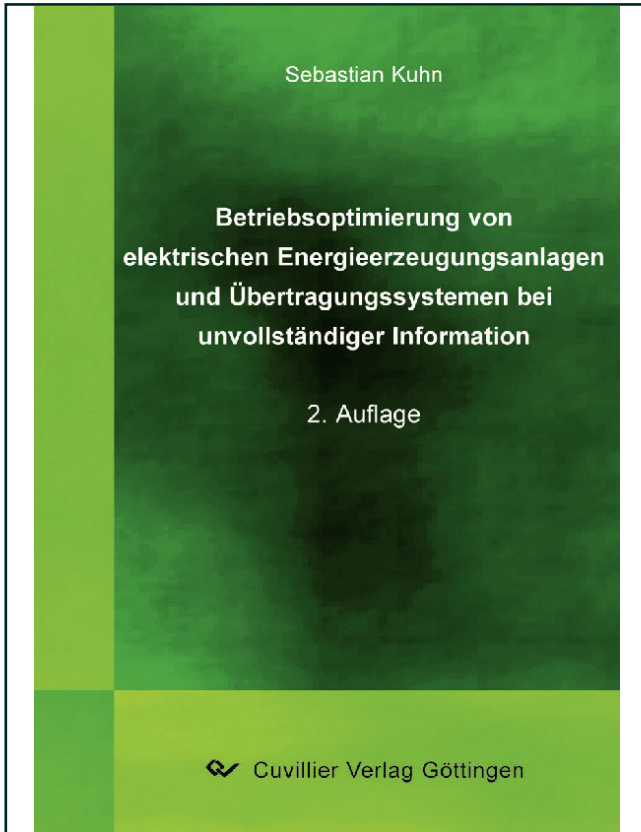




Sebastian Kuhn (Autor)

**Betriebsoptimierung von elektrischen  
Energieerzeugungsanlagen und Übertragungssystemen bei  
unvollständiger Information**



<https://cuvillier.de/de/shop/publications/431>

Copyright:

Cuvillier Verlag, Inhaberin Annette Jentzsch-Cuvillier, Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen, Germany  
Telefon: +49 (0)551 54724-0, E-Mail: [info@cuvillier.de](mailto:info@cuvillier.de), Website: <https://cuvillier.de>

# Kapitel 1

## Einleitung

Durch die verstärkte Nutzung erneuerbarer Energiequellen zur Stromerzeugung haben die Unsicherheiten bezüglich der zu erwartenden Einspeisung und Abnahme in elektrischen Energieübertragungssystemen enorm zugenommen. So unterliegt die Windeinspeisung stochastischen Schwankungen, die sich nur mit einer begrenzten Genauigkeit voraussagen läßt. Dezentrale Energieerzeugungsanlagen, wie Blockheizkraftwerke oder Brennstoffzellen, werden heute vorrangig wärmegeführt gefahren. Dadurch richtet sich ihre Stromerzeugung primär nach der ebenfalls unsicheren Wetterprognose. Soll eine Erzeugungsanlage kostenoptimal betrieben werden, so erfordert die Optimierung nicht nur Informationen über die zu erwartende Entwicklung bezüglich des Strom- und Wärmebedarfs, sondern auch Informationen über die Preise für Primärenergien. Diese basieren ebenfalls auf Prognosen und sind deshalb mit Unsicherheiten behaftet. Verstärkt wird diese Situation durch den Stromhandel mit beschränkt vorhersagbaren Auswirkungen auf Einspeisungen und Abnahmen im Energieübertragungssystem. Somit ergibt sich schnell die Fragestellung, wie die dezentralen Erzeugungsanlagen anzusteuern sind, damit zum einen ein kostenoptimaler Betrieb eingehalten werden kann und zum anderen die Versorgungssicherheit selbst dann, wenn die Abnahme unsicher ist, gewährleistet bleibt. Eine entscheidende Bedeutung kommt in diesem Kontext dem Energieübertragungssystem zu. Ein solches transportiert die benötigte Energie vom Erzeuger zum Verbraucher und verursacht Abhängigkeiten zwischen den möglichen Produktionen der an ihm angeschlossenen Erzeugungsanlagen, so dass

eine einzelne dezentrale Erzeugungsanlage nicht als autonome Einheit angesehen werden kann. Doch ein Energieübertragungssystem wirft neue Fragestellungen auf. Eine kostenminimale Produktionsentscheidung der Erzeugungsanlagen, die die nachgefragte Last decken kann, muss sicherlich einen Energiefluss zur Folge haben, der die Leitungen des Energieübertragungssystems nicht überlastet.

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung mathematischer Modelle und Verfahren zur stochastischen Leistungsfluss- und Betriebsoptimierung dezentraler Erzeugungsanlagen im obigen Kontext. Dabei sind die geschilderten stochastischen Einflüsse miteinzubeziehen. Die mathematische Optimierung als Teilgebiet der angewandten Mathematik stellt ein für zahlreiche Probleme der Praxis nutzbares Instrumentarium bereit. Sie findet ihren Anwendungsbereich beispielsweise auch in der Produktionsplanung, der Telekommunikation oder der Logistik. So kann bei der Entwicklung angemessener mathematischer Modelle und auch bei deren Lösung auf ein breites Spektrum an Modellierungstechniken und gängigen Softwarepaketen zurückgegriffen werden. Auch können zahlreiche Literaturquellen genannt werden, die sich mit der Einspeisungsoptimierung bei sicheren Eingangsdaten auseinandersetzen, wie etwa [13, 25, 28, 36, 71].

Die Arbeit ist wie folgt gegliedert. In Kapitel 2 werden geeignete mathematische Optimierungsmodelle gemäß den zuvor geschilderten Anliegen vorgestellt, die unterschiedliche Modellierungstechniken, angefangen von einer vollständigen Ignorierung des elektrischen Energieübertragungssystems, übergehend zu Approximationsmöglichkeiten des solchen bis hin zu einer exakten Wiedergabe, nutzen und zudem hinsichtlich untereinander geltender Relationen näher untersucht werden. Weiter wird ein Optimierungsmodell vorgestellt, mit dessen Hilfe sich eine kostengünstige Nachrüstung eines elektrischen Energieübertragungssystems bestimmen lässt. Eine solche Nachrüstung kann langfristig dazu beitragen, die Versorgungssicherheit zu erhöhen und die Produktionskosten zu senken. Der in diesem Kapitel gewählte Zugang erfolgt in rein deterministischer Betrachtungsweise, d.h. alle Eingangsdaten werden als bekannt vorausgesetzt. Kapitel 3 stellt Lösungsverfahren dar, die auf die meisten der gewonnenen Modellklassen

anwendbar sind. Kapitel 4 beschäftigt sich intensiv mit der Integration von mit Unsicherheiten behafteten Datensätzen und stellt geeignete stochastische Optimierungsmodelle bei Fokussierung auf den zweistufigen stochastischen Ansatz vor. Sowohl risikoneutrale als auch risikoaverse Betrachtungsweisen mit der Möglichkeit einer Nutzung diverser statistischer Parameter werden genutzt. Eine genaue Modellierung der unsicheren Eingangsdaten kann jedoch die benötigte Rechenzeit bei Nutzung der in Kapitel 3 vorgestellten Algorithmen enorm steigern. Spezielle Algorithmen, die Dekompositionstechniken ausnutzen und so zu einer wesentlichen Reduzierung der Rechenzeiten führen, werden in Kapitel 5 angesprochen. Kapitel 6 stellt neben einer in den Ingenieurwissenschaften eingesetzten Methode zur Lastflussberechnung auch heuristische Ansätze für das in Kapitel 2 entwickelte und schwer zu behandelnde Optimierungsmodell bei einer exakten Modellierung der physikalischen Zusammenhänge des Energieübertragungssystems, d.h. ohne Nutzung von Approximationsmöglichkeiten, bei denen gewisse Voraussetzungen zu erfüllen sind, vor. Die Arbeit schließt mit in Kapitel 7 dargestellten zahlreichen numerischen Testrechnungen.

Nachfolgend wird ein kurzer Einblick in relevante Grundlagen der elektrischen Energieversorgung gegeben. Für etwaige Vertiefungen auf diesem Gebiet wird an dieser Stelle auch auf [4, 28, 29] verwiesen. Zunächst wird der Begriff der elektrischen Energieübertragung näher erläutert, der auch in dem Internetlexikon *Know-Library* [42] zu finden ist. Um die Verbraucher mit elektrischer Energie zu versorgen, ist es notwendig, Leitungen von den Energieerzeugungsanlagen zu den Verbrauchern zu legen. Über weite Distanzen wird in Deutschland die Energie mittels Dreiphasenwechselstrom mit einer Frequenz von 50Hz und einer Spannung von bis zu 400kV übertragen. Erst kurz vor dem Verbraucher wird er auf die bekannte Niederspannung von 230V Einphasenwechselstrom bzw. 400V Dreiphasenwechselstrom transformiert. In anderen Ländern sind abweichende Spannungen oder Frequenzen möglich. Die Übertragung mit Hochspannung hat sich aus verschiedenen Gründen durchgesetzt, da hohe Spannungen technisch leichter zu kontrollieren sind als hohe Ströme, eine hohe Übertragungsleistung gewährleistet ist, geringere Übertragungsverluste auftreten und grosse Entfernungen überbrückt werden können. Je nach anliegender Spannung können Höchstspannungsnetze ( $220kV$

oder  $380kV$ ), Hochspannungsnetze ( $50kV$  bis  $150kV$ ), Mittelspannungsnetze ( $10kV$  bis  $30kV$ ) und Niederspannungsnetze ( $230V$  oder  $400V$ ) unterschieden werden. Abb. 1.1 zeigt exemplarisch ein elektrisches Energieübertragungssystem. Ein solches System besteht aus Sammelschienen (*Knoten*), Übertragungsleitungen

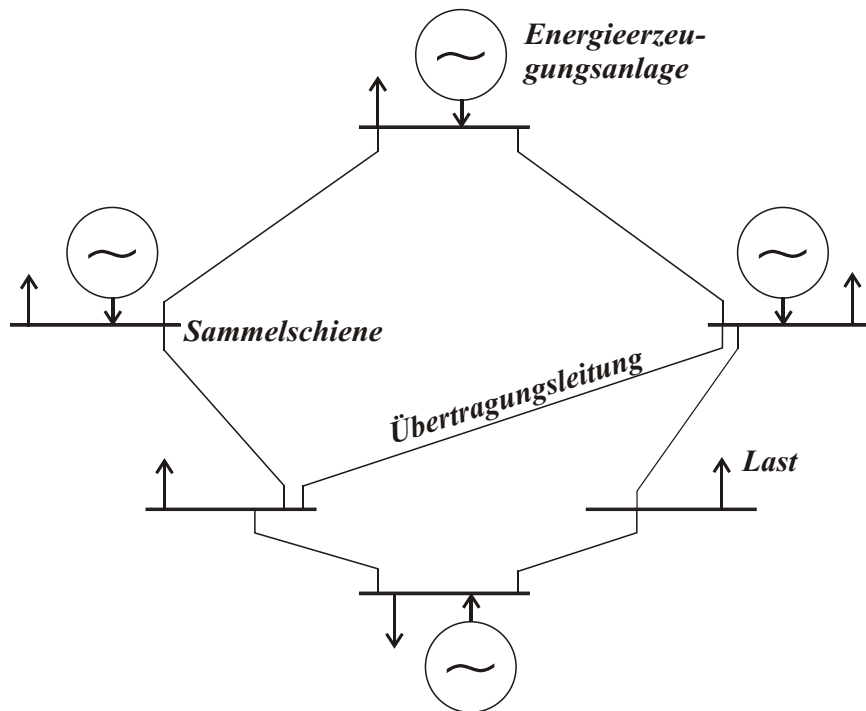


Abbildung 1.1: Ein elektrisches Energieübertragungssystem

(*Kanten*) und Transformatoren. An den Sammelschienen treten zu bedienende Lasten auf, bei Anschluss einer Erzeugungsanlage kann zudem eine Einspeisung elektrischer Energie erfolgen. In der Regel existieren bei größeren Netzen mit mehreren stetig regelbaren Erzeugungsanlagen, zumindest theoretisch, unendlich viele zulässige Einspeisungen in das Energieübertragungssystem, die zu bedienende Lasten decken, aber zu unterschiedlichen Produktionskosten führen. Dieser Sachverhalt kann beispielsweise anhand des Übertragungssystems aus Abb. 1.2 überprüft werden, wenn die Einspeisungsgrenzen der Generatoren geeignet vorgegeben sind. Aus wirtschaftlicher Sicht stellt sich die Ermittlung einer zulässigen Produktionsentscheidung mit minimalen Kosten (*Betriebsoptimierung*), doch soll oftmals auch eine Minimierung von Übertragungsverlusten vorgenommen werden

(*Leistungsflussoptimierung*). Dabei kann es sich um verschiedenartige Aufgaben handeln, wie das nachfolgende Beispiel zeigt:

### Beispiel

Man betrachte ein elektrisches Energieübertragungssystem mit zwei reinen Einspeisungspunkten und einem Lastknoten. Die Leitung von Knoten 1 nach Knoten 2

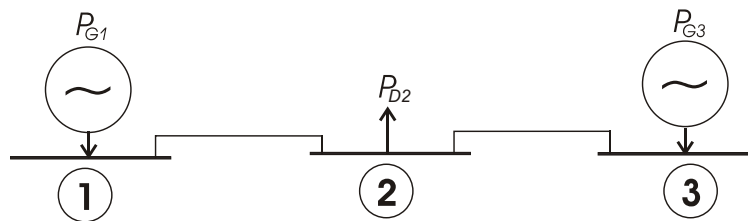


Abbildung 1.2: Ein 3-Knoten-System

sei derart ausgestattet, dass bei einem elektrischen Energiefluss marginale Verluste auftreten, wohingegen eine Übertragung über die Leitung von Knoten 3 nach Knoten 2 zu deutlichen Verlusten führt. Man setze weiter voraus, dass sowohl Erzeugungsanlage 1 mit der Einspeisungsvariablen  $P_{G_1}$  als auch Erzeugungsanlage 3 mit der Einspeisungsvariablen  $P_{G_3}$  alleine in der Lage wären, die Last  $P_{D_2}$  zu bedienen. Zudem verursache die Einspeisung  $P_{G_1}$  Produktionskosten, wobei eine Einspeisung mit  $P_{G_3}$  zu keinerlei Kosten führe, wie dies bei Windenergieanlagen der Fall ist (Wartungskosten werden hier ignoriert). Eine optimale Einspeisung mit minimalen Netzverlusten würde die Last  $P_{D_2}$  sicherlich vollständig mit  $P_{G_1}$  bedienen. Eine kostenminimale Einspeisung könnte aber nur bei alleiniger Bedienung durch  $P_{G_3}$  vorliegen.

Neben der Minimierung von Übertragungsverlusten gehören zur Leistungsflussoptimierung auch die Verbesserung von Spannungsprofilen und die Reduktion des Blindleistungstransportes, doch werden die letzten beiden Aufgaben in dieser Arbeit nicht behandelt. Spannungen und Ströme in einem elektrischen Energieübertragungssystem sind einem zeitkontinuierlichen Prozess unterworfen. In den noch vorzustellenden Modellen wird jedoch eine stationäre Systemdarstellung, d.h.

eine Darstellung zu einem festen Zeitpunkt, betrachtet. In dieser Repräsentation ist, wie [28, 29] entnommen werden kann, die Beschreibung des symmetrisch betriebenen Drehstromsystems durch ein einphasiges Wechselstromsystem möglich. Zwar kann mit den nachfolgenden Modellen auch eine Optimierung über einen Zeitraum vorgenommen werden, doch wird ein solcher immer als diskretisiert vorausgesetzt. Nachfolgende Betrachtungen beziehen sich daher ausschließlich auf eine einphasige Darstellung des Stroms. Weiter wird festgehalten, dass hier das Energieübertragungssystem als ein Inselnetz angesehen wird und so keine Möglichkeit eines Exports oder Imports elektrischer Energie besteht, da nur die grundlegenden Modellierungsaspekte erörtert werden. Zudem werden Transformatoren nur implizit über die durch ihren Einsatz verbesserten Übertragungsfähigkeiten der Leitungen beachtet. Das nachfolgende Kapitel stellt geeignete mathematische Optimierungsmodelle vor, die den zuvor genannten Aufgaben, zunächst in rein deterministischer Betrachtungsweise, d.h. alle Eingangsdaten werden als bekannt vorausgesetzt, gerecht werden.