

Optimaler Aufbau von Batteriesystemen für Windkraftanlagen

Optimal battery system design for wind power plants

Dipl.-Ing., Sebastian König, Prof. Dr.-Ing, Thomas Leibfried, KIT, Karlsruhe, Deutschland, sebastian.koenig@kit.edu

Dipl.-Ing., Frank Wandschneider, Dipl.-Ing., Simon Röhm, Dr., Peter Fischer, Fraunhofer-ICT, Karlsruhe, Deutschland, frank.wandschneider@ict.fraunhofer.de

Kurzfassung

Die Modellierung, Simulation und Optimierung eines großen Batteriespeichersystems wird am Beispiel der Vanadium-Redox-Flow-Batterie (VRFB) präsentiert. Das vorgestellte multiphysikalische Gesamtmodell spiegelt das elektrochemische und das hydraulische Verhalten der Batterie wieder. Der elektrische Teil enthält auch eine in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer ICT in Pfinztal/Berghausen entworfene Modellierung der sogenannten Streustromverluste, welche in Flussbatterien auftreten. Das Energiewandlungssystem (EWS) ist in Wirkungsgradkurven hinterlegt, die zuvor in detaillierten Simulationen ermittelt wurden. Durch die Implementierung des hydraulischen Systems sind auch die Pumpverluste der Flussbatterie bestimmbar.

Durch die Modellierung und Simulation des Gesamtsystems wird der optimale innere Aufbau der Batterie identifiziert. Neben der Dimensionierung des hydraulischen Kreises, wird die parallele und serielle Verschaltung der Batteriestacks zu Strängen und Modulen optimiert. Der Modellaufbau in Matlab/Simulink ist weitgehend automatisiert. Dadurch ist es in Zukunft möglich, eine große Anzahl von Aufbauvarianten des Batteriesystems aufzubauen und zu validieren. Die Ergebnisse und Parameter von vier verschiedenen Aufbauvarianten werden präsentiert und diskutiert.

Abstract

Modeling, simulation and optimization of large energy battery energy storage systems is presented using the example of the vanadium-redox-flow-battery. The multi-physical overall model reflects the electrical and the hydraulic behavior of the battery. The electrical model includes the modeling of stray currents, which occur in flow-batteries. The stray current model has been developed in cooperation with the Fraunhofer Institute for Chemical Technology (ICT) in Pfinztal/Berghausen. The energy conversion system is implemented using efficiency curves, which have been determined in detailed simulations. By implementing the hydraulic system, the flow-battery pump losses can be analyzed.

The optimal inner design of the battery is identified by modeling and simulating the overall system. Beside the dimensioning of the hydraulic circuit, the battery stack connection in parallel and in series to form strings and modules is optimized. The system modeling in Matlab/Simulink is nearly fully automated. This allows the consideration of a big number of battery design variations. The results and parameters of three different design variations are presented and discussed.

1 Einleitung

Die Windenergie wird einen großen Teil der durch die Energiewende benötigten zusätzlichen Erzeugungskapazität zur Verfügung stellen. Um die fluktuierende Natur des Windes auszugleichen, müssen jedoch große Speichersysteme geschaffen werden. Deren Aufbau, beginnend von der einzelnen Zelle bis hin zur Verschaltung aller Komponenten zu einem Gesamtsystem, birgt großes Optimierungspotential. Um dieses zu nutzen, ist eine Modellierung des Gesamtsystems sinnvoll. Die Modellierung, Simulation und Optimierung von Batteriesystemen wird hier am Beispiel einer Vanadium-Redox-Flow-Batterie vollzogen. Dieser Batterietyp ist sehr gut geeignet, um zum Beispiel in Verbindung mit Windkraftanlagen eine

zuverlässige Energieversorgung aus erneuerbaren Quellen sicher zu stellen [1].

Das Gesamtmodell unterteilt sich in das elektrische Modell, welches eine Modellierung der sogenannten Streuströme im Elektrolytsystem der Batterie enthält und das hydraulische Modell, welches die Versorgung der Batterie mit dem flüssigen Elektrolyt übernimmt. Weiterhin wird das Energiewandlungssystem (EWS), sowie eine überlagerte Regelung implementiert. Durch Automatisierung des Modellaufbaus in Matlab/Simulink können viele verschiedene Aufbauvariationen simuliert und miteinander verglichen werden. Die Dimensionierung der relevanten Komponenten wird anhand vierer Aufbauvarianten demonstriert. Anschließend werden die Simulationsergebnisse der vier Modelle vorgestellt und analysiert. Aus ih-

nen lässt sich dann der optimale Aufbau des Batteriesystems ableiten.

2 Grundlagen der Komponenten

2.1 Batteriemodell

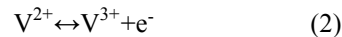
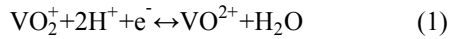
2.1.1 Allgemeine Grundlagen

Flussbatterien unterscheiden sich von konventionellen Batteriearten in zwei wesentlichen Punkten. Anstatt einem Elektrolyt und einer Elektrode werden zwei flüssige Elektrolytlösungen verwendet. Diese sind nicht Teil der Batteriezelle, sondern werden in externen Tanks gelagert [3]. Daraus ergeben sich auch die zwei größten Vorteile der Flussbatterie. Zum einen hat sie gegenüber den konventionellen Systemen eine deutlich höhere Lebenserwartung, zum anderen ist ihre Leistung und ihre Kapazität unabhängig voneinander skalierbar [1].

Zur Erhöhung der Batteriespannung werden meist mehrere Batteriezellen zu einem Stack zusammengefasst. Eine Reihenschaltung mehrerer Stacks, zur weiteren Erhöhung der Spannung, wird als Batteriestrang bezeichnet. Die Summe aller Batteriesträge, die bei der Flussbatterie von zwei Tanks versorgt werden, wird hier als Modul bezeichnet.

2.1.2 Elektrochemische Grundlagen

Da das Metall Vanadium in vier Oxidationszuständen vorkommt, kann eine Flussbatterie in beiden Halbzellen mit in Schwefelsäure gelöstem Vanadium betrieben werden. Beim Laden und Entladen der Batterie finden in den Halbzellen die beiden chemischen Reaktionen (1) und (2) statt [3].



Die Konzentrationen der Ionen definieren das elektrische Potential, das über einer Batteriezelle im Leerlauf abgegriffen werden kann [3]. Die Spannung der einzelnen Zellen U_{Zelle} wird mit einem Nernst-Ansatz als Funktion des Ladungszustandes berechnet, siehe Gleichung (3).

$$U_Z = U_Z^{00} + \frac{2R \cdot T}{F} \ln \left(\frac{\text{SOC}}{1 - \text{SOC}} \right) \quad (3)$$

U^{00} bezeichnet dabei das Standardpotential der Zellreaktion, R die universale Gaskonstante, T die Temperatur des Elektrolyten, F die Faraday-Konstante und SOC den Ladungszustand des Elektrolyten

$$\text{SOC} = \frac{c_{\text{V}^{2+}}}{c_{\text{V}^{2+}} + c_{\text{V}^{3+}}} = \frac{c_{\text{VO}_2^+}}{c_{\text{VO}_2^+} + c_{\text{VO}^{2+}}} = \frac{c_{\text{V}} - c_{\text{V}^{3+}}}{c_{\text{V}}} \quad (4)$$

mit den Konzentrationen der V^{2+} , V^{3+} , VO^{2+} , VO_2^+ Vanadiumionen. c_{V} bezeichnet die Gesamtkonzentration an Vanadium im Elektrolyt. Der Index "Z" steht für Zelle. Ein weiterer wesentlicher Parameter der Batteriemodellierung ist der Serienwiderstand der Zelle. In [2] werden un-

terschiedliche Widerstände für das Laden und Entladen der Batterie angegeben. Hier wird der Mittelwert beider Werte für beide Betriebsarten verwendet. Die resultierenden Werte können **Tabelle 1** entnommen werden.

Anzahl Zellen pro Stack	N_Z	30
Zellvolumen	V_Z	0,36 l
Vanadium-Konzentration	c_{V}	1,6 mol/l
Standardpotential	U^{00}	1,256 V
Temperatur	T	293,15 K
Nutzbarer SOC	-	20–80 %
Leerlaufspannung, Zelle	U_Z	1,19–1,33 V
Nennleistung	P_N	±9 kW
Serienwiderstand, Zelle	R_Z	0,838 mΩ

Tabelle 1 Parameter des elektrischen Batteriemodells

2.1.3 Grundlagen des hydraulischen Kreises

Bei Flussbatterien müssen bei der Betrachtung des Gesamtwirkungsgrads auch die Verluste durch das Pumpen der Elektrolyte berücksichtigt werden. Diese hängen von der beförderten Menge an Elektrolyt durch das Rohrsystem und dem daraus resultierenden Druckverlust ab. Die für das Pumpen benötigte elektrische Leistung berechnet sich mit dem Pumpenwirkungsgrad η_{Pumpe} , dem Druckverlust Δp und dem Elektrolytfluß Q nach Formel (7) [3].

$$P_{\text{el,Pumpe}} = 2 \cdot \eta_{\text{Pumpe}} \cdot \Delta p_{\text{Modul}} \cdot Q_{\text{Modul}} \quad (7)$$

Der Druckverlust lässt sich mit der erweiterten Bernoulli-Gleichung unter folgenden Annahmen berechnen [3],[4].

- Jede Rohrleitung hat für sich betrachtet überall den gleichen Querschnitt.
- Dichte und Viskosität des Elektrolyten werden als konstant angenommen.
- Die Verrohrung wird in Plastik ausgeführt und hat eine äquivalente Rauheit von 0 mm.

Der Druckverlust in einer Rohrleitung berechnet sich dann nach Formel (8). Neben der Dichte der Flüssigkeit ρ spielen dort die Länge L und der Durchmesser D der Leitung, sowie der Durchfluss Q eine Rolle. Der Reibungsfaktor f ist abhängig davon, ob die Strömung in der Rohrleitung laminar oder turbulent ist. Der Zustand der Strömung lässt sich mit der Reynoldszahl Re aus Rohrdurchmesser, Dichte und Viskosität μ der Flüssigkeit, sowie der Durchströmung bestimmen, wie in [4] ausführlich beschrieben. Weitere Gleichungssätze erlauben dann die Berechnung des Reibungsfaktors $f(Re)$ [3],[4].

$$\Delta p_{\text{Rohrleitung}}(Q) = 8\rho \cdot \frac{L}{\pi^2 D^5} \cdot f(Re) \cdot Q^2 \quad (8)$$

Zusätzliche Druckverluste treten an Biegungen und Abzweigungen auf. Sie berechnen sich nach Formel (9).

$$\Delta p_{\text{Biegung/Abzweigung}}(Q) = k_L \cdot 8\rho \cdot \frac{Q^2}{\pi^2 D^4} \quad (9)$$

Der Verlustkoeffizient k_L ist dabei in Tabellen für unterschiedliche Geometrien hinterlegt [3],[4],[5]. Die gewählten Koeffizienten können **Tabelle 2** entnommen werden.

Bei Biegungen wird k_L von Matlab/Simulink unter Verwendung des Rohrdurchmessers, des Biegungswinkels und des Biegungsradius aus hinterlegten Tabellen ermittelt.

Verlustkoeff. Abzweigung	$k_{L,Abzweigung}$	1
Durchflusswiderstand Stack	$\bar{R} / \text{Pa}\cdot\text{s/l}$	$1,25\cdot 10^5$
Dichte Elektrolyt	$\rho / \text{kg/l}$	1,5
Viskosität	μ / cP	4

Tabelle 2 Allgemeine Parameter hydraulischer Kreis

Die Batteriezellen sind mit einem porösen Graphitfilz gefüllt. Der Druckabfall bei dessen Durchströmung ist maßgeblich für den Druckabfall im Stack. Durch strömungsmechanische Simulationen am ICT konnte festgestellt werden, dass der Strömungswiderstand der Zellen in erster Näherung als linear angenommen werden kann. Er beträgt bei der betrachteten Zellgeometrie, die bereits eine Verlängerung der internen Zuleitung zur Unterdrückung von Streuströmen beinhaltet, $\bar{R}=1,25\cdot 10^5 \text{ Pa}\cdot\text{s/l}$. Aus [3] wurden die Angaben zur Dichte und Viskosität des Elektrolyten entnommen. Bei Messungen am ICT wurde bereits festgestellt, dass die Viskosität des Elektrolyten einer Abhängigkeit vom Ladezustand unterliegt. Diese wird hier jedoch vernachlässigt.

2.2 Streuströme

2.2.1 Grundlagen

Streuströme treten in Elektrolyseuren und Redox-Flow-Batterien auf, weil es neben der elektrischen Verbindung entlang des Stacks, eine zusätzliche ionisch leitende Verbindung über die fluidische Verbindung gleichartiger Halbzellen gibt.

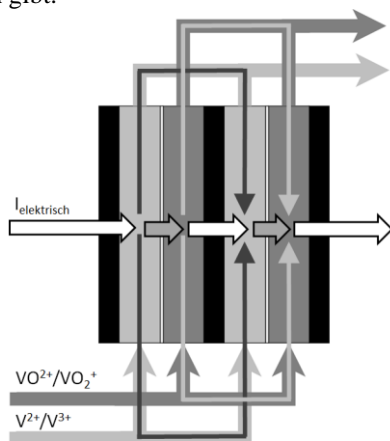


Bild 1 Stack mit zwei Zellen und elektrischen Strömen (weiß gefüllte Pfeile), ionischen Strömen (grau gefüllte Pfeile) und Streuströmen (hell- beziehungsweise dunkelgraue Pfeile)

Dies ist in **Bild 1** für ein System mit zwei Zellen beispielhaft gezeigt. Schwarz sind Endelektroden und die Bipolarelektrode in der Mitte, hellgrau und dunkelgrau die Flüsse der Elektrolyte der beiden Halbzellen und der schmale

Rahmen dazwischen stellt die Membran dar. Der elektrische Strom, dargestellt als Pfeile mit weißer Füllung, tritt über den äußeren Ableiter in die Zelle ein und wird in der ersten Halbzelle in ionischen Strom, dargestellt als Pfeile mit grauer Füllung, umgewandelt. Der größte Teil davon fließt durch die Elektrolytlösung, passiert die Membran und fließt weiter durch die Elektrolytlösung der anderen Halbzelle. Ein Teil des ionischen Stroms fließt dagegen über die äußeren Verbindungsrohre der beiden Halbzellsysteme. Diese Teilströme, dargestellt als hell- beziehungsweise dunkelgraue Pfeile, vereinigen sich auf der anderen Zellseite wieder mit dem Hauptstrom, so dass der Stack nach außen hin keine Ladungsträger verliert. Die am Streustrom beteiligten Ladungsträger stehen in den übersprungenen Halbzellen nicht für die elektrochemische Reaktion der Energiewandlung zur Verfügung. Sie stellen einen internen Kurzschluss dar, womit Leistung und Effizienz des Stacks absinken.

Streuströme können sowohl innerhalb eines Stacks, als auch zwischen mehreren Stacks auftreten. Eine getrennte Betrachtung ist jedoch nicht möglich, da die äußeren Streuströme, die maßgeblich von der Auslegung des hydraulischen Kreis abhängen, die Potentialverteilung in den Zellen stark beeinflusst. Dies wiederum beeinflusst die Ausprägung der inneren Streuströme, die ansonsten nur vom Design des Batteriestacks abhängen.

Die Triebkraft für alle auftretenden Ströme innerhalb und außerhalb des Stacks ist die äußere Potentialdifferenz. Diese führt zu einer Migration von Ionen in den Elektrolytlösungen und damit einem ionischen Stromfluss. Wie ein elektrischer Leiter hat die Elektrolytlösung eine Leitfähigkeit, die von der spezifischen Leitfähigkeit, dem zur Verfügung stehenden Querschnitt und der Länge des Leitungsweges abhängig ist.

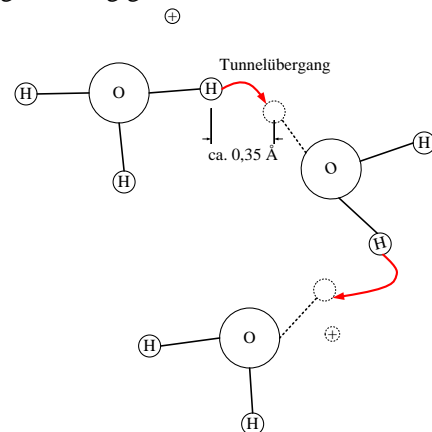


Bild 2 Ladungstransport durch Trennen und Neuaufbau von Wasserstoffbindungen in benachbarten Wassermolekülen (nach [6])

2.2.2 Leitfähigkeiten

Die spezifische Leitfähigkeit hängt von der Zusammensetzung der Elektrolytlösung ab, die Anzahl, Größe und Anzahl der Ladungen pro Ion bestimmt. Große Ionen müssen einen höheren Widerstand bei der Migration überwinden, ähnlich der Reibung von Partikeln in einem

Fluid. Ionen, die mehrere Ladungseinheiten aufweisen, bilden mit gegenteilig geladenen Ionen eine Hülle, die die Ladungen gegenüber dem Lösungsmittel abschirmen. Diese Komplexe sind wesentlich größer als das Einzelion und haben eine verringerte Migrationsgeschwindigkeit. Eine Sonderform stellen die Wasserstoff-Ionen im Wasser dar. Diese migrieren nur zu einem kleinen Teil durch die Lösung während der hauptsächliche Ladungstransport durch das Umlagern von Wasserstoffbindungen der Wassermoleküle geschieht.

Dieser Mechanismus, in **Bild 2** dargestellt, wird als Grotthus-Effekt bezeichnet und läuft wesentlich schneller ab als die Migration von Ionen. Damit sind Wasser und insbesondere saure wässrige Lösungen gute ionische Leiter.

Die Elektrolytsysteme der VRFB sind schwefelsaure wässrige Lösungen und damit grundsätzlich gute ionische Leiter. Die spezifische Leitfähigkeit ändert sich mit dem elektrochemischen Umsatz, ist also vom Ladungszustand abhängig. Dies wird in **Bild 3** gezeigt. Die Leitfähigkeit der Elektrolytlösungen erhöht sich dabei um 50% zwischen ungeladenem und geladenem Zustand. Damit ist es für die Modellierung sinnvoll, die zwei unterschiedlichen Elektrolytsysteme der VRFB in Abhängigkeit vom Ladungszustand zu betrachten.

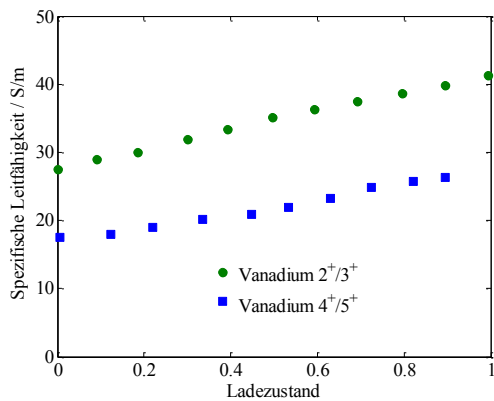


Bild 3 Gemessene spezifische Leitfähigkeiten der beiden Elektrolytsysteme für unterschiedliche Ladungszustände [7]

2.3 Energiewandlungssystem

Wie in [8] erläutert, gibt es sehr viele unterschiedliche Möglichkeiten, Batteriestacks an das Netz oder einen Verbraucher anzubinden. Hier wird eine Kombination aus einem Gleichspannungswandler (DC/DC-Wandler) und einem Gleich-/Wechselrichter (AC/DC-Wandler) verwendet. Für jede der vier Aufbauvarianten wurde ein EWS entworfen und modelliert. In separaten Simulation konnten so durch die Vorgabe verschiedener Sollwerte, Wirkungsgradkurven ermittelt werden, die in der Simulation des Gesamtsystems hinterlegt sind.

2.3.1 DC/DC-Wandler

Für den Aufbau des DC/DC-Wandlers gibt es in der Literatur sehr viele Varianten. Im weiteren wird eine sogenannte Dual-Active-Bridge (DAB) gewählt, die hinsicht-

lich Effizienz und Platzbedarf bereits als sehr vielversprechender Ansatz präsentiert wurde [9],[10]. Insbesondere lassen sich mit der DAB sehr große Übersetzungsverhältnisse realisieren. Die Bezeichnung Dual-Active-Bridge rührt daher, dass bei dieser Topologie zwei aktive Brückenschaltungen verwendet werden. Je nach Spannung auf der Unterspannungsseite (US) lassen sich dort MOSFETs als Schaltelemente einsetzen. R_{OS} und R_{US} sind die parasitären Widerständen der Hilfsspulen L_{OS} und L_{US} , sowie die Kontaktwiderstände der Verkabelung.

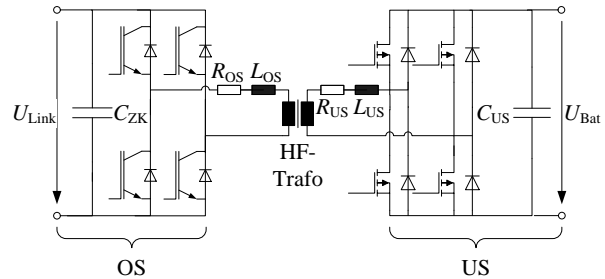


Bild 6 Dual-Active-Bridge nach [7]

Im einphasigen Fall, siehe **Bild 6**, werden zwei Vollbrücken verwendet, im dreiphasigen Fall zwei Drehstrombrücken. Aufgrund der vergleichsweise geringen übertragenen Leistung pro DC-Wandler, wird hier der einphasige Aufbau genutzt. Die beiden Brücken erzeugen zwei synchrone hochfrequente Wechselspannungen, die über den Hochfrequenz-Transformator gekoppelt sind. Über den Phasenverschiebungswinkel ϑ zwischen den beiden Spannungen kann der Leistungsfluss geregelt werden, siehe Gleichung (5). U_{Bat} ist die Batteriespannung, U_{link} die Spannung des DC-Links. ω_s ist die Schaltkreisfrequenz, L_{OS} die auf die Oberspannungsseite bezogene Gesamtinduktivität der DAB. Mit \ddot{u} wird das Übersetzungsverhältnis des HF-Transformators bezeichnet. Die DAB wird hier immer mit einer Schaltfrequenz von 20 kHz betrieben.

$$P_{DAB} = \frac{U_{Bat} \cdot \ddot{u} \cdot U_{link}}{\omega_s L_{OS}} \cdot \vartheta \left(1 - \frac{|\vartheta|}{\pi} \right) \quad (5)$$

	$P_r /$ kW	$U_{bat} /$ V	$U_{link} /$ V	\ddot{u}	$L_{OS} /$ μH	$L_G /$ μH	$L_{US} /$ μH
1	10	38	600	15,9	169	17,2	0,44
2	20	75	600	7,96	84,4	8,59	0,85
3	30	113	600	5,31	56,3	5,73	1,27
4	60	226	600	2,65	28,1	2,86	2,53
	$L_{OS} /$ μH	$L_{m,OS} /$ mH	$R_{m,OS} /$ kΩ	$R_{r,US} /$ mΩ	$R_{r,OS} /$ mΩ	$R_{US} /$ mΩ	$R_{OS} /$ mΩ
1	44,5	3,5	10,8	0,16	38,2	0,14	7,2
2	22,2	1,7	5,4	0,33	19,1	0,23	3,6
3	14,8	1,2	3,6	0,49	12,7	0,34	2,4
4	7,41	0,6	1,8	0,98	6,4	0,68	1,2

Tabelle 4 Parameter DAB

Die vier benötigten Variationen des DAB-DC/DC-Wandlers werden wie in [8] beschrieben dimensioniert. Bei der Dimensionierung wurde festgelegt, dass bei der Übertragung der Nennleistung ein Übertragungswinkel von $\vartheta=45^\circ$ anliegen soll. Zusammen mit den aus [10] entnommenen Parametern ergeben sich dann die in Tabelle 4 gezeigten Systemparameter. Die Indizes ergeben sich aus dem Ersatzschaltbild in Bild 7. OS und US geben an, ob der Wert auf die Ober- oder Unterspannungsseite des Wandlers bezogen ist. Der Index T steht für Transformator, m steht für Magnetisierung.

Die Wirkungsgrade der vier vollständigen Energiewandlungssysteme sind in **Bild 8** zu sehen. Auf der Abszisse wird die auf die jeweilige Nennleistung bezogene Systemleistung verwendet, um einen Vergleich der Wirkungsgrade zu ermöglichen. Negative Werte auf der Abszisse entsprechen dem Laden der Batterie, positive Werte dem Entladen.

2.3.2 AC/DC-Wandler

Als AC/DC-Wandler kommen Drehstrombrückenschaltungen (DBS) zum Einsatz, die über eine Pulsweitenmodulation angesteuert werden. Neben der Regelung des AC/DC-Wandlers ist vor allem die Auslegung des Filters auf der Netzseite interessant. Hier wurde der in [8] vorgestellte Ansatz zur automatisierten Dimensionierung von LCL-Filtern eingesetzt, um die Verzerrungsfreiheit der eingespeisten und entnommen Leistung sicherzustellen, wie in **Bild 7** dargestellt. Im Ersatzwiderstand R werden die parasitären Verluste der beiden Spulen berücksichtigt. C_F enthält einen zusätzlichen Dämpfungswiderstand, der hier nicht gezeigt ist. Es werden verschiedene Filter für die verschiedenen Schaltungsvarianten benötigt. Die Schaltfrequenz f_s der Leistungselektronik wird mit zunehmender Leistung abgesenkt. Die entworfene Regelung im dq0-System ermöglicht eine entkoppelte Einspeisung von Wirk- und Blindleistung.

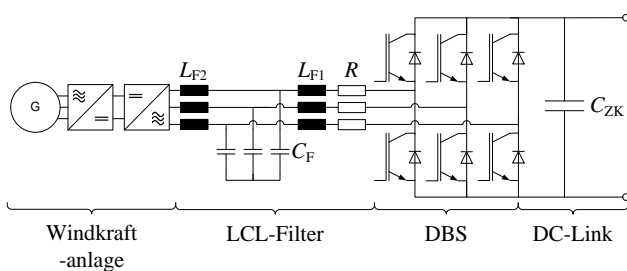


Bild 7 AC/DC-Wandler mit LCL-Filter

P_N /kW	L_{F1} /mH	L_{F2} / μ H	C_F / μ F	R /m Ω	f_s /kHz
10	3,5	231	10	320	10
20	2,2	181	20	160	8
30	1,9	215	30	107	6
60	1,2	155	60	53	5

Tabelle 5 Parameter LCL-Filter und AC/DC-Wandler

Auch die Dimensionierung des LCL-Filters wird automatisiert gemäß dem in [8] vorgestellten Verfahren durchgeführt. Die Parameter der leistungselektronischen Schalter wurden Datenblättern entnommen. Die Parameter der vier Filterentwürfe können **Tabelle 5** entnommen werden.

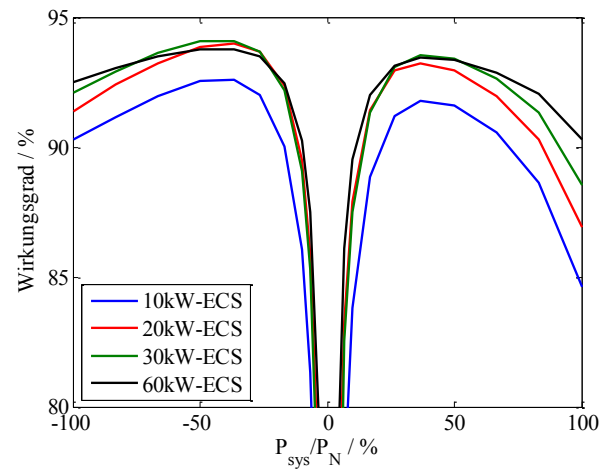


Bild 8 Wirkungsgrade der vier entworfenen EWS

2.4 Hydraulischer Kreis

Der Verrohrungsplan des Batteriesystems ist in Bild 9 zu sehen. Die Tanks befinden sich im Untergeschoss. Die Elektrolytleitungen verlaufen unter den im Obergeschoss aufgestellten Batteriestacks. Für einen Speicher mit einem Energieinhalt von 20 MWh werden mindestens 600 m³ Tankinhalt benötigt.

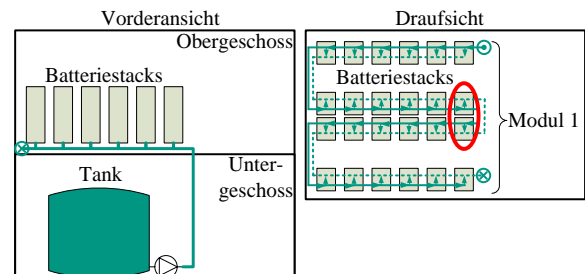


Bild 9 Verrohrungsplan der VRFB

Jeweils vier Batteriereihen bilden ein Modul. Eine Reihe nimmt sechs Stacks auf. Ein Modul besteht dann aus 24 Stacks. Die Rohrlängen sowie die Anzahl und Position der Winkel- und T-Stücke legt der Verrohrungsplan fest. Da alle Stacks parallel durchströmt werden, ist eine gleichmäßige Elektrolytversorgung aller Stacks nicht von immer sichergestellt. Die Ungleichheit bei der Durchströmung der Stacks hängt maßgeblich vom Rohrdurchmesser und vom hydraulischen Widerstand der Stacks selbst ab. Der Stack, welcher als erstes aus dem Tank versorgt wird, wird als letzter an die Rückleitung angeschlossen. So ergeben sich die beiden in **Bild 9** rot markierten Stacks als potentielle Schwachpunkte. Je geringer der Strömungswiderstand der Stacks, desto größer die ungleichmäßige Durchflutung. Bei dem hier verwendeten Strömungswiderstand der Stacks tritt bei dem gewählten

Rohrdurchmesser eine vernachlässigbare Ungleichheit in der Durchströmung aller Stacks auf.

Neben der ausreichender Versorgung der rot markierten Stacks mit Elektrolytflüssigkeit, muss auch auf die benötigte mechanische Leistung der Pumpen geachtet werden. Diese soll hier maximal 5 kW pro Kreislauf betragen. Mit diesen beiden Bedingungen werden die in **Tabelle 6** aufgeführten Parameter für den hydraulischen Kreis bestimmt. Die Auslegung des hydraulischen Kreises erfolgt nach dem in [11] vorgestellten Verfahren. Der Wirkungsgrad der eingesetzten Pumpe wurden dem Datenblatt [12] entnommen und ist in **Bild 10** zu sehen.

Zuleitung Tank→1. Stack	6,4 m
Rücklauf Stack → Pipeline (vertikal)	1,0 m
Abstand benachbarter Stacks	1,0 m
Abstand gegenüberliegende Stacks	3,0 m
Abstand hintereinanderliegende Stacks	2,0 m
Rückleitung letzter Stack→Tank	10,8 m
Durchmesser Haupt-Rohrleitung	131 mm
Durchmesser Rücklauf Stack→ Pipeline	65,5 mm

Tabelle 6 Parameter hydraulischer Kreis

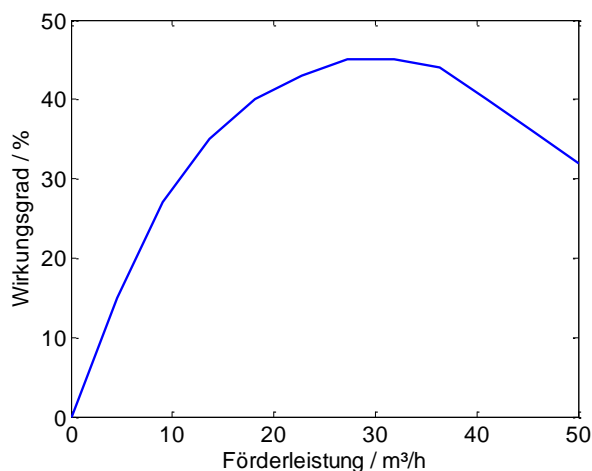


Bild 10 Wirkungsgrad Siebec A31 [12]

3 Simulation und Ergebnisse

3.1 Grundlegendes Vorgehen

In [8] konnte bereits gezeigt werden, dass eine serielle Verschaltung von mehreren Stacks zu einem höheren Wirkungsgrad des EWS führt, siehe auch Bild 8. Dabei wurden jedoch die dadurch verursachten erhöhten Verluste durch Streuströme nicht beachtet. Dies ist zur Identifikation des optimalen Aufbaus aber zwingend erforderlich. Hier werden folgende vier Aufbauvarianten bestehend aus jeweils 24 Stacks betrachtet, wie in Bild 9 gezeigt. Variante 1 besteht nur aus parallel geschalteten Stacks. Ein Batteriestrang besteht also aus einem einzelnen Stack. Ein Modul besteht dann aus 24 Strängen. Variante 2 schaltet jeweils zwei Stacks in Serie. Ein Strang besteht also aus zwei Stacks, ein Modul aus zwölf Strängen. Für Variante

3 wird ein zusätzliches Stack in Serie geschaltet. Ein Strang besitzt dann drei Stacks, ein Modul acht Stränge. In Variante 4 wird die Anzahl der seriell verschalteten Stacks auf sechs erhöht. Ein Strang besteht dann aus sechs Stacks, ein Modul aus vier Strängen. Da alle Module aus der gleichen Anzahl Stacks bestehen, kann bei allen Varianten ein identisch aufgebauter hydraulischer Kreis verwendet werden, was auch die Vergleichbarkeit der Wirkungsgrade verbessert.

3.2 Vergleich der Wirkungsgrade

In **Bild 11** sind die simulativ ermittelten Gesamtwirkungsgrade zu sehen. Zu deren Bestimmung wurden Vollzyklen zwischen Ladezustand 0,2 und 0,8 mit unterschiedlichen Leistungssollwerten an den Batterieklappen simuliert. Das Tankvolumen pro Modul beträgt 2 m³. Bei der hier gewählten Auslegung des hydraulischen Kreises stellt Variante 2 die optimale Aufbauvariante dar. Die Verbesserungen in den Wirkungsgraden der EWS werden bei Varianten 3 und 4 durch stark erhöhte Streustromverluste mehr als kompensiert. Der vergleichsweise große Unterschied zwischen den Wirkungsgraden der EWS der Varianten 1 und 2 genügt jedoch, um die durch die Serienschaltung von zwei Stacks verstärkt auftretenden Streustromverluste mehr aus auszugleichen.

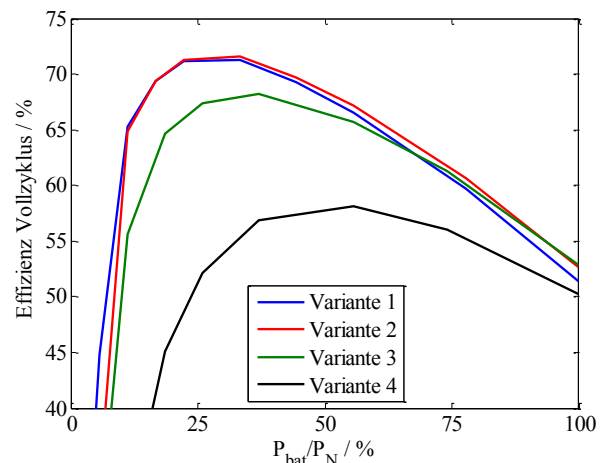


Bild 11 Wirkungsgrade der betrachteten Gesamtsysteme

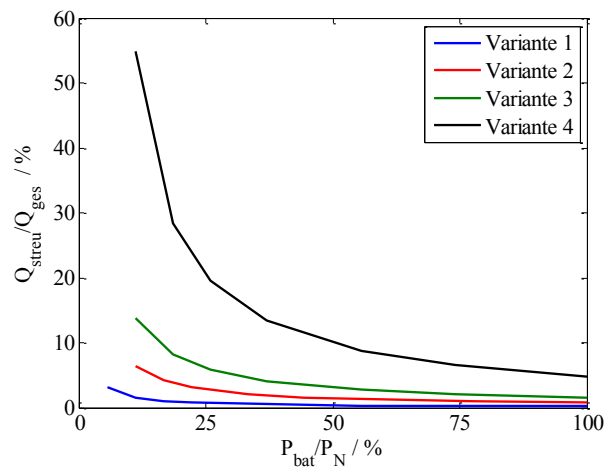


Bild 12 Streuverluste der vier Varianten im Vollzyklus

3.3 Vergleich der Streuverluste

In **Bild 12** sind die durch die Streuströme pro Vollzyklus umgesetzten Ladungen bezogen auf die Kapazität dargestellt. Wie zu erwarten werden bei geringen Batterieleistung bedingt durch die verlängerten Zykluszeiten deutlich höhere Ladungen von Streuströmen umgesetzt. So wird bei der seriellen Verschaltung von sechs Stacks bei weniger als 20% der Nennleistung eine Ladung, die mehr als 40% der Batteriekapazität entspricht, von Streuströmen umgesetzt. Dies erklärt die sehr schlechte Vollzyklus-Effizienz, die in **Bild 11** zu sehen ist. Der Vergleich der Varianten 1 bis 3 zeigt eine in erster Näherung lineare Zunahme der Streustromverluste. Der Vergleich mit Variante 4 lässt jedoch vermuten, dass die Streuverluste mit zunehmender Anzahl der in Serie geschalteten Stacks nichtlinear steigen.

4 Zusammenfassung

Obwohl die ganzheitliche Modellierung des Batteriesystems mit einigem Aufwand verbunden ist und entsprechend komplexe Modelle hervorbringt, konnte gezeigt werden, dass durch die Betrachtung verschiedener Aufbauvarianten der Aufbau eines optimalen Batteriesystems zum Beispiel für Windkraftanlagen gefunden werden kann.

Die gewonnenen Simulationsdaten des Gesamtsystems zeigen, dass es ohne weitere Optimierung des hydraulischen Kreises zur Unterdrückung von Streuströmen nicht sinnvoll ist, mehr als zwei Stacks zu einem Strang zusammen zu fassen. Der damit verbundene schlechtere Wirkungsgrad des EWS muss demnach hingenommen werden. Bei der Überarbeitung des hydraulischen Kreises müssen jedoch die zusätzlichen Verluste, die zum Beispiel durch die Verlängerung von Rohrleitungen zur Erhöhung des elektrischen Widerstands für Streuströme entstehen, mit einbezogen werden. Durch die ganzheitliche Modellierung des Systems ist jedoch sichergestellt, dass diese Effekte bei der Optimierung berücksichtigt werden. Auch der optimierte Betrieb der Pumpen ist Gegenstand weiterer Forschung. Schlussendlich wird außerdem die optimierte Fahrweise des Batteriesystems zur bestmöglichen Ausnutzung der Wirkungsgrade der einzelnen Stränge untersucht.

5 Literatur

[1] D. Banham-Hall, G. Taylor, C. Smith und M. Irving: Flow Batteries for Enhancing Wind Power Integration. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 27, Nr. 3, August 2012.

[2] M. Skyllas-Kazacos und C. Menictas: The Vanadium Redox Battery for Emergency Back-Up Applications. Proceedings of the 19th Telecommunications Energy Conference, 1997

[3] C. Blanc: Modeling of a Vanadium Redox Flow Battery Electricity Storage System. Dissertation Nr. 4277 an der École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 24. April 2009.

[4] Frank M. White: Viscous fluid flow. Second Edition, McGraw-Hill Inc., 1991

[5] George R. Keller: Hydraulic System Analysis, Penton Media Inc., 1977

[6] C.H. Hamann, W. Vielstich: Elektrochemie. Weinheim: Wiley-VCH, 4. Auflage 2005

[7] F. T. Wandschneider, P. Fischer, K. Pinkwart, J. Tübke, H. Nirschl: Modeling a Vanadium Redox-Flow Battery with an Anion Exchange Membrane. In preparation for Electrochimica Acta, 2013

[8] S. König, P. Müller und T. Leibfried: Design and comparison of three different possibilities to connect a vanadium-redox-flow-battery to a wind power plant, Valencia, 13th CHLIE, 2013.

[9] R. De Doncker, D. Divan und M. Kheraluwala: A Three-Phase Soft-Switched High-Power-Density dc/dc Converter for High-Power Applications. IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 27, Nr. 1, Jan/Febr 1991.

[10] M. Tan, T. Abe und H. Akagi, "Design and Performance of a Bidirectional Isolated DC-DC Converter for a Battery Energy Storage System", IEEE Trans. on Power Electronics, Vol. 27, March 2012.

[11] S. König und T. Leibfried: Modellierung und Simulation eines 2 MW/20 MWh Vanadium Redox Flow Batteriesystems, NEIS Konferenz Hamburg, September 2013

[12] SIEBEC Pumpen Saint-Egreve, Frankreich: Datenblatt Fiche A31P, http://siebec.com/IMG/pdf/FICHE_POMPE_A31P_A32P_A33P_DE.pdf, Version vom 23.08.2013