationsmessungen im Feld	117
6.2.1	Definitionen und Grenzwerte	117
6.2.2	Beispiel Fehlerdetektion	119
6.2.3	Zusammenfassung	121
6.3	Kennlinienmessungen als Werkzeug zur Fehlererkennung	122
6.3.1	Grundlagen	122
6.3.2	Geeignete Messgeräte	123
6.3.3	Welche Kennlinienmessgeräte gibt es?	124
6.3.4	Durchführung der Messungen	124
6.3.5	Welche Informationen liefert eine Kennlinienmessung?	125
6.3.6	Das Kennliniendiagramm	126
6.3.7	Durchführung der Messungen – Praxisbeispiele	126
6.3.8	Bewertung der Ergebnisse	130
6.3.9	Messtoleranzen	131

6.3.10	Zusammenfassung	132
6.4	Thermografie als Werkzeug zur Fehlererkennung	132
6.4.1	Grundlagen	133
6.4.2	Welche Informationen liefert die Thermografie?	133
6.4.3	Geeignete Kameras	133
6.4.4	Was sehen wir im Thermobild?	134
6.4.5	Beispiele aus der Praxis	137
6.4.6	Zusammenfassung	143
6.5	Elektrolumineszenz als Werkzeug zur Fehlererkennung	143
6.5.1	Grundlagen	143
6.5.2	Welche Informationen liefert die Elektrolumineszenz?	144
6.5.3	Beispiele aus der Praxis	144
6.5.4	Zusammenfassung	148
7	Ausblick	149
<hr/>		
	Danksagung	150
	Über den Autor	151
	Bildquellenverzeichnis	152
	Begriffe und Abkürzungen	153
	Stichworte	155

Es gibt ein paar wirklich gute Bücher über Photovoltaik, von denen ich an dieser Stelle vier meiner Favoriten nennen möchte:

- Heinrich Häberlin: Photovoltaik (2007)
- Volker Quarschning: Regenerative Energiesysteme (2013)
- Konrad Mertens: Photovoltaik: Lehrbuch zu Grundlagen, Technologie und Praxis (2013)
- DGS-Ordner: Photovoltaische Anlagen (2013)

Diese Bücher kann ich nur empfehlen. Es sind ausgezeichnete Werke, die das Wissen über Photovoltaik zusammenfassen.

Warum schreibe ich dann noch ein Buch zu diesem Thema?

Mehrere Jahre Erfahrung beim Bau von kleineren Dachanlagen bis hin zu Multi-megawattparks und einige Erfahrungen als Sachverständiger sind in dieses Buch eingeflossen, und ich werde versuchen, mich möglichst nah an der Praxis zu halten: Wo liegen die Hauptschwierigkeiten bei den unterschiedlichen Anlagen, wie kann man sie vermeiden? Welche Lösungen gibt es? Denn die gute Planung einer Anlage kann helfen, viele dieser Detailschwierigkeiten zu vermeiden.

Am Anfang jedes Kapitels werde ich die relevanten Normen mit den jeweiligen Hauptanforderungen nennen und wie diese Normforderungen sinnvollerweise umzusetzen sind. Die Liste der hier genannten Normen umfasst aber nicht all

jene, die das Thema Photovoltaik betreffen, sondern ich nenne nur die Normen, die (für mich) relevant sind und besonders das Schutzziel der Normen beschreiben. Nahezu vollständige Zusammenfassungen der Normen zum Thema findet man beim VDE-Verlag, beispielsweise: Arno Bergmann: Photovoltaikanlagen: Normgerecht errichten, betreiben, herstellen, konstruieren; VDE-Schriftenreihe „Normen verständlich“ Band 138.

Am Ende eines jeden Unterkapitels wird eine kleine Checkliste zu finden sein, die besonders Sachverständigen, Servicetechnikern und Bauleitern die Möglichkeit bietet, sich daraus eine eigene Checkliste zu erstellen. Die Checklisten sollen die einzelnen kritischen Punkte der Begutachtung von Anlagen und Anlagenteilen noch einmal komprimiert zusammenfassen.

Nun wünsche ich Ihnen eine interessante Lektüre mit ein wenig Spaß an der einen oder anderen Stelle, an der Ihnen sicherlich eigene Anlagen, die Sie gebaut oder begutachtet haben, wieder in den Sinn kommen.

Danke für Ihr Interesse. Ich freue mich über Ihre Rückmeldungen und Ihre konstruktive Kritik.

Bonn, im März 2015
Volker Hense

- Leseprobe -

Grundlagen Photovoltaik

1

Elektrotechnik	1.1
Statik	1.2

1.1 Elektrotechnik

Zum Einstieg möchte ich zunächst noch einmal die relevanten elektrotechnischen Zusammenhänge in der Photovoltaik zusammenfassen.

Photovoltaik ist keine Raketenwissenschaft, deshalb gibt es auch eine durchaus übersichtliche Formelsammlung. Wichtig sind die Abhängigkeiten, z. B. von Modultemperatur und Einstrahlung, die uns die Kerngrößen Strom und Spannung liefern.

1.1.1 Strom

Der von Solarmodulen produzierte Strom ist abhängig von zwei Parametern:

- Der Strom ist linear abhängig von der Einstrahlung.
- Der Nenn-Strom ist abhängig von der Zellgröße.
 - Eine kristalline Zelle mit 5" (12,5 cm) Kantenlänge hat einen charakteristischen Strom I_{mpp} von 4,5 bis 5 A.
 - Eine kristalline Zelle mit 6" (15,6 cm) Kantenlänge hat einen charakteristischen Strom I_{mpp} von 7,5 bis 8,5 A.

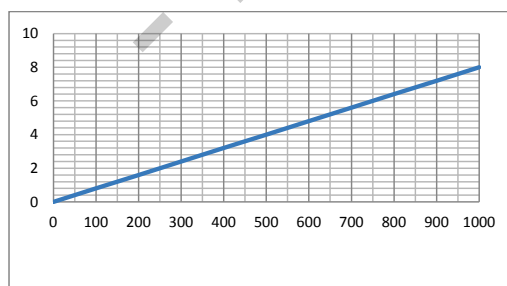


Abb. 1-01: Strom in Abhängigkeit von der Einstrahlung

1.1.2 Spannung

- Die Spannung einer Solarzelle hängt einerseits vom Zellmaterial ab. Eine kristalline Zelle hat eine charakteristische Leerlaufspannung V_{oc} zwischen 0,5 und 0,6 V, unabhängig von der

Größe. Diese Spannung liegt an, wenn die Zelle bestrahlt wird.

- Der Spannungsverlauf ist nicht linear, und schon bei einer Einstrahlung von rund $200 W/m^2$ kann die volle Leerlaufspannung gemessen werden.

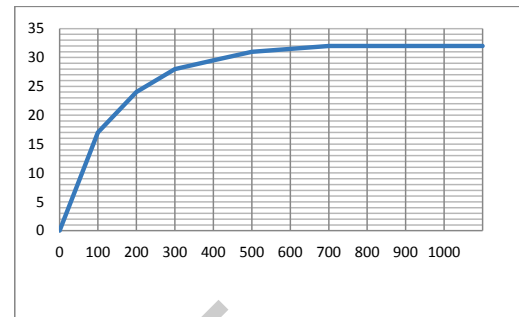


Abb. 1-02: Spannung in Abhängigkeit von der Einstrahlung

- Die Spannung ist andererseits temperaturabhängig. Je wärmer die Zelle oder das Modul ist, desto geringer ist die zu messende Spannung. Diese Abhängigkeit gibt uns der Hersteller der Module durch den Temperaturkoeffizienten an, entweder in $mA/^\circ C$ oder in $\%/^\circ C$, oder um es korrekt zu formulieren: mA/K oder $\%/K$ (Temperaturdifferenzen werden bei den Ingenieuren in Kelvin [K] angegeben). Diese Temperaturdifferenzen werden gegen die ST-Bedingungen (Standard Test Conditions $1.000 W/m^2$, $25^\circ C$ Modultemperatur und ein Lichtspektrum AM 1,5) gemessen. Ein Modul mit $45^\circ C$ hat also $20 K$ Temperaturdifferenz zu den $25^\circ C$ der Standard-Testbedingungen. Mit einem Temperaturkoeffizienten von beispielsweise $-0,4 \%/K$ würde die zu erwartende Spannung U_{oc} (Datenblatt) also bei -8% liegen.

1.1.3 Leistung

- Leistung ist immer Spannung multipliziert mit dem Strom ($P = U \cdot I$) (2. Ohmsches Gesetz).

Aus all dem folgt, dass wir jedes Mal, wenn wir in einem PV-Umfeld Strom oder Spannung messen, Einstrahlung und Mo-

dultemperatur mitmessen sollten, um die Werte überhaupt einordnen zu können. Wie lässt sich das bewerkstelligen? Die Temperatur kann man mit vielen kleinen Hilfsmitteln messen, z. B. Anlagethermometer, Infrarotthermometer, Temperaturfühler. Für die Einstrahlung gibt es Sensoren, sogenannte Lichtmesser. Man muss jedoch darauf achten, dass sie W/m^2 -Werte anzeigen können. Viele Geräte dienen z. B. der Lichtmessung an Arbeitsplätzen oder der Lichtplanung; sie sind meistens ungeeignet für Außenanwendungen. Alternativ dazu kann man natürlich mit Einstrahlungssensoren messen, die mit einigen Messgeräten für die Photovoltaik geliefert werden, zum Beispiel bei Installationstestern oder Kennlinienmessgeräten. Bei den gemessenen Werten Temperatur und Einstrahlung geht es nicht um Genauigkeit, sondern um die Frage, ob die Werte für Strom und Spannung überhaupt plausibel sind.

Für die Leistungsbeschreibung in der Photovoltaik gibt es für jeden Stromwert einen dazugehörigen Spannungswert, abhängig vom Widerstand an dem Arbeitspunkt.

Daraus ergibt sich die typische Kennlinie einer Solarzelle/eines Moduls/eines Strings, siehe Abbildung 1-03.

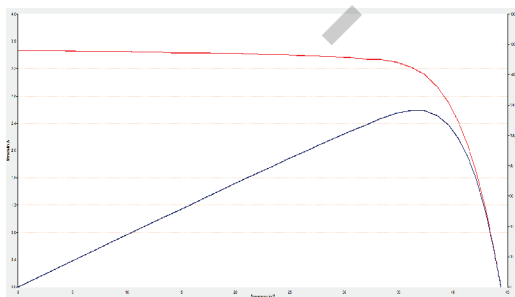


Abb. 1-03: Typische Kennlinie einer Solarzelle

Diese Kennlinienform wird in einigen der folgenden Kapitel wiederzufinden sein. Die Form entsteht, wenn Module/Zellen beleuchtet werden. Im Kurzschluss sind die Klemmen Plus und Minus leitend verbunden, der Widerstand ist also 0, der charakteristische Wert auf der Kurve ist der Kurzschlussstrom I_{sc} . Bei Veränderung

des Widerstands in Richtung unendlich wird die Leerlaufspannung erreicht (die Klemmen sind also offen), charakteristische Größe ist die Leerlaufspannung V_{oc} . Damit sind die beiden Grenzpunkte der für die Photovoltaik üblichen Kennlinie gesetzt.

Diese Kennlinie ist sowohl für Zellen und Module als auch für Modulstrings der Grundform sehr ähnlich.

Die blaue Linie stellt die Leistung des Moduls dar, also Spannung multipliziert mit Strom. Der Punkt maximaler Leistung (MPP = Maximum Power Point) ist der Punkt, an dem das Produkt aus Spannung mal Strom am größten ist.

Vielfach verwendet wird auch der Begriff Füllfaktor. Per Formel wird der Füllfaktor definiert als:

$$P_{mpp}/(I_{sc} * V_{oc})$$

Übertragen wir die Formel in das Kennliniendiagramm, erhalten wir das Flächenverhältnis zweier Rechtecke: zum einen des Rechtecks unterhalb der Kurve, das durch den Punkt maximaler Leistung beschrieben wird (grün), und zum zweiten des Rechtecks, das durch I_{sc} und V_{oc} aufgespannt wird (blau), siehe Abbildung 1-04.

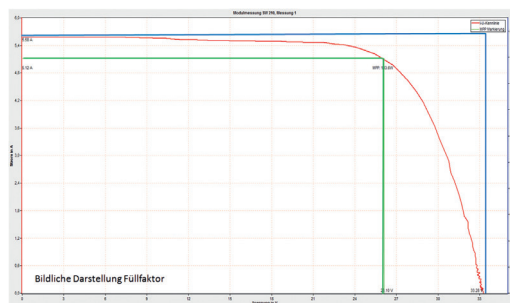


Abb. 1-04: Bildliche Darstellung Füllfaktor

Zu den Bezeichnungen, die in diesem Buch verwendet werden:

Ich werde im Zuge der Internationalisierung (auch in unseren Normen werden die Bauteile mittlerweile nur noch in Englisch bezeichnet, ein Überspannungsableiter heißt jetzt Surge Protective Device

– SPD, ein FI-Schutzschalter heißt jetzt Residual Current Device – RCD ... dazu später mehr) die internationalen Bezeichnungen für Kurzschlussstrom und Leerlaufspannung verwenden, also V_{oc} und I_{sc} (Open Circuit Voltage, Short Circuit Current).

1.1.4 Parallel- und Reihenschaltung

Zur Wiederholung:

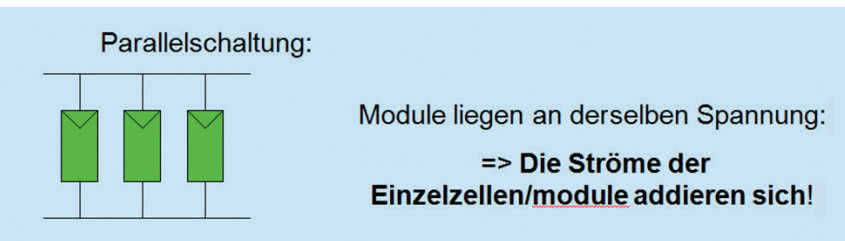


Abb. 1-05: Parallelschaltung

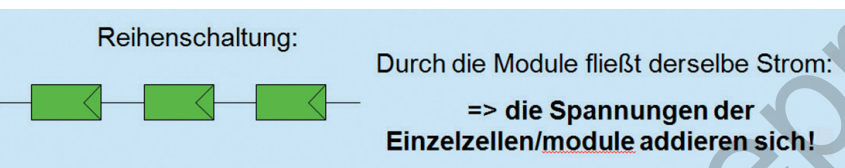


Abb. 1-06: Reihenschaltung

In einem Modul sind alle Zellen in Reihe (seriell) geschaltet. Das bedeutet bei einem String mit 20 Modulen in Reihe, beispielsweise einem Sechzigzeller mit 250 Wp, dass 1.200 Zellen in Reihe geschaltet sind. Wenn eine Zelle in dieser Reihenschaltung teilweise verschattet wird, abgebrochen oder beeinträchtigt ist, ohne dass die Bypassdiode schaltet, verringert sich die Fläche der Zelle. Da der Strom eine Funktion der Zellengröße ist, ergibt sich eine „verstopfte Stelle“ wie in einem Gartenschlauch. (Es sei diese Analogie zur Hydraulik erlaubt. Gleichstrom lässt sich wirklich gut mit Wasser in einer Rohrleitung vergleichen.)

Diese Zusammenhänge zwischen Strom, Spannung, Einstrahlung und Temperatur sollten immer präsent sein, um Messwerte interpretieren zu können und auftretende Phänomene zu erklären.

1.1.5 Checkliste

- ☐ Die Größe einer Solarzelle bestimmt den Nennstrom unter STC.
- ☐ Der Strom ist linear abhängig von der Einstrahlungsstärke.
- ☐ Die Spannung einer Solarzelle ist technologieabhängig (z. B. ca. 0,55 V pro Zelle bei kristallinen Solarzellen).
- ☐ Die Spannung ist nicht linear abhängig von der Einstrahlung.
- ☐ Die Spannung ist abhängig von der Zell- bzw. Modultemperatur.
- ☐ Die Leistung ist das Produkt aus Spannung und Strom.
- ☐ Die Leistung ist bis zum Punkt maximaler Leistung nahezu linear abhängig von der Einstrahlung.
- ☐ Messe ich einen Spannungswert in der Photovoltaik, sollte ich immer die Temperatur des gemessenen Moduls/Strings mit aufnehmen.
- ☐ Messe ich einen Stromwert, sollte dieser mit der aktuellen Einstrahlung auf Modulebene in Beziehung gesetzt werden.

1.2 Statik

Endlose Zahlenkolonnen, kryptische Zeichnungen, seltsame Formelzeichen, so sieht für viele von uns eine statische Berechnung aus. Mit viel Glück finden sich dann doch ab und zu Werte, die man wenigstens schon mal gehört hat, wie Schneelasten und Windlasten. Doch spätestens beim Biege- oder Widerstandsmoment hört es für die meisten auf.

Statische Berechnungen gehören nicht zum Aufgabenbereich eines Sachverständigen oder Servicetechnikers. Allerdings sollten so viele Grundkenntnisse vorhan-

den sein, dass man grob beurteilen kann, ob eine Unterkonstruktion geeignet ist oder nicht. Im Zweifelsfall sollte immer ein Statiker hinzugezogen werden, wenn der Eindruck entsteht, dass eine Unterkonstruktion nicht ausreichend stabil sein könnte.

Um dem Thema Statik etwas näher zu kommen, versuche ich einige Grundlagen zu erklären.

Dazu werden wir uns die Berechnungsschritte von der Ermittlung des Gewichts einer Konstruktion, einer angreifenden Kraft und einer Last bis zu den daraus resultierenden mechanischen Spannungen und Momenten anschauen müssen.

1.2.1 Wie wird aus einer Masse/ einem Gewicht eine Kraft?

Abbildung 1-07 zeigt ein Gewicht mit einer Masse von ca. 1 kg. Die Bezeichnung für die Masse ist m . Die Masse dieses Gewichts wird dann eine Kraft, wenn es nicht im luftleeren Raum schwebt, sondern auf etwas wirkt.



Abb. 1-07: Gewicht mit einer Masse von 1 kg

Also stellen wir das Gewicht hier bei uns auf der Erde auf eine Fläche.

Das Gewicht wird dann durch die umgangssprachlich als Erdanziehungskraft bezeichnete Beschleunigung g Richtung Erdmittelpunkt beschleunigt. Dadurch entsteht die zum Erdmittelpunkt gerichtete Kraft F (englisch: Force) mit:

$$F = m \cdot g$$

(Kraft ist also gleich Masse multipliziert mit Beschleunigung.)

Mit der Erdbeschleunigung $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ ergibt sich daraus die Erdanziehungskraft:

$$F = 1 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 = 9,81 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2$$

Die SI-Maßeinheit für die Kraft, also das Produkt $\text{kg} \cdot \text{m/s}^2$, ist das Newton (**N**, benannt nach Sir Isaac Newton, der im 17. Jahrhundert die Grundlagen der Mechanik entwickelte).

Also beträgt die Gewichtskraft einer Masse von 1 kg bei uns auf der Erde 9,81 N.



Abb. 1-08: Kraft F

Ganz grob kann man sagen: 1 kg entspricht 10 N, 100 kg entsprechen 1 kN.

(Übrigens werden laut meinem Professor für Mechanik Kräfte immer rot gezeichnet, daher ist der Pfeil zur Darstellung der Kraft in den Abbildungen rot.)

1.2.2 Wie wird aus einer Kraft eine Last?

Wirkt eine Kraft auf eine Fläche, in diesem Beispiel die Standfläche des Gewichts (hier grün dargestellt), ergibt sich daraus eine Kraft pro Flächeneinheit, also N/m^2 . Sie wird als Druck bezeichnet und in der SI-Einheit Pascal (Pa) angegeben:

$$1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$$

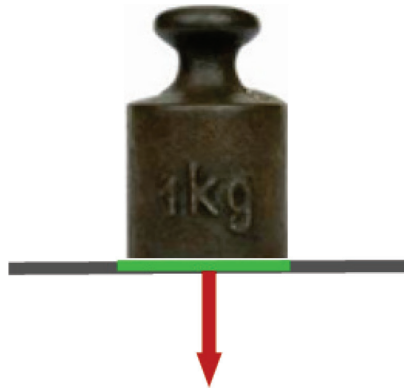


Abb. 1-09: Kraft pro Flächeneinheit

Daneben gibt es auch noch die Einheit bar: **1 bar = 100.000 Pa**

In der Photovoltaik finden wir diese Einheit zum Beispiel in der Modultestnorm IEC 61215, in der es um die zulässige Belastung der Module geht.

Dazu gibt es einen Lasttest mit 2.400 Pa, das entspricht 2,4 kN/m² oder ungefähr 240 kg/m². Der erweiterte Lasttest mit 5.400 Pa, der in der Norm beschrieben wird, erfordert also einen Druck von 5,4 kN/m² oder ungefähr 540 kg/m².

1.2.3 Wie wird aus einer Kraft ein Moment?

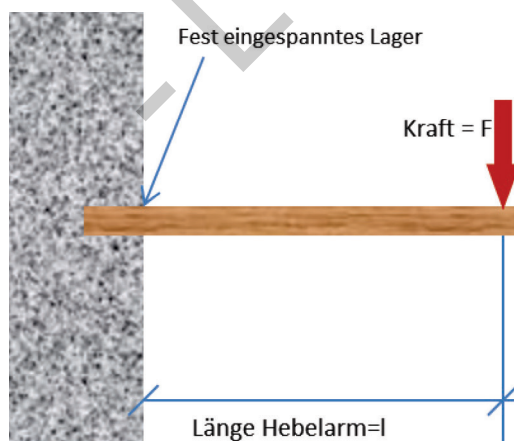


Abb. 1-10: Hebelarm mit Länge „l“

Die Abbildung 1-10 zeigt ein Beispiel für ein Moment M , das durch eine Kraft F über den Hebelarm L verursacht wird. Die Kraft wirkt auf einen Stab, der fest in einer Wand verankert oder, wie es in der Statik

heißt, fest eingespannt ist. Diese Lagerart kann Lagerkräfte in allen Richtungen und Einspannmomente aufnehmen.

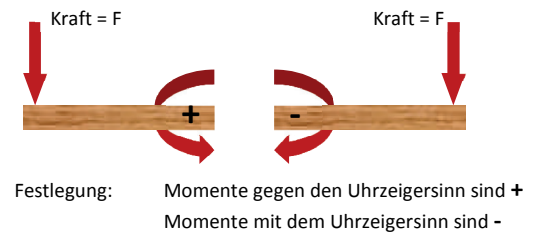


Abb. 1-11: Festlegung Vorzeichen Drehmomente

Als kleines Beispiel: Modulhersteller fordern die Befestigung der Modulklemmschrauben mit einem vorgegebenen Drehmoment von 20 Nm, das bedeutet, dass ein Gewicht von 2 kg an einem Hebelarm von 1 m Länge hängt.

1.2.4 Welche Lasten müssen berücksichtigt werden?

Bauwerke sind verschiedenen Belastungen (= Lasten) ausgesetzt.

In der Musterbauordnung (MBO), aus der alle Landesbauordnungen (LBO) abgeleitet werden, finden sich zwei entscheidende Paragraphen:

MBO § 3: „Bauliche Anlagen sind so anzuordnen, zu errichten, zu ändern und instand zu halten, dass die öffentliche Sicherheit und Ordnung, insbesondere Leben, Gesundheit und die natürlichen Lebensgrundlagen, nicht gefährdet werden.“

MBO § 12: „Jede bauliche Anlage muss im Ganzen und in ihren einzelnen Teilen für sich allein standsicher sein.“

Für PV-Anlagen entscheidend ist also die Standsicherheit. Das bedeutet, dass eine Konstruktion alle angreifenden Kräfte aufnehmen muss, ohne dass es zu einer Beschädigung kommt, die zu einer Gefährdung für Menschen, Tiere oder Sachwerte führen kann.

Welche Kräfte wirken auf eine PV-Konstruktion, welche Lasten sind anzunehmen?

- Die Dachkonstruktion des Gebäudes muss das zusätzliche Gewicht der PV-Anlage aufnehmen und sicher ableiten können.
- Auf das Dach wirken zusätzlich auch noch Windkräfte und Schneelasten ein.
- Bei Industriegebäuden sind weitere Lasten zu berücksichtigen, z. B. dynamische Lasten durch im Inneren befindliche Kräne, die Anfahr- und Bremskräfte erzeugen, die in die Konstruktionen eingeleitet werden.
- Bei Brücken sind Verkehrslasten zu berücksichtigen.
- Erdbeben und Fahrzeuganprall stellen weitere Lastfälle dar.

Lasten werden in verschiedene Gruppen unterteilt:

- nach Dauer**
 - ständige Lasten (Eigengewicht der Bauteile)
 - nicht ständige Lasten (Schnee, Wind, dynamische Kräfte ...)
- nach Richtung**
 - vertikale Lasten
 - horizontale Lasten in Gebäudequer- und -längsrichtung
- nach Verteilung**
 - Punktlasten (Ein Dachhaken leitet Lasten an einem Punkt ein.)
 - Streckenlasten (oder Linienlasten: Eine auf das Dach aufgelegte Schiene überträgt die Lasten linienförmig.)
 - Flächenlasten (Ein zugeschnittes Dach trägt eine Flächenlast.)

Flächen- und Streckenlasten bezeichnet man mit Kleinbuchstaben:

- ständige Lasten mit g
 - Verkehrslasten mit p
 - Summe $g + p$ mit q
 - Schneelast mit s
 - Windlast mit w
- Bei der Windlast können unterschieden werden:
- Winddruck mit W_D
 - Windsog mit W_S

1.2.5 Umstellung auf Eurocode

Die anzunehmenden Lasten finden sich in entsprechenden Normwerken. Die Normgrenzwerte werden regelmäßig überprüft, um festzustellen, ob die Grenzwerte noch geeignet sind.

Die alte Norm DIN 1055 „Lastannahmen am Hochbau“ musste 2007 umgestellt werden, nachdem klar geworden war, dass die in ihr formulierten Annahmen nicht mehr den Tatsachen entsprachen und Grenzwerte mehrfach deutlich überschritten wurden. Generell gingen die normgebenden Gremien davon aus, dass mit den gesetzten Grenzwerten eine Sicherheit von 50 Jahren bestand, dass also einmal in 50 Jahren die Grenzwerte überschritten werden durften.

Besonders der durch große Schneemassen verursachte Einsturz der Eissporthalle in Bad Reichenhall im Jahr 2006 hat aber gezeigt, dass die Normannahmen nicht mehr zeitgemäß waren.

Die Normänderung von 2007 führte dann zu dem Ergebnis, dass im Süden Deutschlands deutlich höhere Schneelasten anzunehmen waren, im Norden Deutschlands deutlich höhere Windlasten. In anderen

In Systemskizzen werden Lasten durch folgende Symbole dargestellt:



Gebieten, zum Beispiel im Rheinland, wurden die Werte der anzunehmenden Lasten dagegen sogar etwas gesenkt.

DIN 1055

In der neuen DIN 1055 von 2007 wurden neue Wind- (DIN1055-4) und Schneelastzonenkarten (DIN1055-5) eingeführt. Aus der deutschen DIN 1055 wurde dann im Zuge der europäischen Harmonisierung der Normen die EN 1991 bzw. der Eurocode 1: „Einwirkungen auf Tragwerke“.

Ab dem 1. Januar 2014 war es dann für alle Bundesländer so weit: Seitdem gelten im Bauwesen die Eurocodes (ECs) für die Bemessung und Ausführung.

Trotz offizieller Einführung der europäischen Regelwerke zum 1. Juli 2012 gab es zuvor innerhalb Deutschlands Übergangsfristen, die über die Ingenieurkammern der Länder geregelt wurden. Für sieben Bundesländer endeten diese Fristen mit dem 31. Dezember 2013.

1.2.6 Schneelasten



Abb. 1-12: Schneelastzonenkarte nach EN1991

Die anzunehmenden Schneelasten hängen von der geografischen Lage und der Höhe der Installation über NN (Normalnull) ab.

1	Geländehöhe des Bauwerkstandorts über NN m	Schneelastzone			
		I Neu: 1 u. 1a	II Neu: 2	III Neu: 2a	IV Neu: 3
2	≤ 200	0,75	0,75	0,75	1,00
	300	0,75	0,75	0,75	1,15
	400	0,75	0,75	1,00	1,55
3	500	0,75	0,90	1,25	2,10
	600	0,85	1,15	1,60	2,60
	700	1,05	1,50	2,00	3,25
4	800	1,25	1,85	2,55	3,90
	900		2,30	3,10	4,65
	1000			3,80	5,50
5	> 1000	Wird im Einzelfall durch die zuständige Baubehörde im Einvernehmen mit dem Zentralamt des Deutschen Wetterdienstes in Offenbach festgelegt.			

Tab. 1-01: Schneelastzonentabelle nach EN1991, Angaben in kN/m²

Das ist schon bei der Auswahl der Module wichtig. Viele haben mittlerweile die Bauartzulassung nach IEC 61215 mit dem erweiterten Lasttest mit 5,4 kN/m². Die Module, die diese Bauartzulassung nicht haben, sind getestet und zugelassen bis 2,4 kN/m². Sie sind dementsprechend nicht einsetzbar in der Schneelastzone 2a an Standorten mit einer Höhe von mehr als 800 m über NN bzw. in Schneelastzone 3 an Standorten mit einer Höhe von mehr als 600 m über NN.

Bedenkt man jetzt noch, dass neben den Schneelasten auch der Winddruck mit berücksichtigt werden muss, wird klar, dass die Auswahl der Module besonders in den höheren Schneelastzonen sorgfältig erfolgen muss.

Weitere Abhängigkeiten zur Bestimmung der Schneelast

Die in der Schneelasttabelle angegebenen Werte beziehen sich auf eine waagrecht projizierte Fläche. Ist das Dach geneigt, kann der Schnee abgleiten und die Last wirkt nicht senkrecht auf die Dachfläche ein. Auch dieser Umstand ist in der Norm berücksichtigt. Die Dachneigung geht als Korrekturfaktor in die Berechnung ein. Dieser Minderungsfaktor wird als k_s bezeichnet und kann ab 30° Dachneigung angesetzt werden. Es gilt: anzunehmende Schneelast $s = s_0 \cdot k_s$ (s. Tab. 1-02)

α	$\leq 30^\circ$	35°	40°	45°	50°	55°	60°	65°	$\geq 70^\circ$
ks	1,00	0,87	0,75	0,62	0,50	0,37	0,25	0,12	0

Tab. 1-02: Schneelasttabelle

Doch ACHTUNG: Angeschleppte Gauben, Schleppdächer mit geringerem Dachwinkel oder Schneefangeinrichtungen können dazu führen, dass sich Schnee anhäuft und daher eine andere Lastannahme gewählt werden muss. Der Minderungskfaktor ks kann dann nicht mehr angesetzt werden.

Außerdem ist für die entstehende Schneelast auch nicht unbedingt die Schneehöhe ausschlaggebend, sondern der Zustand und der Wassergehalt des Schnees: Trockener Schnee hat beispielsweise bei einer Höhe von 10 cm ein Gewicht von ca. 10 kg/m², nasser Schnee kann auch 40 kg/m² wiegen, und eine 10 cm dicke Eisschicht wiegt bis zu 90 kg/m². Steht eine 10 cm hohe Wasserschicht auf einem Flachdach, weil die Dachabläufe verstopft sind, entsteht eine Last von 100 kg/m².

1.2.7 Windlasten

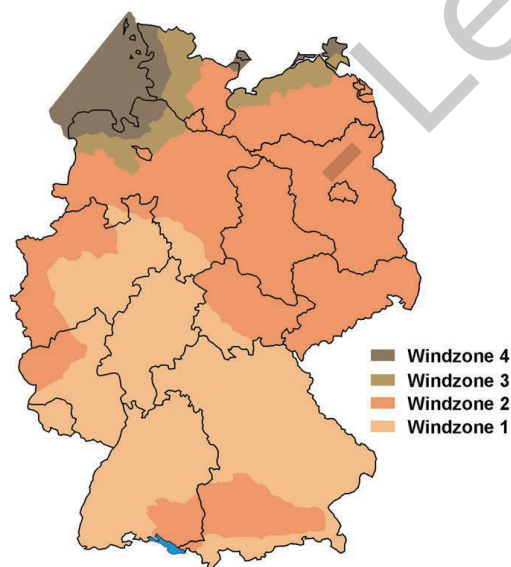


Abb. 1-13: Windlastzonenkarte nach EN 1991

Windzone	$v_{b,0}$ in m/s	$q_{b,0}$ in kN/m ²
1	22,5	0,32
2	25,0	0,39
3	27,5	0,47
4	30,0	0,56

Mittelwerte in 10 m Höhe im ebenen, offenen Gelände für einen Zeitraum von 10 Minuten bei einer jährlichen Überschreitungswahrscheinlichkeit von 0,02.

Tab. 1-03: Windlastzonentabelle nach EN 1991, Angaben in kN/m²

Die Angaben in der Windlastzonentabelle sind nicht so aufregend. Die q_b -Werte sind Mittelwerte in 10 m Höhe; diese Größe wird Basisgeschwindigkeitsdruck genannt. Zur Berechnung eines Bauwerks benötigen wir allerdings die Kräfte, die Windböen verursachen. Diese Größe wird als q_p (Spitzengeschwindigkeitsdruck) bezeichnet. Diese Böengeschwindigkeit ist abhängig vom Gelände: In freien Lagen ohne Bewuchs oder Bebauung kann sich die Windgeschwindigkeit aufbauen, während Bäume, Häuser und Geländesenken oder -erhebungen den Wind bremsen und verwirbeln und die Böengeschwindigkeit verringern.

Entsprechende Geländekategorien sind in der EN 1991 (Eurocode 1) festgelegt:

- Geländekategorie I: Offene See, Seen mit mindestens 5 km freier Fläche in Windrichtung, ebenes, flaches Land ohne Hindernisse
- Geländekategorie II: Gelände mit Hecken, einzelnen Gehöften, Häusern oder Bäumen, z. B. landwirtschaftliche Gebiete
- Geländekategorie III: Vorstädte, Industrie- oder Gewerbegebiete, Wälder
- Geländekategorie IV: Stadtgebiete, bei denen mindestens 15 % der Fläche mit Gebäuden bebaut sind, deren mittlere Höhe 15 m überschreitet