

# **Zeitlich und räumlich aufgelöste Leistungsflüsse zwischen Regionen bei einer Stromversorgung mit 100% Erneuerbaren Energien in Deutschland**

Eberhard Waffenschmidt, Momoko Kristuf, Daniel Körber

Betzdorferstr.2, 50679 Köln

+49 221 8275 2020

Korrespondierender Autor: eberhard.waffenschmidt@th-köln.de

[www.100pro-erneuerbare.com](http://www.100pro-erneuerbare.com)

## **1. Einleitung**

Mit der Ausbreitung der Erneuerbaren Energien in Deutschland wird diskutiert, ob die derzeitige Struktur des Stromnetzes angemessen ist. Öffentlich wird der Ausbau des Übertragungsnetzes mit weiteren Hochspannungsfreileitungen gefordert, während andere Stimmen mit einer zellularen Netzstruktur eher einen dezentralen Ansatz mit lokalen Speichern verfolgen. Detaillierte und ausführliche Studien lassen sich nur schwer unabhängig nachvollziehen und an andere Annahmen anpassen, da die Datengrundlagen nicht öffentlich verfügbar sind.

Um eine breitere öffentliche Diskussion auch Fachleuten zu ermöglichen, die nicht einen Zugang zu den häufig vertraulichen Daten von etablierten Institutionen bekommen können oder möchten, wurden zeitlich und räumlich aufgelöste Einspeise- und Bedarfsdaten aus öffentlich verfügbaren Quellen gesammelt und aufbereitet. Im Rahmen von mehreren Studierendenprojekten wurden für die jeweils 32 Regierungsbezirke in Deutschland, zeitlich in 15 min aufgelöst Daten ermittelt (Dank dafür an S. Schaefer, A. Ait Benomar, und A. Lenz). Es wurden nur Daten zu Erneuerbaren Einspeisen vorgesehen, denn Ziel ist eine Untersuchung der elektrischen Versorgung mit 100% Erneuerbaren Energien.

Zur Auswertung wurde ein Simulationstool mit Benutzeroberfläche in der Programmierumgebung MatLab entworfen, mit dessen Hilfe Leistungsflüsse zwischen Regionen berechnet und visualisiert werden können. Ein einfaches Modell für Speicher ist ebenfalls implementiert. Die Daten und das Simulationstool (als installierbare EXE-Datei) werden zeitnah auf der Website der Autoren (siehe oben) verfügbar sein.

## 2. Benutzeroberfläche

Die Benutzeroberfläche stellt zum einen eine Landkarte von Deutschland dar (Bild 1). Die Farbe der einzelnen Regionen korrespondiert mit dem Überschuss oder Mangel an elektrischer Energie für den jeweiligen Zeitraum. Leistungsflüsse sind als Pfeile zwischen den Regionen dargestellt.

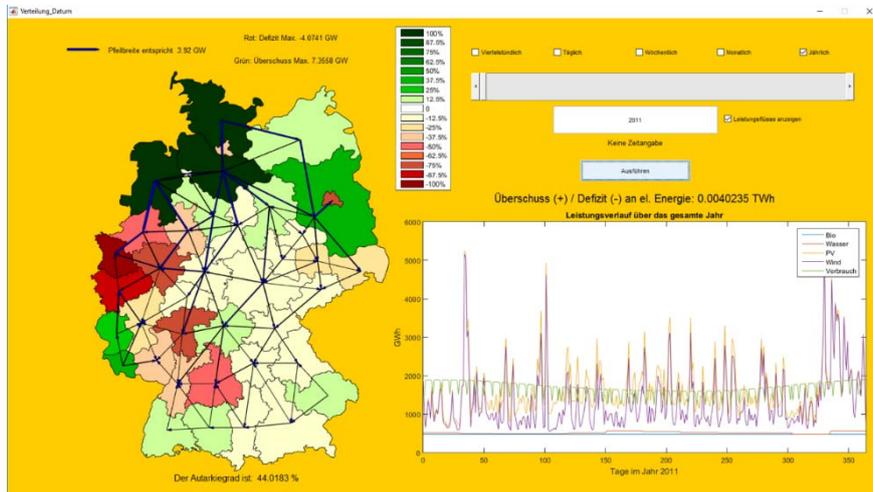


Bild 1: Benutzeroberfläche zur Anzeige der Ergebnisse.

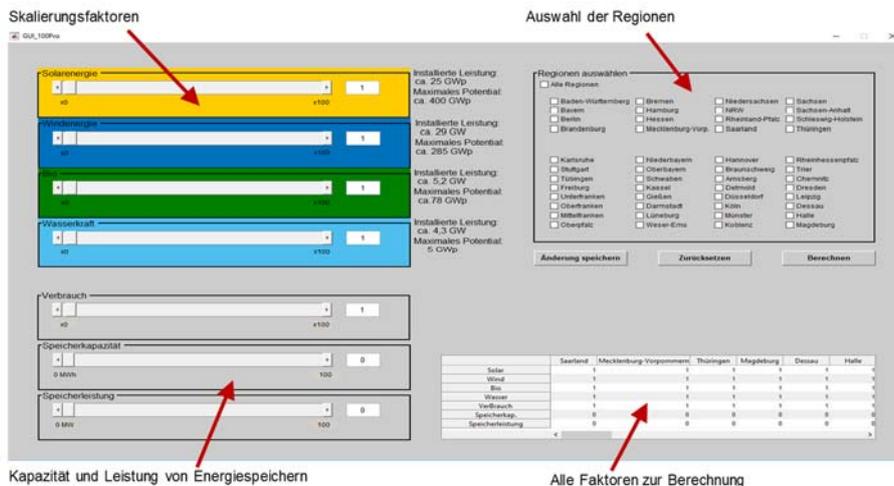


Bild 2: Benutzeroberfläche zur Eingabe der Skalierungsfaktoren für die einzelnen Regionen.

Ein Schieberegler ermöglicht die Wahl des Zeitpunktes. Eine X-Y-Grafik stellt den Zeitverlauf ausgewählter Größen dar. Bild 2 zeigt die Eingabemöglichkeiten: Mit Hilfe der Schieberegler lassen sich für die jeweils angewählten Regionen Skalierungsfaktoren für die einzelnen Energieträger und den Bedarf sowie Speicherkapazität und -Leistung schrittweise einstellen.

### 3. Datenbasis

Die Datenbasis besteht aus Jahres-Profilen für die jeweils 32 Regierungsbezirke in Deutschland, zeitlich in 15 min aufgelöst, jeweils für das Referenzjahr 2011.

#### 3.1. Lastdaten

Zur Ermittlung der Verbrauchsdaten wurden zunächst Jahresenergieverbräuche für Strom für die einzelnen Bundesländer, getrennt nach Verbrauchergruppen, ermittelt [1]. Mit Hilfe der Einwohnerzahlen der Bundesländer [2] und der Regierungsbezirke [3] wurden die Verbrauchsdaten der Einwohnerzahl entsprechend auf die Regierungsbezirke skaliert. Sodann wurden Standardlastprofile H0 (Haushalte), G0 (Gewerbe und Industrie) sowie L0 (Landwirtschaft) nach VDEW [4] entsprechend der Jahresverbräuche in den Regierungsbezirken skaliert und addiert.

#### 3.2. Windkraft

Die Daten für die Windkrafteinspeisung wurden ermittelt aus Wetterdaten von Wetterstationen des Deutsche Wetterdienstes (DWD) [5]. Quelle [6] listet alle Windparks in Deutschland mit genauer Position. Den jeweiligen Windparks wurden die Winddaten der nächstgelegenen Wetterstation zugeordnet. Unter Verwendung von Daten einer empirisch gewählten typischen Referenzwindanlage (Enercon E-82 mit einer Nennleistung von  $P_N = 2.0$  MW [9] ) wurde aus den Winddaten die Leistung für die Referenzwindanlage am jeweiligen Standort berechnet. Diese wurde dann für den jeweiligen Windpark auf die installierte Leistung skaliert und für die Regierungsbezirke aufsummiert. Die Winddaten sind nur stündlich verfügbar. Zwischenwerte wurden aus den Werten für die vollen Stunden übernommen.

Die bei der Höhe über Grund  $h_1 = 10$  m (Angaben in Datensätzen aus [5]) gemessenen Windgeschwindigkeiten  $v_1$  wurden auf Windgeschwindigkeiten  $v_2$  bei einer mittleren Höhe über Grund  $h_2 = 108$  m (für Referenzanlage) nach der folgenden Gleichung [7] skaliert.

$$v_2 = v_1 \cdot \frac{\ln(h_2/z_0)}{\ln(h_1/z_0)} \quad (1)$$

Dabei wird für die Oberflächenrauigkeit  $z_0 = 0.1$  m (Geländeklasse 2) [7] angenommen. Aus dieser Windgeschwindigkeit  $v = v_2$  wurde dann die eingespeiste

Leistung  $P$  berechnet [8]:

$$P = \eta \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot r^2 \cdot v^3 \quad (2)$$

Dabei wird für den Wirkungsgrad  $\eta = 0.4$  angenommen [8] und die die Luftdichte  $\rho = 1.22 \text{ kg/m}^3$ . Der Rotorradius  $r = 41 \text{ m}$  wird durch die angenommene Referenzanlage bestimmt.

### 3.5. Photovoltaik

Auf der Website der Firma SMA [10] wird die aktuelle und historische Einspeisung von PV-Energie in Deutschland in einer Landkarte dargestellt. Die Daten sind in 15 min zeitlich und für Postleitzahlenbereiche auf Ebene der ersten beiden Ziffern örtlich aufgelöst. Die Darstellung basiert auf XML-Daten, die von der Website mit einem Skript abgerufen werden können. Sie wurden für das Jahr 2011 heruntergeladen und den jeweiligen Regierungsbezirken zugeordnet.

### 3.3. Wasserenergie

Der Datensatz zur erzeugten Energie der Wasserkraftwerke wurde aus der im jeweiligen Regierungsbezirk installierten Leistung von Wasserkraftwerken [11] berechnet. Die installierten Leistungen wurden mit der monatlichen Niederschlagsmenge im Bezirk [12] skaliert. Damit ergeben sich Profile mit monatlicher Auflösung. Dies entspricht der großen Speicherwirkung von Gewässern.

### 3.4. Biogas

Die von den Bioenergiekraftwerken erzeugte Energie wird hier vereinfacht als Grundlast angenommen. Die installierten Kapazitäten jeder Region [13] bestimmen die erzeugte Energie über die Zeit. In zukünftigen Software-Versionen könnte Biogas als flexible Einspeisung berücksichtigt werden.

## 4. Leistungsflüsse

Die Berechnung des Leistungsausgleichs zwischen den einzelnen Regionen wird hier ohne Berücksichtigung eines Stromnetzes ermittelt. Als Annahme sind dazu alle Regionen mit ihren Nachbarregionen „ideal“ verknüpft, und jede dieser Verbindungen wird als gleichwertig angenommen. Die Übertragung über eine dieser Verbindungen wird mit einer „Straf-Funktion“ beaufschlagt. Dazu wurde das Quadrat der übertragenen Leistung gewählt. Dies ermöglicht eine sehr einfache Optimierung der

„Straf-Verluste“ mit Hilfe eines Knoten-Potential-Verfahrens [14]. Anstellen von elektrischen Strömen werden Leistungsflüsse eingesetzt und statt elektrische Spannungen werden künstliche Leistungspotentiale definiert. Alle Verbindungs-Admittanzen werden zu 1 gesetzt. Die residualen Leistungen in jeder Region entsprechen damit Strömen an den Knoten als Eingangsgrößen. Durch Inversion der Admittanzmatrix ergeben sich dann die Leistungspotentiale und damit Leistungsflüsse zwischen den Regionen.

## 5. Speichermodell und erste Ergebnisse

Jeder Region ist ein einfaches Speichermodell zugeordnet. Kapazität und maximale Leistung können für jede Region einzeln festgelegt werden. Es werden unterschiedliche Betriebsstrategien untersucht, welche - als erste Erkenntnisse - einen entscheidenden Einfluss auf die Verteilung der Leistungsflüsse haben. Insbesondere sorgt ein Algorithmus, der vorrangig lokale Speicher bedient, dafür, dass benachbarte Regionen mit einem Mangel nicht von dort, sondern von weiter her versorgt werden und entsprechend Leistung von weither übertragen werden müsste.

Generell zeigen jedoch erste qualitative Untersuchungen, dass ein verstärkter Einsatz von lokalen Speichern mit angepasstem Betriebsalgorithmus zu einer deutlichen Reduzierung der notwendigen Übertragungskapazitäten führen. Quantitative Untersuchungen dazu sind in der Durchführung.

## Referenzen

- [1] AK Energiebilanzen, „Energiebilanzen der Länder“, im Internet, 9.12.2016:  
<http://www.lak-energiebilanzen.de/seiten/energiebilanzenLaender.cfm>
- [2] Fact fish, „Einwohnerzahlen in Deutschland – Alle 16 Bundesländer“, im Internet, 9.12.2016, <http://www.factfish.com/de/einwohnerzahl/deutschland>
- [3] Fact fish, „Einwohnerzahlen in Deutschland – Alle 22 Regierungsbezirke“, im Internet, 9.12.2016,  
<http://www.factfish.com/de/einwohnerzahl/deutschland/bezirke>
- [4] Stadtwerke Unna, „VDEW-Lastprofile“, im Internet, 9.12.2016:  
[http://www.gipsprojekt.de/featureGips/Gips?SessionMandant=sw\\_unna&Anwen](http://www.gipsprojekt.de/featureGips/Gips?SessionMandant=sw_unna&Anwen)

[dung=EnWGKnotenAnzeigen&PrimaryId=133029&Mandantkuerzel=sw\\_unna&Navigation=J](#)

- [5] DWD Climate Data Center (CDC): „Historische stündliche Stationsmessungen der Windgeschwindigkeit und Windrichtung“, Version v004, 2016. Im Internet, 7.12.2016: [ftp://ftp-cdc.dwd.de/pub/CDC/observations\\_germany/climate/hourly/wind/historical/](ftp://ftp-cdc.dwd.de/pub/CDC/observations_germany/climate/hourly/wind/historical/)
- [6] “The Windpower – Windparks”, im Internet, 7.12.2016: [http://www.thewindpower.net/country\\_windfarms\\_de\\_2\\_deutschland.php](http://www.thewindpower.net/country_windfarms_de_2_deutschland.php)
- [7] Wikipedia, „Logarithmisches Windprofil“, im Internet, 9.12.2016: [https://de.wikipedia.org/wiki/Logarithmisches\\_Windprofil](https://de.wikipedia.org/wiki/Logarithmisches_Windprofil)
- [8] S. Rikowski, „Windkraft-Tutorial: Leistung einer Windkraftanlage berechnen“, im Internet, 9.12.2016: <http://www.kurztutorial.info/windkraft/wind-leistung/energie.htm>
- [9] „Enercon E-82 E2 / 2,0MW – Technische Daten im Überblick“, im Internet, 9.12.2016: <http://www.enercon.de/produkte/ep-2/e-82/>
- [10] SMA, „Das leistet Photovoltaik in Deutschland“, im Internet, Daten abgerufen in 2012, aktuell am 9.12.2016 angezeigt unter: <http://www.sma.de/unternehmen/pv-leistung-in-deutschland.html>
- [11] Wikipedia, „Liste von Wasserkraftwerken in Deutschland“, im Internet, 9.12.2016: [https://de.wikipedia.org/wiki/Liste\\_von\\_Wasserkraftwerken\\_in\\_Deutschland](https://de.wikipedia.org/wiki/Liste_von_Wasserkraftwerken_in_Deutschland)
- [12] WetterKontor GmbH, “WetterKontor”, im Internet, 9.12.2016: <http://www.wetterkontor.de>
- [13] statista, „Installierte Leistung von Biogasanlagen in Deutschland nach Bundesland im Jahr 2014“, im Internet, 9.12.2016: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/164248/umfrage/installierte-leistung-von-biogasanlagen-nach-bundesland-2010-11/>
- [14] Wikipedia, „knotenpotentialverfahren“, im Internet, 9.12.2016: <https://de.wikipedia.org/wiki/Knotenpotentialverfahren>