

# MODELLBASIERTE ANALYSE DER AUSLEGUNG UND DES BETRIEBS KOMMUNALER ENERGIEVERSORGUNGSSYSTEME

Thomas BEXTEN<sup>1</sup>, Björn ROSCHER<sup>2</sup>, Daniel WEINTRAUB<sup>3</sup>, Ralf BACHMANN<sup>4</sup>,  
Ralf SCHELENZ<sup>2</sup>, Georg JACOBS<sup>2</sup>, Peter JESCHKE<sup>3</sup>, Rik W. DE DONCKER<sup>4</sup>  
Manfred WIRSUM<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institut für Kraftwerkstechnik, Dampf und Gasturbinen RWTH Aachen  
Mathieustraße 9 52072 Aachen, Tel: +49 (0) 241 80 2540,  
[office@ikdg.rwth-aachen.de](mailto:office@ikdg.rwth-aachen.de), [www.ikdg.rwth-aachen.de](http://www.ikdg.rwth-aachen.de)

<sup>2</sup> Chair for Wind Power Drives RWTH Aachen,  
Campus-Boulevard 61 52074 Aachen, Tel: +49 (0) 241 80 908 85  
[info@cwd.rwth-aachen.de](mailto:info@cwd.rwth-aachen.de), [www.cwd.rwth-aachen.de](http://www.cwd.rwth-aachen.de)

<sup>3</sup>Institut für Strahlantriebe und Turboarbeitsmaschinen RWTH Aachen  
Templergraben 55 52062 Aachen, Tel: +49 (0) 241 80 955 00,  
[office@ist.rwth-aachen.de](mailto:office@ist.rwth-aachen.de), [www.ist.rwth-aachen.de](http://www.ist.rwth-aachen.de)

<sup>4</sup>Institute for Power Generation and Storage Systems E.ON Research Center RWTH Aachen  
Mathieustraße 10 52072 Aachen, Tel: +49 (0) 241 80 49940,  
[post\\_pgs@eonerc.rwth-aachen.de](mailto:post_pgs@eonerc.rwth-aachen.de), [www.pgs.eonerc.rwth-aachen.de](http://www.pgs.eonerc.rwth-aachen.de)

**Kurzfassung:** Der Einsatz von dezentralen disponiblen Energiewandlungs- und Speicherkomponenten in kommunale Energieversorgungssystemen stellt einen Ansatz zur Bewältigung der Herausforderungen dar, die sich aus dem stetigen Zuwachs an volatilen regenerativen Stromerzeugungskapazitäten in Europa ergeben. Die Kenntnis über die resultierende technische Auslegung und die Anforderungen an die einzelnen Komponenten dieser Energieversorgungssysteme in Abhängigkeit verschiedener Randbedingungen und Systemkonfigurationen ist dabei für die erfolgreiche Weiterentwicklung dieser Systeme entscheidend. Im Rahmen des Projekts „Kommunale Energieversorgungssysteme der Zukunft“ wird an der RWTH Aachen ein Simulationswerkzeug entwickelt, welches eine detaillierte technische Analyse dieser Systeme ermöglicht. Das Simulationswerkzeug basiert dabei auf einer stationären Simulation der Interaktion von regenerativen Stromerzeugungskapazitäten mit verschiedenen disponiblen Energiewandlungs- und Speichersystemen für verschiedene Betriebsszenarien.

**Keywords:** kommunale Energieversorgungssysteme, modellbasierte Systemanalyse

## 1 Einleitung

### 1.1 Strukturwandel der Energieversorgung

Die Struktur der Energieversorgung in Deutschland und in Europa im Allgemeinen befindet sich aktuell in einem starken Wandel, der vorwiegend durch den stetigen Zuwachs an regenerativen Stromerzeugungskapazitäten geprägt ist. [1] Neben den Vorteilen einer klimaneutralen Stromerzeugung aus diesen Kapazitäten ergibt sich durch den resultierenden

hohen Anteil an der gesamten Stromerzeugung auch eine Vielzahl an technischen, ökonomischen und gesellschaftlichen Herausforderungen. Als Antwort auf diese Herausforderungen sind derzeit verschiedene Entwicklungstendenzen im Bereich der Energieerzeugung zu registrieren. Zum einen ist eine vermehrte gekoppelte Strom- und Wärmeerzeugung in kleineren dezentralen Einheiten zu beobachten. [2] Dies steht im Gegensatz zum bisherigen Schwerpunkt der Stromerzeugung in großen zentralen Kraftwerkseinheiten. Zum anderen befindet sich derzeit eine Vielzahl von Stromspeichertechnologien in verschiedenen Phasen der Entwicklung als potentieller Lösungsansatz für die hohe Volatilität und die geringe Prognostizierbarkeit der regenerativen Stromerzeugung. [3] Dies umfasst die Weiterentwicklung von bereits etablierten Technologien wie z.B. Batterie-Speichern und die Entwicklung neuer Speichertechnologien wie z.B. verschiedenen Power-to-Gas-Konzepten.

## **1.2 Projekt „Kommunale Energieversorgungssysteme der Zukunft“**

Das Projekt „Kommunale Energieversorgungssysteme der Zukunft“ ist ein Beitrag der RWTH Aachen zur Bewältigung der Herausforderungen, die sich aus den beschriebenen Entwicklungstendenzen ergeben. Das Projekt verfolgt dabei einen interdisziplinären Ansatz zur Entwicklung integrierter technischer, ökonomischer und gesellschaftlicher Lösungen für zukünftige dezentral geprägte kommunale Energieversorgungssysteme mit einem hohen Anteil regenerativer Stromerzeugung. Um die verschiedenen neuartigen Aspekte dieser Art von Energieversorgungssystemen berücksichtigen zu können, verfügt das interdisziplinäre Projektteam über Kompetenzen im Bereich der Ingenieurwissenschaften, der Ökonomie und der Sozialwissenschaften.

## **2 Stationäres Simulationswerkzeug**

Die Kenntnis über die resultierende technische Auslegung und die Anforderungen an die einzelnen Komponenten dieser Energieversorgungssysteme in Abhängigkeit verschiedener Randbedingungen und Systemkonfigurationen ist für die erfolgreiche Weiterentwicklung dieser Systeme entscheidend. Einer der Schwerpunkte des Projekts ist aus diesem Grund die Entwicklung eines Simulationswerkzeugs, welches eine detaillierte technische Analyse dieser Systeme ermöglicht.

### **2.1 Zielsetzung**

Das frei parametrierbare Simulationswerkzeug ermöglicht die Durchführung von Analysen der Dimensionierung und der Betriebsweise der einzelnen Teil-Systeme eines kommunalen Energieversorgungssystems für verschiedene Randbedingungen und Betriebsstrategien. Im Rahmen der Simulationsrechnungen werden die resultierenden Konfigurationen und der zeitlich aufgelöste Einsatz aller Komponenten des Energieversorgungssystems auf Basis der definierten Eingangsparameter mit Hilfe eines stationären Simulationsmodells für einen Referenzzeitraum bestimmt. Der Fokus der Analyse liegt auf den disponiblen Energiewandlungs- und Speichersystemen hinsichtlich der Leistungs- und Kapazitätsdimensionierung, den Anforderungen an die betriebliche Flexibilität und der relativen Auslastung der Komponenten. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit,

Steigerungen der Flexibilität oder der Effizienz einzelner Komponenten im Kontext des gesamten Energieversorgungssystems zu bewerten.

## 2.2 Methodik

Das Simulationswerkzeug basiert auf einer Vernetzung verschiedener modularer stationärer Komponenten-Modelle des Energieversorgungssystems mit Leistungs- und Lastprofilen in MATLAB/Simulink [4] und ermöglicht die Simulation des Systembetriebs mit einer zeitlichen Auflösung von einer Minute.

### 2.2.1 Randbedingungen

In einem ersten Schritt erfolgt die Definition der Randbedingungen des zu analysierenden kommunalen Energieversorgungssystems. Die Randbedingungen umfassen das Profil der Stromerzeugung aus regenerativen Erzeugungskapazitäten (Windenergieanlagen und Photovoltaikanlagen) und das Profil der lokalen Stromlast im betrachteten Referenzzeitraum. Auf Basis der beiden Profile wird das resultierende Residuallastprofil berechnet. Stehen die entsprechenden Leistungsprofile für den Referenzzeitraum als Messdaten zur Verfügung, können diese direkt für die Berechnung der Residuallast verwendet werden. Liegen die Profile nicht als Messdaten vor, können diese durch vorgelagerte Simulationsrechnungen erzeugt werden. Im Folgenden sind die Modelle, die diesen Simulationsrechnungen zu Grunde liegen, beschrieben.

#### Windenergieanlagen-Modell

Das verwendete Windenergie-Einspeisemodell besteht aus den drei Komponenten: Windverteilung, Leistungskurve der Turbine und Windparkeffekte.

Je nach Standort und Jahreszeit kann die Windverteilung stark variieren. Um dennoch eine Aussage machen zu können, lassen sich mit der Weibullverteilung die Häufigkeiten einzelner Windgeschwindigkeiten beschreiben. Hierfür werden der Formparameter  $k$  und die gemittelte Windgeschwindigkeit  $A$  des Standorts benötigt. Jedoch berücksichtigt diese Methode keine saisonalen Effekte, weswegen historische Wetterdaten in das modellierte Windprofil integriert werden. Die verwendeten Wetterdaten des Deutschen Wetterdienstes [5] enthalten gemittelte Windgeschwindigkeiten mit einer stündlichen Auflösung. Für die Betrachtung von Speichersystemen wird ein Windprofil mit einer Minutenauflösung benötigt. Die historischen Daten werden als Eingangswerte für TurbSim [6] verwendet. Die Software des National Research Energy Laboratories ermöglicht die Modellierung eines turbulenten Windfeldes mit einer vordefinierten gemittelten Windgeschwindigkeit für eine beliebige Auflösung. Die einzelnen turbulenten Windfelder werden in iterativen Schritten zusammengeführt bis die Verteilung des erstellten Windprofils mit der Weibullverteilung einzelner, aussagekräftiger Jahre übereinstimmt. Es werden ein windschwaches, ein normales und ein windstarkes Jahr (2007, 2008 und 2010) ausgewählt.

Die Leistungskurve der Turbine, die für diese Ausarbeitung zugrunde liegt, beruht auf der Funktion:

$$P = \frac{1}{2} * \rho * C_p * V^3 * \pi * R^2 \quad (1)$$

Wobei  $P$  der erzeugten Leistung entspricht,  $\rho$  der Dichte der Luft mit  $1.225 \text{ kg/m}^3$ ,  $C_p$  dem Leistungskoeffizient des Rotors mit einem angenommenen Wert von  $0,48$ ,  $V$  der Windgeschwindigkeit und  $R$  dem Rotorradius.

Schlussendlich ist für eine repräsentative Betrachtung der Effekt der Platzierung der Windturbinen zu berücksichtigen. Aufgrund des Windschattens und Verwirbelungen anderer Turbinen kann die eigentliche Energieeinspeisung stark variieren, daher ist ein Mindestabstand des 8-fachen Rotordurchmessers zu empfehlen, um somit Verluste von bis zu  $30\%$  zu vermeiden. Viele Standorte besitzen eine häufig auftretende und eine selten auftretende Windrichtung. In der selten auftretenden Richtung können die Turbinen näher platziert werden, wodurch Bauraum eingespart werden kann. Zur korrekten Darstellung dieser Verluste wird das Katic-Wake-Model [7] verwendet. Es ermöglicht, die reduzierte Windgeschwindigkeit in einem beliebigen Abstand hinter einer Turbine zu errechnen, wobei die erhöhte Turbulenz vernachlässigt wird. Dennoch ist diese Modellierung für eine globale Betrachtung aussagekräftig. Der dadurch ermittelte Verlust wird mit der erzeugten Leistung multipliziert und somit als Einspeiseprofil für spätere Arbeitsschritte verwendet.

### Photovoltaikanlagen-Modell

Das Modell des Photovoltaikmoduls (PV-Modul) basiert auf dem Ersatzschaltbild einer Photovoltaikzelle (PV-Zelle) entsprechend [8]. Das Verhalten des PV-Moduls kann mit einer variablen Stromquelle, einem Parallelwiderstand  $R_p$  und einem Reihenwiderstand  $R_s$ , wie in Abbildung 1 dargestellt, abgebildet werden.

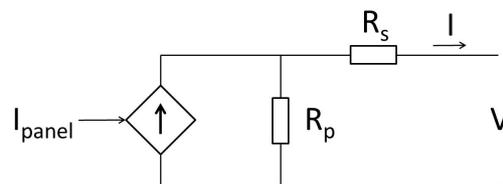


Abbildung 1 – Ersatzschaltbild eines PV-Moduls.

Der erzeugte Strom  $I_{panel}$  ist abhängig von den Spezifikationen des PV-Moduls und der einfallenden Sonneneinstrahlung. Der analytische Zusammenhang ist in folgender Gleichung dargestellt:

$$I_{panel} = I_{pv} - I_0 \left[ e^{\left( \frac{V + R_s I}{V_t a} \right)} - 1 \right] \quad (2)$$

wobei  $V_t$  der thermischen Spannung des Array mit  $N_s$  in Reihe geschalteten Zellen,  $a$  dem Dioden-Idealitätsfaktor,  $I_0$  dem Sättigungsstrom und  $I_{pv}$  dem zur Sonneneinstrahlung proportionalen Strom entspricht.

### Stromlast-Modell

Die Modellierung der Stromlast erfolgt auf Basis der Standard-Lastprofile des BDEW [9]. Diese Standardlastprofile geben den relativen Stromverbrauch für verschiedene Verbrauchergruppen (z.B. Haushalte, Gewerbe, etc.) innerhalb eines Jahres in 15-Minuten-Intervallen an. Im Rahmen der Parametrierung des Stromlastmodells wird die zu analysierende Verbraucherstruktur in die vordefinierten Verbrauchergruppen unterteilt und mit Hilfe des bekannten Jahresverbrauchs skaliert.

## 2.2.2 Übergeordnete System-Betriebsstrategie und disponible Energiewandlungs- und Speicherkomponenten

Nach der Berechnung des Residuallastprofils erfolgt die Auswahl der übergeordneten Betriebsstrategie des kommunalen Energieversorgungssystems durch den Anwender des Simulationswerkzeugs. Die übergeordnete Betriebsstrategie definiert die Zielsetzung, die durch die Koppelung der volatilen regenerativen Erzeugungskapazitäten mit den disponiblen Energiewandlungs- und Speichersystemen realisiert werden soll. Eine solche Zielsetzung kann beispielsweise die vollständige Autarkie des betrachteten Energieversorgungssystems oder eine Verstetigung der Interaktionen mit den übergeordneten Strom- und Wärmeversorgungsnetzen für ein definiertes Zeitintervall sein. Entsprechend der gewählten übergeordneten Betriebsstrategie ergibt sich ein angepasstes Residuallastprofil welches durch die disponiblen Energiewandlungs- und Speichersysteme abgedeckt werden muss. Dieses angepasste Residuallastprofil wird im Folgenden als lokales Residuallastprofil bezeichnet.

Parallel zur Auswahl der übergeordneten Betriebsstrategie erfolgt die Auswahl und Parametrierung der Modelle der disponiblen Energiewandlungs- und Speichersysteme durch den Anwender. In diesem Schritt wird definiert, welche disponiblen Systeme dem betrachteten Energieversorgungssystem zur Abdeckung der entstehenden lokalen positiven und negativen Residuallasten grundsätzlich zur Verfügung stehen, und wie diese parametrierung sind. Die Parametrierung der Modelle ermöglicht die Abbildung realer Energiewandlungs- und Speichersysteme in der Simulationsrechnung und die Analyse der resultierenden Anforderungen an diese Systeme. Die Modelle der verschiedenen Systeme sind entweder direkt in MATLAB/Simulink hinterlegt oder die Integration in das Gesamtmodell erfolgt durch entsprechende Kennfelder. In diesem Fall werden die Kennfelder mit Hilfe spezialisierter Simulationswerkzeuge einzelner Komponenten erstellt. Im Folgenden sind die Modellierung und exemplarische Parametrierung einer Gasturbine und eines Elektrolyseurs als disponible Energiewandlungssysteme und die Modellierung einer Batterie als disponibler Energiespeicher im Detail dargestellt.

### Gasturbinen-Modell

Der Gasturbinen-Wirkungsgrad ist primär von der Anlagenauslegung abhängig und steigt im Allgemeinen mit der Nennleistung. Die im Betrieb erreichte Effizienz ist von den Umgebungsbedingungen abhängig und variiert je nach abgeforderter Leistung. Stehen über die Brennstoffmenge hinaus weitere Regelungsstellgrößen zur Verfügung, beispielsweise verstellbare Leitschaufeln bei einwelligen Gasturbinen, hat auch die Regelungsstrategie einen Einfluss auf den Teillastwirkungsgrad [10]. Um diese Zusammenhänge im Simulationswerkzeug des Energieversorgungssystems zu berücksichtigen, werden mit der Software GasTurb 12 [11] Gasturbinenrechenmodelle erstellt. Hier wird beispielhaft das Modell einer Gasturbine der 2-MW<sub>el</sub>-Leistungsklasse beschrieben. Es handelt sich um eine Anlage in Einwellenbauart mit zweistufigem Radialverdichter und dreistufiger Axialturbine. Eine Auswahl der wichtigsten Eigenschaften im Volllastzustand und ISO-Umgebungsbedingungen ist in Tabelle 1 aufgeführt. Als Brennstoff wird Erdgas angenommen.

Elektrische Leistung	[kW]	1630
Heat Rate	[kJ/kW-h]	13870
Abgastemperatur	[°C]	526
Massenstrom	[kg/s]	8,00
Verdichterdruckverhältnis	[-]	10,5
Drehzahl	[rpm]	22000

Tabelle 1: Auslegungspunkt der Gasturbine

Die Modellierung nach [12] beginnt mit der Definition des thermodynamischen Kreisprozesses am Auslegungspunkt. Die Turbineneintrittstemperatur, Komponentenwirkungsgrade, Parameter des Sekundärluftsystems sowie weitere Verlustbeiträge werden technisch sinnvoll so gewählt, dass der resultierende Kreisprozess die Werte der Tabelle 1 möglichst genau wiedergibt. Für die Nachrechnung bei veränderlichen Betriebsbedingungen werden skalierte Verdichter- und Turbinenkennfelder verwendet, die dem Technologiestand der modellierten Gasturbine entsprechen. Das Regelungssystem hält die Drehzahl unabhängig vom Lastmoment des Generators, welches die abgeforderte elektrische Leistung repräsentiert, konstant. Darüber hinaus stellt es die Einhaltung struktureller und thermischer Grenzen sicher, indem es die elektrische Leistung und die Abgastemperatur auf Maximalwerte beschränkt.

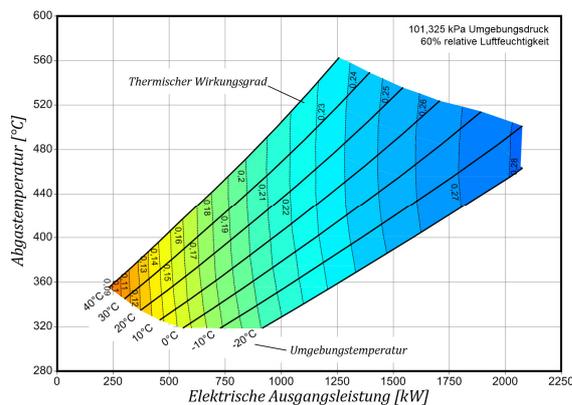


Abbildung 2: Auswertung des Gasturbinenmodells bei verschiedenen Temperaturen u. Leistungsanforderungen

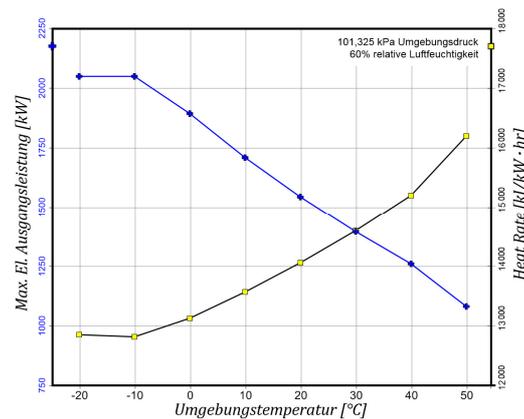


Abbildung 3: Leistung der Gasturbine bei Vollast und verschiedenen Temperaturen

Das resultierende Modell kann für verschiedene Umgebungsbedingungen und Lastfälle ausgewertet werden und erlaubt präzise Aussagen über die zur Verfügung gestellten Strom- und Wärmemengen sowie den Wirkungsgrad im Betrieb und optional auch über weitere Größen, wie etwa Bauteiltemperaturen für eine Lebensdaueranalyse. In Abbildung 2 sind beispielhaft die Ergebnisse einer Studie des Einflusses der Umgebungstemperatur auf den thermischen Wirkungsgrad der Gasturbine sowie die Abgastemperatur dargestellt. Der thermische Wirkungsgrad ist hier als Quotient der Gasturbinenwellenleistung und des Produktes aus Brennstoffmassenstrom und -heizwert definiert. In Abbildung 3 ist die bei verschiedenen Temperaturen maximal erzeugbare elektrische Leistung aufgeführt. Diese Daten werden gemeinsam mit weiteren Leistungswerten, z.B. dem Abgasmassenstrom, im Kennfeldformat in das MATLAB/Simulink-Modell des gesamten Energieversorgungssystems integriert.

### Elektrolyseur-Modell

Das Modell des Elektrolyseurs basiert auf der empirischen Modellierung eines alkalischen Elektrolyseurs durch [13]. Der Zusammenhang zwischen der Erzeugung von Wasserstoff und dem dafür benötigten elektrischen Strom wird durch folgenden Funktion beschrieben:

$$\dot{n}_{H_2} = \eta_F * \frac{n_c * I}{z * F} \quad (3)$$

wobei  $\dot{n}_{H_2}$  der molaren Wasserstoffproduktion,  $\eta_F$  dem Faraday-Wirkungsgrad,  $n_c$  der Anzahl an seriellen Zellen pro Stack,  $I$  der Stromstärke,  $z$  der Anzahl an pro Reaktion übertragenen Elektronen und  $F$  der Faraday-Konstante entspricht.

Der Faraday-Wirkungsgrad berücksichtigt parasitäre Stromverluste des Elektrolyseurs und wird im Rahmen der Modellierung durch die in Abbildung 4 dargestellte Charakteristik in Abhängigkeit der Betriebstemperatur und der Stromdichte (Stromstärke bezogen auf die aktive Zellfläche) berücksichtigt. Der Zusammenhang zwischen dem benötigten elektrischen Strom und der elektrischen Leistung des Elektrolyseurs wird mit Hilfe der in Abbildung 5 dargestellten U-I-Charakteristik dargestellt. Die U-I-Charakteristik berücksichtigt die notwendige Zellspannung zur Erzeugung des Wasserstoffs und alle weiteren elektrischen Widerstände des Systems in Abhängigkeit der Stromdichte und der Betriebstemperatur.

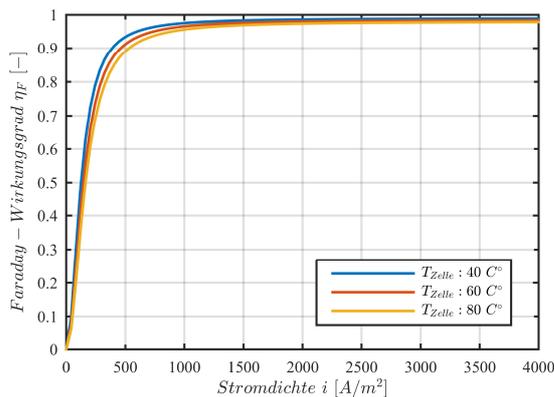


Abbildung 4: Faraday-Wirkungsgrad-Charakteristik

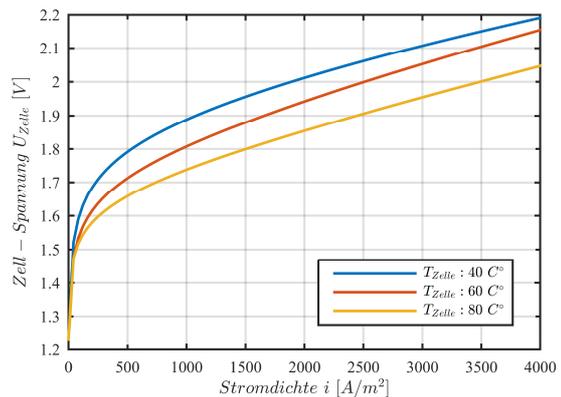


Abbildung 5: U-I-Charakteristik

Die im Rahmen der Modellierung verwendete U-I-Charakteristik und die Charakteristik des Faraday-Wirkungsgrades werden als unabhängig von der weiteren Parametrierung des Modells angenommen und basieren auf experimentellen Analysen von alkalischen Elektrolyseuren. [13] [14] In die vollständige Parametrierung des Modells fließen Angaben über die nominelle elektrische Leistung, die aktive Zellfläche, die zulässige Stromdichte und die Betriebstemperatur ein. Für die exemplarische Simulationsrechnung in Abschnitt 3 wird beispielsweise eine nominelle elektrische Leistung von 650 kW, eine aktive Zellfläche von 0,25 cm², eine zulässige Stromdichte von 4000 A/m² und ein konstante Betriebstemperatur von 80 °C angenommen.

### Batterie-Modell

Das Batterie-Modell zur Simulation des Betriebsverhaltens eines Batterie-Speichers basiert auf der Integration der Lade- und Entladeleistung der Batterie. Die Sollwertvorgabe für die Entlade- bzw. Ladeleistung entstammt der übergeordneten Systemsteuerung und wird erfüllt, solange die Batterie innerhalb eines definierten Bereichs erlaubter Ladezustände (State of

Charge - SOC) betrieben wird. Ein SOC von 100 % repräsentiert dabei eine voll aufgeladene Batterie. Durch die Multiplikation mit dem Speicher-Wirkungsgrad werden anschließend die Verluste beim Laden und Entladen des Batteriespeichersystems berücksichtigt. Der SOC wird auf Basis der Integration der Leistung berechnet. Dynamische Effekte aufgrund von Temperaturänderungen, Betriebsverhalten und anderen Faktoren sind in diesem Modell zur Vereinfachung nicht berücksichtigt.

Nach der Parametrierung der Komponentenmodelle wird durch den Anwender definiert, welche disponiblen Komponenten im Rahmen der Auslegung des Energieversorgungssystems hinsichtlich Leistung und Kapazität (bzw. Anzahl an einzusetzenden Einheiten) festgelegt sind und welche frei dimensioniert werden können. Um eine Umsetzung der gewählten übergeordneten Betriebsstrategie zu gewährleisten, muss mindestens eine der Komponenten hinsichtlich ihrer Leistung und ggf. ihrer Kapazität frei dimensionierbar sein. In einem letzten Schritt muss der Nutzer eine Priorisierung der grundsätzlich zur Verfügung stehenden disponiblen Systeme vornehmen. Dies ist notwendig wenn positiv und negativ auftretende lokale Residuallasten potentiell durch mehrere Systeme abgedeckt werden können. Durch die Priorisierung wird festgelegt, welche disponiblen Systeme bei Auftreten entsprechender Residuallasten bevorzugt aktiviert werden.

### **2.3 Berechnungsalgorithmus**

Nach der Definition der Randbedingungen, der übergeordneten Systembetriebsstrategie und der verfügbaren disponiblen Energiewandlungs- und Speichersysteme erfolgt die Berechnung der Leistung und der Kapazität der dimensionierbaren disponiblen Systeme und des zeitlich aufgelösten Einsatzes aller Systeme innerhalb des betrachteten Referenzzeitraums. Die Berechnung erfolgt dabei in einem iterativen Prozess. In einem ersten Schritt wird eine vereinfachte Auslegung der Leistung und ggf. der Kapazität der dimensionierbaren Komponenten vorgenommen. Die vereinfachte Auslegung basiert ausschließlich auf dem berechneten lokalen Residuallastprofil und vereinfachten Effizienz-Charakteristika aller Komponenten und dient als Basis für die detaillierte Simulation des Betriebs des Energieversorgungssystems innerhalb des betrachteten Referenzzeitraums. Die detaillierte Simulation zeichnet sich durch die Implementierung einer übergeordneten Steuerungssystematik der disponiblen Komponenten aus, welche die zulässigen Leistungsgradienten und weitere Restriktionen der Systemkomponenten wie z.B. An- und Abfahrprozesse berücksichtigt. Nach einer internen Überprüfung der Ergebnisse der detaillierten Simulationsrechnung wird die Leistungs- und Kapazitätsdimensionierung der Komponenten iterativ angepasst bis eine erfolgreiche Umsetzung der vorgegebenen Systembetriebsstrategie unter Berücksichtigung der Restriktionen aller Systemkomponenten erreicht ist.

### **2.4 Ergebnisauswertung**

Der Fokus der Ergebnisanalyse der detaillierten Simulationsrechnung liegt zum einen auf der resultierenden Leistung und ggf. Kapazität der disponiblen Komponenten, die im Rahmen des beschriebenen iterativen Prozesses zur freien Dimensionierung zur Verfügung standen. Die Ergebnisse der detaillierten Simulationsrechnungen geben dem Anwender somit

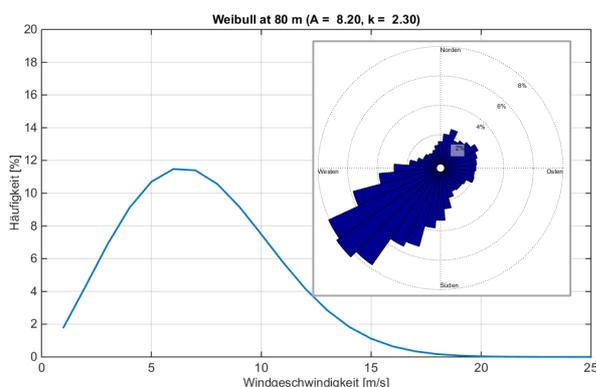
beispielsweise Hinweise auf den Einfluss verschiedener übergeordneter Betriebsstrategien auf die resultierende Dimensionierung der disponiblen Komponenten des Energieversorgungssystems. Ein weiterer Schwerpunkt der Ergebnisanalyse liegt auf den resultierenden Anforderungen an die betriebliche Flexibilität der disponiblen Komponenten des betrachteten Energieversorgungssystems. Dies umfasst beispielsweise die Anzahl an An- und Abfahrvorgängen und die Häufigkeit von maximalen Leistungsgradienten innerhalb des betrachteten Referenzzeitraums. Diese Parameter können Hinweise auf die Belastungen der einzelnen Komponenten geben und ggf. Potentiale für Verbesserungen aufzeigen.

### 3 Exemplarische Simulationsrechnung

Das Simulationswerkzeug befindet sich in einer fortgeschrittenen Entwicklungsphase. Der Fokus der aktuellen Entwicklungsarbeiten liegt auf der Automatisierung der beschriebenen Methodik. Die Funktionalität des beschriebenen Simulationswerkzeugs und die Ergebnisauswertung sollen im Folgenden an Hand einer exemplarischen Simulationsrechnung demonstriert werden.

#### 3.1 Eingangparameter

Im Folgenden sind die Ergebnisse einer vereinfachten exemplarischen Simulationsrechnung für eine Kommune mit ca. 16000 Einwohnern dargestellt, deren Verbraucherstruktur vorwiegend durch Haushalte geprägt ist. Als regenerative Erzeugungskapazitäten stehen ein Windpark mit acht 3-MW<sub>el</sub>-Windenergieanlagen und 1200 Photovoltaikanlagen mit einer modularen Leistung von 5 kW<sub>el-peak</sub> zur Verfügung. Die Profile der regenerativen Stromerzeugung und der Stromlast werden mit Hilfe der in Abschnitt 2.2.1 beschriebenen Methodik erzeugt. Das Windprofil und das Profil der solaren (globalen horizontalen) Einstrahlung entsprechen Werten eines Standorts im Großraum Aachen. In Abbildung 6 und in Tabelle 2 sind die entsprechende Weibullverteilung der Windgeschwindigkeit und die Windrichtungsverteilung für ein normales Windjahr beziehungsweise die Parameter der Windenergieanlagen dargestellt. Zur Parametrierung der Photovoltaikanlagen sind Module des Typs Trina Solar TSM 235 berücksichtigt worden. Es werden fünf parallele Strings mit jeweils fünf in Reihe geschalteten Modulen angenommen.



Nennleistung	[kW]	3000
Einschaltgeschwindigkeit	[m/s]	3,5
Abschaltgeschwindigkeit	[m/s]	28
Rotordurchmesser	[m]	101
Nabenhöhe	[m]	90

Abbildung 6: Windgeschwindigkeits-Weibullverteilung und Windrichtungsverteilung      Tabelle 2: Auslegungsparameter Windenergieanlage

Für die exemplarische Simulationsrechnung soll durch die übergeordnete Betriebsstrategie eine Verstetigung des Strombezugs bzw. der Stromabgabe in das übergeordnete Netz in 15-Minuten-Intervallen realisiert werden. Als Referenzzeitraum wird ein Jahr betrachtet. Als disponible Komponenten stehen eine Gasturbine, ein Elektrolyseur und ein Batterie-Speicher mit der in Abschnitt 2.2.2 beschriebenen Parametrierung zur Verfügung. Um die Umsetzung der gewählten Betriebsstrategie zu gewährleisten soll der Batterie-Speicher hinsichtlich seiner Leistung und Kapazität frei dimensionierbar sein. Die Gasturbine wird partiell zur Abdeckung einer konstanten Wärmelast eingesetzt, sodass nur der obere Teil des Leistungsbandes der Gasturbine zur Abdeckung variabler positiver Residuallasten eingesetzt werden kann. Innerhalb dieses Leistungsbandes ist der zulässige Leistungsgradient auf 160 kW/min begrenzt. Hinsichtlich des zulässigen Leistungsgradienten des Elektrolyseurs und der Batterie werden vereinfachend keine Einschränkungen angenommen.

### 3.2 Ergebnisauswertung

Im Folgenden sollen einige Aspekte der resultierenden Dimensionierung des Energieversorgungssystems und der Anforderungen an die betrieblichen Flexibilität der Komponenten betrachtet werden.

In Abbildung 7 sind der Verlauf der regenerativen Stromerzeugung aus Sonne und Wind und der Verlauf der kommunalen Stromlast für einen exemplarischen Tag innerhalb des Referenzzeitraums dargestellt. Darüber hinaus ist der resultierende Residuallastverlauf dargestellt, der sich aus der Differenz der regenerativen Stromerzeugung und der Stromlast ergibt. Die Abbildung zeigt deutliche Unterschiede in den Eigenschaften der regenerativen Stromerzeugung aus Sonne und Wind auf. Die Stromerzeugung aus Photovoltaikanlagen ist zwischen Sonnenauf und -untergang durch einen stetigen Verlauf geprägt, der zur Mittagszeit ein ausgeprägtes Maximum aufweist. Im Gegensatz dazu weist die Stromerzeugung aus Windenergieanlagen einen deutlich unstetigeren Verlauf auf, der durch eine hohe Volatilität geprägt ist. Durch den hohen Anteil der Windenergieanlagen an der gesamten Stromerzeugung im Rahmen des betrachteten Szenarios weist auch der Residuallastverlauf hinsichtlich der Volatilität eine vergleichbare Charakteristik auf.

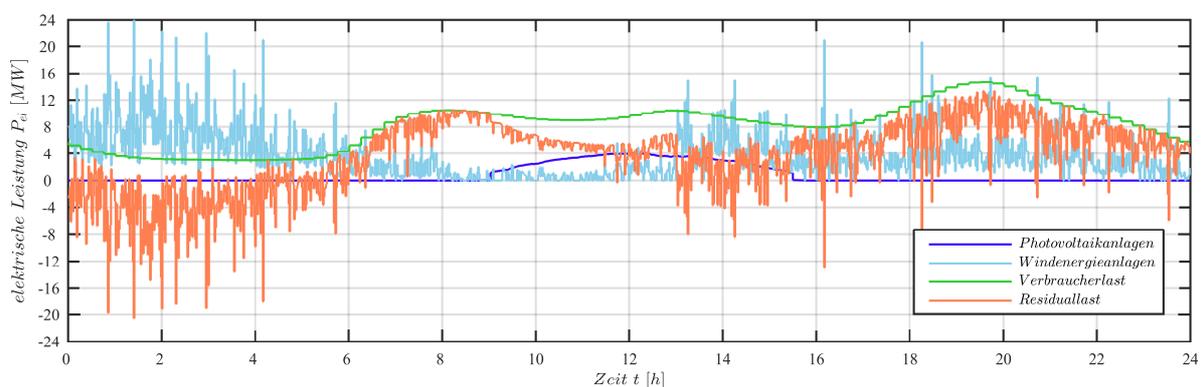


Abbildung 7: Verlauf der regenerativen Stromerzeugung, der Stromlast und der Residuallast

Entsprechend der definierten übergeordneten Betriebsstrategie wird ein Teil der Residuallast durch den partiellen Grundlastbetrieb der Gasturbine und einen konstanten Strombezug bzw. eine konstante Stromabgabe aus dem übergeordneten Stromnetz in 15-Minuten-Intervallen abgedeckt. Alle Abweichungen der anliegenden Residuallast von diesem konstanten Wert

(lokale Residuallast) müssen durch die disponiblen Energiewandlungs- und Speichersystem des Energieversorgungssystems innerhalb der Intervalle kompensiert werden. In Abbildung 8 sind die entsprechenden Verläufe für den exemplarischen Tag dargestellt. Es wird deutlich, dass der Mittelwert der lokalen Residuallast im Gegensatz zur gesamten Residuallast zwar deutlich verringert ist, die lokale Residuallast aber weiterhin eine hohe Volatilität und Unstetigkeit aufweist.

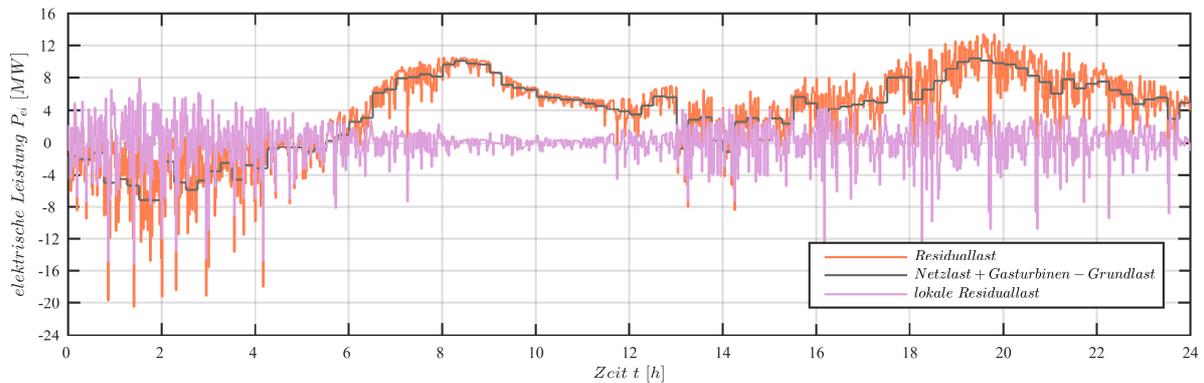


Abbildung 8: Verlauf der Residuallast, der Netzlast und der lokalen Residuallast

Die lokale Residuallast muss durch das variable Leistungsband der Gasturbine, den Elektrolyseur und die Batterie bereitgestellt werden. In Abbildung 9 ist der entsprechende Einsatz dieser Komponenten in einem exemplarischen Zeitabschnitt von einer Stunde dargestellt. In Bereichen positiver lokaler Residuallast wird deutlich, dass die Gasturbine die Volatilität der Residuallast aufgrund des begrenzten Leistungsgradienten nicht vollständig kompensieren kann. Der Einsatz der Batterie zur Kompensation der Volatilität in diesem Lastbereich ist in der betrachteten Systemkonfiguration demnach unabdingbar notwendig. Im Bereich der negativen lokalen Residuallast kann der Elektrolyseur die Volatilität der Residuallast zwar kompensieren, dies führt allerdings zu einer hohen Häufigkeit an An- und Abfahrvorgängen der Komponente. Da der Leistungsbereich des Elektrolyseurs nicht den gesamten negativen Residuallastbereich abdeckt, ist allerdings auch hier der Einsatz des Batterie-Speichers notwendig.

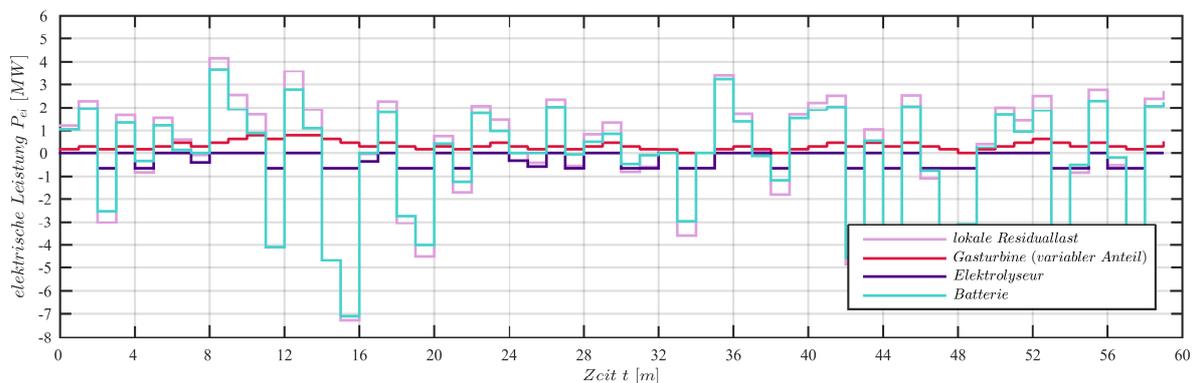
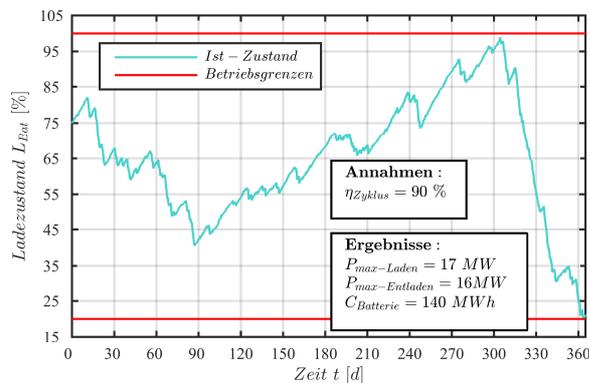


Abbildung 9: Einsatz der disponiblen Komponenten

Die resultierende Dimensionierung des Batteriespeichers und die Anforderungen an die betriebliche Flexibilität der Gasturbine (GT) und des Elektrolyseurs (EZ) innerhalb des Referenzzeitraums sind in Abbildung 10 und in Tabelle 3 dargestellt. Die maximalen Be- und Entladeleistung der Batterie resultiert aus der hohen Volatilität der lokalen Residuallast. Die

hohe Speicherkapazität ist ein Hinweis darauf, dass die lokale Residuallast bzw. der Anteil, der durch die Batterie bereitgestellt werden muss, sich nicht kurzfristig ausgleicht, sondern dass der Ausgleich innerhalb längerfristiger Zeiträume erfolgt.



		GT	EZ
Startvorgänge	[-]	0	101411
Volllaststunden	[h]	6021	3271
max. positiver Leistungsgrad.	[kW/min]	160	650
max. negativer Leistungsgrad.	[kW/min]	160	650

Abbildung 10: Dimensionierung der Batteriespeichers

Tabelle 3: Flexibilitätsanforderungen an GT und EZ

## 4 Fazit und Ausblick

Das beschriebene Simulationswerkzeug ermöglicht die Analyse der resultierenden Auslegung und der Anforderungen an die betriebliche Flexibilität von disponiblen Systemkomponenten in kommunalen dezentralen Energieversorgungssystemen mit hohen Anteilen an regenerativer Stromerzeugung.

Die exemplarische Simulationsrechnung zeigt zum einen deutlich, dass die hohe Volatilität der regenerativen Stromerzeugung bzw. die resultierende hohe Volatilität der Residuallast hohe Anforderungen an die betriebliche Flexibilität (i.e. Anzahl an Startvorgängen und Leistungsgradienten) der disponiblen Komponenten stellt. Zum anderen verdeutlicht die durchgeführte Simulationsrechnung, dass bereits die Zielsetzung einer kurzfristigen Verstetigung der Interaktion des kommunalen Energieversorgungssystems mit dem übergeordneten Stromnetz in hohen benötigten Lade- und Entladeleistungen und Speicherkapazitäten eines exemplarischen Batteriespeichers resultiert. Diese Art von Information kann beispielsweise die Basis für eine gezielte Weiterentwicklung einzelner Komponenten des betrachteten Energieversorgungssystems sein oder den Ausgangspunkt für eine Anpassung der Betriebsstrategie des Gesamtsystems darstellen.

Der aktuelle Fokus der Weiterentwicklung des Simulationswerkzeugs liegt auf einer zunehmenden Automatisierung der Definition der Randbedingungen, der Parametrierung der Modelle der disponiblen Systeme und der Ergebnisauswertung auf Basis der Eingaben des Nutzers. Darüber hinaus konzentrieren sich die aktuellen Entwicklungsaktivitäten auf eine Erweiterung der Modellbibliothek, um beispielsweise auch die Nutzung der Abwärme der disponiblen Komponenten abbilden zu können.

## 5 Danksagung

Die Autoren bedanken sich für die Förderung des Forschungsvorhabens „Kommunale Energieversorgungssysteme der Zukunft“ durch den Strategiefonds der RWTH Aachen.

## 6 Literaturverzeichnis

- [1] Hohmeyer, O. H. and S. Bohm (2015). "Trends toward 100% renewable electricity supply in Germany and Europe: a paradigm shift in energy policies." *Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment* 4(1): 74-97
- [2] Anaya, K. L. and M. G. Pollitt (2015). "Integrating distributed generation: Regulation and trends in three leading countries." *Energy Policy*.
- [3] Denholm, P. and M. Hand (2011). "Grid flexibility and storage required to achieve very high penetration of variable renewable electricity." *Energy Policy* 39(3): 1817-1830.
- [4] The Mathworks Inc, MATLAB/Simulink R2014b, <http://de.mathworks.com/products/matlab/> (Zugriff: 31.01.2016)
- [5] WebWerdis (Web-based Weather Request and Distribution System), Deutscher Wetterdienst (DWD), [https://werdis.dwd.de/werdis/start.js\\_JSP.do](https://werdis.dwd.de/werdis/start.js_JSP.do) (Zugriff: 02.02.2015)
- [6] TurbSim, *A stochastic, full-field, turbulence simulator primarily for use with InflowWind/ AeroDyn- based simulation tools*, N. Kelley and B. Jonkmann, <https://nwtc.nrel.gov/TurbSim> (Zugriff: 02.02.2015)
- [7] I. Katic, J. Hostrup, N.O.Jensen – A simple Model for cluster efficiency, European Wind Energy Association, Conference and Exhibition, 7-9 October 1986, Rome, Italy
- [8] M. G. Villalva, J. R. Gazoli and E. R. Filho, "Modeling and Circuit-Based Simulation of Photovoltaic Arrays," in *Proceedings of the Power Electronics Conference (COBEP'09)*, pp. 1244-1254, 2009
- [9] NEW Netz GmbH, <https://www.new-netz-gmbh.de/stromnetz/netzzugang/lastprofile/> (Zugriff: 31.01.2016)
- [10] Lechner, C. und Seume, J., 2010. *Stationäre Gasturbinen. 2., neu bearbeitete Auflage*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.
- [11] GasTurb GmbH, 2016. *GasTurb 12*, [www.gasturb.de](http://www.gasturb.de).
- [12] Kurzke, J., 2005. *How to Create a Performance Model of a Gas Turbine from a Limited Amount of Information*. *Proceedings of Turbo Expo 2005*, GT2005-68536, Reno-Tahoe, Nevada, USA, 6.-9. Juni 2005.
- [13] Ulleberg, O. (2003). "Modeling of advanced alkaline electrolyzers: a system simulations approach." *International Journal of Hydrogen Energy* 28: 21-99.
- [14] Steeb H, AbaOud H. HYSOLAR: German–Saudi joint program on sola hydrogen. *Prod Util Phase* 1996;II:1992–5.