

# Einsatz- und Auslegungsoptimierung von Energiespeichern mit GOMES®

ANNEDORE KANNGIEßER, DANIEL WOLF, MARCUS BUDT

**Der Umbau des Energieversorgungssystems hin zu einem größeren Anteil Erneuerbarer Energien verlangt, dass für die Aufrechterhaltung der Versorgungssicherheit verstärkt auch flexible Komponenten bspw. Stromspeicher eingesetzt werden. Zur präzisen und detaillierten Bewertung der potenziellen Speicheranwendungen hat Fraunhofer UMSICHT das Modell GOMES® entwickelt, welches der Einsatz- und Auslegungsoptimierung von netzgekoppelten Energiespeichern dient. Die Funktionalität des Modells wird an dem Fallbeispiel eines adiabaten Druckluftspeicherkraftwerks demonstriert, welches einen Windpark unterstützt, der aufgrund von Netzengpässen von Abregelungen bedroht ist. Die Ergebnisse dieser Szenarienuntersuchungen zeigen, dass mit GOMES® nicht nur die Wirtschaftlichkeit einer Speicheranwendung oder die optimale Dimensionierung von Speicherleistung und Speicherkapazität bestimmt werden können, sondern auch wichtige Rückschlüsse auf das technische Anlagenlayout möglich sind.**

## Motivation

Für die Integration steigender Anteile von erneuerbaren Energieträgern in das Energieversorgungssystem wird mehr Flexibilität im System benötigt. Für die Stabilität des elektrischen Netzes ist es wichtig, dass sich die Stromerzeugung und der Stromverbrauch jederzeit in der Balance befinden. Das traditionelle Konzept, dass die Stromerzeuger in jedem Moment genau so viel Strom zur Verfü-

gung stellen, wie vom Verbraucher nachgefragt wird, wird insbesondere angesichts der fluktuierenden Energieträger wie Windenergie und Photovoltaik immer schwieriger umzusetzen. In diesem Zusammenhang stellen Stromspeicher, die sowohl überschüssigen, regenerativen Strom aufnehmen und zu Zeiten mit hoher Nachfrage wieder abgeben können, sich als wichtige, flexible Komponente dar. Stromspeicher können an den unterschiedlichsten Standorten eingesetzt werden (erzeugernah bspw. in der Nähe von Windparks, beim Endkunden oder an kritischen Punkten im elektrischen Netz) und bieten eine weite Bandbreite an Speicherdienstleistungen. Dazu gehören die Stützung der Systemstabilität und der Systemzuverlässigkeit, die Vermeidung von Investitionen bspw. für Netzausbau sowie das Ausgleichen von Last und Erzeugung im großen Maßstab.

## Modell GOMES®

In den letzten Jahren hat Fraunhofer UMSICHT ein generisches Modell für die Einsatz- und Auslegungsoptimierung von netzgekoppelten Speichersystemen entwickelt. Aufgrund des modularen Aufbaus ist GOMES® (Generic Optimization Model for Energy Storage) in der Lage die ökonomische und technische Relevanz einer Vielzahl an unterschiedlichen Speicherdienstleistungen zu bewerten. Ebenso können die verschiedensten Energiespeicherformen untersucht werden (siehe Abbildung 1). Zu der Klasse der stationären, elektrischen Speicher gehören bspw. die Technologien Pumpspeicherkraftwerk, adiabates Druckluft-

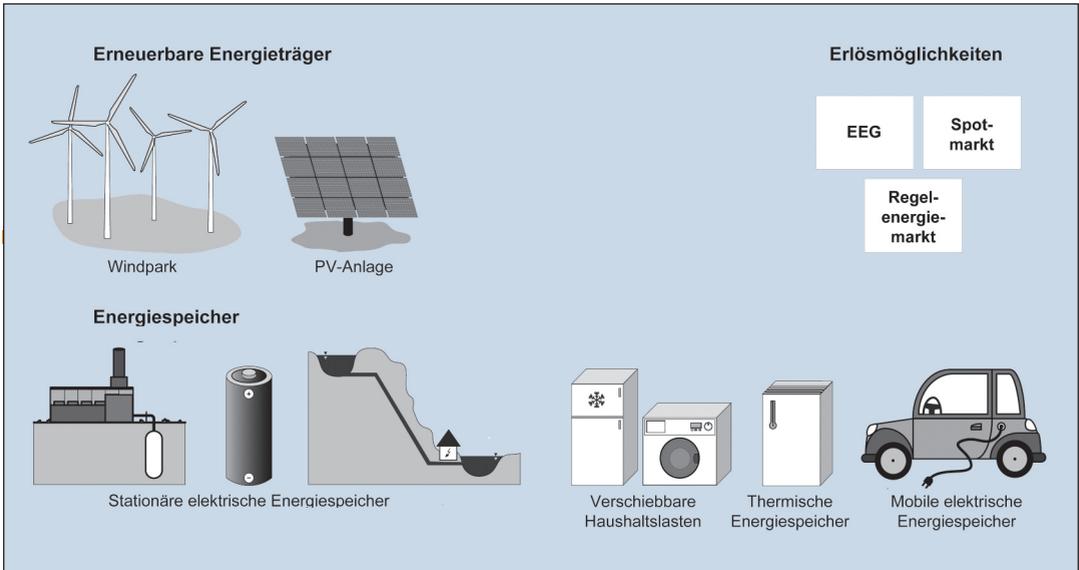


Abbildung 1: Modulare Komponenten von GOMES®

speicherkraftwerk und verschiedene Batterietypen. Diese Speicher sind ortsgebunden und können jederzeit mit dem elektrischen Netz interagieren. Desweiteren gibt es mobile, elektrische Speicher, in Form von Elektroautos. Der Unterschied der mobilen, elektrischen Speicher zu den stationären, elektrischen Speichern, besteht darin, dass diese per Definition nur zeitweise mit dem Netz verbunden sind, diese Kopplung an unterschiedlichen Standorten erfolgen kann und außerdem Energie aus dem integrierten Batteriespeicher für das Zurücklegen von Fahrtstrecken verbraucht wird. Weitere Gruppen sind thermische Speicher (z.B. Warmwasserspeicher an Wärmepumpe), welche den Strombezug für Heizzwecke zeitlich von dem Verbrauch der Heizenergie entkoppeln können, sowie verschiebbare Haushaltslasten (z.B. Waschmaschine, Kühlschrank), welche ihren Strombezug zeitlich verlagern können. Die zeitliche Verlagerung des Strombezugs im Endkundenbereich kann dazu dienen, dass eigenproduzierter Photovoltaik-Strom auch selbst verbraucht werden kann, dass in Kombination mit einem variablen Strombezugstarif die Strombezugskosten verringert werden oder dass durch die Vergleichmäßigung der Last das Netz entlastet wird.

In die Szenarienrechnungen mit GOMES® gehen zur Beschreibung der Energiespeicher, der erneuerbaren Energieträger und der Erlösmöglichkeiten neben Parametern wie bspw. der installierten Windparkleistung viertelstündlich aufgelöste Zeitreihen ein, die ein vollständiges Jahr umfassen. Dies kann der Verlauf der Windeinspeiseleistung oder auch der Strompreis am Day-Ahead-Spotmarkt sein. Es ist wichtig, dass bei der Bewertung von Speicheranwendungen vollständige Jahre und zeitlich hoch aufgelöste Daten betrachtet werden, weil das Rechnen mit einzelnen Typtagen oder Mittelwerten der zeitlichen Komplexität von Speichervorgängen nicht gerecht werden würde. Im Gegensatz zu thermischen Kraftwerken, deren Erzeugungsleistung im Normalfall jederzeit vollständig abgerufen werden kann, hängt die Arbeitsfähigkeit eines Speichers grundsätzlich von dem aktuellen Füllstand ab. Dieser stellt sich infolge der vorher erfolgten Ein- und Ausspeichervorgänge ein. Abbildung 2 gibt auf der linken Seite eine Übersicht über die Eingangsparameter und -zeitreihen von GOMES®. Auf der rechten Seite werden die resultierenden Ergebnisse der Optimierung, sowie Beispiele für daraus ableitbare Schlussfolgerungen dargestellt.

## Fallstudie: Windpark & A-CAES

Hintergrund dieser Fallstudie ist die vor allem in Norddeutschland immer häufiger auftretende Situation, dass Windenergieanlagen abgeregelt werden müssen, weil das den Strom aufnehmende Netz lokal überlastet ist. Dieses Problem wird sich in Zukunft noch weiter verstärken, wenn große Off-shore-Windparks vor der Küste zugebaut werden. Die zunächst naheliegendste Lösung für diese Problematik stellt der Ausbau der Stromnetze dar. Allerdings hinkt der Ausbau der Netze der Entwicklung der installierten Leistung deutlich hinterher. Dies ist u.a. den langjährigen Genehmigungsverfahren und der geringen Akzeptanz in der Bevölkerung geschuldet. Daher soll in dieser Fallstudie der alternative Einsatz eines adiabaten Druckluftspeicherkraftwerks (A-CAES) untersucht werden, das in der Nähe des Windparks installiert wird. Die Aufgabe des A-CAES besteht darin, in Starkwindphasen den überschüssigen Windstrom zwischenspeichern, um ihn zeitverzögert – wenn wieder genug Übertragungskapazität zur Verfügung steht und entsprechend Strombedarf vorhanden – in das Netz abzugeben.

Wirtschaftlichkeitsanalysen haben ergeben, dass sich die Investition in einen Speicher nicht rechnet, sofern die Einnahmen ausschließlich aus dem Verkauf dieser Windstromüberschüsse erzielt werden. Daher wird dem A-CAES erlaubt zusätzlich am Day-Ahead-Spotmarkt zu handeln sowie am Regelenenergiemarkt Minutenreserve anzubieten. Der Handel am Day-Ahead-Spotmarkt bedeutet, dass in Stunden mit niedrigem Spotpreis Strom eingekauft und zwischengespeichert wird, um ihn in Stunden mit hohem Spotpreis wieder auszuspeichern und zu verkaufen. Das Anbieten von positiver oder negativer Minutenreserve am Regelenenergiemarkt hat die Konsequenz, dass der Speicher die angebotene Leistung jeweils für die vierstündige Kontraktdauer vorhalten und im Abruffall liefern muss.

Während der Vorhaltephase zieht dies sowohl Konsequenzen für die zulässige Leistung, mit der der Speicher Windstrom ein- oder ausspeichert bzw. am Spotmarkt agiert, als auch für den Füllstand, welcher währenddessen minimal bzw. maximal im Speicher vorhanden sein muss, nach sich.

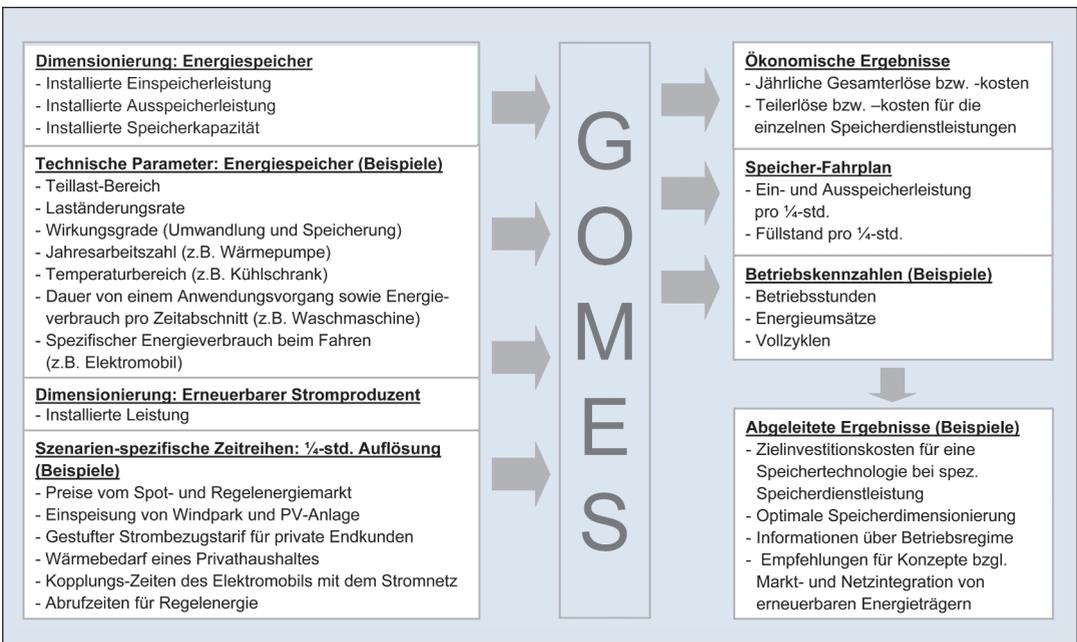


Abbildung 3 zeigt den Betriebsverlauf des A-CAES an fünf exemplarischen Tagen. Zu Grunde gelegt ist dabei ein Windpark mit einer installierten Leistung von 350 MW, welcher einer maximalen Übertragungskapazität der Stromleitung von 260 MW gegenübersteht. Die aus betriebswirtschaftlicher Sicht optimale Dimensionierung des Speichers wurde durch vorhergehende Szenarienrechnungen mit GOMES® zu  $P_{Ein} = 70$  MW und  $P_{Aus} = 40$  MW bestimmt. Das Speichervolumen ermöglicht eine dauerhafte Ausspeicherung über sieben Stunden unter Volllast der Turbine.

Im oberen Diagramm ist auf der linken Achse für jeden Zeitschritt die aktuelle Ein- und Ausspeicherleistung des A-CAES aufgetragen, auf der rechten Achse stehen die aktuelle Windeinspeisung und die restriktive Übertragungskapazität der Stromleitung. Im unteren Diagramm ist auf der linken Achse der resultierende Speicherfüllstand aufgetragen, auf der rechten Achse kann der Spotpreis abgelesen werden. Im mittleren Diagramm ist die Leistung an vorgehaltener bzw. abgerufener Minutenreserve eingetragen. Innerhalb der fünf ausgewählten Tage ist zu erkennen, dass der A-

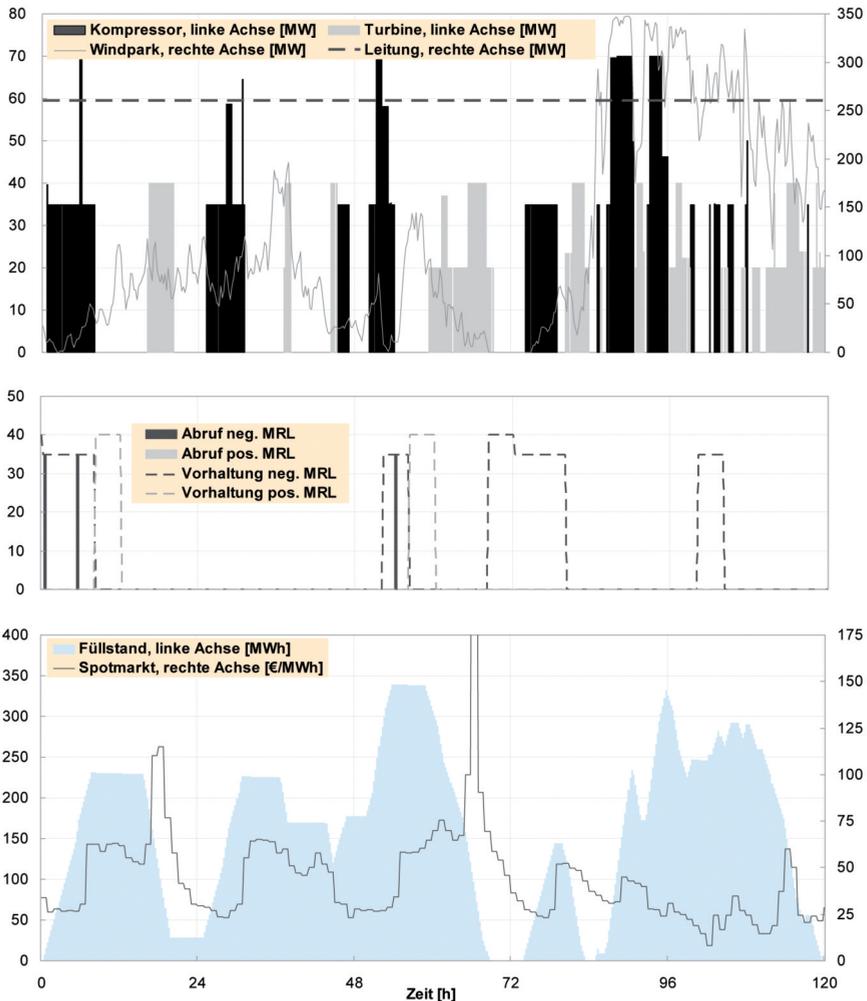


Abbildung 3: Betriebsverlauf des A-CAES an fünf exemplarischen Tagen

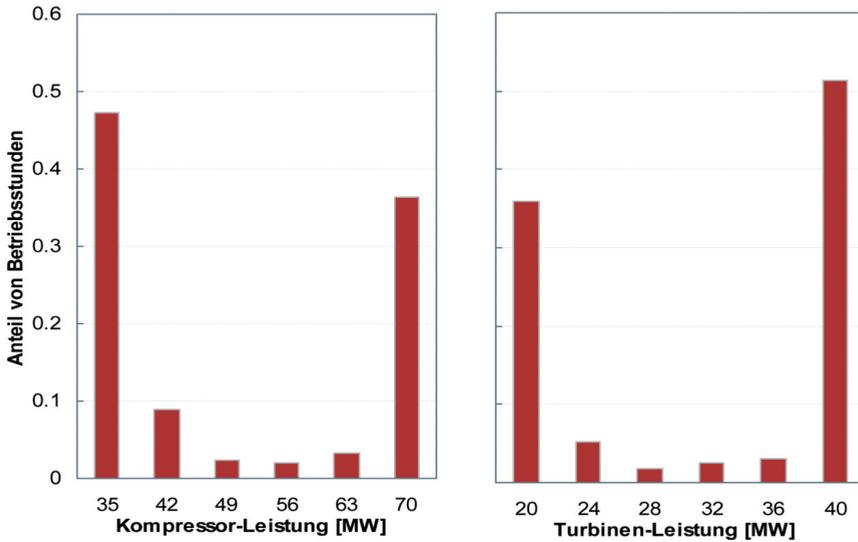


Abbildung 4: Anteil der unterschiedlichen Lastzustände des Kompressors (links) und der Turbine (rechts)

CAES sowohl Windüberschüsse erntet als auch am Spotmarkt und Minutenreservemarkt agiert. In den ersten drei Tagen ist die Windeinspeiseleistung relativ gering und übersteigt zu keinem Zeitpunkt die maximale Übertragungskapazität. Das heißt, der Speicherbetrieb wird in diesem Zeitraum maßgeblich von dem Handel am Spotmarkt getrieben. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Einspeiservorgänge mit niedrigen Spotpreisen und die Ausspeiservorgänge mit hohen Spotpreisen korrelieren. Der Spotmarkthandel wird dabei leicht durch das Anbieten von Minutenreserve eingeschränkt (vgl. mittleres Diagramm in Abbildung 3).

Die Einspeicherung zu Beginn des ersten Tages erfolgt bspw. nur mit der Hälfte der installierten Kompressorleistung (35 MW), da die anderen 35 MW frei gehalten werden müssen, falls ein Abruf der angebotenen negativen Minutenreserve erfolgt. Dies geschieht kurz darauf tatsächlich, woraufhin der Kompressor seine Leistung kurzzeitig auf 70 MW erhöht. Am vierten und fünften Tag wird der Speicherbetrieb dagegen maßgeblich von der Zwischenspeicherung von Windstrom bestimmt. An diesen beiden Tagen übersteigt die Einspeiseleistung des Windparks mehrfach die maximale Übertragungskapazität der Netzanbindung. Wäh-

rend der Speicher zu Beginn der Starkwindphase leer ist und daher zuerst den kompletten Überschuss zwischenspeichern kann, ist dies zu Beginn des fünften Tages nicht mehr möglich. Der Füllstand des Speichers hat zu diesem Zeitpunkt bereits sein Maximum erreicht, so dass trotz Windüberschusses der Speicher für einige Stunden in den Ausspeichermodus schalten muss, um im Anschluss erneut Windstrom zwischenspeichern zu können.

Ein interessanter Punkt, der für die technische Auslegung des A-CAES von Bedeutung ist, ist der hohe Anteil an Teillastbetrieb, sowohl bei dem Kompressor als auch bei der Turbine. Den Nachweis, dass sich dieses bereits in den fünf exemplarischen Tagen auffällige Verhalten im restlichen Jahr fortsetzt, liefert Abbildung 4. Der linke Teil der Abbildung enthält ein Histogramm der Kompressorleistung, der rechte Teil ein Histogramm der Turbinenleistung. Der Kompressor fährt in nahezu 65 % seiner Betriebsstunden in Teillast, den größten Teil davon sogar an der unteren Grenze seines Teillastbereiches. Die Turbine fährt in ca. 50 % ihrer Betriebsstunden im Teillastbereich. Auch hier entfällt der größte Anteil davon auf die untere Teillastgrenze.

Die Szenarienrechnungen mit GOMES® lassen für die technische Auslegung von A-CAES, welche windparknah die hier genannten Speicherdienstleistungen erbringen, mehrere wichtige Schlussfolgerungen zu:

- Bei der Dimensionierung sollte die Kompressorleistung größer gewählt werden als die Turbinenleistung. Das Speichervolumen sollte eine Volllast-Ausspeicherung von ca. 7 Stunden erlauben.
- Der multifunktionale Speicherbetrieb, welcher das Anbieten von Minutenreserve beinhaltet, bringt die Bedingung mit sich, dass der A-CAES innerhalb von 15 Minuten anfahren kann.
- Bei dem untersuchten, multifunktionalen Betrieb dominieren sowohl bei dem Kompres-

sor als auch bei der Turbine die Betriebsstunden mit Teillast. Aufgrund dessen sollte ein thermodynamisches Anlagenlayout gewählt werden, welches hohe Teillastwirkungsgrade ermöglicht.

*Dipl.-Ing. Annedore Kanngießner; Dr.-Ing. Daniel Wolf, Dipl.-Ing. Marcus Budt*

*Position (gilt für alle drei): Wissenschaftlicher Mitarbeiter im Geschäftsfeld Energie-Effizienz-Technologien bei Fraunhofer UMSICHT*

*Kontakt: Fraunhofer UMSICHT, Osterfelder Str. 3, 46047 Oberhausen, [www.umsicht.fraunhofer.de/](http://www.umsicht.fraunhofer.de/)  
[annedore.kanngiesser@umsicht.fraunhofer.de](mailto:annedore.kanngiesser@umsicht.fraunhofer.de)  
[daniel.wolf@umsicht.fraunhofer.de](mailto:daniel.wolf@umsicht.fraunhofer.de)  
[marcus.budt@umsicht.fraunhofer.de](mailto:marcus.budt@umsicht.fraunhofer.de)*