

Torsten Werth

# Netzberechnung mit Erzeugungsprofilen

Grundlagen, Berechnung, Anwendung

---

# Netzberechnung mit Erzeugungsprofilen

---

Torsten Werth

# Netzberechnung mit Erzeugungsprofilen

Grundlagen, Berechnung, Anwendung

 Springer Vieweg

Torsten Werth  
Hungen, Deutschland

ISBN 978-3-658-12727-5  
DOI 10.1007/978-3-658-12728-2

ISBN 978-3-658-12728-2 (eBook)

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

Springer Vieweg

© Springer Fachmedien Wiesbaden 2016

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen.

*Lektorat:* Dr. Daniel Fröhlich

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier.

Springer Fachmedien Wiesbaden ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media ([www.springer.com](http://www.springer.com))

---

# Vorwort

Die zunehmende Bedeutung von Windkraftanlagen und Photovoltaikanlagen stellt neue und gesteigerte Anforderungen an die elektrischen Netze und deren Planung. Eine wesentliche Herausforderung besteht darin, die Anlagen in weitestgehend schon vorhandene Netze einzubinden. Nicht selten sind die Leistungen der Anlagen größer als die Leistungen, für die die Netze ursprünglich ausgelegt wurden. Die Folge ist, dass bei der planerischen Überprüfung zulässige Grenzwerte zur Spannung und zur thermischen Belastbarkeit der Betriebsmittel nicht mehr eingehalten werden. Als Konsequenz werden Maßnahmen zur Netzverstärkung und Netzausbau notwendig oder geplante Anlagen können nicht angeschlossen werden.

Als mögliche Lösung bzw. Alternativen können unterschiedliche grundsätzliche Ansätze verfolgt werden.

Ein Ansatz beschreibt den Einsatz von Flexibilitätstechnologien. Dabei wird die vorhandene Infrastruktur weitestgehend weiter genutzt und durch weniger umfangreiche Maßnahmen den steigenden Anforderungen angepasst. In intelligenten Netzen – Smart Grids – wird mithilfe von Kommunikations- und Informationstechnik das jeweilige Netz überwacht und gesteuert.

Ergänzend oder alternativ wird versucht, technische Änderungen zu reduzieren und zu minimieren ohne dass spürbar auf Energie aus Windkraftanlagen und Photovoltaikanlagen verzichtet werden muss. Dies ist möglich, wenn die tatsächlichen Leistungen geringer ausfallen als die Nennleistungen der Erzeugungsanlagen oder die Anlagen im Fall einer Netzüberlastung in ihrer Leistung reduziert werden.

Allen Ansätzen gemein ist die Zielsetzung, möglichst viel Energie in das Netz einspeisen zu können bei minimalem Bedarf an umfangreichen und risikobehafteten Maßnahmen. Gleichzeitig teilen sie die Gemeinsamkeit, dass Kenntnisse über das zeitliche Verhalten der Anlagen als Voraussetzung vorliegen müssen.

Grundlage dafür sind meteorologische Daten von Referenzjahren, anhand derer mit den im Buch vorgestellten Methoden Leistungsverläufe für alle denkbaren Anlagenkombinationen erstellt werden können. Durch die Referenzierung wird zudem eine Vergleichbarkeit geschaffen zwischen unterschiedlichen Entwicklungen der Erzeugungsanlagen und Netzausbauvarianten.

In der Planung wird ein umfangreiches Systemverständnis erforderlich. Dabei gilt es in der Netzplanung, Verständnis über die Zusammenhänge herzustellen und darüber wovon die tatsächliche Leistung beeinflusst wird. Zusätzlich werden Berechnungen in der Netzplanung aufwendiger, auch wenn diese zunehmend automatisch durchgeführt werden können. Unterschiedlichste Lösungsvarianten müssen für alle relevanten Netzzustände berechnet und bewertet werden.

In den einzelnen Kapiteln sind Beispiele enthalten. Sie dienen dem Verständnis auf zwei Ebenen. Zum einen soll die Anwendung von Methoden verständlicher gemacht werden. Zum anderen kann dadurch verdeutlicht werden, welche Auswirkungen unterschiedliche Annahmen auf das Ergebnis haben. An zwei vereinfachten Beispielen wird gezeigt, welche Möglichkeiten sich durch die Berücksichtigung von Erzeugungsprofilen ergeben können.

Alle Beispiele sind speziell für diese Zielsetzung entworfen.

Der Austausch von Wissen erfolgt international. Am Ende des Buches stehen die wichtigsten Fachbegriffe in englischer Sprache zur Verfügung. Sie dienen als Hilfsmittel bei zusätzlichen Recherchen.

Geltende Gesetze und technische Regelwerke erfordern aktuell noch die klassischen konservativen Methoden.

Aus heutiger Sicht ist jedoch absehbar, dass langfristig neue und innovative Methoden in der Netzplanung unverzichtbar sein werden.

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> . . . . .	1
1.1	Bedeutung der elektrischen Energie . . . . .	1
1.2	Anforderungen an die Energieversorgung . . . . .	1
1.3	Aufbau von Energieverteilnetzen . . . . .	2
1.4	Konventionelle Leistungsannahmen . . . . .	3
1.5	Netzberechnung unter Berücksichtigung von Erzeugungsprofilen . . . . .	3
1.6	Zusammenfassung zur Einleitung . . . . .	6
<b>2</b>	<b>Netzplanung</b> . . . . .	9
2.1	Aufgaben in der Netzplanung . . . . .	9
2.2	Bedingungen für den Anschluss von Erzeugungsanlagen . . . . .	10
2.3	Thermische Belastbarkeit von Betriebsmitteln . . . . .	11
2.4	Anforderungen an die Spannung . . . . .	12
2.5	Zusammenfassung zur Netzplanung . . . . .	13
	Literatur . . . . .	13
<b>3</b>	<b>Netzberechnung</b> . . . . .	15
3.1	Formen der Leistungsflussberechnung . . . . .	16
3.2	Ablauf einer Leistungsflussberechnung . . . . .	17
3.3	Netzberechnung mit Erzeugungsprofilen . . . . .	19
3.4	Anwendung der Monte-Carlo-Methode . . . . .	20
3.5	Zusammenfassung zur Netzberechnung . . . . .	22
	Literatur . . . . .	22
<b>4</b>	<b>Photovoltaikanlagen</b> . . . . .	23
4.1	Aufbau von Photovoltaikanlagen . . . . .	23
4.2	Einflussfaktoren Einstrahlung und Temperatur . . . . .	24
4.2.1	Beispiel zur Berechnung der Modulleistung . . . . .	29
4.3	Genäherte Bestimmung der Modultemperatur . . . . .	30
4.3.1	Beispiel zur Berechnung der Modultemperatur und -leistung . . . . .	31
4.4	Dargebot solarer Einstrahlung . . . . .	32

4.5	Weitere Einflussgrößen auf die Leistung von Photovoltaikanlagen . . . . .	35
4.6	Zeitreihen für Photovoltaikanlagen unterschiedlicher Ausrichtung . . . . .	36
4.7	Zusammenwirken unterschiedlich ausgerichteter Photovoltaikanlagen . . . . .	37
4.7.1	Beispiel zur Auswirkung unterschiedlicher Ausrichtungen . . . . .	38
4.8	Zusammenfassung zum Verhalten von Photovoltaikanlagen . . . . .	40
	Literatur . . . . .	41
<b>5</b>	<b>Windkraftanlagen</b> . . . . .	<b>43</b>
5.1	Die besondere Bedeutung der Windgeschwindigkeit . . . . .	43
5.2	Aufbau und Konzepte zur Netzanbindung von Windkraftanlagen . . . . .	45
5.3	Leistungskennlinien von Windkraftanlagen . . . . .	47
5.4	Winddargebot . . . . .	48
5.5	Einfluss der Höhe . . . . .	49
5.6	Berechnung der Zeitreihen für unterschiedliche Windkraftanlagen . . . . .	51
5.7	Beispiel zur Leistung von Windkraftanlagen . . . . .	53
5.8	Zusammenfassung zum Verhalten von Windkraftanlagen . . . . .	56
	Literatur . . . . .	56
<b>6</b>	<b>Zusammenwirken von Windkraft- und Photovoltaikanlagen</b> . . . . .	<b>57</b>
6.1	Regionale Unterschiede . . . . .	57
6.2	Abhängigkeit der maximal erzeugten Leistung aus Photovoltaik von der erzeugten Leistung aus Windkraft . . . . .	59
6.3	Anwendungsmöglichkeiten . . . . .	61
6.4	Beispiel zum Zusammenwirken von Photovoltaik und Windkraft . . . . .	63
6.5	Zusammenfassung zum Zusammenwirken von Photovoltaik und Windkraft . . . . .	65
<b>7</b>	<b>Anwendungsbeispiel Auslastung von Transformatoren</b> . . . . .	<b>67</b>
7.1	Verluste in Transformatoren . . . . .	68
7.2	Belastbarkeit von ölgefüllten Transformatoren . . . . .	70
7.3	Beschreibung der Aufgabenstellung . . . . .	71
7.4	Beschreibung der Vorgehensweise . . . . .	71
7.5	Zu treffende Annahmen . . . . .	72
7.6	Eingangsparameter . . . . .	74
7.7	Ergebnisse der Temperaturberechnung . . . . .	74
7.8	Weitere Überlegungen zur Auslastung des Transformators . . . . .	75
7.9	Zusammenfassung zum Anwendungsbeispiel zur Auslastung eines ölgefüllten Transformators . . . . .	77
	Literatur . . . . .	78

---

<b>8</b>	<b>Anwendungsbeispiel zur Weitbereichsregelung</b> . . . . .	79
8.1	Direkte Spannungseinstellung von Transformatoren . . . . .	80
8.2	Anforderungen an eine Weitbereichsregelung . . . . .	81
8.3	Beschreibung der Aufgabenstellung . . . . .	83
8.4	Beschreibung der Vorgehensweise und Annahmen . . . . .	83
8.5	Ergebnisse der Berechnungen ohne geregelte Sammelschienenspannung . . . . .	85
8.6	Analyse und Entwurf einer $U_{\text{soll}}(P)$ -Regelung . . . . .	87
8.7	Erneute Berechnung mit geregelter Sammelschienenspannung . . . . .	89
8.8	Weitere Überlegungen zur Weitbereichsregelung . . . . .	90
8.9	Zusammenfassung zum Anwendungsbeispiel zur Weitbereichsregelung . . . . .	92
	Literatur . . . . .	94
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung</b> . . . . .	95
	<b>Anhang</b> . . . . .	99
	<b>Glossar</b> . . . . .	117
	<b>Weiterführende Literatur und Informationen</b> . . . . .	121
	<b>Sachverzeichnis</b> . . . . .	123

---

## 1.1 Bedeutung der elektrischen Energie

Elektrische Energie ist für die Menschheit unverzichtbar geworden. Sie ist vielseitig einsetzbar, auf zahlreiche Arten zu erzeugen und verlustarm zu transportieren. Sie kann in andere Energieformen wie mechanische Energie oder Wärme gewandelt werden.

In der Industrie wird elektrische Energie zusätzlich für sämtliche Aufgaben der Steuerung und Regelung eingesetzt.

Die Bedeutung der elektrischen Energie im Bereich der Mobilität gewinnt zunehmend an Bedeutung und für die immer wichtiger und leistungsfähiger werdende Informations- und Kommunikationstechnologie ist elektrische Energie Grundvoraussetzung.

Dabei hat die Energieversorgung in den Industrieländern eine so hohe Qualität und einen so hohen Stellenwert erreicht, dass Sie von den meisten Menschen als selbstverständlich empfunden wird.

---

## 1.2 Anforderungen an die Energieversorgung

Durch die allgemeinen Anforderungen an die Energieversorgung ergeben sich entsprechende Anforderungen an die Energieverteilnetze.

Die Anforderungen ergeben sich aus Gesetzen, aus den Erwartungen aus der Gesellschaft und aus den ökonomischen und ökologischen Rahmenbedingungen.

Wegen des hohen Stellenwerts der elektrischen Energie sind auch die Anforderungen an die Energieverteilnetze entsprechend hoch.

Eine Grundanforderung ist die Sicherheit der Netze. Vom elektrischen Netz dürfen selbstverständlich keine Gefahren für Menschen und Sachen ausgehen. Weiter müssen Netze zuverlässig sein. Versorgungsunterbrechungen durch Ausfälle von Betriebsmitteln sollten vermieden werden. Da diese Unterbrechungen nicht vorhersagbar sind und nicht grundsätzlich ausgeschlossen werden können, müssen Netze so geplant und aufgebaut

sein, dass die Versorgungsunterbrechungen schnell wieder beseitigt werden können. Diese Anforderungen sprechen für ausreichend dimensionierte und auf Redundanz ausgelegte Netzkonzepte.

Diesen Anforderungen steht der Anspruch einer kostengünstigen Energieversorgung entgegen. Ausbaumaßnahmen und Erneuerungen von Betriebsmitteln müssen so geplant werden, dass die Betriebsmittel möglichst über ihre gesamte technische Lebensdauer genutzt werden können. Je nach Betriebsmittel kann diese 50 Jahre und mehr betragen.

Solche Anforderungen miteinander vereinbaren zu können erfordert einen hohen Aufwand und hohe Ansprüche an die Netzplanung.

---

### 1.3 Aufbau von Energieverteilnetzen

Das Energieversorgungssystem lässt sich in mehrere Spannungsebenen unterteilen: die Höchstspannungsebene, die Hochspannungsebene, die Mittelspannungsebene und die Niederspannungsebene. Es wird weiterhin unterteilt in Transportnetze, zu denen das Höchstspannungsnetz gehört, und die Verteilnetze, zu denen alle übrigen Netze zählen.

Die höchste Spannungsebene hat das 380-kV-Netz, welches zum Transport elektrischer Leistung über größere Distanzen genutzt wird. Großkraftwerke, wie beispielsweise Atomkraftwerke, speisen ebenfalls in das 380-kV-Netz. Über den Betrieb im Verbund wird gegenseitige Unterstützung bei Kraftwerksausfällen ermöglicht, auch auf internationaler Ebene im europäischen Raum. Das 380 kV-Netz wird deshalb auch als Höchstspannungs-, Verbund-, Transport- oder *Übertragungsnetz* bezeichnet.

Dem Höchstspannungs- bzw. Transportnetz ist das *Hochspannungsnetz* unterlagert. Dessen Spannung beträgt 110 kV. In Umspannstationen wird die Spannung von 380 kV auf 110 kV heruntertransformiert und von dort aus in der Regel über Freileitungen weiterverteilt. Das Hochspannungsnetz dient zur Verteilung elektrischer Leistung auf regionaler Ebene. Größere Windparks speisen auch in das Hochspannungsnetz ein.

Aus dem Hochspannungsnetz werden über Umspannstationen die *Mittelspannungsnetze* versorgt, die wiederum die Niederspannungsnetze versorgen. Die Spannungstransformation erfolgt über Verteiltransformatoren mittlerer Größe, die über eine direkte Spannungseinstellung verfügen. Mittelspannung bezeichnet Spannungen zwischen 6 kV bis 30 kV. Üblicherweise werden jedoch 10 kV und 20 kV eingesetzt. Über das Mittelspannungsnetz werden auch Großkunden versorgt und die Leistung von Industriekraftwerken eingespeist. Der Großteil der Leistung aus Erneuerbaren Energien in Deutschland ist im Mittelspannungsnetz angeschlossen. Diese Leistung besteht zum größten Teil aus Windkraftanlagen. Der zweite relevante Anteil besteht aus größeren Photovoltaikanlagen.

Die Haushalte der Endverbraucher werden über das *Niederspannungsnetz* bzw. 0,4-kV-Netz versorgt. Es bezieht seine Leistung an den Umspannstationen, in denen die Spannung von 10 kV oder 20 kV auf 0,4 kV herunter transformiert wird. Da über diese Stationen die Niederspannungsortsnetze versorgt werden, werden diese oft auch als Ortsnetzstationen

und die Transformatoren als Ortsnetztransformatoren bezeichnet. Photovoltaikanlagen mit Leistungen im zweistelligen kW-Bereich speisen in das Niederspannungsnetz ein.

In den folgenden Kapiteln wird in den Beispielen hauptsächlich auf das Nieder- und das Mittelspannungsnetz Bezug genommen.

---

## 1.4 Konventionelle Leistungsannahmen

Ursprünglich ist die Struktur der Stromnetze aus der lange Zeit üblichen Richtung des Energieflusses entstanden. Die Energie fließt aus Richtung der Höchst- und Hochspannungsebenen, in die die Kraftwerke einspeisen, in Richtung der unteren Spannungsebenen. Planungstechnisch galt es in der jeweiligen Spannungsebene die maximal zu erwartende Last anzunehmen, um die Netzbetriebsmittel so auslegen zu können, dass diese im ungestörten Betrieb thermisch nicht überlastet werden konnten (vergl. Abschn. 2.3) und der Spannungsfall (vergl. Abschn. 2.4) vorgegebene Grenzen einhielt. Mit den gleichen Annahmen wurde das *n-1-Kriterium* überprüft. Leistungen von Transformatoren und Querschnitte von Leitungen müssen ausreichen, um im Fall, dass eins von n Betriebsmitteln ausfällt, die beschriebenen Anforderungen weiterhin erfüllt werden. Wird entlang einer Leitung nur Leistung entnommen, so fällt die Spannung und wird zum Ende kleiner. Mit dem Anschluss von Anlagen zur Stromerzeugung aus regenerativen Energiequellen wird an den gleichen Stellen einer Leitung nicht nur Leistung durch Verbraucher entnommen, sondern auch Leistung eingespeist. Die Richtung und die Größe des Energieflusses können sich also ändern und somit auch die Richtung des Spannungsfalls, der dadurch zu einer Spannungsanhebung wird. Wird entlang einer Leitung nur Leistung eingespeist, ist die Spannung am Leitungsende am größten. In diesem Fall muss überprüft werden, dass die obere Spannungsgrenze nicht verletzt wird. Aus diesen Anforderungen heraus hat sich in der Planung eine Vorgehensweise etabliert, bei der beide Extrema betrachtet werden:

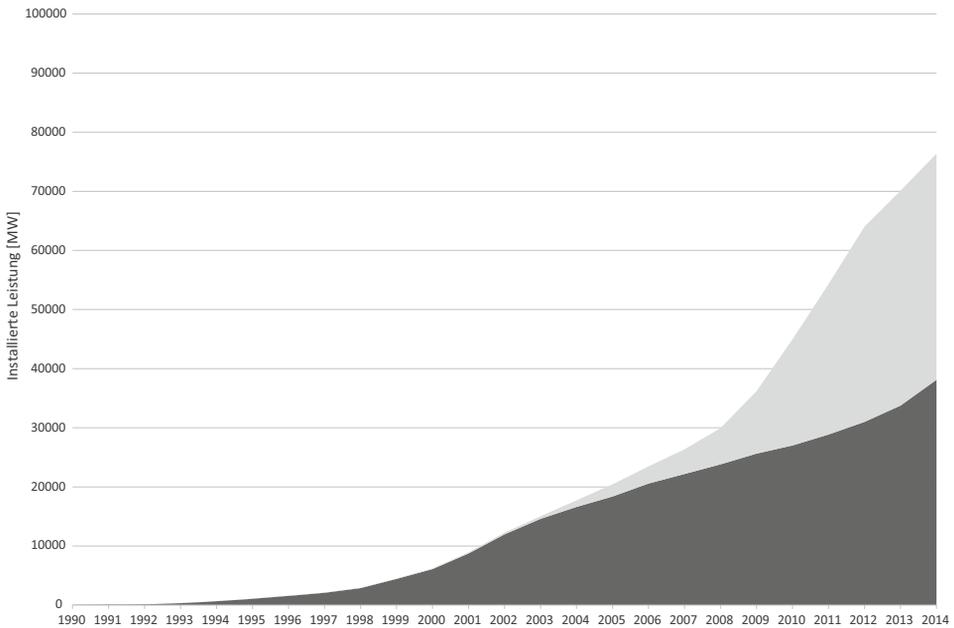
- Maximale Last, Einspeisung durch Erneuerbare Energien bleiben unberücksichtigt,
- Maximale Einspeisung durch Erneuerbare Energien, Last bleibt unberücksichtigt.

Dabei wird angenommen, dass alle Windkraft- und Photovoltaikanlagen gleichzeitig mit ihrer gesamten Nennleistung in das Netz einspeisen. Dieser konventionelle Ansatz bietet den Vorteil größter Planungssicherheit.

---

## 1.5 Netzberechnung unter Berücksichtigung von Erzeugungsprofilen

Im Jahr 2014 waren in Deutschland an Land ca. 38 GW Leistung in Form von Windkraftanlagen und ca. 38 GW Leistung in Form von Photovoltaikanlagen im Netz installiert. Damit hat sich die Summe an installierter Leistung aus Windkraft und Photovoltaikanlagen seit 2009 mehr als verdoppelt. Abb. 1.1 zeigt die Entwicklung der installierten



**Abb. 1.1** Entwicklung installierter Leistung von Windkraft- und Photovoltaikanlagen

Leistung in Form von Windkraftanlagen (untere Kurvenfläche) und Photovoltaikanlagen (obere Kurvenfläche).

Immer häufiger führt der konventionelle Ansatz bei der Planung, weitere Leistung zu installieren, zu zwei möglichen Ergebnissen:

- Netzausbau oder -verstärkung ist notwendig, um die geplante Windkraft oder Photovoltaikanlage an das Netz anschließen zu können.
- In einem Netz können keine weiteren Anlagen zur Stromerzeugung aus Erneuerbare Energien angeschlossen werden.

Die tatsächliche maximale Leistung ist meistens jedoch deutlich geringer. Windkraftanlagen an Land haben ca. 1500 Volllaststunden. Photovoltaikanlagen in Deutschland haben ungefähr 800 *Volllaststunden*. In Abschn. 4.4 und 5.4 wird gezeigt, dass sich diese Volllaststunden zu nicht unerheblichen Teilen aus Betriebsstunden in unteren und mittleren Leistungsbereichen zusammensetzen. Dies ist im Wesentlichen darauf zurückzuführen, dass nicht für alle Anlagen gleichzeitig die optimalen Bedingungen vorzufinden sind.

Ist das zeitliche Verhalten bekannt oder abschätzbar, so kann das Netz für die realistischen Bedingungen optimiert werden. Das zeitliche Verhalten wird durch die Witterung bestimmt. Dabei müssen regionale Unterschiede berücksichtigt werden. In Abschn. 4.4, 5.4 und 6.1 wird gezeigt, dass es große Unterschiede gibt. Die notwendigen Messdaten zur Temperatur, Windgeschwindigkeit und globalen Einstrahlung können in der Regel