

Energiewirtschaft und Energiespeicherung

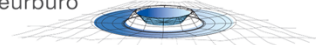
Rahmenbedingungen und Handlungsoptionen
zur erfolgreichen Umsetzung der Energiewende

Vortrag mit Diskussion
am 25. September 2013

bei der
Hanns Seidel Stiftung
Seminarleitung: Hans Fendt

Hotel Alpenhof GmbH
Donauwörther Straße 233
86154 Augsburg

MATTHIAS POPP
Ingenieurbüro



Erneuerbare Energien, Energiespeicherung
Simulationen, Software-Entwicklung

Prof. Dr.-Ing. Matthias Popp
Schönbrunn-Burgstraße 19
D-95632 Wunsiedel
Telefon: 09232 / 9933-10
Telefax: 09232 / 9933-40
matthias@POPPware.de
www.poppware.de

Vorab, kurz einige Informationen zu meiner Person und meinem Büro.

Dr.-Ing. Matthias Popp

- Jahrgang 1958
- Wunsiedel im Fichtelgebirge, Bayern
- 1983 Gründung des Ingenieurbüro Popp im 7. Studiensemester
- 1983 Diplom für Maschinenbau an der Fachhochschule Coburg
- Ingenieurbüro Popp, u. A. Softwareentwicklung für die Automobilindustrie
- 1989 Diplom für Maschinenbau an der TU München
- Stadtrat (CSU) und von 2002 bis 2008 ehrenamtlicher Zweiter Bürgermeister seiner Heimat- und Festspielstadt Wunsiedel im Fichtelgebirge sowie Aufsichtsrat der SWW Wunsiedel GmbH.



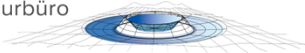
Dabei intensive Auseinandersetzung mit Fragen der Energieversorgung.

Im Zuge eines Projektvorschlages für ein Pumpspeicherkraftwerk im Fichtelgebirge erfolgte die Suche nach Antworten auf die Frage:

Wie können Energiespeicher einen Beitrag zu einer nachhaltigen regenerativen Stromversorgung leisten?

- 2010 Doktor-Ingenieur an der TU Braunschweig
- 2011 Finalist um den RWE Zukunftspreis 2011
- 2013 Professor für Energietechnik, Technische Hochschule Nürnberg

MATTHIAS POPP
Ingenieurbüro



Erneuerbare Energien, Energiespeicherung
Simulationen, Software-Entwicklung



Im Jahr 2008 stellte ich mir aus Anlass öffentlicher Diskussionen um ein vorgeschlagenes Pumpspeicherkraftwerk im Fichtelgebirge die Frage des Speicherbedarfs bei einer Stromversorgung mit erneuerbaren Energien.

Diese sollen in Zukunft die Hauptlast der Versorgung übernehmen, wenn fossile Energieträger zunehmend teurer und knapper werden.

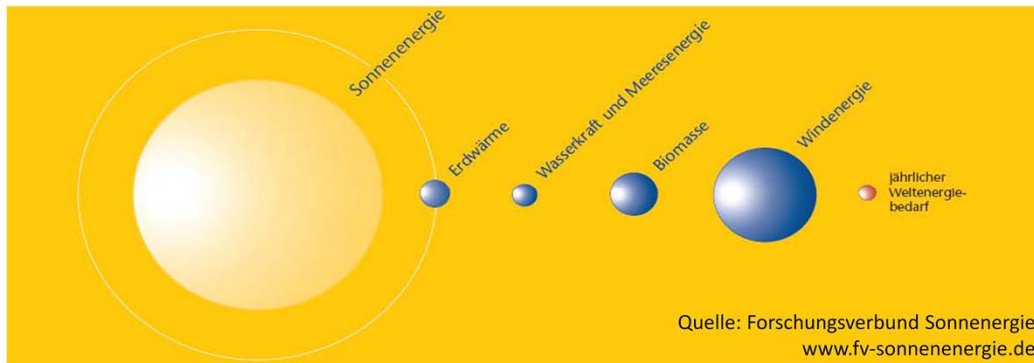
Damals gab es dazu in Deutschland weder eine Literatur noch eine Forschungseinrichtung, welche eine Antwort auf diese Frage geben konnte.

Internetrecherchen ergaben, dass umfassende Daten zur Untersuchung dieser Fragestellung existieren.

Meine Ausbildung und meine langjährige Auseinandersetzung mit der Analyse und Verarbeitung großer Datenbestände ermöglichten mir eine systematische Untersuchung dieser Fragestellung für Europa auf der Basis realer Energiewetterdaten über einen fast 40-jährigen Zeitraum.

Die daraus entstandene Promotion wird vom Springer Verlag als Buch herausgegeben und erreichte das Finale um der RWE Zukunftspreis 2011.

Ist eine zu 100% erneuerbare Stromversorgung überhaupt möglich?



- Das Energieangebot der Sonne übertrifft den Weltenergiebedarf der Menschheit um das ca. 8000-Fache,
- das der damit angefachten Windbewegungen um das ca. 700-Fache.

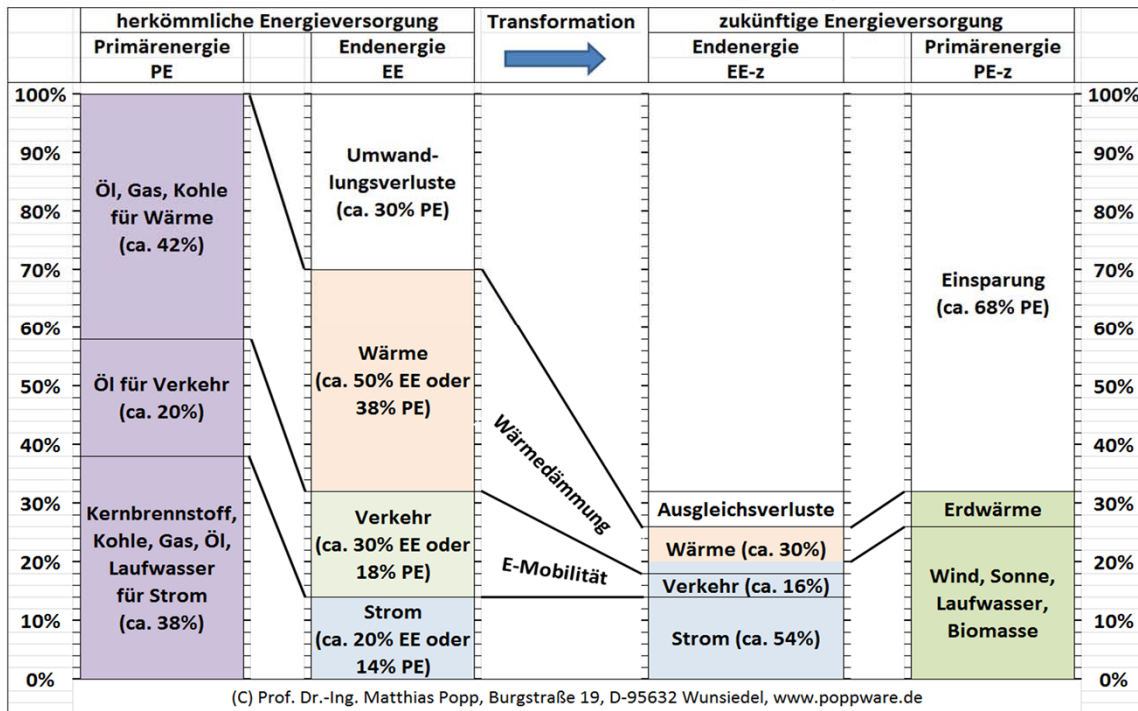
Der **Weltenergiebedarf** wird von der einstrahlenden Sonne und den dadurch angefachten Winden um viele Größenordnungen übertroffen.

Diese praktisch unbegrenzt verfügbaren Energiequellen werden in Zukunft die Hauptlast einer regenerativen Stromversorgung übernehmen.

In den dicht besiedelten Ländern Europas wird man sich auf diese beiden großen Potentiale konzentrieren müssen, wenn der Stromverbrauch nachhaltig gedeckt werden soll.

Andere Arten, wie Biomasse, Wasserkraft oder Erdwärme werden einen kleinen weiteren Beitrag dazu leisten.

Transformation des Energiesystems



Die zukünftige Energieversorgung soll ohne fossile und nukleare Rohstoffe zurechtkommen.

Um den gewohnten Lebensstandard zu erhalten, können erhebliche Einsparpotentiale durch die Isolierung von Gebäuden und durch Elektrofahrzeuge erschlossen werden.

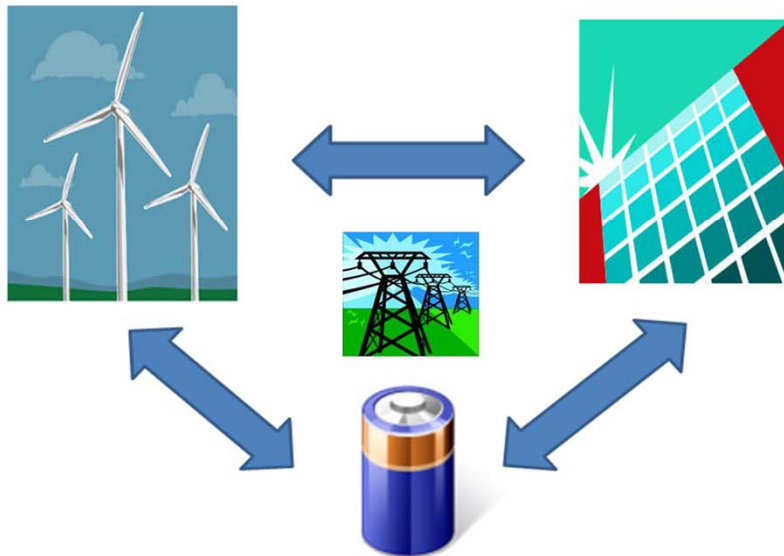
Der dabei voraussichtlich zunehmende Strombedarf wird aus natürlichen Energiekreisläufen zu decken sein.

Ohne Elektromobilität, z.B. durch Substitution der fossilen Brennstoffe mit beispielsweise Methan, das aus Wind- und Solarstrom erzeugt wird, lassen sich die Umwandlungsverluste in Verbrennungsmotoren kaum reduzieren. In diesem Fall müsste deutlich mehr regenerative Energie gewonnen werden und eine entsprechend größere Anzahl von Wind- und Solarenergiesystemen errichtet werden.

Auch die Wärmebereitstellung für Gebäude ließe sich ohne saisonale Wärmespeicherlösungen mit Kraft-Wärme gekoppelten Heiz- und Stromerzeugungsanlagen oder zukünftig auch mit Brennstoffzellen z.B. auf Methanbasis realisieren. Auch dieser Ansatz erfordert mehr Energieumwandlungsanlagen, als in der gezeigten Grafik angenommen wird.

Die Verfügbarkeit von regenerativer Energie als Solches ist kein Problem. Vielmehr geht es um die Frage des Aufwands und die Bereitschaft, entsprechende Veränderungen im Lebensumfeld zuzulassen.

Stromverbrauch, Wind, Sonne und Speicher



(C) Prof. Dr.-Ing Matthias Popp, Burgstraße 19, 95632 Wunsiedel, www.poppware.de

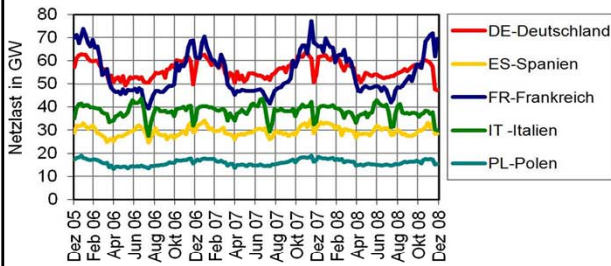
5

Die maßgeblichen regenerativen Energien stehen aber volatil, also wetterlaunig zur Verfügung.

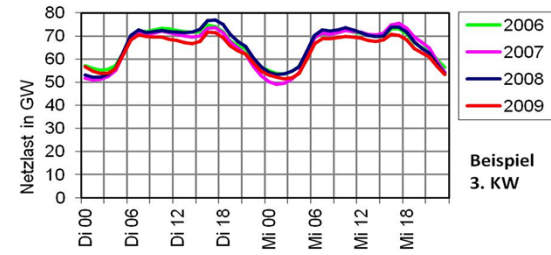
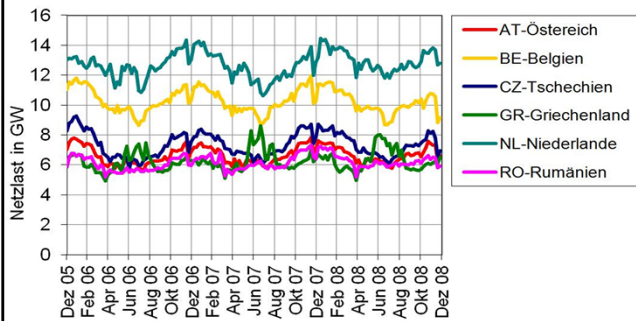
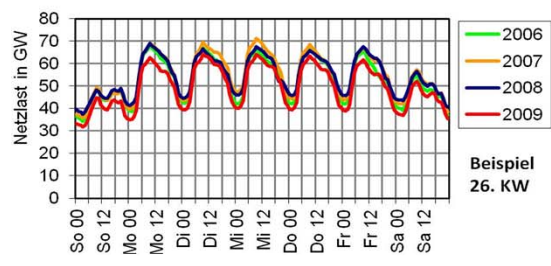
Durch Speichereinsatz können sie der Nachfrage angepasst werden.

Stromverbrauch in Europa

wöchentliche Netzlasten europäischer Länder



tageszeitliche Netzlasten in Deutschland



(C) Prof. Dr.-Ing Matthias Popp, Burgstraße 19, 95632 Wunsiedel, www.poppware.de

6

Der **Verbrauch** in den europäischen Ländern ist im Normalfall im Winterhalbjahr höher als im Sommer.

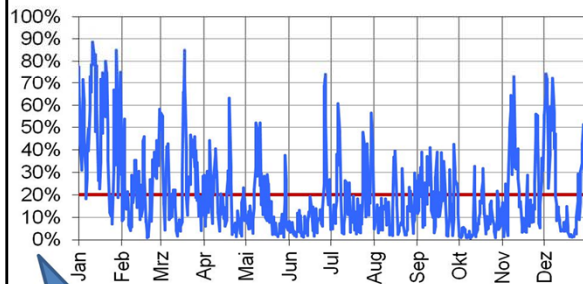
Er zeigt in Abhängigkeit von den elektrisch betriebenen industriellen Prozessen, der Jahreszeit, den Wetterverhältnissen, Ferienzeiten, Feiertagen, Großereignissen, der Nutzung elektrischer Heizeinrichtungen und dem Verbrauchsverhalten in den verschiedenen Ländern einen typischen wöchentlichen Verlauf.

Elektrische Energie kann im Stromnetz nicht direkt gespeichert werden, sondern muss in jedem Moment mit der Leistung bereitgestellt werden, die verbraucht wird.

Die Energiewirtschaft hat diese Versorgungsaufgabe in jedem Moment präzise zu erfüllen, egal welcher Kraftwerkspark sich dahinter befindet.

Charakteristik der Windenergie

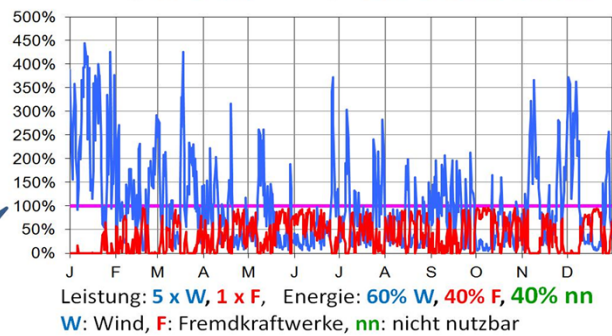
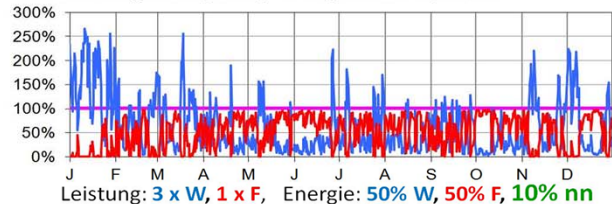
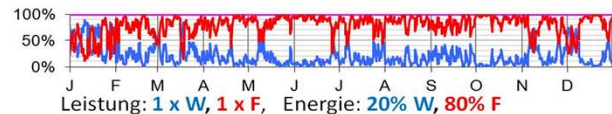
**Tatsächliche
Windstromeinspeisung in
Deutschland
beispielhaft für 2005 (blau)
Benutzungsgrad ca. 20%**



100% = installierte
Nennleistung

100% =
durchschnittliche
Nachfrage

Ausbauszenarien ohne Speicher



(C) Prof. Dr.-Ing Matthias Popp, Burgstraße 19, 95632 Wunsiedel, www.poppware.de

7

Die in den Windenergieanlagen installierte maximale Generatorleistung wird bei deutschlandweiter Betrachtung, wegen meist schwächerer Winde, praktisch nie erreicht.

Ab und zu gibt es landesweite Flauten, in denen die Windstromproduktion gegen Null abfällt.

Die gewählte Darstellung vergleicht die verfügbare Windleistung mit der in den Generatorgondeln installierten maximalen Leistung. Damit können auch Versorgungsverhältnisse untersucht werden, mit denen bei einem weiteren Ausbau der Windenergie zu rechnen ist.

Immer dann, wenn der Windstrom nicht ausreicht, um die ihm zugedachte Versorgungsaufgabe zu erfüllen, müssen andere Kraftwerke einspringen, um das Defizit auszugleichen.

Im Durchschnitt lieferten die Windenergieanlagen Deutschlands etwa 20% der Leistung auf die sie ausgelegt sind.

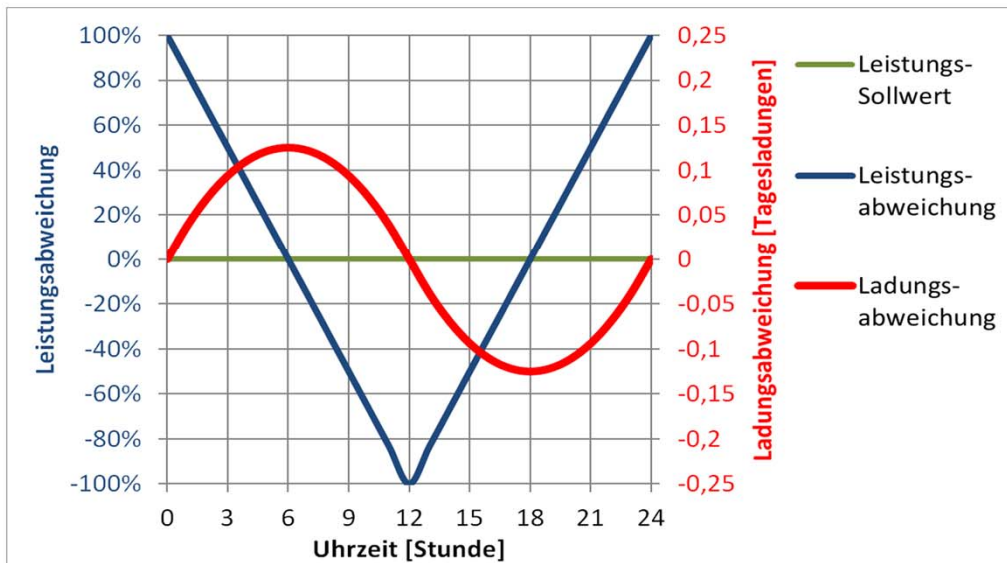
Ihr Benutzungsgrad lag damit bei durchschnittlich 20%.

Windenergieanlagen können jedoch auch so ausgelegt werden, dass sie höhere Benutzungsgrade erreichen.

Zur Ermittlung der notwendigen Speichereigenschaften zum Ausgleich von Überschüssen und Defiziten wird die Ladungsabweichung eingeführt.

Ladungsabweichung

als charakteristisches Merkmal volatiler Stromquellen



(C) Prof. Dr.-Ing Matthias Popp, Burgstraße 19, 95632 Wunsiedel, www.poppware.de

8

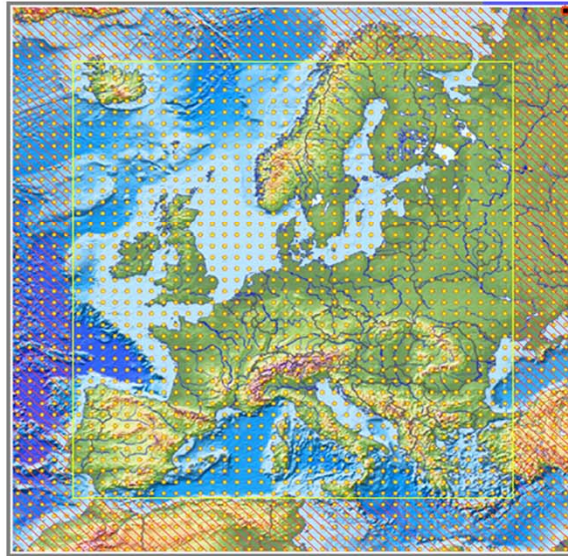
Die **Ladungsabweichung** zeigt, wie ein idealer Speicher bewirtschaftet werden müsste, um aus einer volatilen Erzeugungsleistung eine konstante Versorgungsleistung zu machen, wenn genau gleich viel Strom erzeugt und verbraucht würde.

Zeitweise Leistungsüberschüsse würden einen Speicher aufladen und Defizite würden ihn entleeren.

Am Ende eines Untersuchungszeitraums hätte der Speicher wieder den anfänglichen Ladezustand.

Mathematisch handelt es sich um das Integral der Durchschnittsleistungsabweichung über der Zeit.

Windenergie in Europa - Datengrundlage



Rastergebiete

90 x 90 km

Windgeschwindigkeit

100 Meter über Grund

1970 bis 2008

3-stündige Zeitschritte

Quelle:

Anemos Gesellschaft für
Umweltmeteorologie mbH

(C) Prof. Dr.-Ing Matthias Popp, Burgstraße 19, 95632 Wunsiedel, www.poppware.de

9

Mit diesem Konzept wurde die Windenergie in Europa untersucht.

Zur Verfügung stand ein digitaler Windatlas.

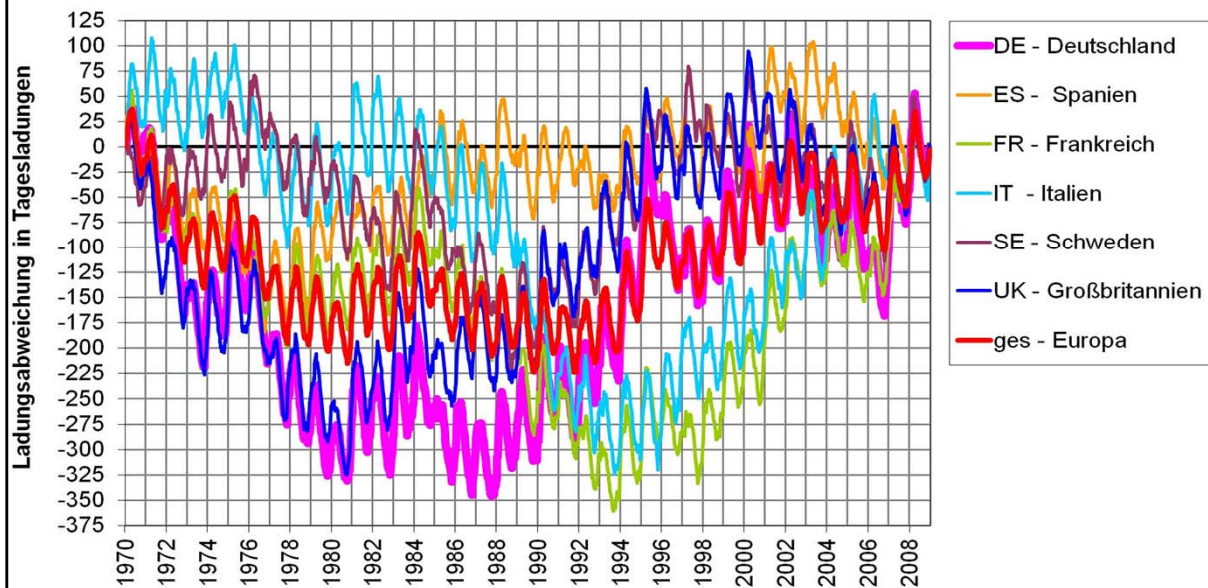
In dreistündigen Zeitschritten wurden Windleistungen für alle Länder Europas berechnet, die sich an den Kennlinien realer Windenergieanlagen orientieren.

Der Vergleich dieser berechneten Werte, mit den tatsächlichen Windstromeinspeisungen in Deutschland, ergab eine gute Übereinstimmung und begründet das Vertrauen in die angewandte Vorgehensweise.

Betrachten wir die dabei ermittelten Ladungsabweichungen.

Ladungsabweichung der Windenergie in Europa

für Windenergieanlagen mit 20% Benutzungsgrad



(C) Prof. Dr.-Ing Matthias Popp, Burgstraße 19, 95632 Wunsiedel, www.poppware.de

10

Für den Untersuchungszeitraum ergeben sich für einige große Stromverbrauchsländer und für Europa insgesamt die dargestellten Ladungsabweichungen. Eine Tagesladung ist die elektrische Energie, die im Langzeitdurchschnitt an einem Tag im jeweiligen Gebiet verbraucht wird.

Zugrunde liegt die Annahme, dass in jedem europäischen Land, und damit auch in Europa insgesamt, Windenergieanlagen zur Verfügung gestanden hätten, mit denen im Gesamtzeitraum genau so viel Strom hätte produziert werden können, als über diesen Zeitraum verbraucht wurde. Folglich ist die Ladungsabweichung am Anfang und am Ende der Untersuchung genau auf Null.

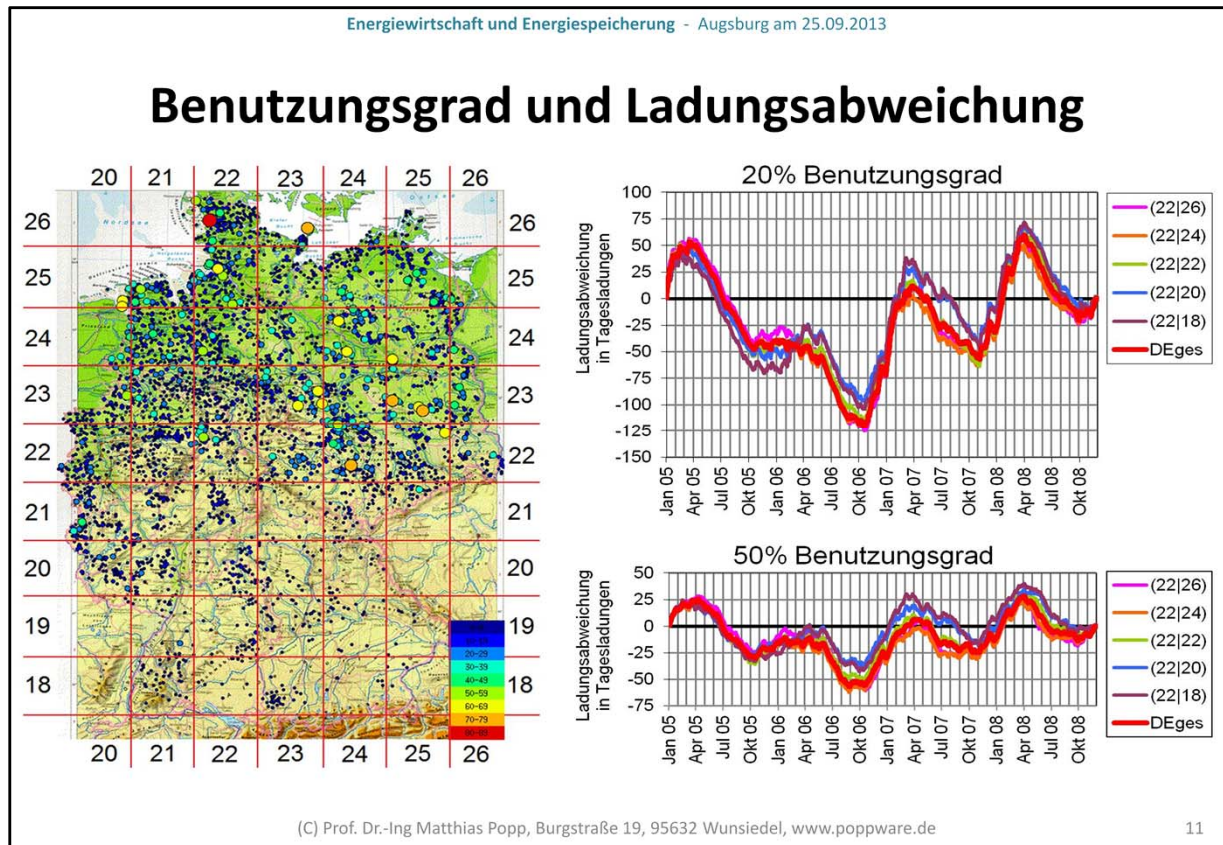
In windschwachen Perioden kommt es zu einer Speicherleerung, in windstarken zu einer Speicheraufladung.

Die Kurven zeigen erhebliche Unterschiede im jährlichen Windenergiedargebot der einzelnen Länder.

Die Ladungsabweichungen bauen sich dabei in einigen Ländern zu Beträgen auf und wieder ab, die dem Stromverbrauch eines gesamten Jahres entsprechen.

Besonders zu beachten ist, dass es in allen Ländern Europas im Winter, wegen durchschnittlich stärkerer Winde zu einer Ladungszunahme und im Sommer, wegen schwächerer Winde zu einer Ladungsabnahme käme.

Die bei der Windenergienutzung auftretende Ladungsabweichung hängt dabei stark von der technischen Auslegung der Windenergieanlagen ab.



Herunter gebrochen auf Deutschland zeigt die Karte die Rastergebiete des verwendeten europäischen Windatlas.

Vergleicht man die Ladungsabweichungen der einzelnen Gebiete Deutschlands, dann stellt man fest, dass die Kurvenverläufe alle sehr ähnlich sind.

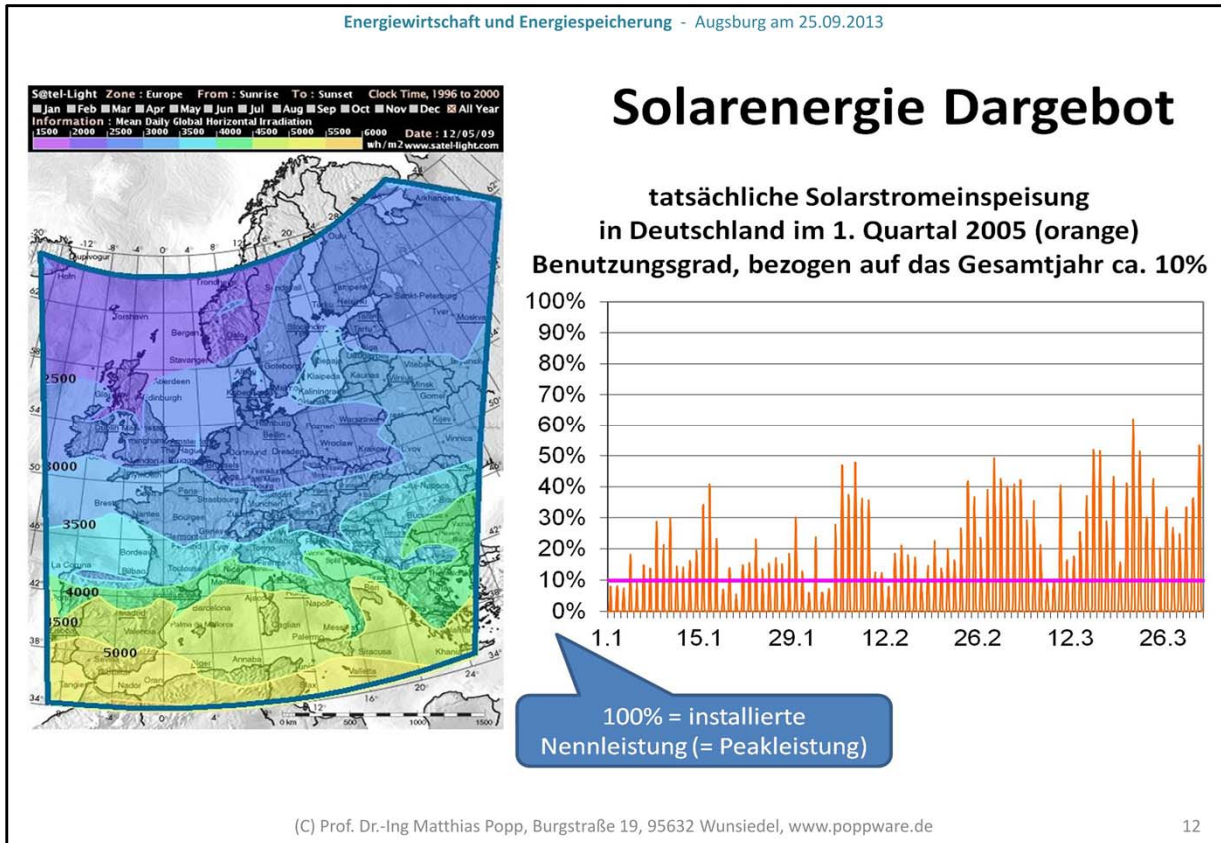
Die Diagramme zeigen beispielhaft für vier Jahre von Nord nach Süd die Ladungsabweichungen einiger Gebiete.

Die Ähnlichkeit der Verläufe liegt daran, dass die Windverhältnisse in der Regel einem großräumigen Wettergeschehen folgen, das weit über die Grenzen einzelner Länder hinausreicht.

Die Ausgleichseffekte durch eine leistungsstarke nationale Vernetzung werden sich deshalb bezüglich der Windenergie in Grenzen halten.

Viel größer ist jedoch der Effekt, der sich über einen höheren Benutzungsgrad erzielen lässt.

(Details dazu befinden sich im Anhang)



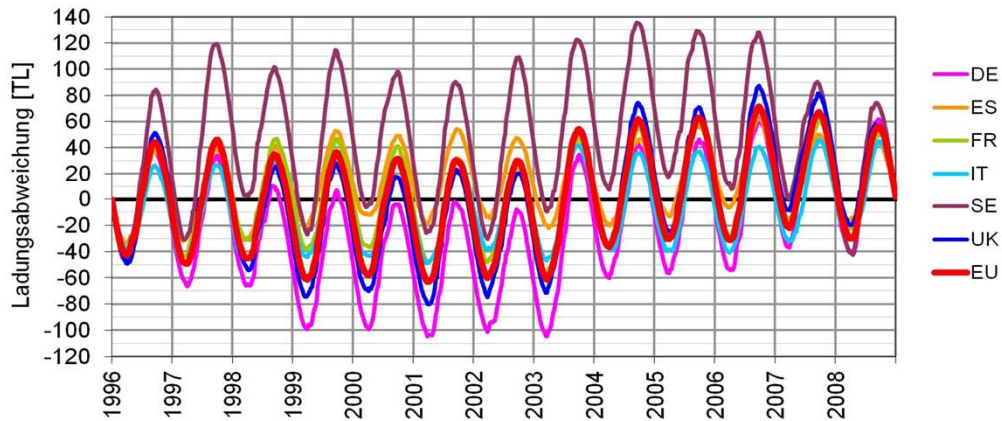
Für die analog untersuchte **Solarenergie** standen Globalstrahlungsdaten aus Meteosat Messungen zur Verfügung.

Die Einspeiseleistung kommt in täglichen Pulsen an und erreicht im Langzeitdurchschnitt für Deutschland ca. 10% der mit Solarmodulen installierten Peakleistung.

(Peakleistung ist die Leistungsabgabe eines Solarmoduls bei einer genormten hohen Einstrahlung, die in Deutschland über Mittag an einem klaren Sommersonntag erreicht werden kann)

Auch dafür wurden die Ladungsabweichungen ermittelt.

Ladungsabweichung einer Solarstromversorgung



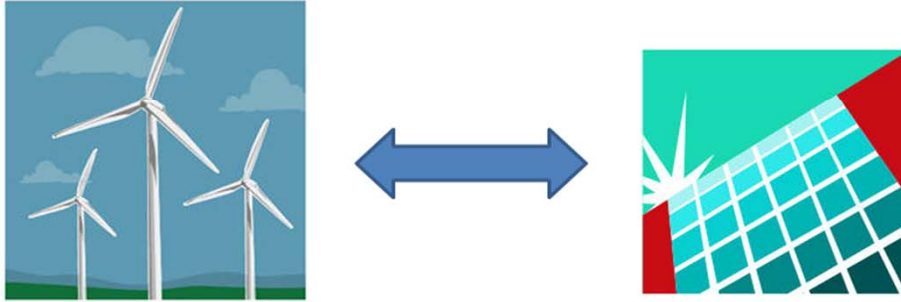
(C) Prof. Dr.-Ing Matthias Popp, Burgstraße 19, 95632 Wunsiedel, www.poppware.de

13

Das Diagramm zeigt erwartungsgemäß, dass sich die Speicher im Sommer füllen und im Winter leeren würden.

Damit verhält sich die Ladungsabweichung der Sonnenenergie in Europa gegenläufig zur Ladungsabweichung der Windenergie.

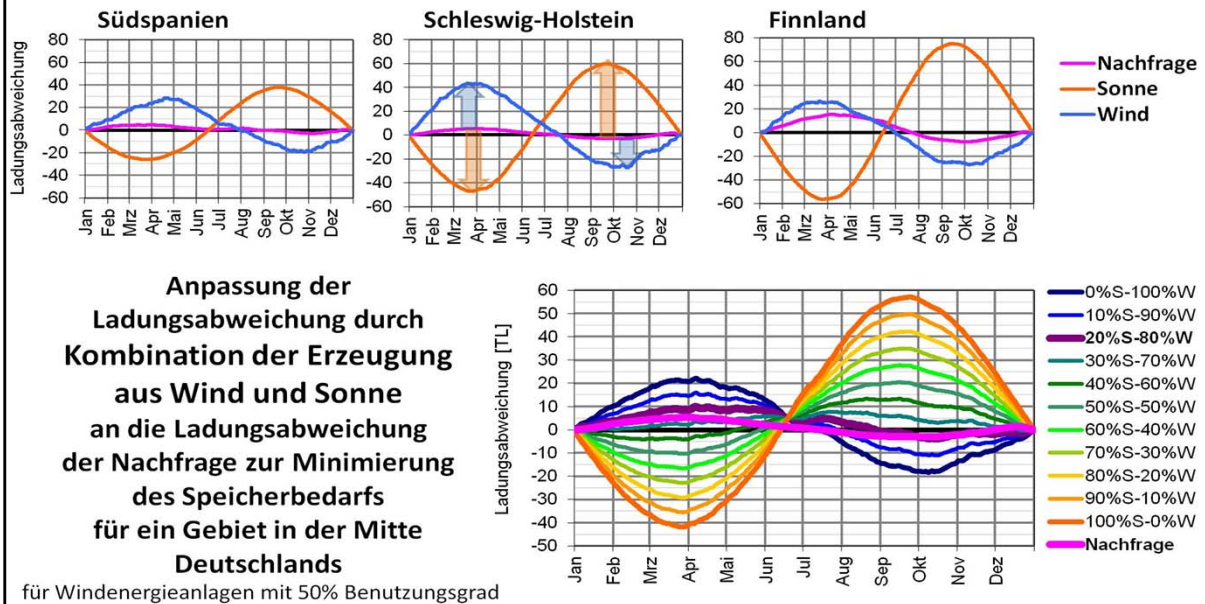
Kombination von Wind und Sonne



Daher liegt es nahe, über eine Kombination dieser beiden volatilen Energieressourcen nachzudenken.

jahresdurchschnittliche Ladungsabweichungen

der Nachfrage sowie des Solar- und Windenergiedargebots in Beispielregionen



(C) Prof. Dr.-Ing Matthias Popp, Burgstraße 19, 95632 Wunsiedel, www.poppware.de

15

Zur Veranschaulichung dieser Verhältnisse wurden die Ladungsabweichungen von Wind, Sonne und der Nachfrage aus 13 Jahren auf einen Jahreszeitraum zusammengefasst.

Die Summe der beiden blauen Pfeile im Beispiel für Schleswig-Holstein gibt die Speicherkapazität wieder, die dort ein bedarfsgerechter Ausgleich der Windenergie erfordern würde.

Ein realer Speicher müsste den Unterschied zwischen maximaler Aufladung über der Verbrauchskurve und maximaler Entnahme unterhalb der Verbrauchskurve ausgleichen können.

Die Summe der beiden orangenen Pfeile ergibt analog die erforderliche Speicherkapazität für eine reine Fotovoltaik Versorgung.

Die Erzeugungsbeiträge von Wind und Sonne können für jede Region und jedes Land so aufeinander abgestimmt werden, dass sie in Summe eine minimale Abweichung von der regionstypischen Nachfrage aufweisen.

Über den darüber ermittelten Erzeugungsmix lässt sich die erforderliche Speicherkapazität minimieren.

Reale Versorgung und Speicherbedarf



Reale Versorgungssysteme müssen mit verlustbehafteten Speichern und mit verlustbehafteten Übertragungsnetzen zurechtkommen.

Speicher können zudem nur über begrenzte Kapazität und Übertragungsnetze nur über begrenzte Übertragungsleistungen verfügen.

Sichere Stromversorgung durch Erzeugungsreserven

Erzeugungsreserven

dienen neben dem

Ausgleich von Speicher- und Übertragungsverlusten

auch dazu,

verbrauchsstarke und/oder **erzeugungsschwache Jahre** mit **begrenzten Speicherkapazitäten** sicher **überbrücken** zu können.

Damit sich damit trotzdem eine sichere und jederzeit bedarfsgerechte Stromversorgung aufbauen lässt, sind **Erzeugungsreserven** erforderlich.

Diese erlauben es, im Langzeitdurchschnitt mehr volatile Energie in elektrischen Strom umzuwandeln, als tatsächlich verbraucht wird.

Erzeugungsreserven werden benötigt, um Speicher- und Übertragungsverluste auszugleichen und um nach erzeugungsschwächeren Perioden die Speicher immer wieder aufladen zu können.

Hinweis:

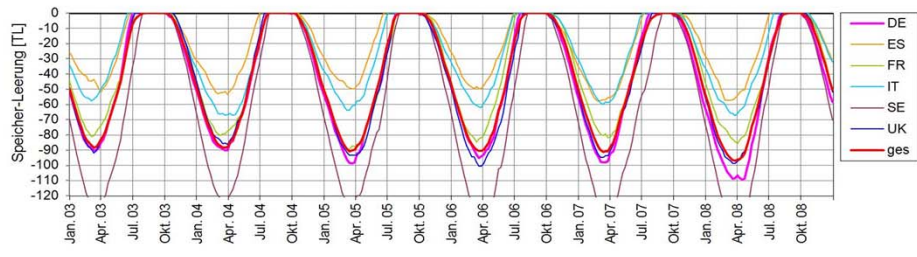
Auch die konventionelle Stromversorgung erfordert einen Kraftwerkspark mit erheblichen Erzeugungsreserven. Nicht die durchschnittlich nachgefragte Leistung, sondern die höchste einmalig zu erfüllende Leistungsspitze muss abgedeckt werden können.

Die in Einsatzbereitschaft gehaltene Kraftwerksleistung lag vor der Energiewende in Deutschland deshalb etwa beim Doppelten, der im Durchschnitt nachgefragten Leistung.

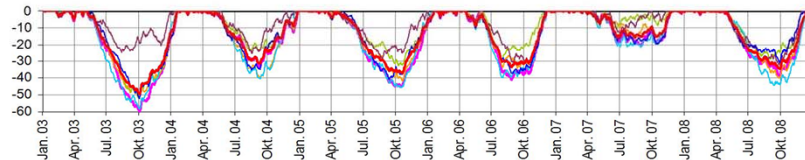
Speicherleerungskurven bei 30% Erzeugungsreserve

Solarenergie
mit leistungsverstärkten
Speichern

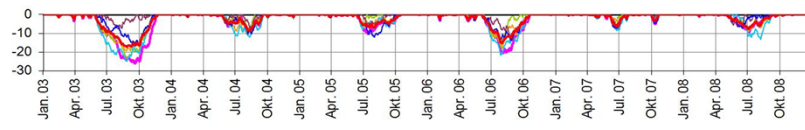
mit 80%
Speicherwirkungsgrad
bei leistungsstarker
kontinentaler Vernetzung



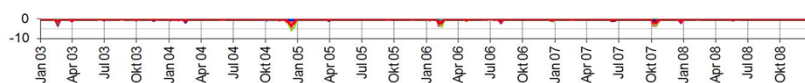
Windenergie mit
20% Benutzungsgrad



Windenergie mit
50% Benutzungsgrad



optimierte Kombination
aus Sonne und Wind
mit 50% Benutzungsgrad



(C) Prof. Dr.-Ing Matthias Popp, Burgstraße 19, 95632 Wunsiedel, www.poppware.de

18

Die Speicherbewirtschaftung für reale, technisch umsetzbare Bedingungen, lässt sich über **Speicherleerungskurven** darstellen.

Diese sind hier dargestellt unter der Annahme einer 30 prozentigen Erzeugungsreserve und eines länderübergreifend ideal kooperierenden Europas.

Bei einer reinen Photovoltaik Versorgung ergäben sich die größten Speicherleerungen am Ende des Winters mit teilweise über 100 Tagesladungen.

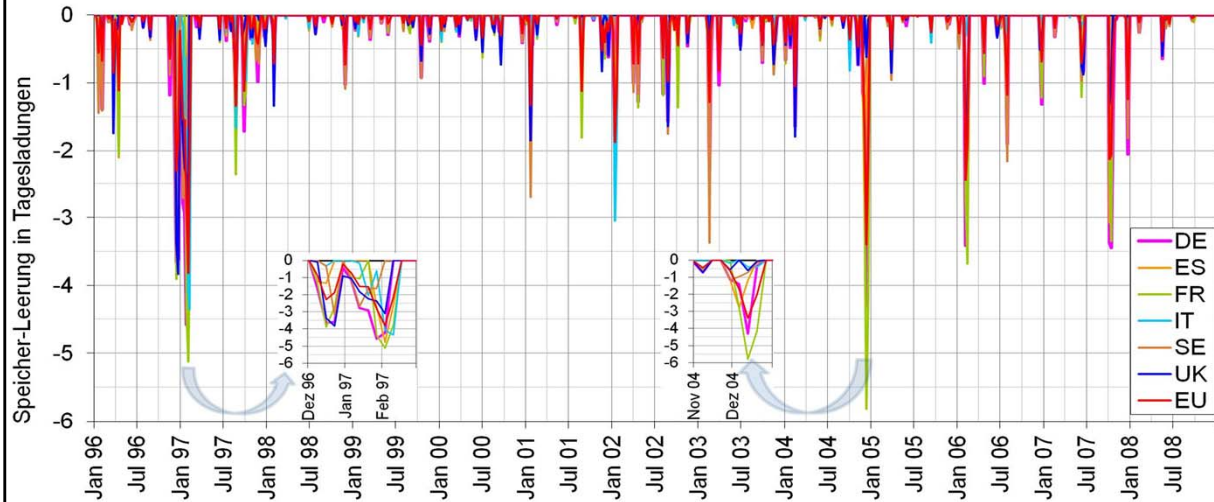
Windenergie mit dem niedrigen, derzeit in Deutschland feststellbaren Benutzungsgrad von ca. 20% hätte die größten Speicherleerungen am Ende des Sommers mit bis zu 60 Tagesladungen.

Windenergie mit höherem Benutzungsgrad könnte die Speicherleerung und damit die für eine sichere Stromversorgung erforderliche Speicherkapazität auf ca. 26 Tagesladungen reduzieren.

Ein optimaler Mix dieser beiden Energiearten würde eine drastische Reduzierung der maximal notwendigen Speicherkapazität bewirken.

Speicherbedarf minimierende Kombination

aus Windenergie mit 50% Benutzungsgrad und Solarenergie
bei leistungsstarker kontinentaler Vernetzung



(C) Prof. Dr.-Ing Matthias Popp, Burgstraße 19, 95632 Wunsiedel, www.poppware.de

19

Diese Verhältnisse werden in diesem Diagramm, für eine europaweit optimierte Zusammenarbeit, über einen längeren Zeitraum genauer aufgezeigt.

Man erkennt, dass es nur alle paar Jahre, während des Winters, zu einer bedeutenden Inanspruchnahme der Speicherkapazität käme.

Häufig würden die Speicher über viele Monate hinweg mit weniger als einer halben Tagesladung beansprucht, meistens wären die Speicher gut gefüllt.

Herausforderung der Transformation

Kraftwerke,

deren **Leistung nach Bedarf** angefordert werden kann

werden **ersetzt durch** Energieumwandlungsanlagen,

die **Leistung nach Wetterlage** abgeben.

Stromerzeugung nach Anlagentypen

Leistungs- verfügbarkeit	konventionelle Systeme (endliche, knapper werdende Energieträger)	regenerative Systeme (aus natürlichen Kreisläufen entnommene Energiepotentiale, die sich immer wieder neu bilden)
bedarfsgerecht	<ul style="list-style-type: none"> • Gaskraftwerke, • Ölkraftwerke, • Steinkohlekraftwerke 	<ul style="list-style-type: none"> • Speicherwasserkraftwerke (soweit Kapazität vorhanden), • Biomethankraftwerke
weitgehend konstant	<ul style="list-style-type: none"> • Kernkraftwerke, • Braunkohlekraftwerke 	<ul style="list-style-type: none"> • Geothermiekraftwerke, • Biomassekraftwerke, • Gruben-/Deponiegaskraftwerke, • Müllverbrennungsanlagen
Energiewetter abhängig	<ul style="list-style-type: none"> • wärmegeführte Heizkraftwerke (KWK, mit fossilen Energieträgern betrieben) 	<ul style="list-style-type: none"> • Laufwasserkraftwerke, • Solarenergieanlagen, • Windenergieanlagen, • wärmegeführte Heizkraftwerke (KWK, mit regenerativen Energieträgern betrieben)

Von entscheidender Bedeutung für die Möglichkeit zur bedarfsgerechten Verbrauchsdeckung ist die kurzfristige Leistungsverfügbarkeit der bereitstehenden Kraftwerke.

Bei der Weiterentwicklung der heute vorliegenden Situation geht es zugleich darum, konventionelle durch regenerative Stromerzeugungssysteme abzulösen.

Wenn das dabei entstehende Stromerzeugungssystem für sich alleine nicht in der Lage ist, eine jederzeit bedarfsgerechte Versorgung zu gewährleisten, sind zusätzliche Systeme erforderlich, um Erzeugung und Verbrauch in einer jederzeitigen präzisen Balance zu halten.

Ausgleich von Erzeugung und Verbrauch

Ebene	Technologie	Varianten	Wirkung
Nachfrageseite	Lastmanagement	<ul style="list-style-type: none"> • Tarifieren • Lastverschiebung • Lastabwurf • 	Verbrauchsverschiebung, Verbrauchsverzicht oder Versorgungsunterbrechung bei Erzeugungsdefiziten
Erzeugungsseite	Erzeugungsmanagement	<ul style="list-style-type: none"> • Abregelung • Abschaltung 	Verzicht auf die Nutzung ausgebauter Potentiale von Laufwasser, Wind, Sonne, Biogas bei Überangebot
Übertragungsnetz	leistungsstarke großräumige Vernetzung	<ul style="list-style-type: none"> • HGÜ (Hochspannungs-Gleichstrom Übertragung) • HDÜ (Hochspannungs-Drehstrom Übertragung) 	Nutzung großräumiger statistischer Ausgleichseffekte zur Reduzierung regionaler Anforderungen
zusätzlich	Speicher	<ul style="list-style-type: none"> • Pumpspeicher • Druckluftspeicher • Gasspeicher • Batteriespeicher 	Bedarfsgerechte Versorgung durch Aufladung bei Erzeugungsüberschüssen und Entladung bei Erzeugungsdefiziten

(C) Prof. Dr.-Ing Matthias Popp, Burgstraße 19, 95632 Wunsiedel, www.poppware.de

22

Die mit Zusatzinvestitionen und -Aufwand verbundenen Maßnahmen ermöglichen über unterschiedliche Ansätze einen teilweisen oder vollständigen Ausgleich zwischen Erzeuger und verbrauchter Leistung.

Nachfrageseitige Ausgleichsmaßnahmen können eine reduzierte Versorgungsqualität bewirken.

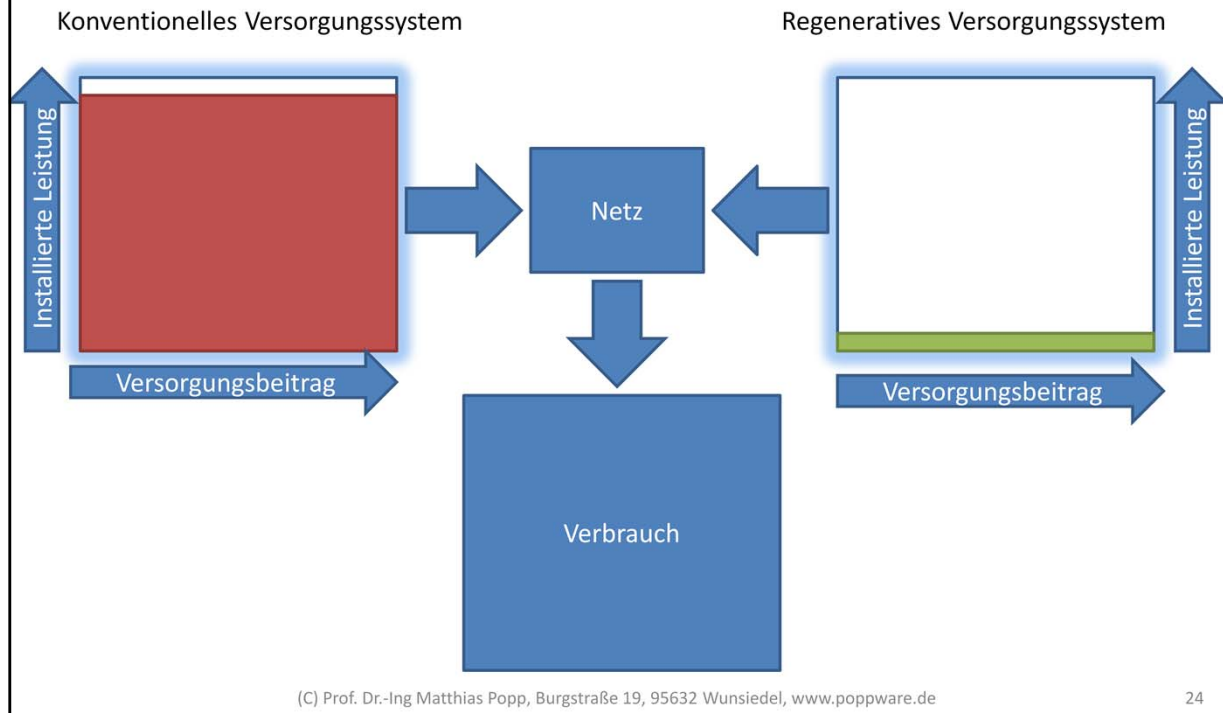
Passend ausgelegte Speichersysteme ermöglichen eine bedarfsgerechte Stromversorgung.

ideale und reale Transformation

ideal: Regenerative ersetzen Konventionelle

**real: Regenerative überlassen Konventionellen
die Versorgungssicherheit**

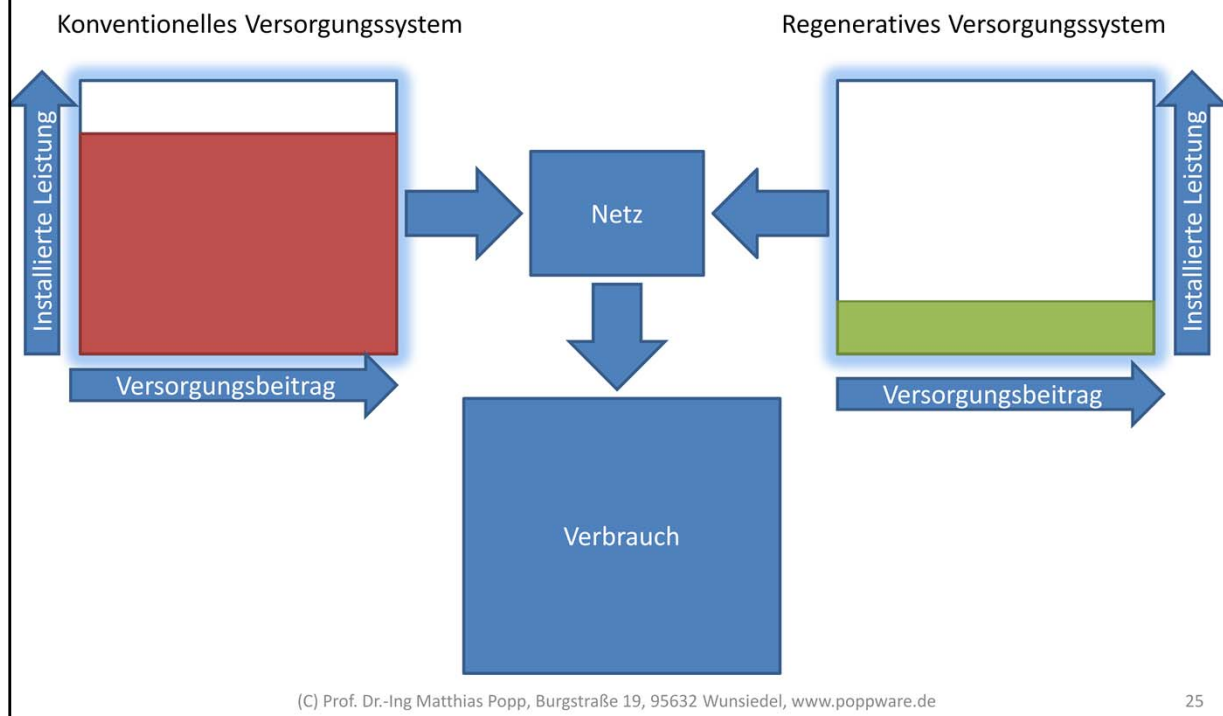
ideale Transformation der Stromversorgung mit Speichern



Historisch gesehen war ein konventioneller Kraftwerkspark darauf ausgelegt, den Verbrauch der Stromabnehmer jederzeit bedarfsgerecht zu decken.

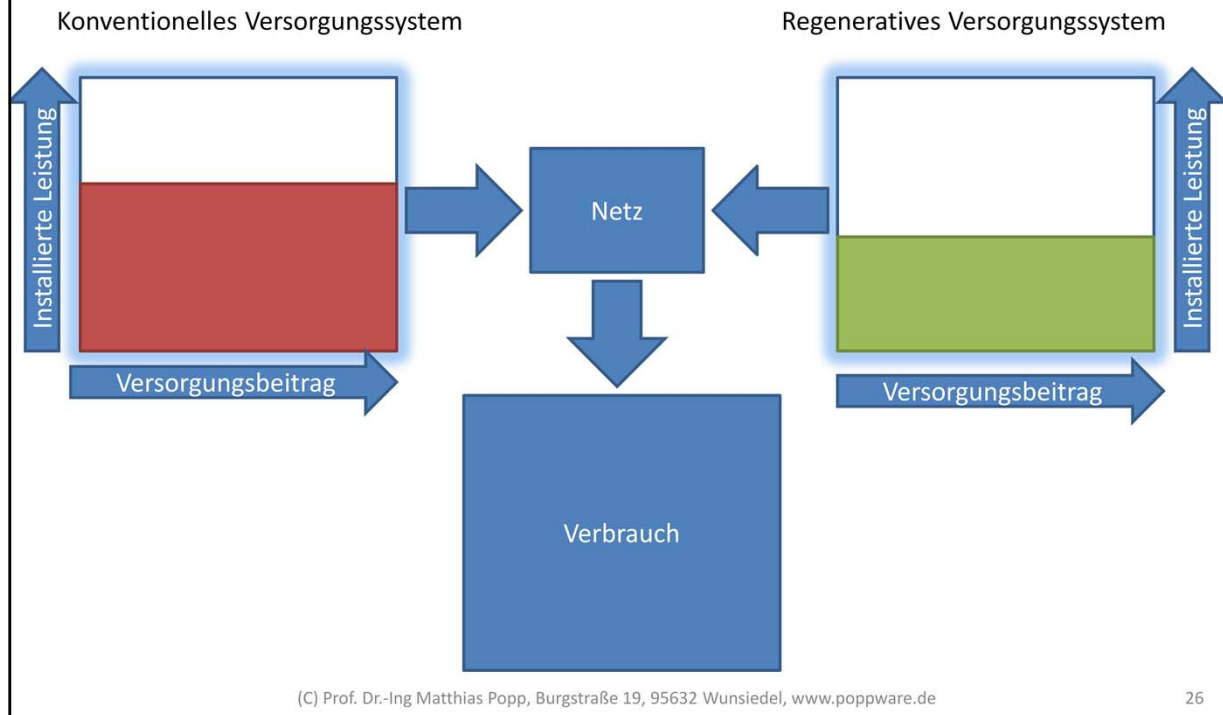
Mit der Wasserkraft stand von Anfang an ein regenerativer Anteil zur Verfügung, der einen eigenständigen Versorgungsbeitrag leisten konnte.

ideale Transformation der Stromversorgung mit Speichern



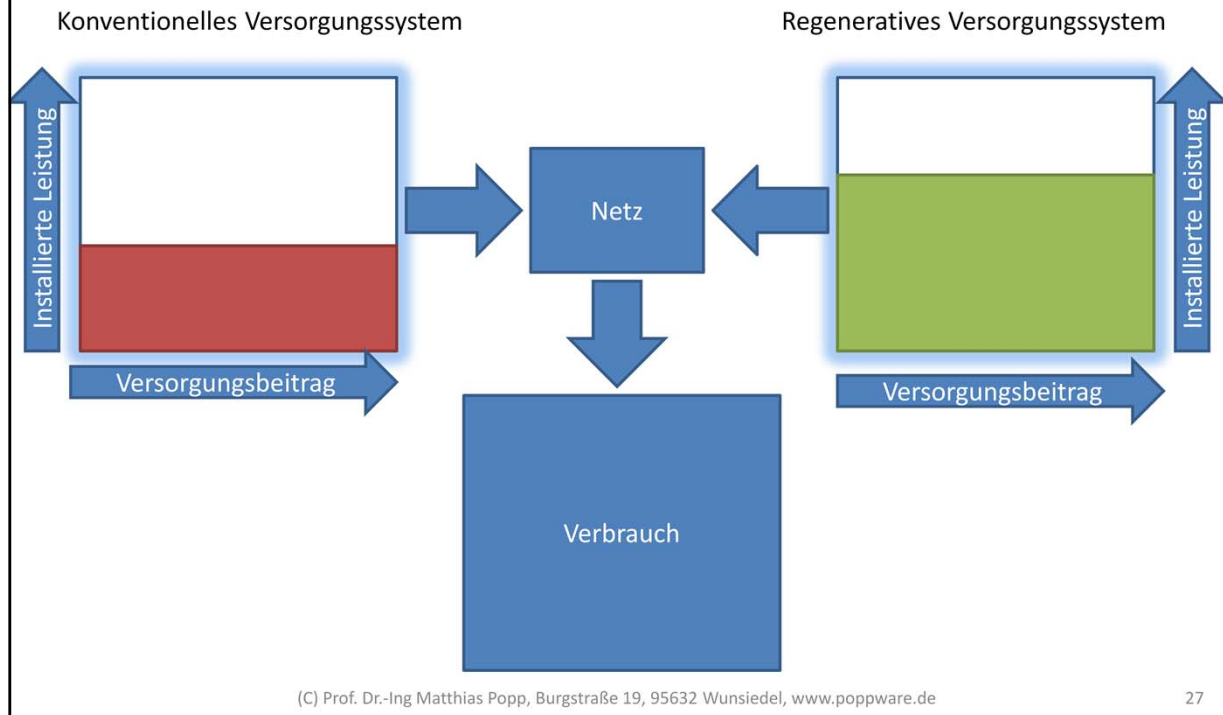
Bei einer idealen Transformation des Stromversorgungssystems könnte mit dem Zubau regenerativer Versorgungseinheiten die entsprechende Kapazität konventioneller Systeme stillgelegt werden.

ideale Transformation der Stromversorgung mit Speichern



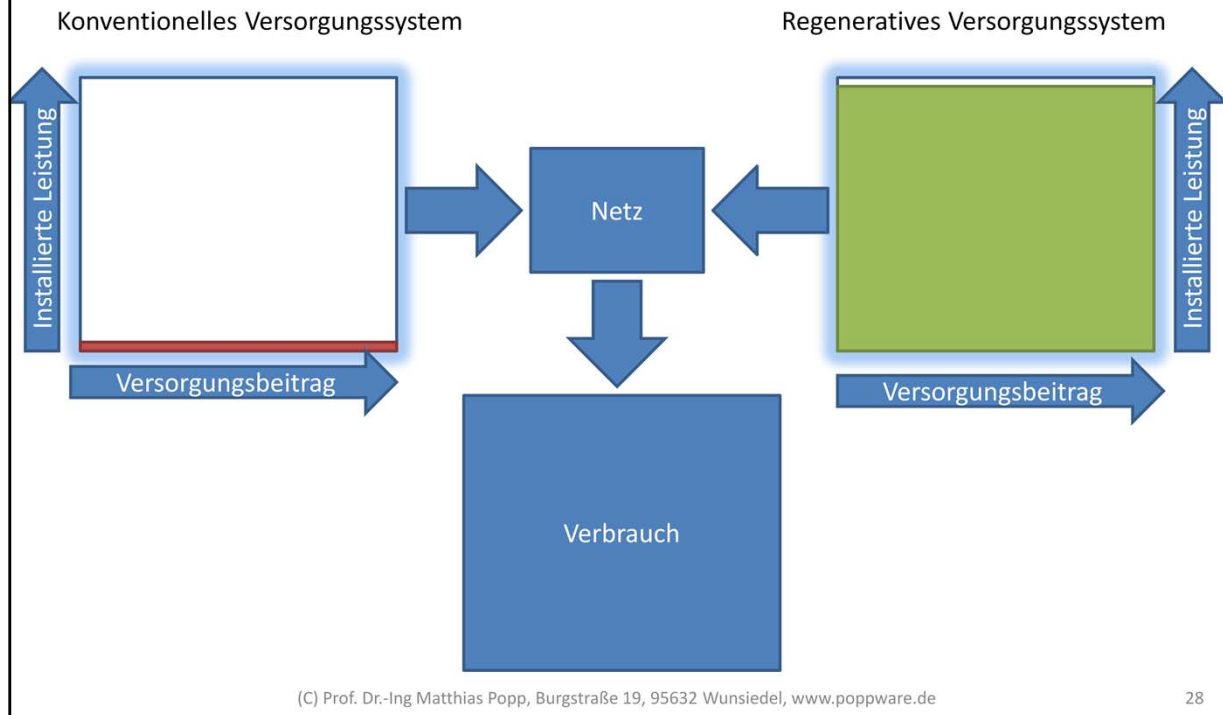
Erneuerbare Energiesysteme, die von Anfang an darauf ausgelegt wären, den Bedarf nachfragegerecht zu decken, würden es ermöglichen, auf konventionelle Kraftwerke zu verzichten.

ideale Transformation der Stromversorgung mit Speichern



Die Auslastung und damit die Rentabilität, der verbleibenden konventionellen Kraftwerke bliebe auf dem Niveau, für das sie ausgelegt waren.

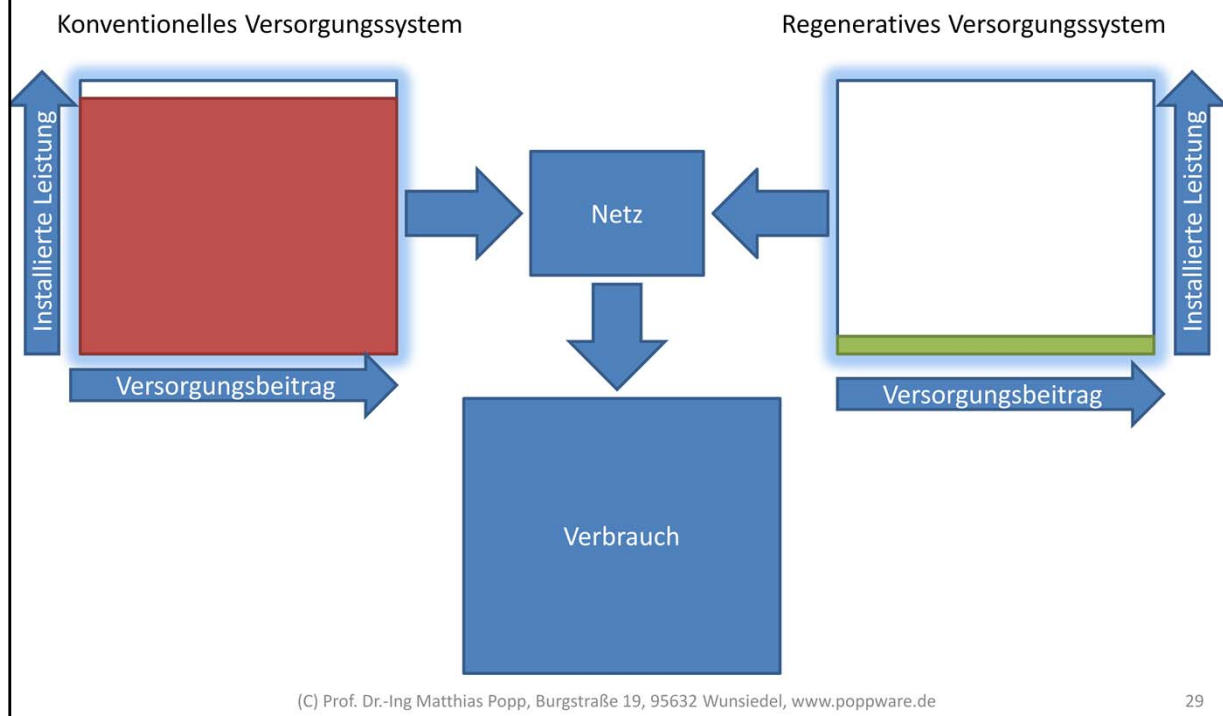
ideale Transformation der Stromversorgung mit Speichern



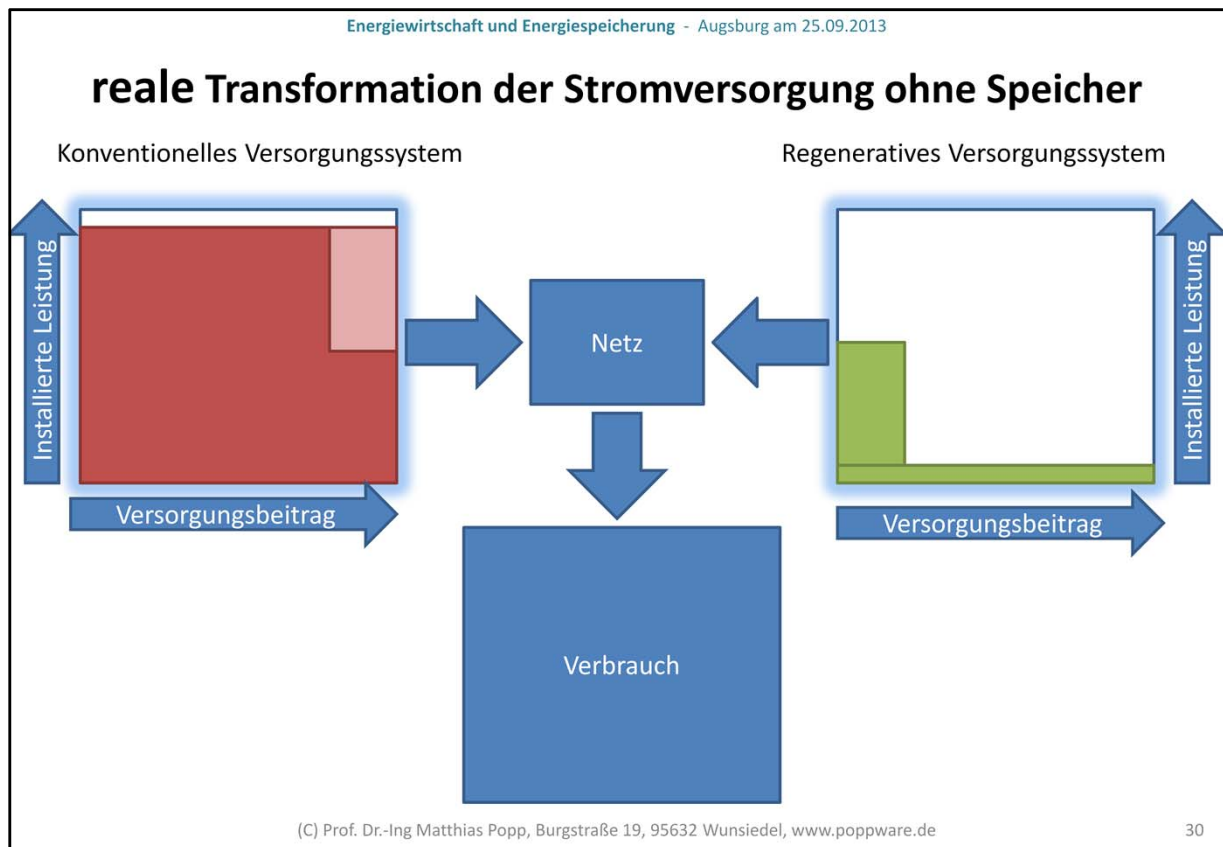
Am Ende hätten die regenerativen Versorgungssysteme die konventionellen abgelöst.

Das regenerative Versorgungssystem wäre so ausgelegt, dass es passend zu den Anforderungen der Verbraucher dimensioniert ist und die Versorgung jederzeit sicher stellen kann.

reale Transformation der Stromversorgung ohne Speicher



Real haben wir es mit der gleichen Ausgangssituation zu tun, die am Anfang der idealen Transformation stand.



Mit Wind- und Solarenergieanlagen wurden und werden regenerative Erzeugungsleistungen zugebaut.

Dies erfolgte jedoch ohne den Zubau von Einrichtungen, welche einen bedarfsgerechten Ausgleich der volatilen Erzeugungsleistungen herbeiführen konnten.

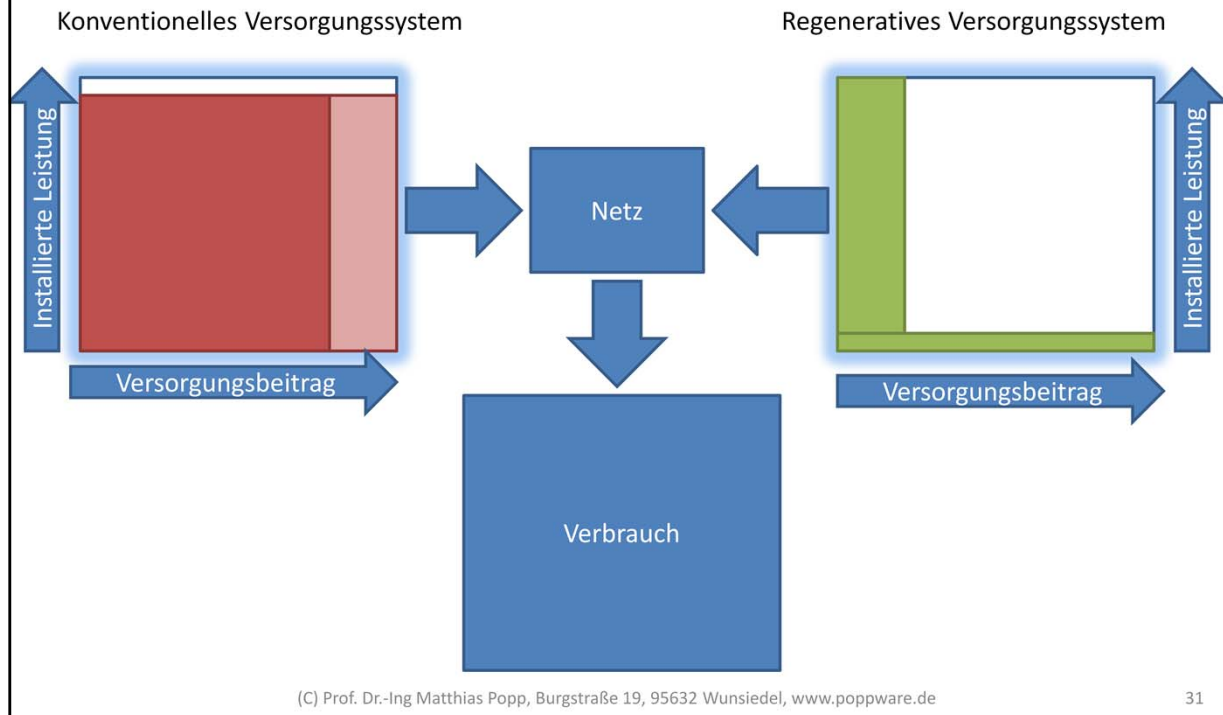
Das ist ein fundamentaler Unterschied zu vielen Wasserkraftanlagen, die über entsprechende Stauhaltungen über einen Energiespeicher verfügen und in der Lage sind, Leistung nach Bedarf zu liefern.

Solange die regenerativen Erzeugungssysteme Strom liefern, werden entsprechende konventionelle Kapazitäten außer Betrieb genommen um Erzeugung und Verbrauch im Gleichgewicht zu halten.

Der auf diese Weise erfolgte Zubau regenerativer Kraftwerksleistung führt zwar zu einer Reduzierung des Brennstoffverbrauchs konventioneller Kraftwerke, nicht aber zu einem Ersatz dieser Kraftwerkskapazität.

Immer dann, wenn das regenerative Versorgungssystem nicht in der Lage ist, den anteiligen Versorgungsbeitrag zu leisten, muss die konventionelle Kraftwerksleistung bereitstehen und einspringen.

reale Transformation der Stromversorgung ohne Speicher

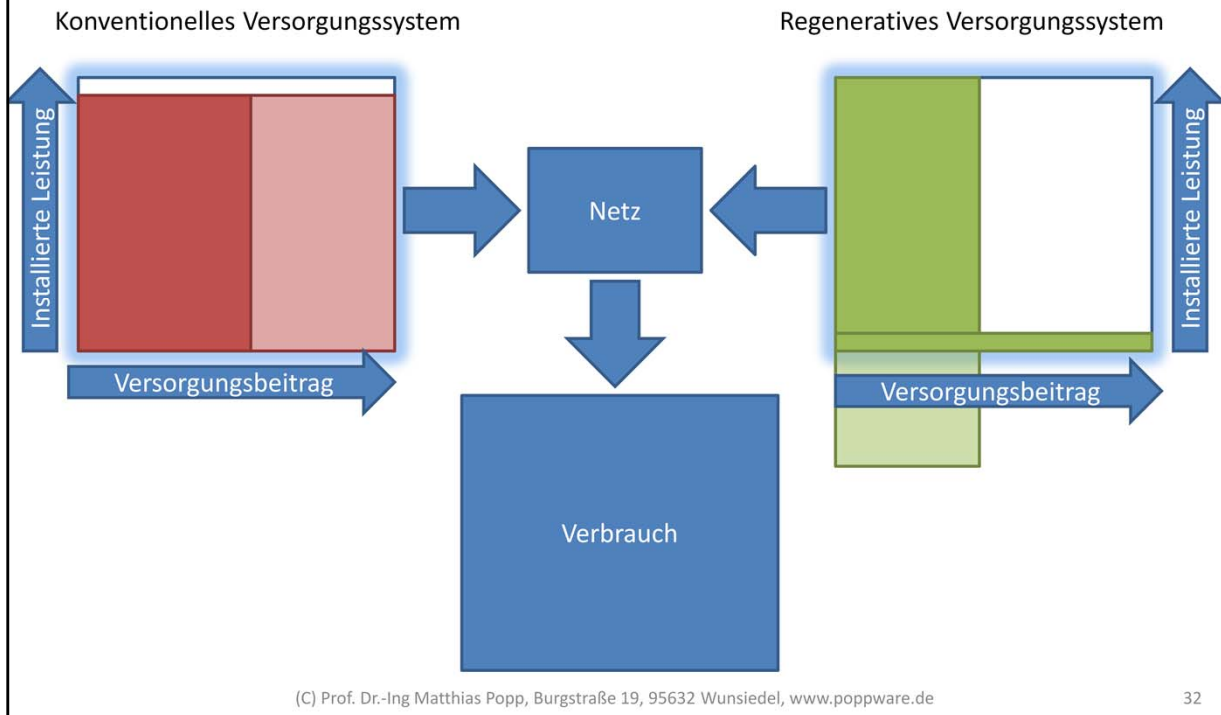


Mittlerweile erreicht die installierte Leistung der regenerativen Erzeugungssysteme die nachgefragte Leistung.

Die wetterlaunige Windstromerzeugung und der Ausfalls der Solarstromerzeugung während der Nacht ermöglichen keine jederzeitige Bedarfsdeckung. Die volatil auftretenden Erzeugungsleistungen lassen sich jedoch noch in hohem Maße dem Verbrauch zuführen.

Der konventionelle Kraftwerkspark wird dabei weniger ausgelastet, muss aber mit seiner vollen Erzeugungskapazität vorgehalten werden.

reale Transformation der Stromversorgung ohne Speicher

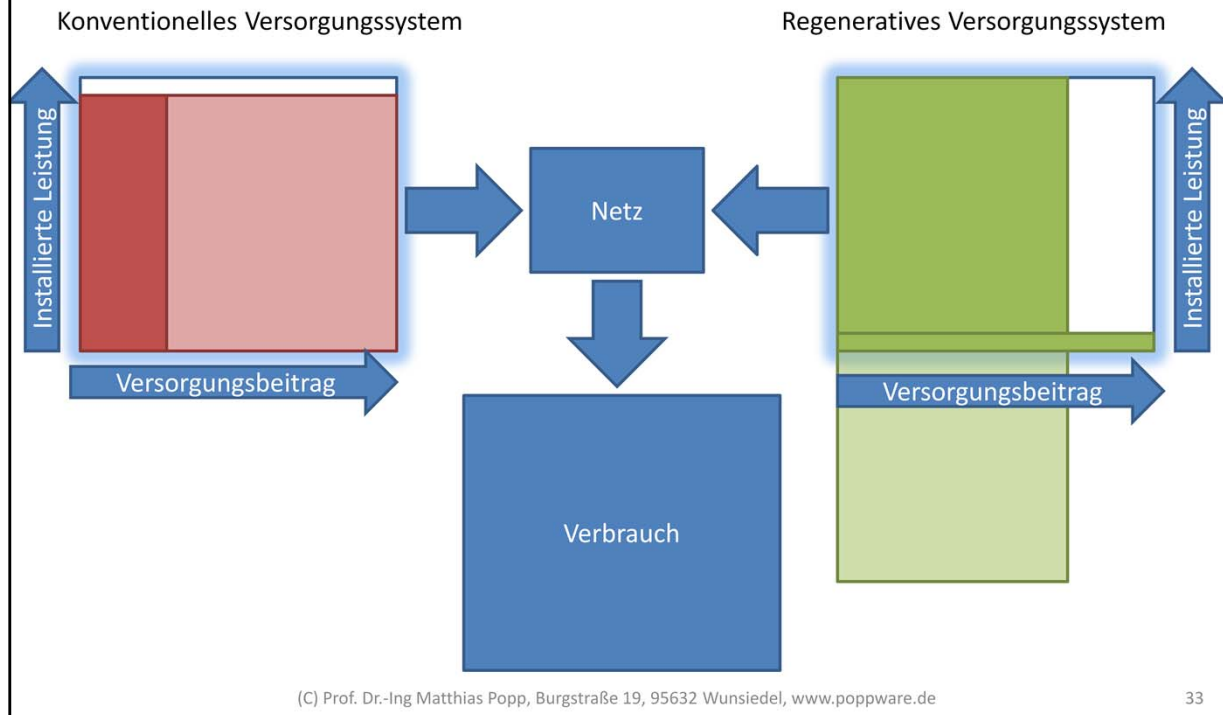


Baut man die volatilen regenerativen Erzeugungssysteme weiter aus, ohne dabei Einrichtungen zum bedarfsgerechten Ausgleich dieser meist von der Nachfrage abweichenden Erzeugungsleistung zu errichten, dann kann nur noch ein Teil der installierten Leistung zur Versorgung beitragen.

Die Überkapazität muss ungenutzt bleiben.

Der konventionelle Kraftwerkspark bleibt mit seiner gesamten Erzeugungskapazität zur Überbrückung von Flauten erforderlich.

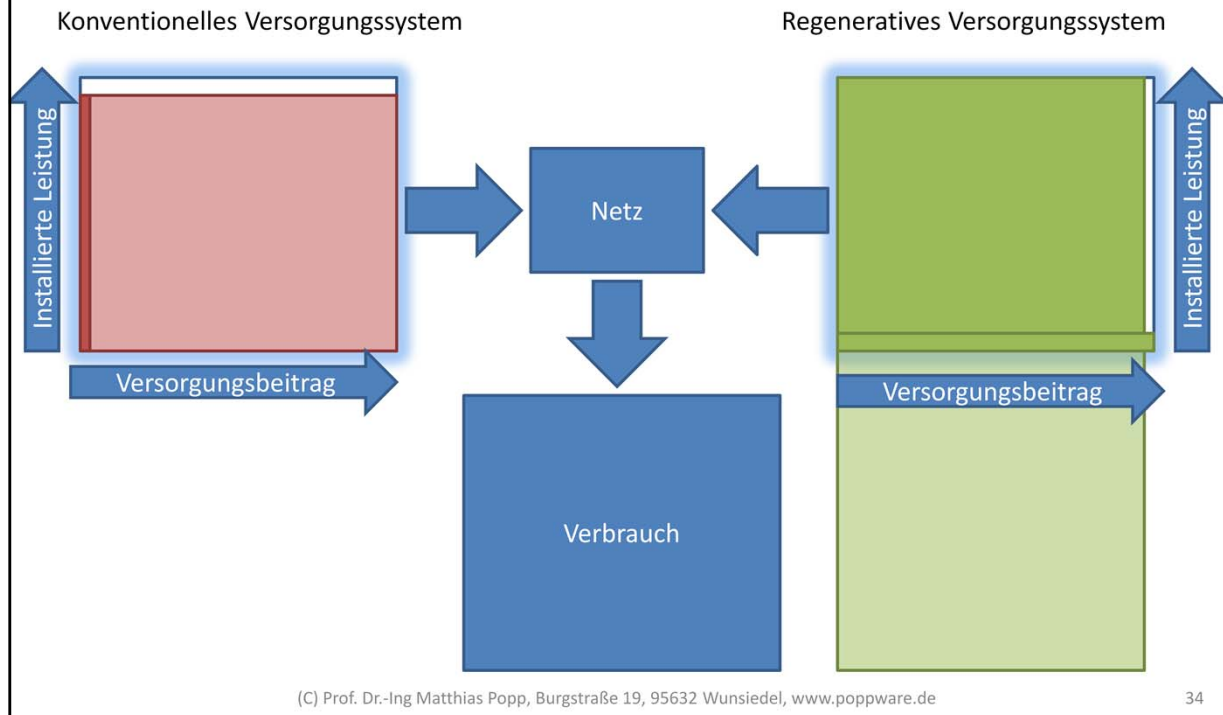
reale Transformation der Stromversorgung ohne Speicher



Die Vorhaltung von Kraftwerkskapazität wird bei dieser Art der Transformation des Stromversorgungssystems zunehmend fragwürdig.

Trotz regenerativer Leistungsinstallation mit einer Energieumwandlungskapazität weit über dem Verbrauch, muss der konventionelle Kraftwerkspark zur Garantie der Versorgungssicherheit in Flautephasen in voller Höhe einsatzbereit vorgehalten werden.

reale Transformation der Stromversorgung ohne Speicher

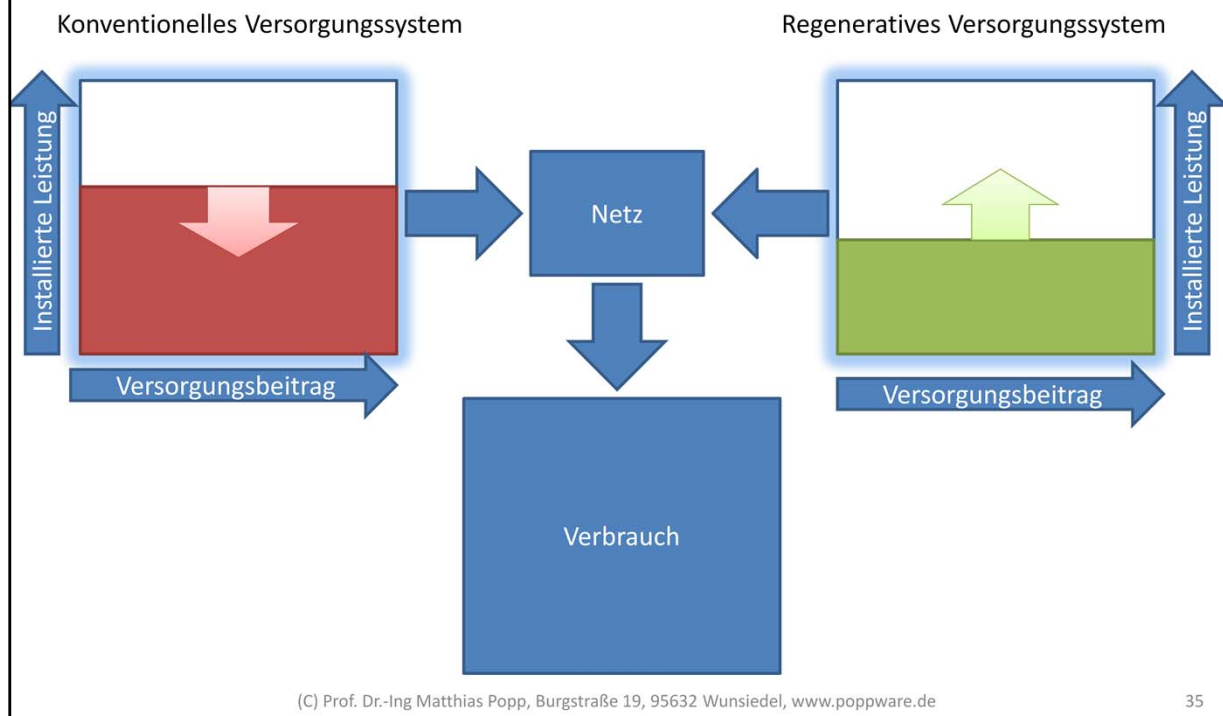


Am Ende unterhält man zwei Kraftwerksparks, die ein Mehrfaches der benötigten Energie umwandeln könnten.

Der Einsatz von Speichersystemen ermöglicht einen Ausweg aus dieser unvorteilhaften Entwicklung.

Unnötige Erzeugungsüberkapazität wird dabei gar nicht erst aufgebaut und regenerative Energiesysteme entwickeln sich derart, dass sie konventionelle Energiesysteme ersetzen können.

ideale Transformation der Stromversorgung



Eine ideale Transformation der Stromversorgung gibt es, wenn im Gleichklang mit dem Ausbau der Erzeugungsleistung auch die Möglichkeit der bedarfsgerechten Leistungsbereitstellung gelöst wird.

Dann sind regenerative Stromversorgungssysteme in der Lage, konventionelle zu ersetzen, anstelle allein deren Auslastung zu reduzieren.

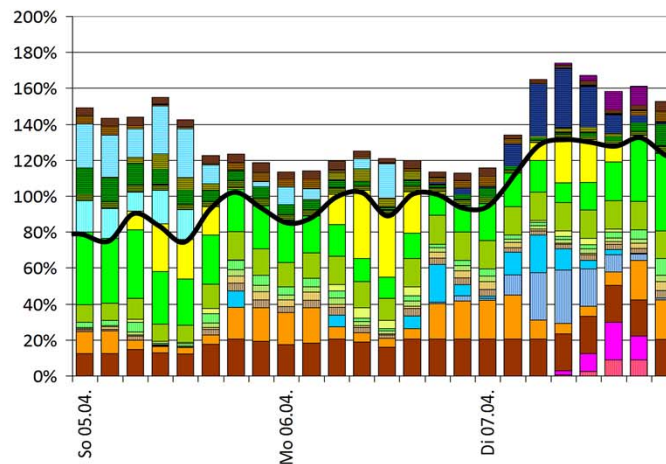
Bei der Weiterentwicklung der elektrizitäts- und energiewirtschaftlichen Rahmenbedingungen sollte darauf geachtet werden, dass die Vorgaben und Anreiz-Mechanismen für das regenerative System so beschaffen sind, dass damit konventionelle Erzeugungssysteme vollständig ersetzt werden können.

Wird das nicht beachtet, dann nehmen wir uns als Volkswirtschaft bei Fortsetzung der bisher praktizierten, einseitig auf die regenerative Erzeugungsleistung fixierten Umsetzung der Energiewende, eine Hypothek auf die Zukunft.

Die Speicherfrage wird zukünftig trotzdem gelöst werden müssen und die Kosten zur Einsatzbereithaltung des konventionellen Kraftwerksparks werden bis dahin immer weiter auflaufen.

Aktuell müssen die Energieversorgungsunternehmen unter den vorhandenen Rahmenbedingungen ihre Versorgungsaufgabe erfüllen und andererseits betriebswirtschaftlichen Ergebniserwartungen gerecht werden. Eine ganzheitlich vorteilhafte Transformation der Stromversorgung findet unter diesen Zwängen leider nicht statt.

Transformation der Stromversorgung in Deutschland



Volatilitätsanalyse

Modellierung der zeitlichen Leistungsumsätze und des Ausgleichsbedarfs im Stromnetz mit zunehmenden Anteilen volatiler Leistung aus Wind und Sonne

Die gezeigte Grafik erfordert weitergehende Erklärung und dient hier lediglich als Aufmacher.

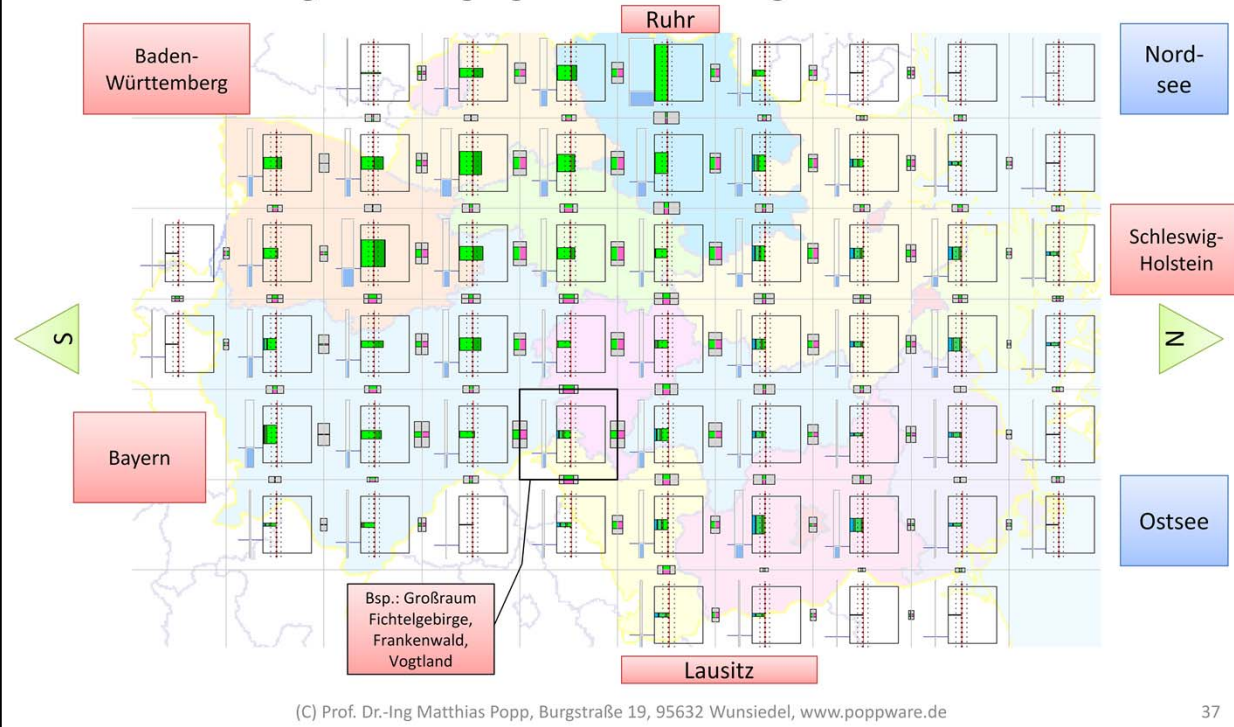
Die **Volatilitätsanalyse** untersucht alle im Laufe der Zeit auftretenden Leistungszustände der Erzeugung mit den unterschiedlichen Energieträgern des Stromversorgungssystems.

Sie zeigt beispielsweise an, wann und in welchem Umfang Wind und Sonne welche Leistungsanteile beitragen, wann Speichersysteme zum Einsatz kommen und wann und in welchem Umfang konventionelle, bedarfsgerecht anforderbare Kraftwerke eingesetzt werden müssen, um eine stabile Versorgung zu erreichen.

Sie ermöglicht sowohl die Analyse von Übergangsszenarien mit einem Mix aus konventionellen und regenerativen Erzeugungssystemen als auch von Zielszenarien mit einem hohen oder 100%-igen Anteil regenerativer Erzeugungssysteme.

Zeitschrittanalyse

Darstellung der Versorgungssituation einer Region im Gesamtkontext



(C) Prof. Dr.-Ing Matthias Popp, Burgstraße 19, 95632 Wunsiedel, www.poppware.de

37

Die **Zeitschrittanalyse** stellt für einen Zeitpunkt die Stromversorgungssituation in einem großräumigen Versorgungsgebiet dar.

Zur besseren Ausnutzung der Darstellungsfläche ist Deutschland in der Grafik um 90° nach rechts gedreht.

Die darüber gelegten Rastergebiete mit der angebrachten Symbolik zeigen die Versorgungssituation landesweit und in den Teilgebieten während eines Zeitschritts.

Für das modellierte Szenario erkennt man die jeweils stattfindenden Leistungsumsätze nach Energieträgern in den Teilregionen, den Ladezustand der dort angenommenen oder existierenden Speichersysteme, die überregionalen Stromflüsse zwischen den Teilregionen und den jeweiligen Stromverbrauch.

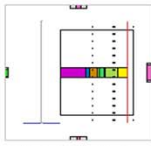
Je breiter der farbige Balken einer Region ausfällt, desto höher sind die dort stattfindenden Leistungsumsätze. Spitzenreiter ist das Ruhrgebiet mit über sechs Millionen Einwohnern. Sowohl der Verbrauch als auch die Erzeugung können ursächlich für den Leistungsumsatz sein.

Zeitschrittanalysen lassen sich für unterschiedlich große Untersuchungsräume, wie ein einzelnes Land, einen Kontinent oder auch kleinere Regionen erstellen.

Zeitschrittanalyse im Detail

Beispiel einer regionalen Versorgungssituation während eines einzelnen Zeitschritts

Szenario



Zustand 2010

mittleres Schwaben

Szenario-Baustein Pos	55	SZBID	5583
X-Koordinate des Rastergebiets	23		
Y-Koordinate des Rastergebiets	18		
Zeitschritt	Mo 26.10.98		
Weltzeit	26.10.98 09:00:00		

Gebietsdaten, die diesen Zeitschritt betreffen:

Verbrauchslast	1.610,07	MW
Eigenproduktion	537,57	MW
Importleistung	1.072,51	MW
Exportleistung	0,00	MW
Fernübertragung: - Export, + Import von Süden	-228,68	MW
Fernübertragung: - Export, + Import von Norden	959,75	MW
Fernübertragung: - Export, + Import von Westen	269,68	MW
Fernübertragung: - Export, + Import von Osten	129,77	MW
Speicherleerung	0,00	MWh

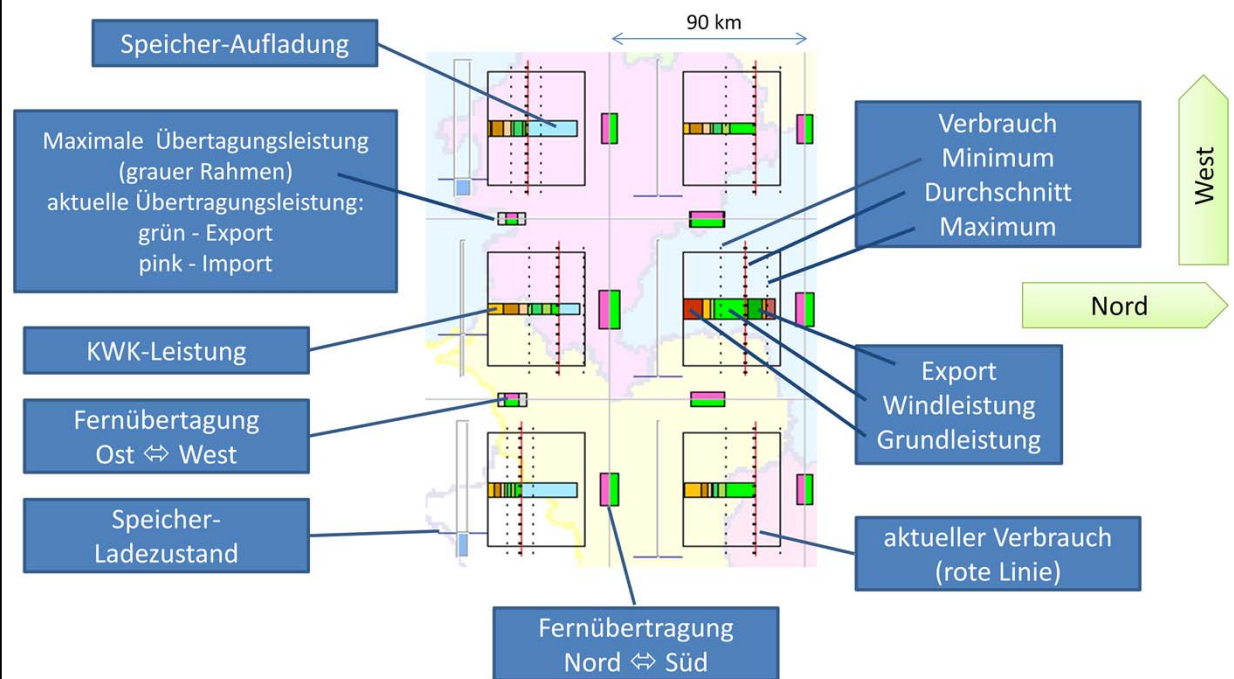
Lastabwurf	0,00	MW
bedarfsgerechter konventionelle Leistung aus Importen	607,64	MW
eigenerzeugte bedarfsgerechte konventionelle Leistung	0,00	MW
konventionelle Grundleistung zum Eigenverbrauch	0,00	MW
Kraft-Wärme gekoppelte Leistung zum Eigenverbrauch	0,00	MW
aus fremden Speichern importierte Leistung	97,57	MW
aus eigenen Speichern entnommene Leistung	0,00	MW
importierte konventionelle Grundleistung	179,80	MW
importierte Kraft-Wärme gekoppelte Leistung	14,85	MW
importierte regenerative Grundleistung	49,90	MW
importierte Windleistung	100,07	MW
importierte Solarleistung	22,68	MW
regenerative Grundleistung zum Eigenverbrauch	302,86	MW
Windleistung zum Eigenverbrauch	16,44	MW
Solarleistung zum Eigenverbrauch	218,26	MW
importierte Leistung zur Aufladung der eigenen Speicher	0,00	MW
exportierte regenerative Grundleistung	0,00	MW
exportierte Windleistung	0,00	MW
exportierte Solarleistung	0,00	MW
Speicheraufladung aus eigener Versorgungsleistung	0,00	MW
exportierte, dem Speicher entnommene Leistung	0,00	MW
exportierte Kraft-Wärme gekoppelte Leistung	0,00	MW
exportierte konventionelle Grundleistung	0,00	MW
exportiert bedarfsgerechte konventionelle Leistung	0,00	MW
nicht nutzbare Überschüsse	0,00	MW

Regionale Eigenbedarfsdeckung

Überschussverwendung

Im Detail kann aus der Zeitschrittanalyse für jede berücksichtigte Region und für jeden Zeitschritt entnommen werden, wie die dort vorherrschende Stromnachfrage erfüllt wird, wie Überschüsse und Defizite ausgeglichen werden und welcher Leistungsaustausch mit den Nachbarregionen erfolgt.

Zeitschrittanalyse - Symbolik



Die Zeitschrittanalyse stellt für einen Zeitpunkt die Stromversorgungssituation in einem großräumigen Versorgungsgebiet dar. Sie zeigt die jeweils stattfindenden Leistungsumsätze nach Energieträgern in den Teilregionen, den Ladezustand der dort befindlichen Speichersysteme, die überregionalen Stromflüsse zwischen den Teilregionen und den jeweiligen Stromverbrauch.

Bedarfsorientierter Ausbau mit optimalem Netz und Methanspeichern, 14 Tage im Juni



(C) Prof. Dr.-Ing Matthias Popp, Burgstraße 19, 95632 Wunsiedel, www.poppware.de

40

Hinweis:

Hier handelt es sich um eine Animation die in der kommentierten PDF Version nicht abgespielt werden kann.

Das hier als Animation gezeigte Szenario geht von einem bedarfsorientierten Ausbau der erneuerbaren Erzeugungssysteme und von Gasspeichersystemen aus, bei denen die Regionen über ein leistungsstarkes Stromnetzwerk verbunden sind, das in der Lage ist, Überschüsse und Defizite mit der maximal anfallenden Leistung auszugleichen.

Im Vergleich zu Ziel-Szenarien mit potentialorientiertem Ausbau oder nach den Leitstudien des BMU, erfordert diese Strategie deutlich weniger Netzausbau und führt zu robusteren Versorgungsverhältnissen in den Teilregionen.

Bedarfsorientierter Ausbau (auch nachfrageorientierter Ausbau):

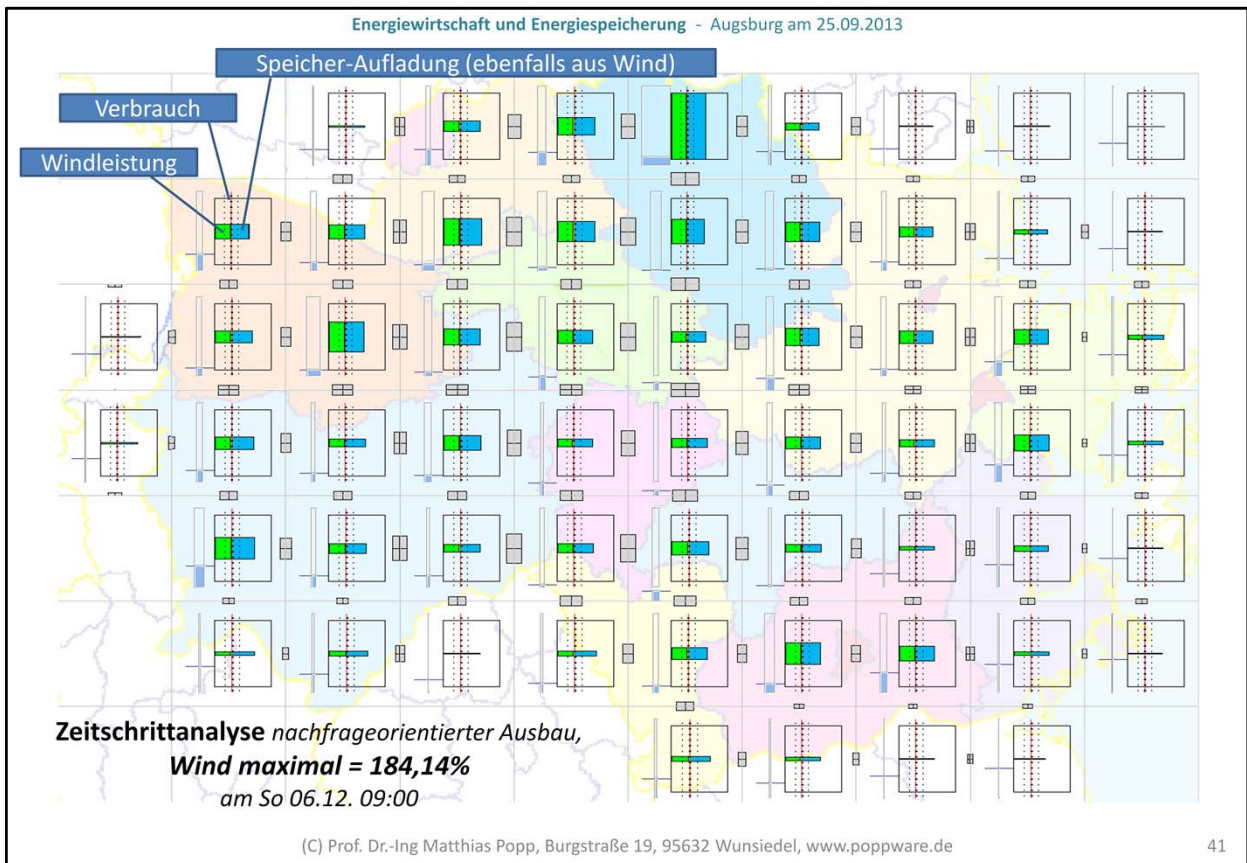
Die regionale regenerative Erzeugung und die regionale Speicherkapazität werden so gut es geht an den regionalen Verbrauch angepasst.

Potentialorientierter Ausbau:

Der Ausbau erfolgt bevorzugt dort, wo die höchsten Energieerträge erwartet werden können. Solarenergie wird verstärkt im Süden, Windenergie verstärkt im Norden und im Meer vor der Küste ausgebaut. Das bedingt den Ausbau leistungsstarker Stromnetze.

Leitstudien des BMU (Bundesministerium für Umwelt):

Darin spielen DESERTEC (Solarstrom aus der Sahara), Speichersysteme in Norwegen, potentialorientierter Ausbau der Erzeugung, sowie erhebliche Stromimporte eine große Rolle.



Extremwertanalysen gestatten es, gezielt Versorgungssituationen herauszufiltern, die besondere Systemanforderungen hervorrufen.

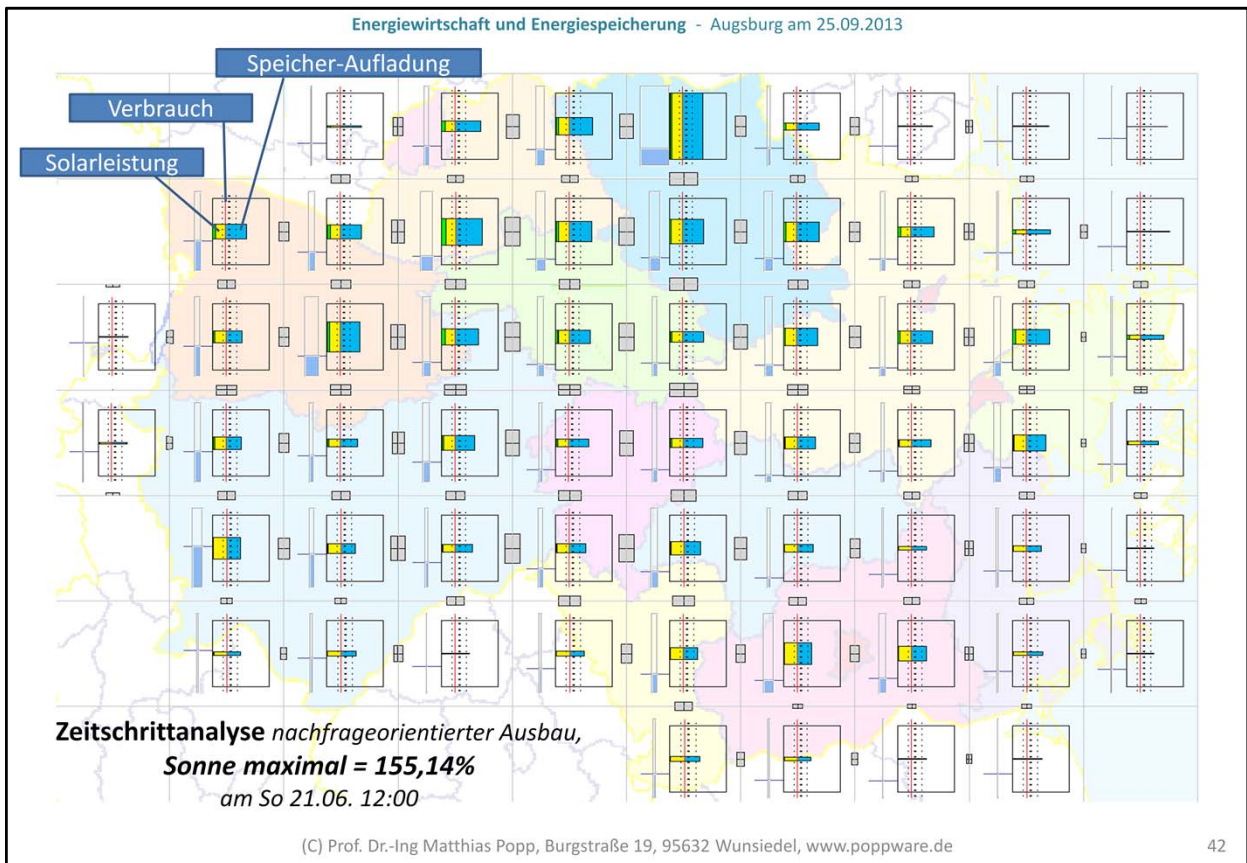
Diese müssen jeweils beherrscht werden, wenn das Gesamtsystem in einem dauerhaft stabilen Zustand gehalten werden soll.

Nachfolgend sind beispielhaft für einen angenommenen landesweit optimierten regenerativen Erzeugungspark, mit nachfrageorientierter Verteilung der Versorgungssysteme, eine Reihe von Extremzuständen dargestellt, mit denen aufgrund des Wettergeschehens eines ganz normalen Jahres zu rechnen wäre.

Dabei ist angenommen, dass jede Region über Methanspeichersysteme mit 38% Wirkungsgrad und einer Kapazität von 20 Tagesladungen verfügen würde, mit denen Defizitphasen überbrückt werden könnten.

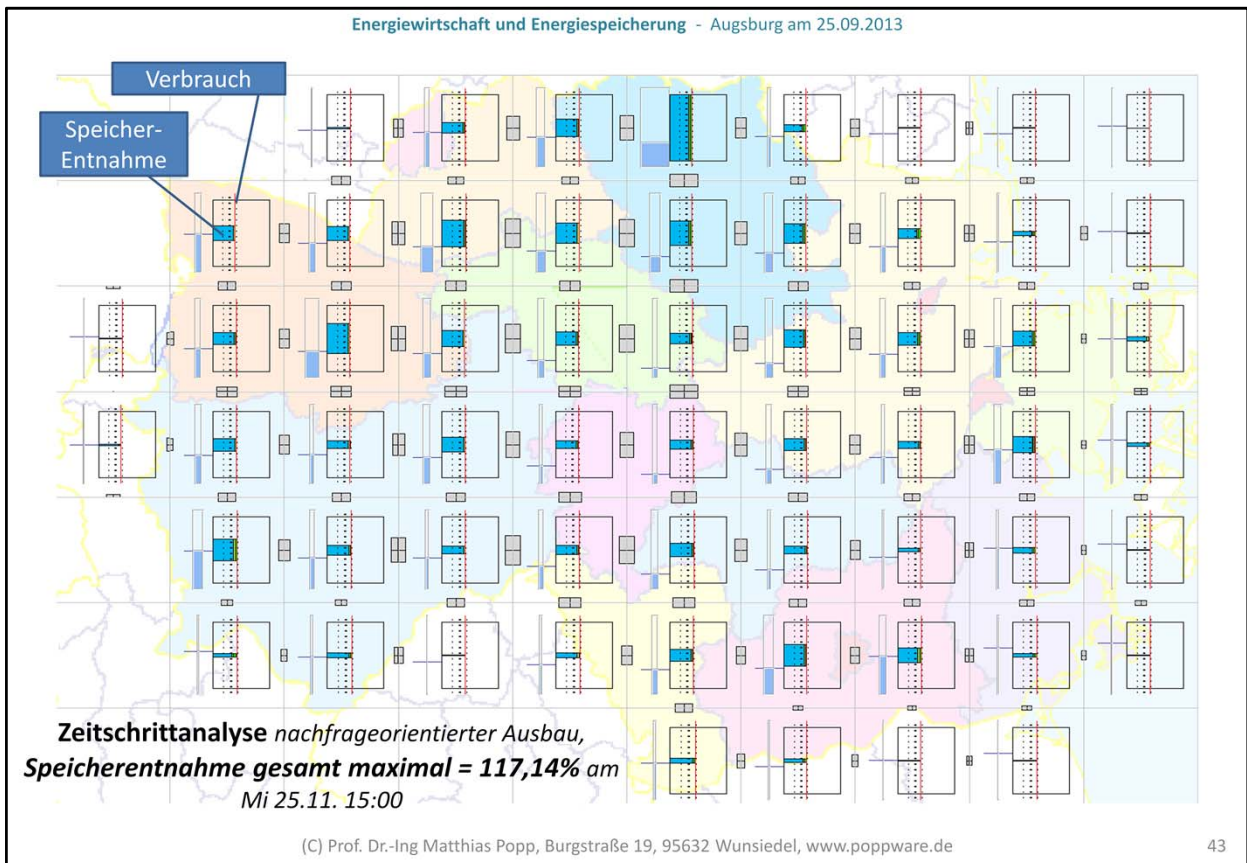
Weiter wird von einem sowohl in Nord-Süd als auch in Ost-West Richtung optimal ausgebauten Übertragungsnetz ausgegangen, mit dem temporär auftretende Überschüsse und Defizite ausgeglichen werden können.

In Situationen, wie der gezeigten, mit landesweit guten Windverhältnissen würde keine Fernübertragung stattfinden, weil jede Region für sich in der Lage wäre die Eigenversorgung zu übernehmen. Mit den Überschüssen würden die regionalen Speichersysteme aufgeladen.



Ähnlich würden sich die Verhältnisse bei optimalem Sonnenschein einstellen.

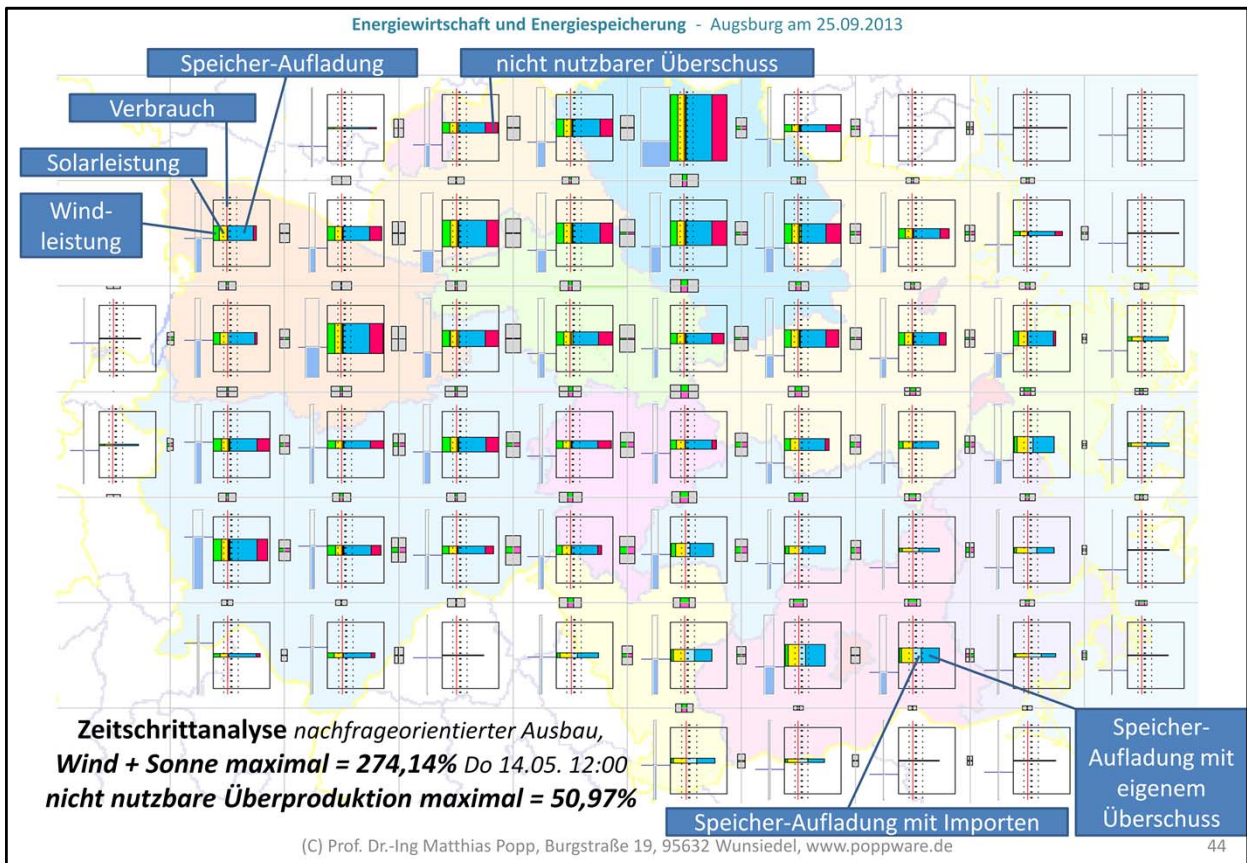
Wegen landesweiter Überschüsse findet auch hier keine großräumige Leistungsübertragung statt.



Ebenso kommt es zu Situationen, in denen überdurchschnittlich hohe Leistungen allein aus den Speichern zu entnehmen wären, weil bei hoher Nachfrage die landesweiten Wetterbedingungen kaum eine regenerative Erzeugung ermöglichen.

Leistungsübertragung wäre nur erforderlich, wenn Speicherreserven einzelner Teilregionen aufgebraucht wären.

Dies würde auf ein weniger optimal ausgelegtes Versorgungssystem hindeuten.



Wenn gute Sonnenscheinverhältnisse gleichzeitig mit starkem Wind auftreten, dann können so hohe Überschussleistungen auftreten, dass diese nicht mehr im vollen Umfang gespeichert werden können.

Dies tritt ein, wenn die Speicher nicht für diese seltenen Situationen ausgelegt wurden.

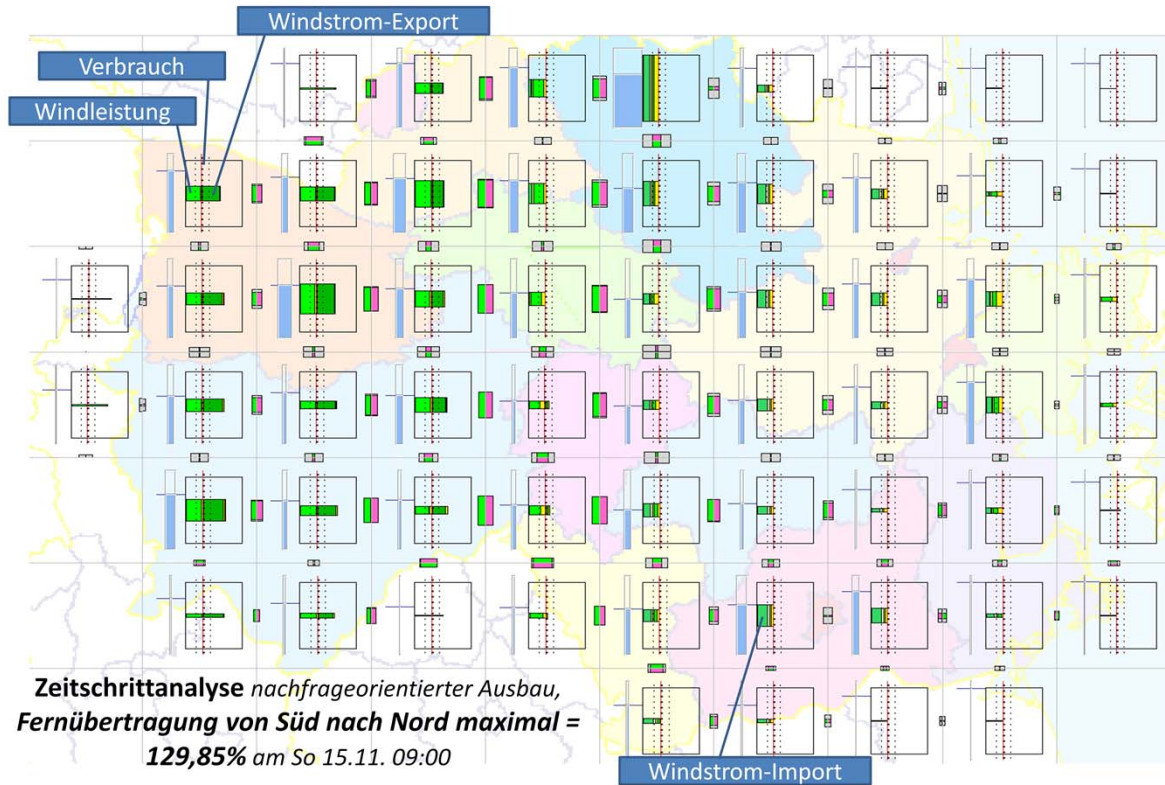
Mit Erzeugungsmanagement muss dafür gesorgt werden, dass der vorliegende Verbrauch plus die maximale Ladeleistung der Speichersysteme nicht überschritten werden.



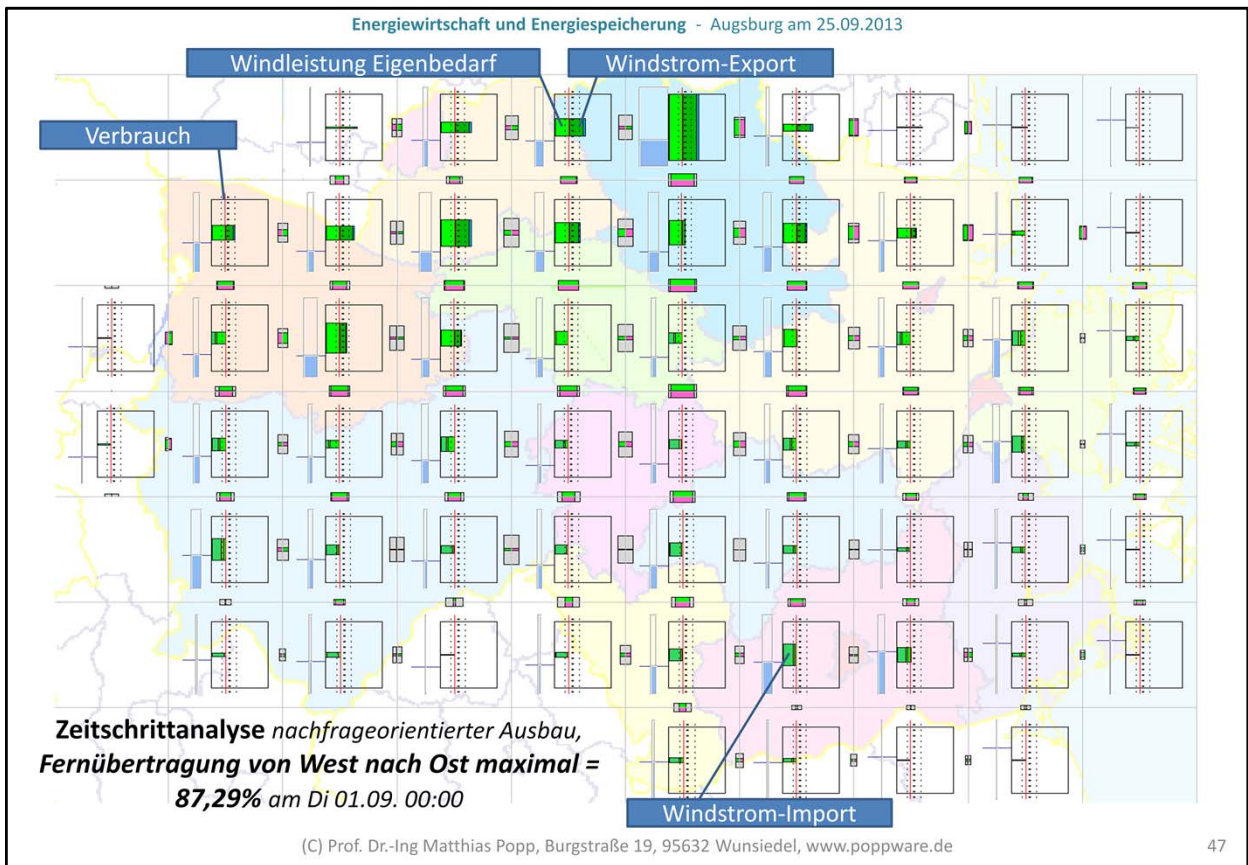
Es gibt aber auch Situationen, in denen in bestimmten Landesteilen besonders gute Erzeugungsbedingungen vorliegen, während andere Landesteile Defizite aufweisen.

Dann würden sich erhebliche Fernübertragungsleistungen einstellen, die diese Unterschiede ausgleichen.

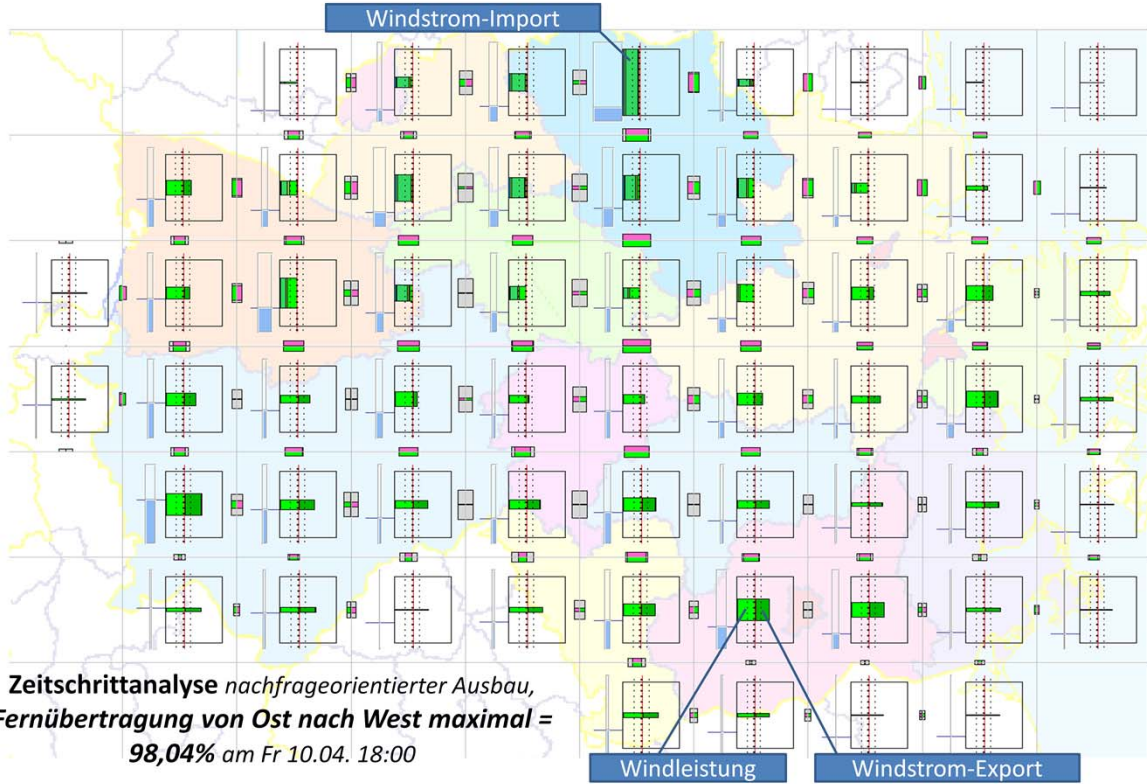
Je nach Lage der Hoch- und Tiefdruckgebiete kommt es dabei zu erheblichen Übertragungsleistungen vom Norden in den Süden, ...



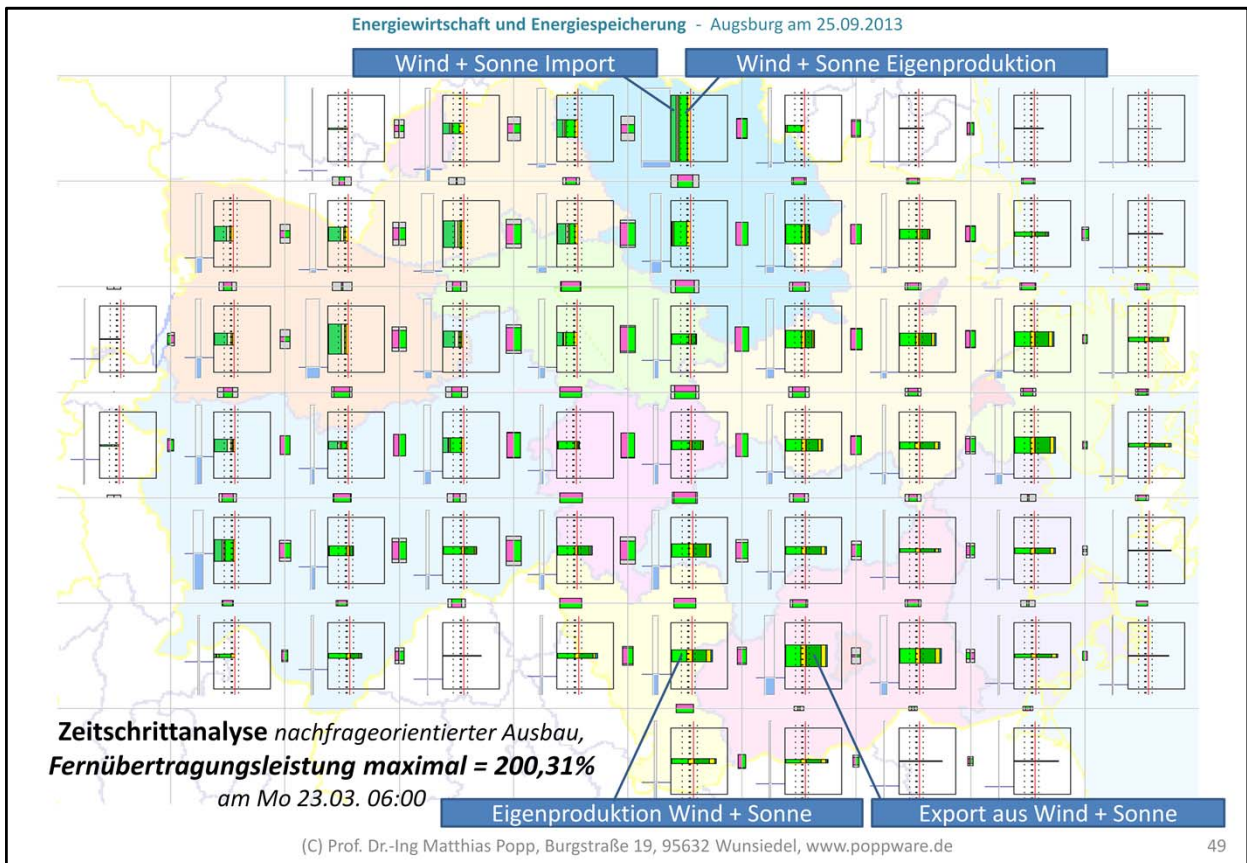
..., vom Süden in den Norden, ...



..., vom Westen in den Osten, ...



..., oder vom Osten in den Westen ...



... oder vom Nordosten in den Südwesten oder umgekehrt.

Temporär kann ein leistungsstarkes Stromnetz in diesen Situationen erhebliche Ausgleichseffekte ermöglichen, bei denen die Speicherreserven geschont werden.

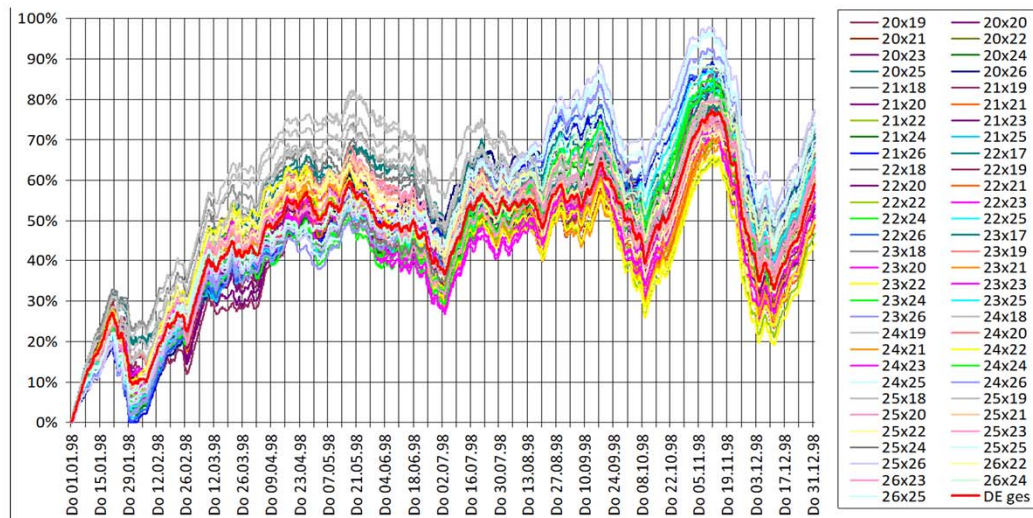
Die Extremwertanalysen zeigen Wetter- und Versorgungssituationen, in denen eine leistungsstarke Vernetzung erheblich dazu beitragen kann, Überschüsse und Defizite in verschiedenen Landesteilen auszugleichen.

Auf der anderen Seite gibt es zahlreiche Energiewettersituationen, in denen ein leistungsstarkes Stromnetz keinen Beitrag dazu leisten kann, die Verbrauchsanforderungen zu erfüllen.

Um festzustellen, welchen Einfluss leistungsfähige Stromnetze auf den Speicher- oder Ausgleichsbedarf volatiler Erzeugungssysteme haben, werden die nachfolgenden Speicherladungskurven eingeführt.

Methan Speicher Ladezustand, optimaler Netzausbau

Annahmen: 30% Erzeugungsreserve, 10% Grundleistung, 120% volatile Erzeugung mit Wind und Sonne, 20 Tagesladungen Speicherkapazität, Start mit leeren Speichern, reale Wetterdaten beispielhaft von 1998



Speicher Ladezustand für alle Rastergebiete Deutschlands
Bedarfsorientierter Ausbau mit 80%/20% Mix von Wind und Sonne, Speichern mit 38% Wirkungsgrad, 50% Wind-Benutzungsgrad, **Fernübertragungsleistung orientiert am maximalen Exportpotential**

(C) Prof. Dr.-Ing Matthias Popp, Burgstraße 19, 95632 Wunsiedel, www.poppware.de

50

Die Grafik zeigt für ein optimal ausgebautes Übertragungsnetz die Auf- und Entladungen von angenommenen Methanspeichern eines ideal über Deutschland verteilten regenerativen Erzeugungssystems, für Rastergebiete mit jeweils 90x90 Kilometern Kantenlänge.

Angenommen sind leere Speicher zu Beginn des Untersuchungszeitraums mit einer auf die Regionen abgestimmten Kapazität von jeweils 20 durchschnittlichen Tagesverbräuchen.

Es ist nicht notwendig, jede einzelne Kurve nachzuvollziehen.

Das Diagramm soll vielmehr die Gleichzeitigkeit von Aufladung und Entladung der Speichersysteme in allen Regionen Deutschlands verdeutlichen, die durch eine Stromversorgung aus Wind und Sonne hervorgerufen wird.

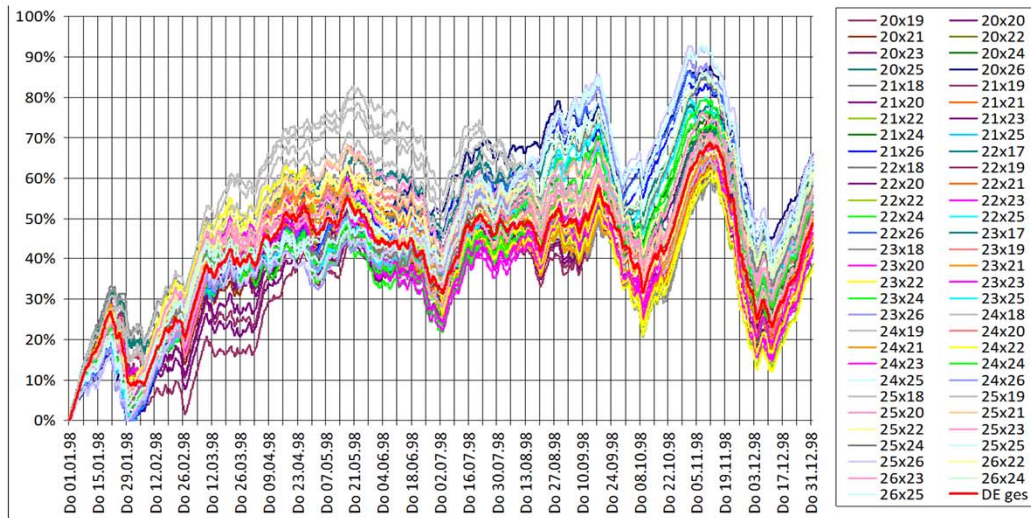
Eine wichtige Erkenntnis dieser Analyse mit realen Wetterdaten, ist die sehr ähnliche Volatilität des Energiewetters in allen Gebieten Deutschlands.

Überschuss und Defizit treten über große Zeiträume in allen Regionen gleichzeitig auf.

Beobachten Sie nun, wie sich die Speicherbewirtschaftung ändern würde, wenn das Übertragungsnetz maximal die halbe Leistung übertragen könnte.

Methan Speicher Ladezustand, 50% Netzausbau

Annahmen: 30% Erzeugungsreserve, 10% Grundleistung, 120% volatile Erzeugung mit Wind und Sonne, 20 Tagesladungen Speicherkapazität, Start mit leeren Speichern, reale Wetterdaten beispielhaft von 1998



Speicher Ladezustand für alle Rastergebiete Deutschlands
Bedarfsorientierter Ausbau mit 80%/20% Mix von Wind und Sonne, Speichern mit 38% Wirkungsgrad, 50% Wind-Benutzungsgrad, **Fernübertragungsleistung begrenzt auf 50% des Durchschnittsverbrauchs**

(C) Prof. Dr.-Ing Matthias Popp, Burgstraße 19, 95632 Wunsiedel, www.poppware.de

51

Die Speicherbewirtschaftung würde sich kaum verändern.

Am Ende des beispielhaft untersuchten Jahres läge die Speicherladung lediglich um 10% niedriger.

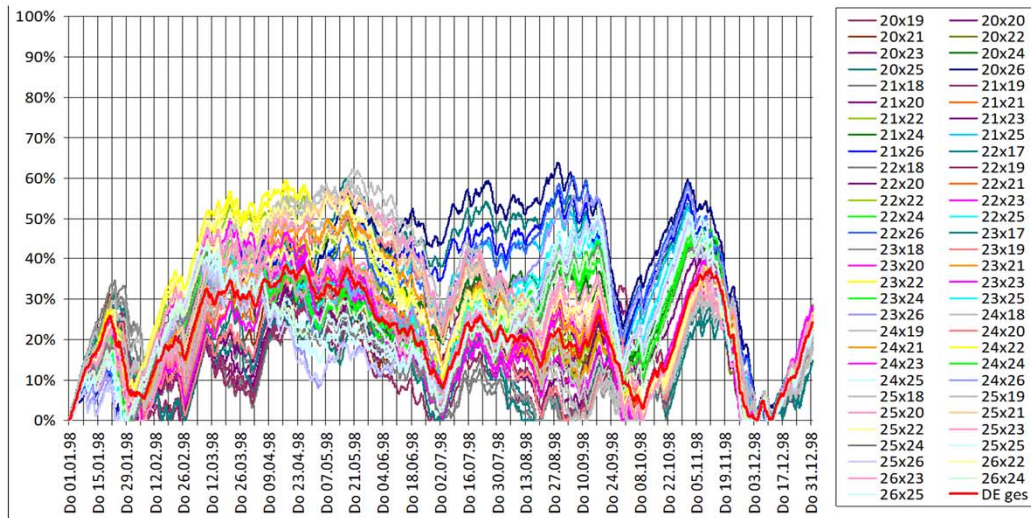
Bei gleichem Erzeugungspark wie vorher, wurden Stromnetze angenommen, die maximal 50% der durchschnittlichen Nachfrage übertragen könnten. Überregionaler Netzausbau müsste dafür im Vergleich zu heute kaum erfolgen.

Über die Speicher müsste nur geringfügig mehr Energie ausgeglichen werden, als bei maximalem Netzausbau.

Beobachten Sie nun, die Verhältnisse, die sich einstellen würden, wenn es überhaupt keine großräumige Leistungsübertragung gäbe.

Methan Speicher Ladezustand, regionale Autarkie

Annahmen: 30% Erzeugungsreserve, 10% Grundleistung, 120% volatile Erzeugung mit Wind und Sonne, 20 Tagesladungen Speicherkapazität, Start mit leeren Speichern, reale Wetterdaten beispielhaft von 1998



Speicher Ladezustand für alle Rastergebiete Deutschlands
Bedarfsorientierter Ausbau mit 80%/20% Mix von Wind und Sonne, Speichern mit 38% Wirkungsgrad, 50% Wind-Benutzungsgrad, **keine Fernübertragungsleistung (nur Theorie, da Leitungsnetz existiert)**

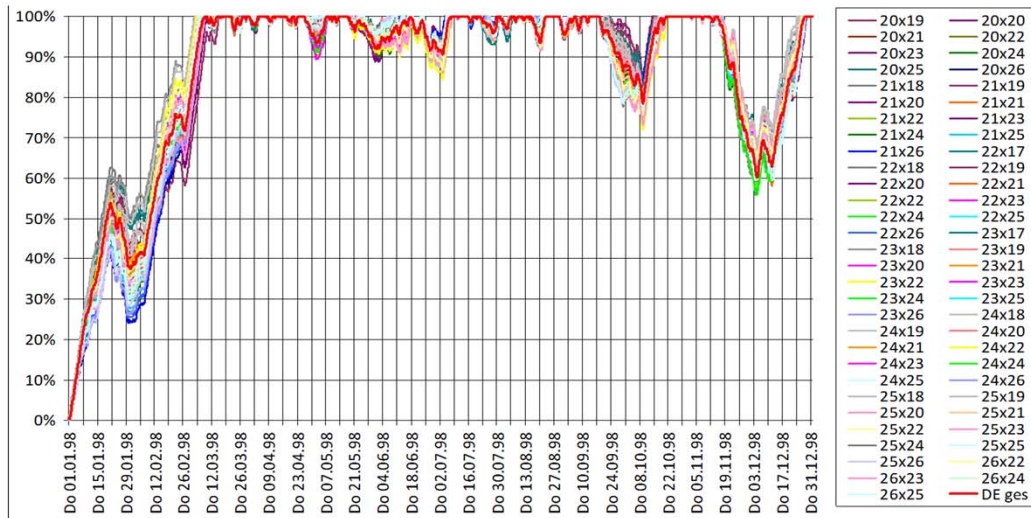
Die Speicher wären beinahe in der Lage gewesen, das gesamte Jahr über die volatile Erzeugung mit der Nachfrage zum Ausgleich zu bringen.

Für eine sichere Versorgung müsste jedoch eine etwas größere Erzeugungsreserve vorgehalten werden.

In diesem theoretischen und nicht anzustrebenden Fall würde eine regionale Versorgungsautarkie entstehen.

Pumpspeicher Ladezustand, optimaler Netzausbau

Annahmen: 30% Erzeugungsreserve, 10% Grundleistung, 120% volatile Erzeugung mit Wind und Sonne, 20 Tagesladungen Speicherkapazität, Start mit leeren Speichern, reale Wetterdaten beispielhaft von 1998



Speicher Ladezustand für alle Rastergebiete Deutschlands
Bedarfsorientierter Ausbau mit 80%/20% Mix von Wind und Sonne, Speichern mit 76% Wirkungsgrad, 50% Wind-Benutzungsgrad, **Fernübertragungsleistung orientiert am maximalen Exportpotential**

(C) Prof. Dr.-Ing Matthias Popp, Burgstraße 19, 95632 Wunsiedel, www.poppware.de

53

Würde der gleiche regenerative Erzeugungspark nicht über die vorher gezeigten wirkungsgradschwächeren Methanspeichersysteme, sondern über wirkungsgradstarke Pumpspeichersysteme ausgeglichen, dann würden sich die Speicher wegen der geringeren Wirkungsgradverluste deutlich schneller aufladen.

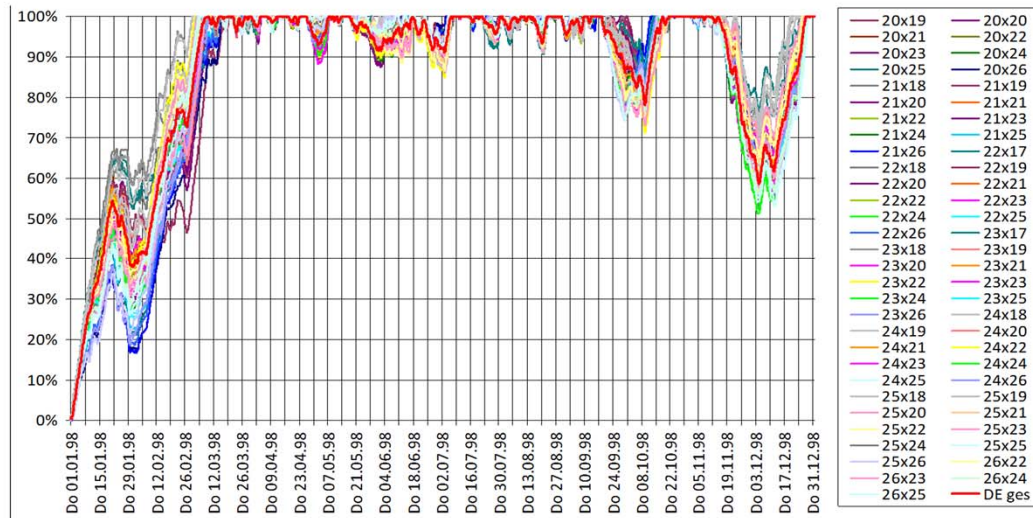
Die Speicherleerungen zur Überbrückung der Flaute würden aber in der gleichen Größenordnung anfallen.

Der Vorteil von Pumpspeichern liegt darin, dass weniger Erzeugungsleistung, also weniger Windenergie- und Solarenergieanlagen ausreichen würden, um die Speicher füllen zu können.

Man könnte den zugrunde liegenden Erzeugungspark folglich erheblich abspecken und würde immer noch eine robuste und bedarfsgerechte Stromversorgung erreichen.

Pumpspeicher Ladezustand, 50% Netzausbau

Annahmen: 30% Erzeugungsreserve, 10% Grundleistung, 120% volatile Erzeugung mit Wind und Sonne, 20 Tagesladungen Speicherkapazität, Start mit leeren Speichern, reale Wetterdaten beispielhaft von 1998

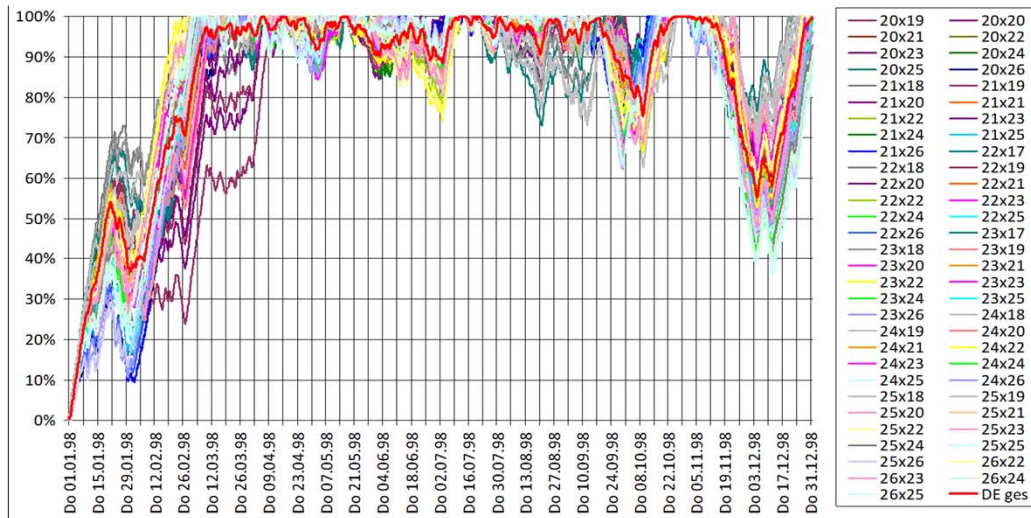


Speicher Ladezustand für alle Rastergebiete Deutschlands
 Bedarfsorientierter Ausbau mit 80%/20% Mix von Wind und Sonne, Speichern mit 76% Wirkungsgrad,
 50% Wind-Benutzungsgrad, **Fernübertragungsleistung begrenzt auf 50% des Durchschnittsverbrauchs**

Auch hier würde ein Fernübertragungsnetz, mit dem maximal 50% der landesweiten Last auf große Entfernungen übertragen werden kann, nur zu einer geringfügigen Erhöhung des regionalen Speicherbedarfs führen.

Pumpspeicher Ladezustand, regionale Autarkie

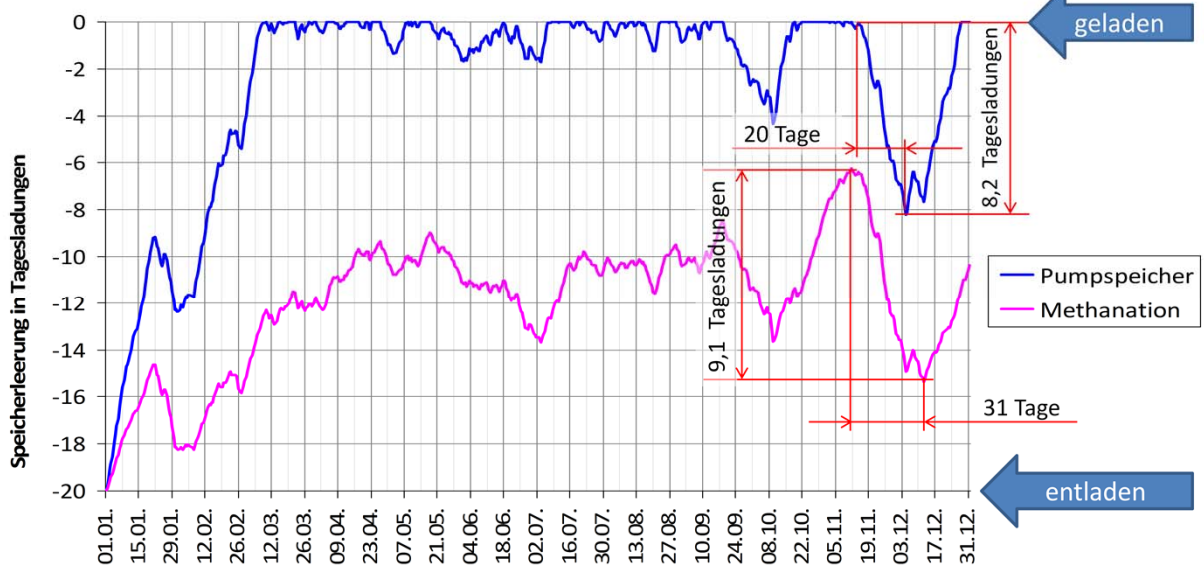
Annahmen: 30% Erzeugungsreserve, 10% Grundleistung, 120% volatile Erzeugung mit Wind und Sonne, 20 Tagesladungen Speicherkapazität, Start mit leeren Speichern, reale Wetterdaten beispielhaft von 1998



Speicher Ladezustand für alle Rastergebiete Deutschlands
 Bedarfsorientierter Ausbau mit 80%/20% Mix von Wind und Sonne, Speichern mit 38% Wirkungsgrad, 50% Wind-Benutzungsgrad, **keine Fernübertragungsleistung (nur Theorie, da Leitungsnetz existiert)**

Selbst wenn theoretisch überhaupt keine Fernübertragung elektrischer Leistung vorgesehen wäre, würde der Speicherbedarf zur Überbrückung der Flauten denjenigen bei besten Übertragungsbedingungen um gerade einmal 20% übersteigen.

Speichernutzung bei Systemen mit niedrigem und hohem Wirkungsgrad bei üblichen deutschen Wetterverhältnissen



76% | 38% Speicherwirkungsgrad | bezogen auf den Verbrauch 100% Erzeugung aus bedarfsgerecht über das Land verteilter Windenergie mit 50% Benutzungsgrad, kombiniert mit 20% Solarenergie und 10% regenerativer Grundleistung z.B. aus Laufwasser, Biomasse, Geothermik | Stromnetz bei dem 50% des landesweiten Verbrauchs fernübertragen werden kann.

(C) Prof. Dr.-Ing Matthias Popp, Burgstraße 19, 95632 Wunsiedel, www.poppware.de

56

Längere Schwachwindphasen definieren die zukünftige Herausforderung an Speichersysteme und nicht mehr der Kurzeitenausgleich zwischen Tag und Nacht.

Bei entsprechend lang anhaltenden großräumigen Wetterbedingungen können weder ein leistungsstarkes Übertragungsnetz noch Lastmanagement mit kurzzeitigen Lastverschiebungen den Fehlbedarf ausgleichen.

Wenn nicht ein leistungsstarker konventioneller bedarfsgerecht anforderbarer Kraftwerkspark in ständiger Einsatzbereitschaft gehalten werden soll, benötigt man Speichersysteme, die über die erforderlichen Kapazitätsreserven verfügen.

Sobald entsprechende Speichersysteme aber zur Verfügung stehen, entfällt bei geeigneter regionaler Verteilung der Erzeugungssysteme sowohl der Bedarf für hochgerüstete Fernübertragungsnetze als auch für Lastmanagement und für Kurzzeitspeichersysteme, sofern diese nicht anderweitigen Aufgaben zur Netzstabilisierung dienen. Das alles können dann die Langzeitspeicher mit erledigen.

Fernübertragungsleistung wird zunehmend erforderlich, wenn von einer bedarfsorientierten Verteilung der Erzeugungsanlagen abgewichen wird. Gleichzeitig ist dabei mit einem erhöhten Speicherbedarf zu rechnen, weil damit die Möglichkeit des großräumigen Volatilitätsausgleichs tendenziell abnimmt (*siehe potentialorientierter Ausbau im Anhang*).

Die örtliche und regionale Leistungsübertragung zwischen dezentralen Erzeugungsorten und Speichersystemen muss auf alle Fälle gelöst werden.

Diese Zusammenhänge sollten bei heutigen Investitionsentscheidungen in zukünftig ggf. weniger ausgelastete Systeme berücksichtigt werden.

Speicher - Anforderungen und Systeme

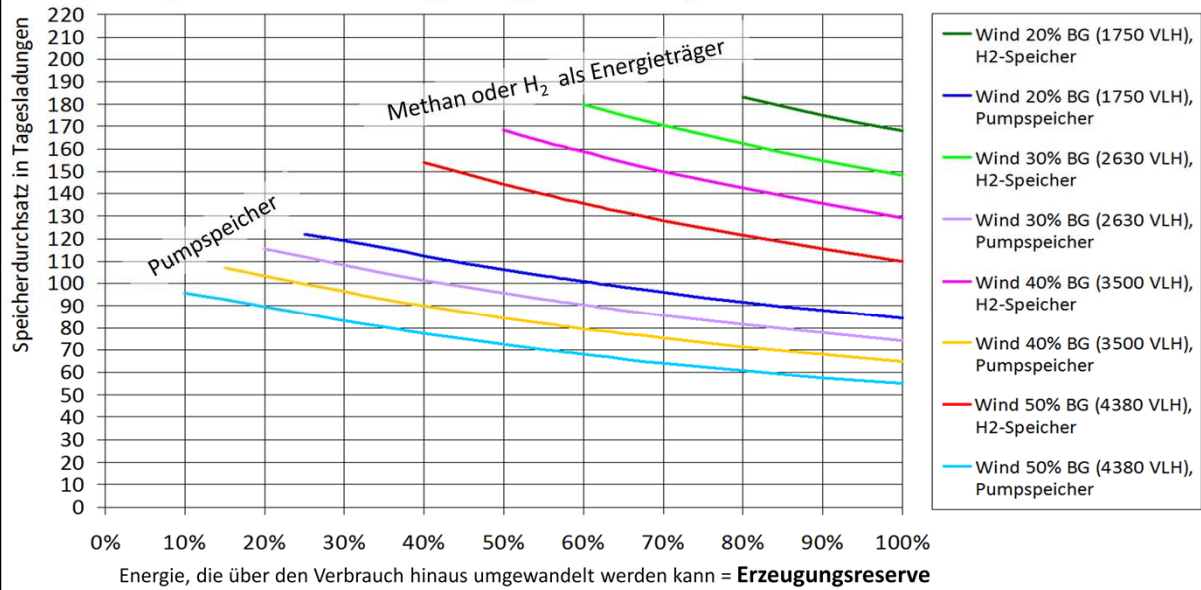
Speicherdurchsatz

Speicherkapazität

Speichersysteme

- **Gasspeicher (Wasserstoff, Methan)**
- **Druckluftspeicher**
- **Pumpspeicher und Ringwallspeicher**

Systemauslegung und Speicherdurchsatz



Jährlicher Speicherdurchsatz bei autarker Versorgung im südlichen Oberfranken und in der nördlichen Oberpfalz (Rastergebiet 24x20) bei optimaler regionaler Abstimmung von Wind- und Solarenergienutzung in Abhängigkeit von der Systemauslegung mit 10% regenerativer Grundleistung.

(C) Prof. Dr.-Ing Matthias Popp, Burgstraße 19, 95632 Wunsiedel, www.poppware.de

58

Der **Speicherdurchsatz** ist die pro Jahr im Durchschnitt benötigte Energie, um die Speicher nach allen Entladungsphasen immer wieder aufzuladen.

Energie für Verluste, die bei einem Speicherprozess anfällt, braucht bei wirkungsgradstarken Speichern nicht erzeugt werden.

Wirkungsgradschwache Speichersysteme würden unter den angenommenen Randbedingungen nahezu einen halben Jahresverbrauch als Speicherdurchsatz erfordern, um nach Flaute-Phasen immer wieder aufgeladen zu werden.

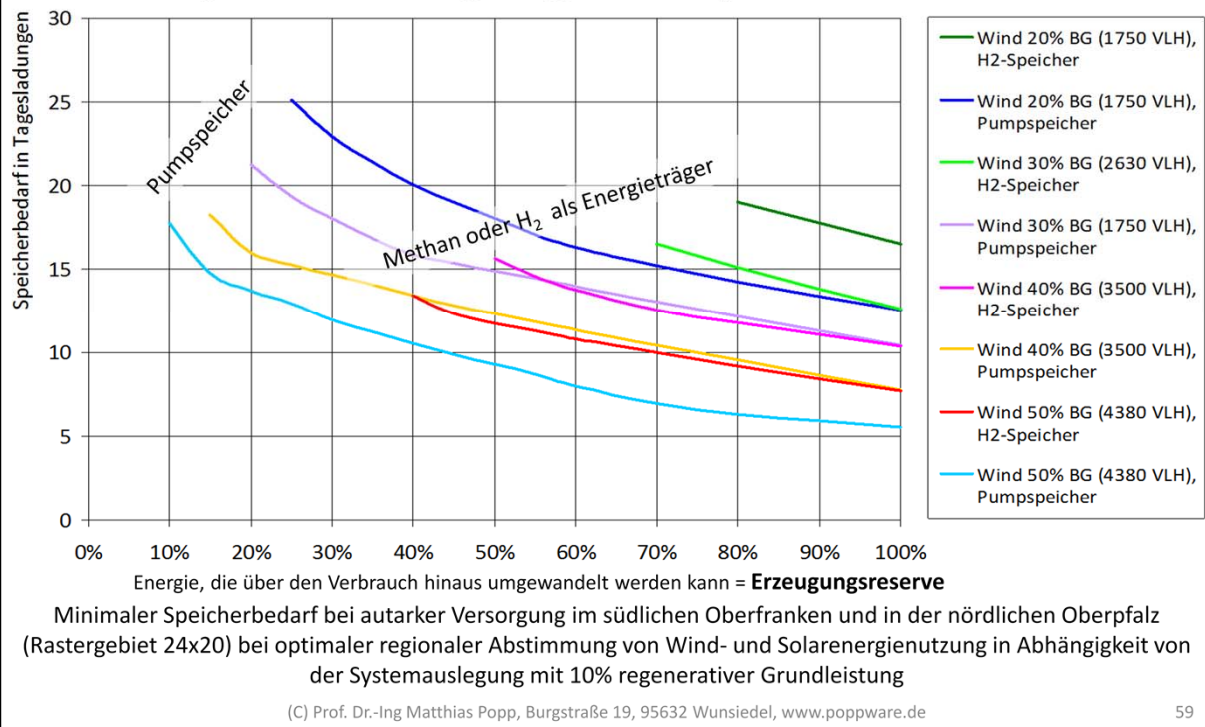
Mit wirkungsgradstarken Speichern ließe sich dieser Wert auf ca. einen viertel Jahresverbrauch reduzieren, der in hohem Maße zeitversetzt wieder abgerufen wird.

Der Unterschied resultiert aus den Speicherverlusten aufgrund des schlechteren Wirkungsgrads.

Um überhaupt ein stabiles Versorgungssystem zu erreichen, erfordern wirkungsgradschwache Speicher und ein ungünstig ausgelegter Erzeugungspark deutlich höhere Erzeugungsreserven, als optimale Systemauslegungen.

Neben der Akzeptanzgewinnung handelt es sich bei den zur Wahl stehenden Speichertechnologien, dem Netzausbau und der Verteilung und Auslegung der Erzeugungsanlagen auch um eine wirtschaftliche Frage, welche Systemlösung bei ganzheitlicher Betrachtung die attraktiveren Entwicklungskorridore eröffnet.

Systemauslegung und Speicherbedarf



Sowohl die Auslegung des Erzeugungssystems als auch der Speicherwirkungsgrad haben erheblichen Einfluss auf die vorzuhaltende **Speicherkapazität**.

Die Speicherkapazität ergibt sich aus der im Langzeitbetrieb zu erwartenden größten Speicherleerung.

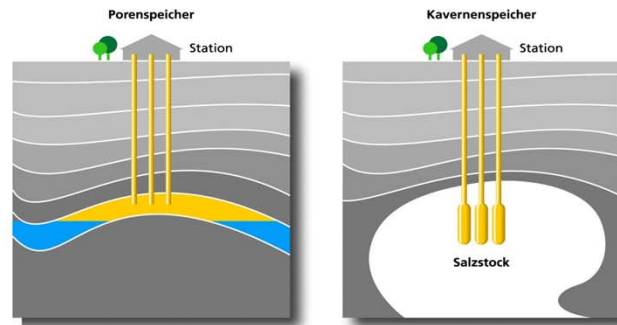
Die Kennlinien zeigen unter der Annahme eines jeweils optimal auf die regionalen Verhältnisse abgestimmten Energiemix, das Minimum an vorzuhaltender Erzeugungsleistung und die größten zu erwartenden Speicherleerungen.

Der Vorteil wirkungsgradstarker Speicher liegt darin, dass mit deutlich weniger Erzeugungsanlagen eine bedarfsgerechte Versorgung möglich wird.

Erdgasspeicher

Erdgasspeicher in Deutschland im Jahr 2011:

- Gesamtes Speichervolumen ca. 35.000 Mio. m³ V_n
- Maximale Arbeitsgaskapazität ca. 20.800 Mio. m³ V_n
- Energiegehalt von Erdgas ca. 10 kWh/ m³ V_n = 10 GWh/Mio. m³ V_n
- Energiespeicherkapazität ca. 208 TWh
- Verstromungswirkungsgrad (GuD) ca. 60%
- **Stromspeicherkapazität** ca. **125 TWh**, das entspricht ca. **87 Tagesladungen** des durchschnittlichen Strombedarfs Deutschlands

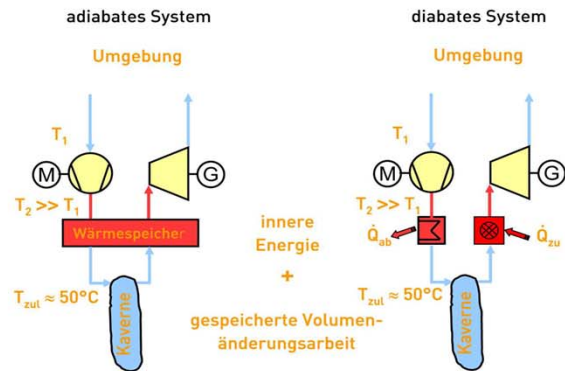
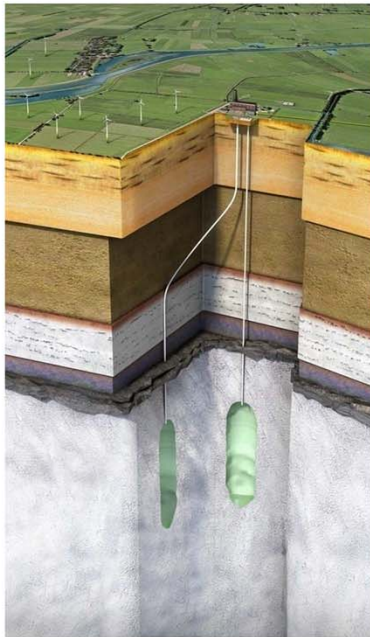


Wegen des immensen Speicherbedarfs, der mit dem weiteren Ausbau der erneuerbaren Stromversorgung auf uns zukommt, wird stark über Alternativen zu der bewährten und technisch ausgereiften Pumpspeichertechnik nachgedacht, mit Wasserstoff oder Erdgas als Energieträger.

Die im Erdgasnetz vorhandene Speicherkapazität würde ohne Weiteres ausreichen, um Stromdefizite auch über die längsten Flauten hinweg ausgleichen zu können.

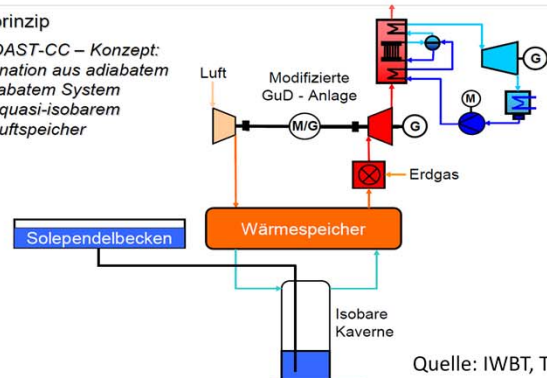
Im Gegensatz zur Pumpspeichertechnik entstehen dabei aber erheblich höhere Verluste und die technische Entwicklung der dazu erforderlichen Systeme steckt noch in den Kinderschuhen.

Druckluftspeicher



Grundprinzip

ISACOAST-CC – Konzept:
Kombination aus adiabatem
und diabatem System
sowie quasi-isobarem
Druckluftspeicher



(C) Prof. Dr.-Ing Matthias Popp, Burgstraße 19, 95632 Wunsiedel, www.poppware.de

61

Druckluftspeicher nutzen unterirdische Hohlräume zur Speicherung komprimierter Luft.

Die Luft erwärmt sich beim Komprimieren auf die dabei angewandten Drücke von 60 bar und darüber auf über 600 °C.

Bei dieser Temperatur kann sie nicht in Kavernen gespeichert werden und muss vorher abgekühlt werden.

Geschieht dies über einen Wärmespeicher, dann kann die dabei abgegebene Wärmeenergie beim Entladen des Druckluftspeichers zum Teil wieder an die ausströmende Luft zurückübertragen werden.

Damit lassen sich Wirkungsgrade um 70% erreichen. Ohne Wärmespeicher bleibt der Wirkungsgrad unter 50%.

Wärmespeicher für die dabei auftretenden Drücke und Temperaturen in Verbindung mit der großen erforderlichen Kapazität sind technisches Neuland und Gegenstand laufender Forschungen.

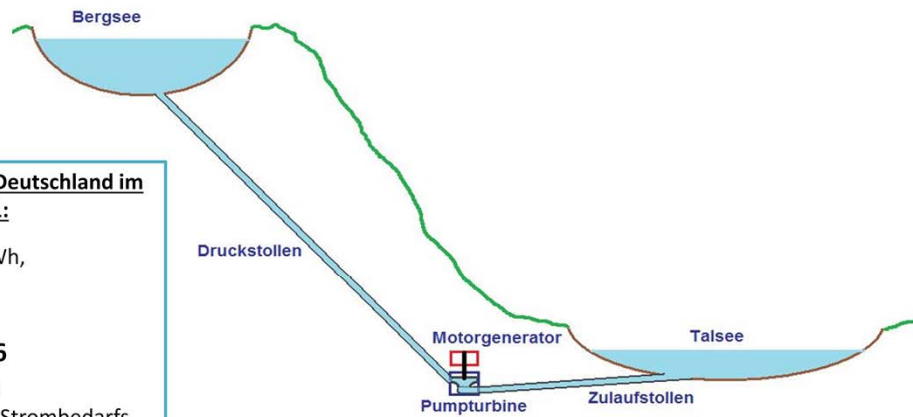
Bei einem bedeutenden Ausbau dieser Technik käme es zu einer Nutzungskonkurrenz mit den Erdgasspeichern.

Die Abfuhr des beim Ausspülen der Kavernen in großen Mengen anfallenden Salzwassers hat ökologisch unschädlich zu erfolgen.

Die Standfestigkeit der unterirdischen Kavernen ist zu beachten und kann sich auf die Langzeitstabilität des Untergrunds auswirken.

Bisher gibt es weltweit zwei Druckluftspeicherkraftwerke. Eines in den USA und eines in Norddeutschland bei Huntorf.

Pumpspeicher



Speicherkraftwerke in Deutschland im Jahr 2011:

- Kapazität ca. 40 GWh,
- Leistung ca. 7 GW,
- entspricht ca. **1/36 Tagesladung** des durchschnittlichen Strombedarfs Deutschlands,
- damit können ca. 10% des landesweiten Strombedarfs für ca. sechs Stunden überbrückt werden

Zur Speicherung einer Kilowattstunde ist eine Tonne Wasser auf 400 Meter Höhe zu heben.

Das entspricht etwa der stündlich eingestrahlten Sonnenenergie pro Quadratmeter der Erdscheibe.

Die in Deutschland existierenden Pumpspeicherkraftwerke wurden errichtet, um den Betrieb von Grundlastkraftwerken zu optimieren.

Die aktuelle Pumpspeicherkapazität Deutschlands könnte die derzeitige Stromnachfrage für gerade einmal 40 Minuten überbrücken.

Für eine regenerative Stromversorgung Deutschlands auf der Basis von Wind und Sonne und ohne weitere Rückgriffmöglichkeit auf fossile und nukleare Energieträger würde das bedeuten, ...

Erforderliche Speicherkapazität

Speicherbedarf Deutschlands im nationalen Alleingang:

bei optimierten Erzeugungsstruktur mit Strom allein aus Wind und Sonne mit 30% Erzeugungsreserve

Kapazität ca. 20 TWh, Leistung ca. 90 GW

entspricht ca. **14 Tagesladungen** der Durchschnittsnachfrage,
erfordert ca. **500 Mal die vorhandene Speicherkapazität**

Speicherbedarf Deutschlands im europäischen Verbund:

bei optimierten Erzeugungsstruktur mit Strom allein aus Wind und Sonne mit 30% Erzeugungsreserve

Kapazität ca. 9 TWh, Leistung ca. 90 GW

entspricht ca. **6 Tagesladungen** der Durchschnittsnachfrage,
erfordert ca. **200 Mal die vorhandene Speicherkapazität,**
leistungsstarken Ausbau der europäischen Stromnetze und einen Ausbau der Wind- und Solarenergie in allen Ländern Europas

..., dass im nationalen Alleingang die derzeit vorhandene Speicherkapazität in etwa zu ver-500-fachen wäre.

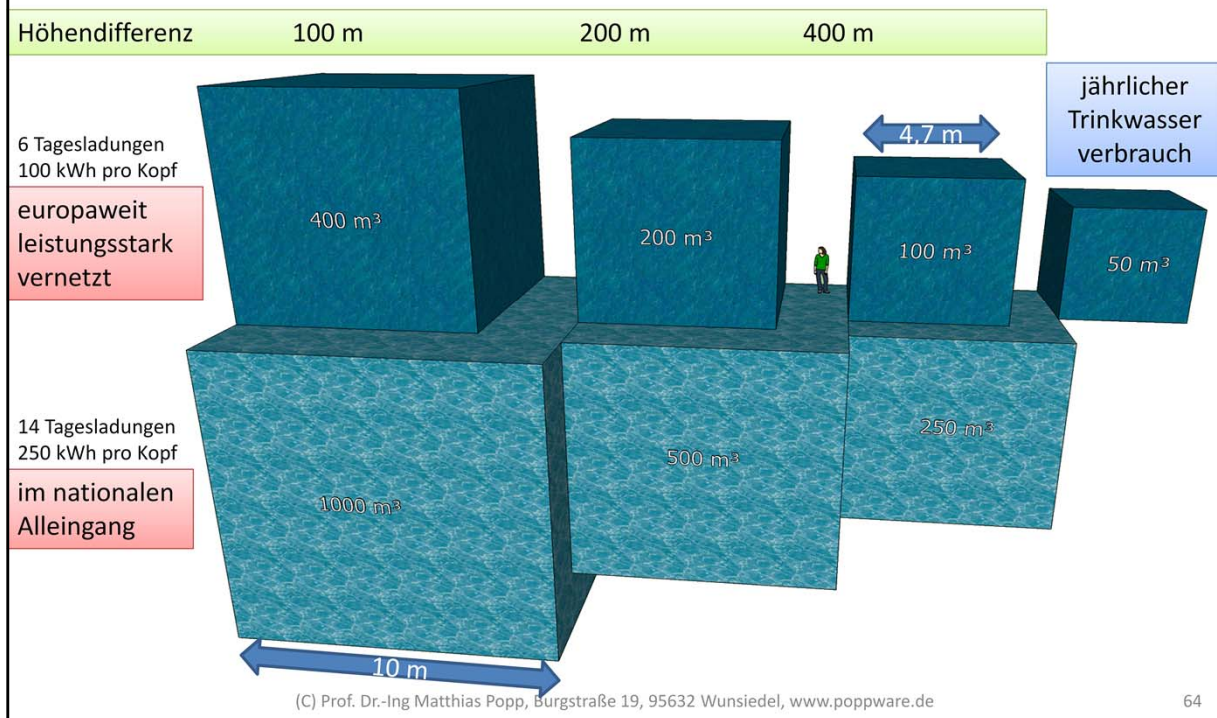
Die Leistung dieser Systeme müsste jedoch lediglich beim etwa 13-fachen von heute liegen.

Die heute in Deutschland existierenden Pumpspeicher passen damit in keiner Weise zu den Anforderungen einer regenerativen Stromversorgung.

Bei einer sich aus heutiger Sicht leider nicht abzeichnenden optimalen europaweiten Kooperation mit leistungsstarker Vernetzung würde sich immer noch ein etwa 200-facher Speicherbedarf ergeben.

Die sich dabei im Falle von Pumpspeichersystemen ergebenden Wasservolumina pro Kopf der Bevölkerung sind nachfolgend maßstabsgetreu dargestellt.

Wasserbedarf zur Energiespeicherung pro Person



Die notwendige Speicherkapazität pro Kopf liegt, zwischen 100 und 250 Kilowattstunden.

Je nach Höhenunterschied der Wasserflächen von Pumpspeichersystemen, würde das pro Einwohner Austauschvolumen zwischen 100 und 1000 m³ erfordern.

Der für die einmalige Erstbefüllung von Energiespeichersystemen erforderliche Wasserbedarf pro Person würde sich nicht um Größenordnungen vom alljährlich erforderlichen Trinkwasserverbrauch unterscheiden.

Einmal aufgefüllt, bleibt das Wasser im System. Nur die Verdunstungsverluste und bewusst herbeigeführte Entnahmen müssen beim späteren Betrieb noch ausgeglichen werden.

Ein Wasserproblem stellt die Füllung von Pumpspeichersystemen nicht dar.

Der Aufbau dieser Speichersysteme kann zudem über mehrere Jahrzehnte hinweg erfolgen, weil ein relevanter Speicherbedarf erst entsteht, wenn mehr als ca. 20% der elektrischen Energie aus volatilen Quellen kommen. Auch die Außerbetriebnahme der konventionellen Kraftwerke wird in einem kontinuierlichen, länger andauernden Prozess stattfinden, der abgestimmt auf den Ausbau der erneuerbaren Erzeugungssysteme und die errichteten Speicherkapazitäten stattfinden wird.

Eine akute Eile zur schnellen Schaffung von Speichersystemen besteht derzeit nicht. Allerdings sollten mit Blick auf die Planungs- und Umsetzungszeiten für derartige Systeme möglichst bald Öffentlichkeitsarbeit betrieben und Rahmenbedingungen geschaffen werden, die es aus gesellschaftlicher, rechtlicher und betriebswirtschaftlicher Sicht ermöglichen, die notwendigen Prozesse in Gang zu setzen.

Bodenflächenbedarf zur Energiespeicherung

- Das Austauschvolumen eines Pumpspeicherkraftwerks muss im aufgeladenen Zustand im Oberbecken Platz finden, im entladenen Zustand im Unterbecken.
Der Speicherraum muss deshalb zweimal vorgehalten werden.
- Auf einer gegebenen Fläche kann um so mehr Volumen gespeichert werden, je größer das Pegelspiel zwischen aufgeladenem und entladenen Zustand realisiert wird.

Wasserflächenbedarf pro Kopf der Bevölkerung zur Schaffung von Speichervolumen

Speicherbedarf	Wasservolumen						Einheit
	100 kWh/Pers. (europäisch)			250 kWh/Pers. (national)			
Höhenunterschied	400	200	100	400	200	100	m
Pegelspiel	100	200	400	250	500	1000	m ³
1 m	200	400	800	500	1000	2000	m ²
5 m	40	80	160	100	200	400	m ²
20 m	10	20	40	25	50	100	m ²
50 m	4	8	16	10	20	40	m ²

Wenn Pumpspeichersysteme mit einer gegebenen Kapazität möglichst flächensparend errichtet werden sollen, dann kommt es neben der Realisierung möglichst großer Höhenunterschiede auch auf ein möglichst großes Pegelspiel in Ober- und Unterbecken zwischen aufgeladenem und entleertem Zustand an.

Bodenflächenbedarf zur Energiespeicherung

Wasserflächenbedarf für Deutschland zur Schaffung von Speichervolumen (80 Mio. Einwohner)							
Pegelspiel	Wasservolumen						Einheit
	8	16	32	20	40	80	km ³
1 m	16000	32000	64000	40000	80000	160000	km ²
5 m	3200	6400	12800	8000	16000	32000	km ²
20 m	800	1600	3200	2000	4000	8000	km ²
50 m	320	640	1280	800	1600	3200	km ²

Wasserflächenbedarf im Vergleich zur Landesfläche Deutschlands (Landesfläche 357.126 km ²)							
Speicherkapazität	mittlere Höhendifferenz der Wasseroberflächen						Einheit
pro Kopf	(europäisch) 100			(national) 250			kWh
deutschlandweit	(europäisch) 8			(national) 20			TWh
Pegelspiel	400	200	100	400	200	100	m
1 m	4,48%	8,96%	17,92%	11,20%	22,40%	44,80%	
5 m	0,90%	1,79%	3,58%	2,24%	4,48%	8,96%	
20 m	0,22%	0,45%	0,90%	0,56%	1,12%	2,24%	
50 m	0,09%	0,18%	0,36%	0,22%	0,45%	0,90%	

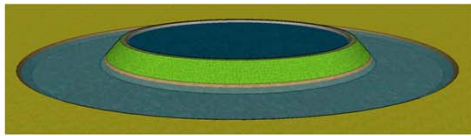
Die landesweit zu schaffenden Wasserflächen zur Energiespeicherung wären marginal im Vergleich zu vielen anderen Landnutzungen.

Je nach Systemauslegung könnte der Speicherwasserflächenbedarf sogar geringer ausfallen, als beispielsweise der Flächenbedarf für den Anteil der Photovoltaik an der Stromerzeugung.

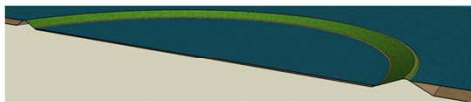
All diese Überlegungen führen zum Vorschlag des Ringwallspeichers.

Ringwallspeicher

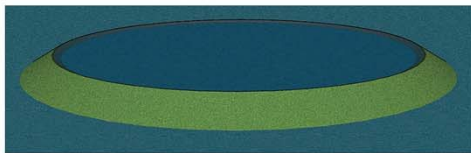
als geotechnische Option zur Schaffung großer Speicherkapazitäten



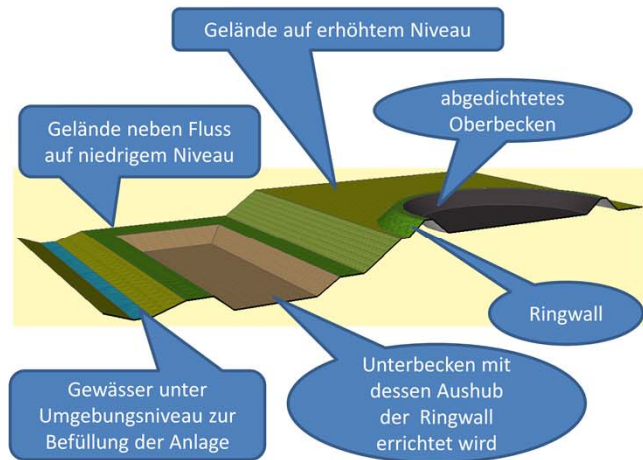
für das „flache Land“



für tiefe Gewässer



für flache Gewässer



bei natürlichen Höhenunterschieden

doppelte geometrische Abmessungen schaffen 16-fache Speicherkapazität

Damit können auch in Gebieten, die für klassische Pumpspeichersysteme nicht in Frage kommen, große Speicherkapazitäten mit hohem Wirkungsgrad errichtet werden, weil dabei große Höhenunterschiede geschaffen oder natürlich vorhandene Höhenunterschiede vergrößert werden.

Schaufelradbagger würden das Unterbecken ausheben und damit den Damm für ein Oberbecken aufschütten, das innen abgedichtet wird.

Die Anlage würde wie ein Pumpspeicherkraftwerk betrieben.

Ringwallspeicher unterscheiden sich von klassischen Pumpspeichern dadurch, dass auf die direkte Flutung sensibler Flusstäler verzichtet werden kann.

Zudem führen bereits geringere Höhenunterschiede, sowie weniger markante und sensible Höhenlagen, zu wirtschaftlich interessanten Konfigurationen.

Die Geometrie dieser Speicher führt mit zunehmender Größe zu einem rasanten Anwachsen der Kapazität.

Dieser Vorschlag gefiel dem Chefredakteur von „Bild der Wissenschaft“, ...

Ringwallspeicher-Hybridkraftwerk

Alternative zu zwei Kernkraftwerken - 2000 große Windenergieanlagen und die darauf abgestimmte Fotovoltaik garantieren mit 14 Tagen Speicherreichweite eine sichere und nachfragegerechte Versorgung mit 2 GW Durchschnitts- und 3,2 GW Spitzenleistung.



„Ringwallspeicher as technical building and tourism paradise“

Zitat von Prof. Dr. Carsten Ahrens von der Jade Hochschule in Oldenburg, der den Ringwallspeicher am 19. Oktober auf der Ingeniera 2010 in Buenos Aires vorstellte.

(C) Prof. Dr.-Ing Matthias Popp, Burgstraße 19, 95632 Wunsiedel, www.poppware.de

68

..., so dass er einen Grafiker beauftragte, diese Illustration anzufertigen.

Hierbei handelt es sich um eine sehr große und idealisierte Vorstellung, die in dieser Form sicher nicht gebaut würde.

Als Anschauungsobjekt zeigt sie aber eine Reihe von Aspekten und Prinzipien, die auf Ringwallspeicher generell zutreffen.

Der Außendurchmesser dieser fiktiven Anlage läge bei ca. 11 km, der Walldurchmesser bei ca. 6 km, die Wallhöhe bei 215 m, das Pegelspiel im inneren Oberbecken bei 50 m und im äußeren Unterbecken bei 20 m.

Die Kapazität von ca. 700 GWh würde im Zusammenwirken mit ca. 2000 Windenergieanlagen in der größten, heute verfügbaren Bauart und der notwendigen Photovoltaik in der Lage sein, versorgungssicher zwei Kernkraftwerke zu ersetzen.

Natürlich geht das vorteilhaft auch deutlich kleiner bei einer größeren Anzahl von dezentral über das Land verteilten Anlagen.

Diese bräuchten auch nicht in der idealisiert dargestellten Kreisform errichtet werden, sondern könnten Siedlungsgebiete und sensible Landschaftsteile umgehen und attraktiv in das entstehende Naturenergiesystem integrieren.

Insbesondere das Unterbecken würde sich für Freizeitbetrieb eignen, weil die auch auf Langzeitausgleich ausgelegten Ringwallspeicher äußerst selten größere Pegelveränderungen aufweisen würden.

Meistens wäre das Oberbecken gut gefüllt und das Unterbecken auf abgesenktem Niveau.

Beispiel Edersee

Zentrum einer beliebten Ferienregion, errichtet unter Kaiser Wilhelm vor 100 Jahren



(C) Prof. Dr.-Ing Matthias Popp, Burgstraße 19, 95632 Wunsiedel, www.poppware.de

69

Derartige Wasserflächen gibt es.

Der Edersee in Hessen erfährt in einer Saison mitunter Absenkungen von über 30 Metern.

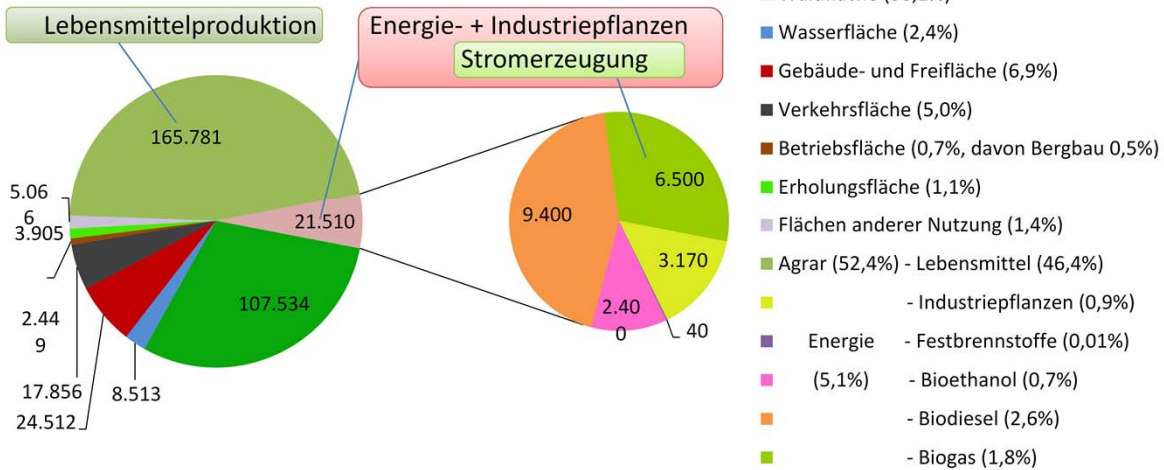
Als ich im Jahr 2008 diese Bilder machte, betrug die Absenkung etwa 20 Meter. An diesem Tag ging es noch einmal um mehr als einen Meter nach unten.

Auch mit diesen Pegelveränderungen findet auf dem See ein reger Freizeitbetrieb statt und er bildet das Zentrum einer beliebten Ferienregion.

Bodennutzung Deutschlands

in km² (Gesamtfläche 357.126 km²)

landwirtschaftlich genutzte Flächen 2010 für



Ringwallspeicher Hybridsysteme zur vollständigen Stromversorgung Deutschlands würden über das Land verteilt eine Bodenfläche von zusammen ca. 3000 km² erfordern.

(C) Prof. Dr.-Ing Matthias Popp, Burgstraße 19, 95632 Wunsiedel, www.poppware.de

70

Etwas mehr als die halbe Fläche Deutschlands wird landwirtschaftlich genutzt. Der größte Teil davon dient der Lebensmittelproduktion.

Die industriell und energetisch genutzte Agrarfläche ist hier weiter aufgeschlüsselt.

Davon wurde bereits im Jahr 2010 auf ca. 6500 km² Biomasse zur Stromerzeugung in Biogasanlagen angebaut.

Der idealisiert dargestellte Ringwallspeicher würde zusammen mit allen Wind- und Solarenergieanlagen eine Bodenfläche von ca. 100 km² erfordern.

30 derartige Hybridkraftwerke hätten eine durchschnittliche Erzeugungsleistung von 60 GW.

Die erforderliche Gesamtfläche läge bei ca. 3000 km².

Sie wären in der Lage die vollständige Stromversorgung Deutschlands allein aus Wind und Sonne nachfragegerecht zu gewährleisten.

Das wäre weniger als 1 % der Landesfläche und weniger als die Hälfte der Fläche von 6500 km², auf der bereits heute Biomasse zur Stromerzeugung mit Biogasanlagen angebaut wird.

Durch Einsatz von weniger als 1 % der Landesfläche ließe sich Deutschland allein mit Strom aus Wind und Sonne nachfragegerecht versorgen.

Vergleich Ringwallaspeicher / Biomasse

**Etwa die Hälfte
der heute in Deutschland bereits zur
Biogasproduktion eingesetzten
Bodenfläche würde ausreichen,
um mit Ringwallaspeicher-
Hybridkraftwerken die regenerative,
nachhaltige und sichere
Stromversorgung des gesamten Landes
zu gewährleisten.**



Biogasanlagen lieferten im Jahr 2010 ca. 3% des deutschen Strombedarfs.

Der Flächenertrag für elektrische Energie des vorgeschlagenen Hybridsystems zur Stromerzeugung liegt etwa 50 Mal höher, als der von Biomasse.

Wo Biomasse 40 MW Leistung bereitstellen kann, könnten Ringwallaspeicher Hybridsysteme 2000 MW leisten.

Die Chance



Ein Verzicht

- auf energetisch genutzte Agrarflächen
- zugunsten Ringwallspeicher-Hybridkraftwerken



eröffnet Freiräume für

- großräumig vernetzte Naturlandschaften.



Schwimmende Inseln

- ermöglichen die Sicherung der Wasserqualität und die
- ökologische Aufwertung der entstehenden Wasserflächen

Ein Umdenken bei dieser Art der Landnutzung könnte Freiräume für naturnahe Flächen schaffen.

Vergleich Ringwallspeicher / Braunkohle



Braunkohletagebau Garzweiler:
Ausschnitt aus Originalfoto: http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Tagebau_Garzweiler_Panorama_2005.jpg
© Raimond Spekking / Wikimedia Commons / CC-BY-SA-3.0 & GFDL

Landschaftseingriffe größeren Ausmaßes als für Ringwallspeicher sind in Deutschland Realität.

(C) Prof. Dr.-Ing Matthias Popp, Burgstraße 19, 95632 Wunsiedel, www.poppware.de

73

Braunkohletagebaue sind die einzigen Bauwerke, bei denen noch viel mehr Erde bewegt wird, als es für die Errichtung großer Ringwallspeichersysteme erforderlich wäre.

Etwa 50% des in Deutschland erzeugten Stroms wird in Kohlekraftwerken gewonnen.

Ein erheblicher Anteil davon kommt als Importkohle aus anderen Ländern, in denen ähnlich große Abbaugelände ausgebeutet werden.

Die Kompetenz der Betreiber von Tagebauen bei der Bewegung großer Erdmassen könnte eine Basis zur kostengünstigen Errichtung dieser Energiespeicher werden.

Diese Speichersysteme werden gebraucht, wenn die fossilen Rohstoffe zur Neige gehen oder wenn deren Gewinnung immer kostspieliger wird, nukleare Energietechnik ausgeschlossen wird und natürliche Energiekreisläufe die Elektrizitätsversorgung übernehmen sollen.

Vergleich Ringwallspeicher / Braunkohle

Braunkohletagebau Hambach (zwischen Köln und Aachen)

- siehe z.B.: http://de.wikipedia.org/wiki/Tagebau_Hambach
- Ausdehnung: am Ende ca. 85 km²
- Tiefe: bis über 400 Meter
- Betriebszeit: noch ca. 45 Jahre
- elektrische Leistung: ca. 4 GW
- ca. 200 Meter überragt die Hochkippe Sophienhöhe die Bördenlandschaft
- das Abraumvolumen wird mehr als 10 Kubikkilometer erreichen

Allein diese bewegten Erdmassen entsprechen dem Erdbauvolumen von sieben Ringwallspeicher-Hybridkraftwerken mit

- 215 Metern Wallhöhe,
- 14 Gigawatt Durchschnitts und
- 22,4 Gigawatt Spitzenleistung.

Der größte deutsche Tagebau Hambach erreicht im Endausbau eine Größe, die der Wasserfläche des illustrierten großen Ringwallspeichers entspricht.

Das Grundwasser wird dafür großräumig auf ca. 500 Meter Tiefe abgesenkt.

Allein das in einem ca. sechsjährigen Vorlauf, vor der ersten Kohleförderung auf die ca. 200 Meter hohe Halde gekippte Volumen von ca. 10 km³ des abgetragenen Deckgebirges würde ausreichen, um sieben Ringwallspeicher in der gezeigten Größe zu errichten.

Enorme zusätzliche Bodenmassen werden innerhalb des Tagebaus vor der Abbaulinie abgetragen und dahinter wieder aufgefüllt.

Die mit diesem Erdbauvolumen geschaffenen Hybridsysteme könnten ein Mehrfaches an elektrischer Leistung bereitstellen, als dieser Tagebau.

Vergleich Ringwallspeicher / Tagebau



Kreisrunde **Ringwallspeichersysteme** sind eine Idealvorstellung, die es so kaum geben wird.

In der Praxis orientieren sich Anlagengröße und Verlauf der Uferlinien an den Möglichkeiten und Gegebenheiten der Landschaft.

Im Gegensatz zu **Tagebauprojekten** können dabei bebaute Gebiete und sensible Zonen ausgespart und in das nachhaltige Natur-Energiesystem integriert werden.

Auch der hier aus dem Flugzeug aufgenommene Tagebau in Tschechien, bei Sokolov, zeigt diese gewaltigen Erdbewegungen, die Realität sind, um Elektrizität aus Braunkohle zu erzeugen.

Bei einer insgesamt in Anspruch genommenen Fläche von ca. 120 km² werden Kohlekraftwerke mit ca. 800 MW Leistung bedient.

Ringwallspeicher werden höchst wahrscheinlich nie diese idealisierte, kreisrunde Form annehmen, wie in der Illustration gezeigt.

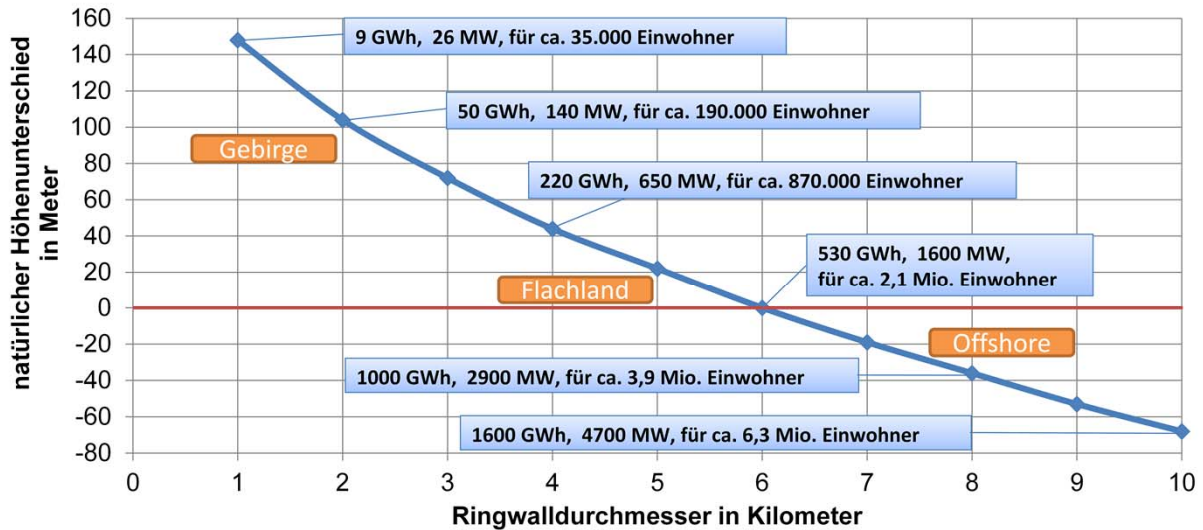
Dafür besteht auch keine Notwendigkeit.

Sensible Gebiete und Ortschaften können ausgespart und reizvoll in die entstehende neue Landschaft integriert werden.

Unter Ausnutzung natürlicher Höhenunterschiede können sie auch viel kleiner wirtschaftlich errichtet werden.

Ringwallspeicher mit ähnlichem Bauaufwand

bei natürlich vorhandenen Höhenunterschieden



mittlere Fallhöhe: 200 m, maximales Pegelspiel: Unterbecken 20 Meter, Oberbecken 50 Meter.
 Speicherreichweite bei den angegebenen Durchschnittsleistungen: 14 Tage.
 Erdbauaufwand: ca. 2,4 m³/kWh, Flächenbedarf: ca. 0,15 bis 0,23 m²/kWh.

Dämme verschlingen das größte Bauvolumen im Fußbereich.

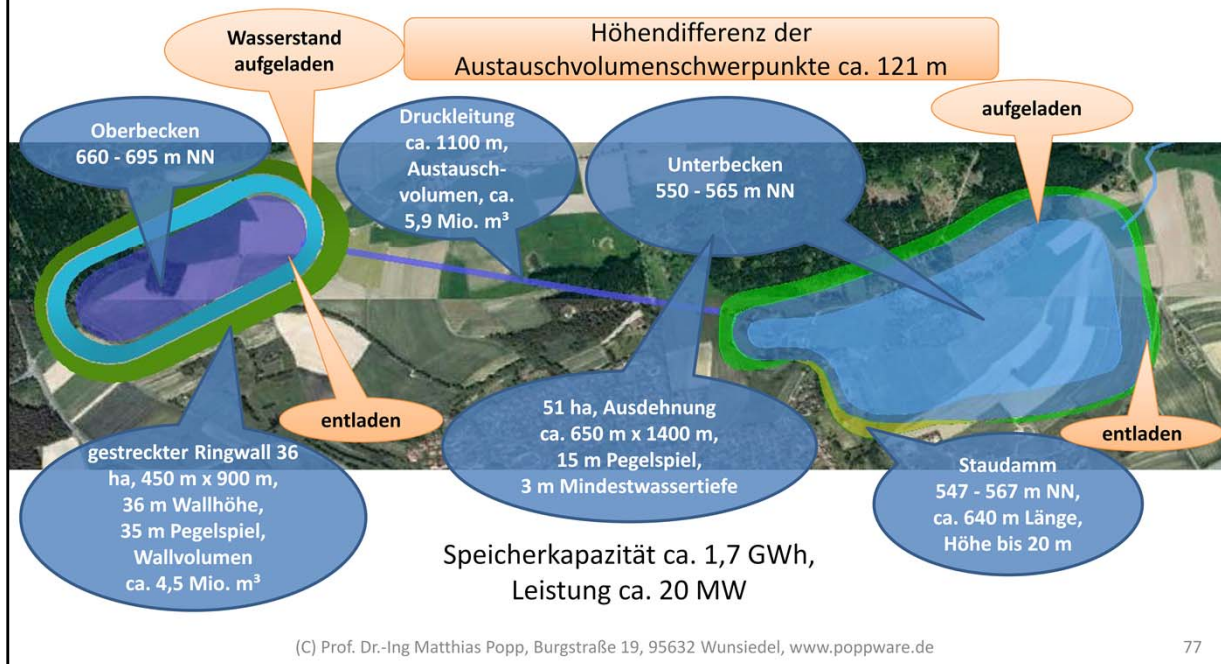
Bereits geringe Höhenunterschiede, bei denen man kaum an die Errichtung eines klassischen Pumpspeicherkraftwerks denken würde, ermöglichen die Errichtung von Ringwallspeichern.

Dabei kann mit einem Aufwand von wenigen Kubikmetern Erdbau pro Kilowattstunde Speicherkapazität in die Kapazitätsgrößenordnungen vorgestoßen werden, die ausreichen um auch die längsten Defizitphasen bei der regenerativen Stromgewinnung sicher zu überbrücken.

Der spezifische Aufwand, ausgedrückt in € pro kWh Speicherkapazität, sinkt weiter drastisch, wenn man von diesen Verhältnissen ausgehend, bei gegebenen Höhenunterschieden die Systeme noch etwas größer errichten kann.

kleiner Ringwallspeicher mit Nutzung natürlicher Höhenunterschiede

zur Lösung der Volatilitätsprobleme eines Versorgungsgebiets mit ca. 15.000 Einwohnern mit einer zu 100% regenerativen Stromversorgung



Ein Beispiel, wie so ein Speichersystem für ein kleines Versorgungsgebiet in eine hügelige Mittelgebirgslandschaft integriert werden könnte, sehen sie hier.

Hochwasserschutz, Freizeitsee und nachhaltige Versorgung mit regenerativer Energie ließen sich damit vereinigen.



Im abgelaufenen Jahr 2012 konnte ich für eine Schweizer Kraftwerksgruppe eine Volatilitätsanalyse für die Schweiz anfertigen.

Die Schweiz verfügt über riesige Speicherwasserressourcen, die es ermöglichen, das Land für ca. 50 Tage allein aus den Speicherbecken heraus zu versorgen. Allerdings ist der Kraftwerkspark der Schweiz so ausgelegt, dass diese riesigen Speichervorräte auch benötigt werden, um die Stromversorgung des Landes zu bewerkstelligen.

Die Speicher werden im Wesentlichen im Sommerhalbjahr mit der Gletscherschmelze aufgefüllt und im Winterhalbjahr, mit dem Einfrieren der Gletscher, geleert (ein Speicherzyklus pro Jahr).

Die Schweiz möchte ebenfalls aus der Kernenergienutzung aussteigen und bekommt damit insbesondere im Winter ein Versorgungsproblem.

Dieses könnte durch den Einsatz von Windenergiesystemen gelöst werden, um die wegfallende Kernenergie zu ersetzen.

Allerdings erscheint der Einsatz von Windenergieanlagen auf den Höhenzügen der Schweizer Alpen derzeit als eine in mehrfacher Hinsicht unlösbare Herausforderung.

Würde die Schweiz durch Kooperation mit den Nachbarländern zu einem idealen Energiemix aus Wind- und Laufwasserenergie gelangen, dann könnte sie mit deutlich weniger Speicherkapazität als ihr zur Verfügung steht, eine sichere Versorgungssituation herbeiführen.

Windenergielieferung gegen Partizipation an der Speicherkapazität könnte ein interessantes Geschäftsmodell zwischen Bayern / Deutschland und der Schweiz werden, die zu einer Win-Win-Situation der beteiligten Partner führt.

Für Bayern würde das allerdings bedeuten, dass die Windenergie gegenüber dem vorliegenden bayerischen Energiekonzept einen ganz anderen Stellenwert erhalten muss.

Ein idealer Energiemix aus Wind und Sonne liegt in Süddeutschland etwa bei 80% Windenergie zu 20% Photovoltaik. Wenn Bayern ähnlich wie die Schweiz unüberwindbare Schwierigkeiten beim Ausbau der Windenergie sehen sollte, dann werden diesen Handel mit der Schweiz über kurz oder lang andere Regionen machen.

In der kleinen dicht besiedelten Schweiz war es im letzten Jahrhundert bis etwa 1970 möglich, riesige Wasserspeichersysteme zu errichten, die eine nachfragegerechte, regenerative und dazu kostengünstige Vollversorgung des Landes mit Strom, fast ausschließlich aus Wasserkraft, ermöglichten.

Mit Einzug der Kernenergie wurden, wie in vielen Ländern, Stimmungen laut (oder angeheizt), die in der Nutzung von Wasserkraft und den damit verbundenen Stauhaltungen eine Naturzerstörung sehen. Dies hat in einigen Ausprägungen dieser Systeme aus ökologischer Sicht sicher auch eine gewisse Berechtigung. Niemand prangert jedoch die Schweiz wegen dieser riesigen Speicherwasserbecken der Naturzerstörung an oder fordert gar deren Rückbau. Vielmehr sind die Stauseen beliebte Fotomotive und sollen nun weiter ausgebaut werden.

Wenn es gelingt, diese ideologische Blockade gegen große Wasserbauwerke wieder aufzulösen und auf eine konstruktive Herangehensweise zurück zu führen, wären wir auch in Bayern und in Deutschland in der Lage, vergleichbare Flächen wie in der Schweiz als Wasserhaltungen für Energiespeichersysteme zu errichten.

Die geringeren Höhenunterschiede, die uns hierzulande zur Verfügung stehen, lassen sich kompensieren durch einen idealen regenerativen Energiemix, der es ermöglicht, mit deutlich kleineren Speicherkapazitäten, als diese in der Schweiz errichtet wurden, zu einer sicheren regenerativen Stromversorgung zu gelangen.

Zum Schluss

Eine sichere, robuste und bedarfsgerechte zu 100% regenerative Stromversorgung erfordert heute in Deutschland eine Windenergieanlage pro ca. 1300 Einwohner, dazu pro Einwohner ca. 20 m² Solarmodulfläche und beispielsweise ca. 40 m² Wasserfläche für wirkungsgradstarke, dezentral, gut über das Land verteilte Stromspeicheranlagen.

Zusammen beansprucht das ca. 1% der Landesfläche.

Im Vergleich dazu würde eine 100%-ige Stromversorgung Deutschlands mit Biomasse pro Einwohner ca. 2200 m² oder nahezu die Hälfte der Landesfläche erfordern.

Eine sichere und bedarfsgerechte zu 100% regenerative Stromversorgung ist heute eine reale Option.

Für die Umsetzung gibt es sowohl erzeugungsseitig als auch bei den Speichertechnologien große Spielräume und Optimierungspotentiale.

Die Lernkurve dafür befindet sich noch ganz am Anfang.

Es geht dabei weniger um eine technische oder finanzielle Herausforderung als vielmehr um eine gesellschaftliche Information und Willensbildung und die Schaffung geeigneter rechtlicher und betriebswirtschaftlicher Rahmenbedingungen, welche die erforderlichen Investitionen in Gang bringen.

Ich hoffe mit diesem Vortrag
Inspiration und gute Ideen
geweckt zu haben
und stehe gerne für eine vertiefte
Zusammenarbeit zur Verfügung.



Dr.-Ing. Matthias Popp
Schönbrunn-Burgstraße 19
D-95632 Wunsiedel
Telefon: 09232 / 9933-10
Telefax: 09232 / 9933-40
matthias@POPpware.de
www.poppware.de

Die weitere Entwicklung des erneuerbaren Energiesystems bietet heute noch sehr viele Spielräume, die bis zum Ende durchdacht werden können, bevor Richtungsentscheidungen gefällt werden.

Wird dabei dafür gesorgt, dass ein robustes, versorgungssicheres und volkswirtschaftlich vorteilhaftes Zielsystem entsteht, dann ist anzunehmen, dass die zukünftigen Gesamtkosten der Transformation in einem vergleichsweise günstigen Korridor verbleiben.

Diese Aussage gilt sowohl im Großen, bei der Transformation der europäischen und der deutschen Energieversorgung als auch für regionale Versorgungsunternehmen.

Anhänge

- I. Benutzungsgrad von Windenergieanlagen (3 Folien)
- II. Speicherbedarf einer bedarfsgerechten Stromversorgung in Abhängigkeit von Erzeugung, länderübergreifender Kooperation und Speichersystemen (1 Folie)
- III. Energiesystem in Deutschland vor der Energiewende 2010 (1 Folie)
- IV. Potentialorientierter Ausbau der regenerativen Energiesysteme (2 Folien)
- V. Prinzipielle Entwicklung der Stromkosten in Abhängigkeit von der zeitlichen Umsetzung der Energiewende

Erhöhung des Benutzungsgrads (Volllaststundenzahl)

- **größere Rotordurchmesser**
- **größere Nabenhöhen in Luftschichten mit höheren Windgeschwindigkeiten**

Die Windleistung

- erhöht sich mit dem Quadrat der Rotordurchmesser
doppelter Durchmesser => vierfache Leistung
- erhöht sich mit der Dritten Potenz der Windgeschwindigkeit
doppelte Windgeschwindigkeit => achtfache Leistung

Wird bei diesen Maßnahmen die Nennleistung einer Windenergieanlage beibehalten, dann erhöht sich die im Durchschnitt abgegebene Leistung und damit der Benutzungsgrad

bei deutlich reduzierter Ladungsabweichung.



Werden Windenergieanlagen auf größere Volllaststundenzahlen oder gleichbedeutend auf einen höheren Benutzungsgrad ausgelegt, dann reduziert sich die Ladungsabweichung der damit umgewandelten elektrischen Energie deutlich.

Werden gleichartige Windenergieanlagen an unterschiedlichen Standorten aufgestellt, dann erreichen sie an windschwächeren Standorten niedrigere und an windstärkeren Standorten höhere Volllaststundenzahlen.

Dieser nicht an die Standortverhältnisse angepasste Einsatz führt dazu, dass Windenergieanlagen im Meer, wo der Wind ungestört bis nahe an den Boden sein Geschwindigkeitsprofil ausbilden kann, höhere Volllaststundenzahlen erreichen, als im Binnenland, wo die hohen Windgeschwindigkeiten erst in größeren Höhen erreicht werden.

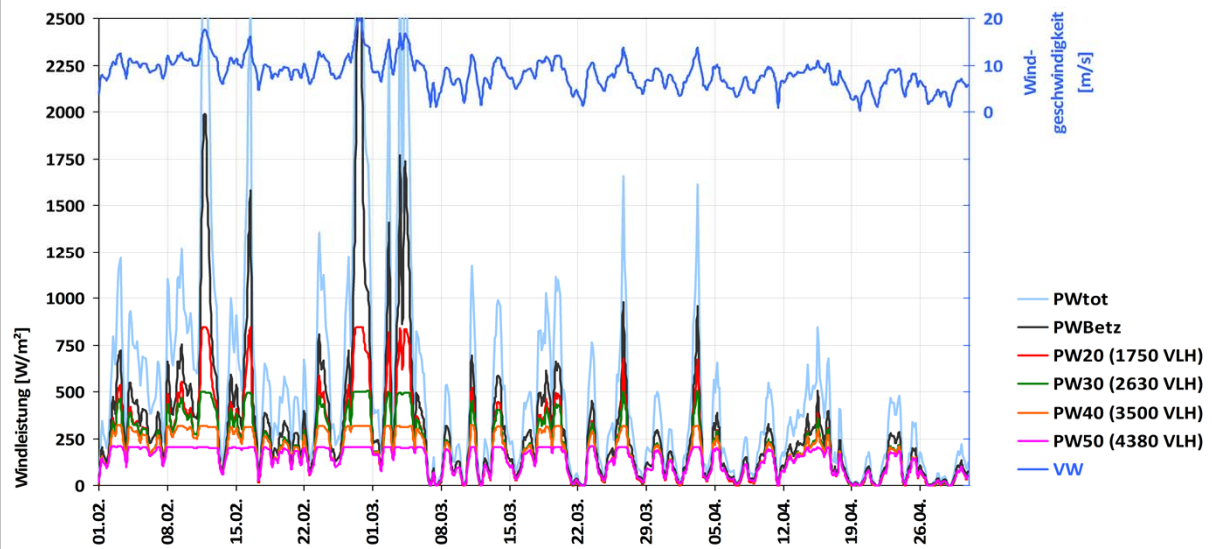
Würden Offshore-Anlagen, bei erhöhtem Bauaufwand, mit stärkeren Generatoren ausgerüstet, dann würde deren Energieertrag zunehmen, bei gleichzeitig abnehmender Volllaststundenzahl.

Würde, bei reduziertem Bauaufwand, die Generatorleistung von Binnenlandanlagen zurückgenommen, dann würde deren Volllaststundenzahl zunehmen, bei etwas reduziertem Energieertrag.

Einige Hersteller bieten sogenannte „Schwachwindanlagen“ an, die in diese Richtung weisen.

Benutzungsgrad und Leistungsabgabe

in einer beispielhaft gewählten Region für einen beispielhaft gewählten Zeitraum



(C) Prof. Dr.-Ing Matthias Popp, Burgstraße 19, 95632 Wunsiedel, www.poppware.de

83

Dieses Diagramm zeigt im oberen Bereich beispielhaft den zeitlichen Verlauf der Windgeschwindigkeit einer Region für einen gewissen Zeitabschnitt bezüglich der rechten Y-Achse.

An der linken Y-Achse ist die Windleistung aufgetragen, die pro Quadratmeter Strömungsquerschnitt in diesen Luftmassen steckt bzw. über technische Systeme aus diesen Luftmassen abgegriffen werden kann.

Weil sich die Windleistung PW proportional zur dritten Potenz der Windgeschwindigkeit VW verhält, kommt es bei höheren Windgeschwindigkeiten zu enormen Leistungsspitzen, mit mehreren Kilowatt pro Quadratmeter Strömungsquerschnitt.

Bedenkt man, dass bei großen Windenergieanlagen Flächen von über 10.000 Quadratmetern aus den bewegten Luftmassen abgegriffen werden, dann wird deutlich, dass dabei erhebliche Leistungen mit mehreren Megawatt auftreten.

Die bewegten Luftmassen können nicht auf null abgebremst werden. Deshalb kann nur ein Teil der ihnen innewohnenden totalen Leistung PW_{tot} in andere Leistungsformen umgewandelt werden.

Der Physiker Betz wies in den 20-er Jahren des letzten Jahrhunderts nach, dass physikalisch maximal $16/27$ ($\approx 59,3\%$) der totalen Windleistung geerntet werden kann, wenn die bewegte Luftmasse in einer verlustfreien Energieumwandlungsanlage auf ein Drittel ihrer ursprünglichen Geschwindigkeit verlangsamt wird.

Technisch ist man mit guten Windenergieanlagen in optimierten Betriebsbereichen in der Lage über 50% der totalen Windleistung abzugreifen.

Man verzichtet allerdings darauf, diesen hohen, als Leistungsbeiwert bezeichneten Erntefaktor, auch bei selten auftretenden hohen Windgeschwindigkeiten zu erreichen.

Ab einer Abregelungswindgeschwindigkeit verändert man die Anstellwinkel der Rotorblätter so, dass der Wind weniger verlangsamt und die maximale Leistung des Generators nicht überschritten wird.

Je nach technischer Auslegung der Windenergieanlage kann diese Abregelung bei niedrigeren oder höheren Windgeschwindigkeiten einsetzen.

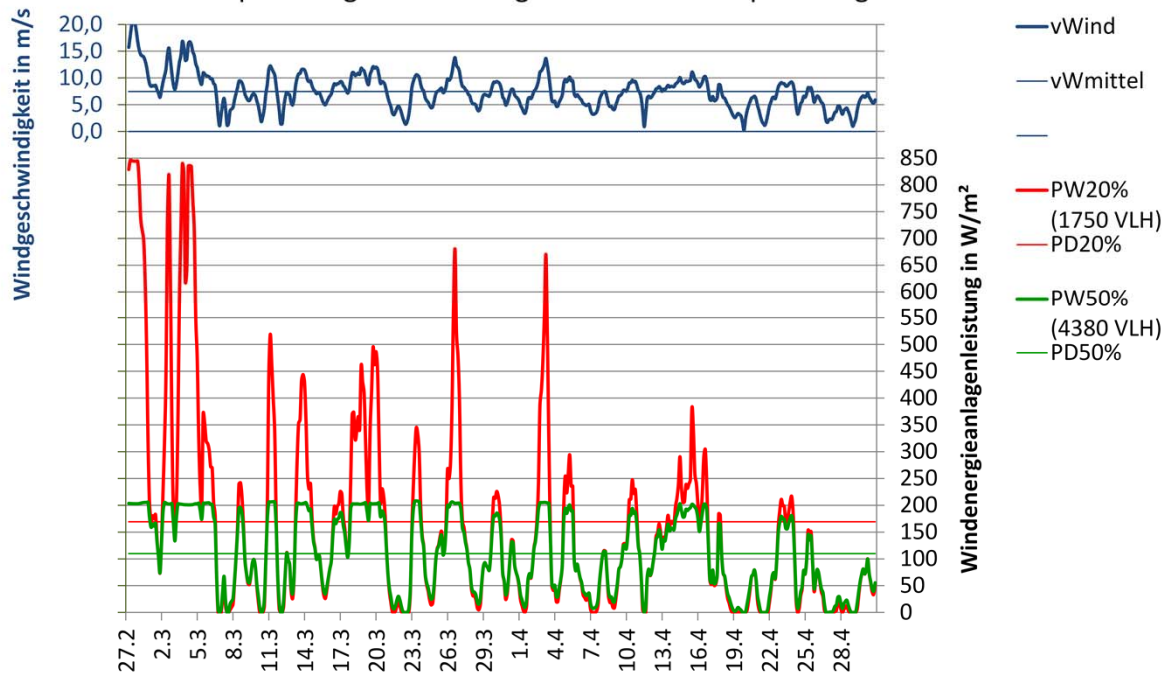
Je höher diese Abregelungswindgeschwindigkeit gewählt wird, desto seltener wird die Nennleistung der Windenergieanlage erreicht, desto weniger Volllaststunden kommen zustande und desto niedriger bleibt der Benutzungsgrad.

Umgedreht steigt der Benutzungsgrad bei einer Auslegung auf eine niedrigere Abregelungswindgeschwindigkeit.

Die aus der totalen Windleistung abgegriffenen Anlagenleistungen sind in dem Diagramm für Benutzungsgrade von 20% (PW20) bis 50% (PW50) dargestellt.

Benutzungsgrad und Durchschnittsleistung

in einer beispielhaft gewählten Region für einen beispielhaft gewählten Zeitraum



(C) Prof. Dr.-Ing Matthias Popp, Burgstraße 19, 95632 Wunsiedel, www.poppware.de

84

Den technisch interessierenden, umwandelbaren Leistungsbereich veranschaulicht dieses Diagramm in größerer Auflösung.

Zusätzlich sind darin die sich ergebenden Langzeitdurchschnittsleistungen als gestrichelte Linien eingezeichnet.

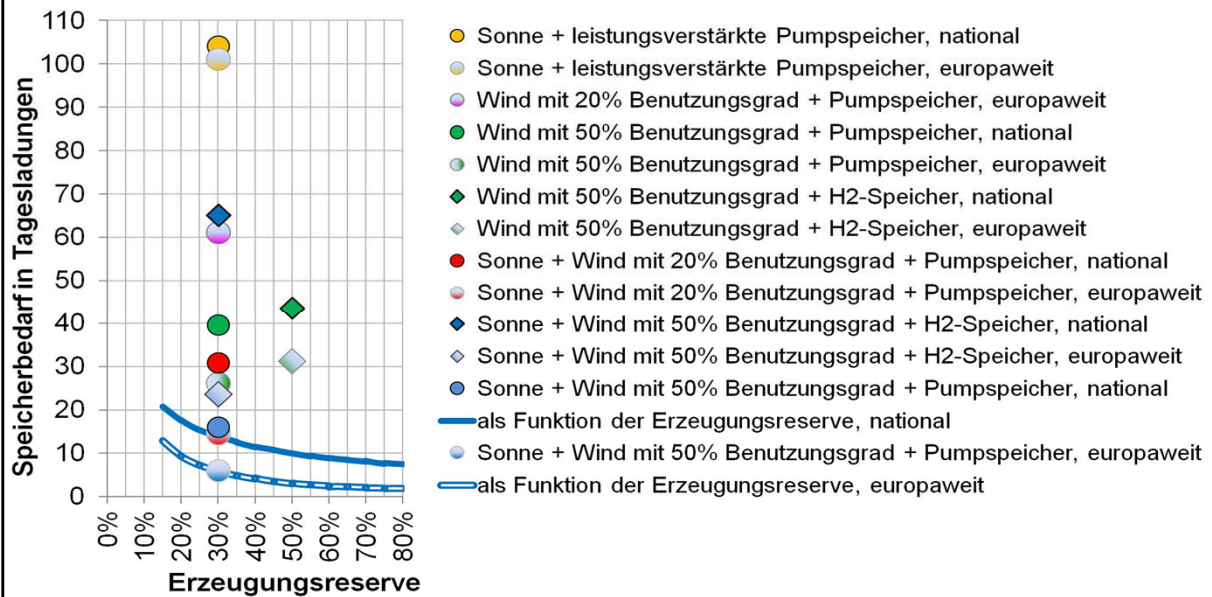
Während die Nennleistungen (= Maximalleistungen) in Abhängigkeit des Benutzungsgrades einen erheblichen Unterschied aufweisen, liegen die erreichten Durchschnittsleistungen viel näher beisammen.

Im gezeigten Beispiel läge bei einer Viertelung der installierten Nennleistung bei gleichem Rotordurchmesser die abgegebene Leistung bei 50% Benutzungsgrad immer noch bei ca. 61% der Durchschnittsleistung, die bei 20% Benutzungsgrad erreicht wird.

Mit einem hohen Benutzungsgrad verbessert sich die Gleichmäßigkeit der umgewandelten elektrischen Leistung, bei gleichzeitig reduziertem Bauaufwand.

Der Energieertrag ist proportional zur erreichten Durchschnittsleistung.

Wie groß müsste die „Batterie“ sein?



Annahmen: Pumpspeicherwirkungsgrad 80%, H2-Speicherwirkungsgrad 40%, keine Selbstentladung, länderübergreifender Fernübertragungswirkungsgrad 95%

(C) Prof. Dr.-Ing Matthias Popp, Burgstraße 19, 95632 Wunsiedel, www.poppware.de

85

Eine Auswahl von untersuchten Szenarien zeigt dieses Diagramm.

Jeder Eintrag repräsentiert eine regenerative Stromversorgung, welche die Nachfrage bedarfsgerecht decken könnte.

Der notwendige Speicherbedarf variiert von mehr als 100 Tagesladungen bei reinen Solarenergieszenarien, herunter zu wenigen Tagesladungen, bei optimierten Verhältnissen.

Je besser die Abstimmung zwischen Wind und Sonne, die grenzüberschreitende Kooperation, je höher die Erzeugungsreserve und der Speicherwirkungsgrad, desto niedriger wird die erforderliche Speicherkapazität zum Ausgleich der Volatilität – und umgekehrt.

Dabei sind nationale Lösungen mit 14 Tagen Speicherkapazität, und länderübergreifende Lösungen mit 6 Tagen und darunter, erreichbar.

Versorgungssysteme mit Gasspeichern, auf der Basis von Wasserstoff oder Methan würden ebenfalls funktionieren.

Wegen der größeren Verluste würden diese höhere Erzeugungsreserven und Speicherkapazitäten erfordern.

Zeitschrittanalyse mit optimalem Netzausbau, vor Energiewende, 14 Tage im Juni



(C) Prof. Dr.-Ing Matthias Popp, Burgstraße 19, 95632 Wunsiedel, www.poppware.de

86

Hinweis:

Hier handelt es sich um eine Animation die in der kommentierten PDF Version nicht abgespielt werden kann.

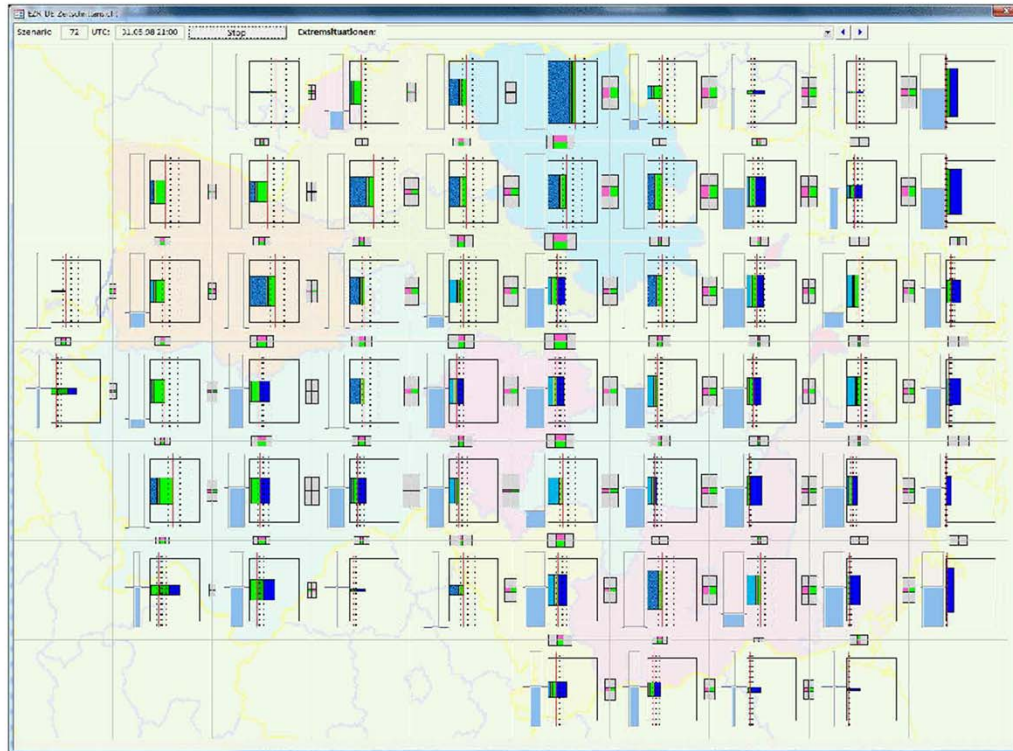
Lässt man die aufeinander folgenden Systemzustände als Animation in rascher Folge ablaufen, dann bekommt man einen Eindruck von der Dynamik der Stromversorgung mit den Wechselbeziehungen zwischen Erzeugung, Verbrauch, Übertragungsnetz und Speichersystemen.

Die Sequenz zeigt die Versorgungssituation mit dem Kraftwerkspark in Deutschland vor der Energiewende im Jahr 2010, auf Basis von realen Wetterdaten und Verbrauchsdaten, eines beispielhaft ausgewählten Jahres.

Die volatilen regenerativen Energien aus Wind und Sonne spielen darin noch keine bedeutende Rolle.

Die Sequenz kann zum Vergleich mit dem nachfolgenden Szenario verwendet werden, um den Transformationsaufwand abschätzen und einordnen zu können.

Potentialorientierte Erzeugung mit optimalem Netzausbau und Methanspeichern, 14 Tage im Juni



87

Hinweis:

Hier handelt es sich um eine Animation die in der kommentierten PDF Version nicht abgespielt werden kann.

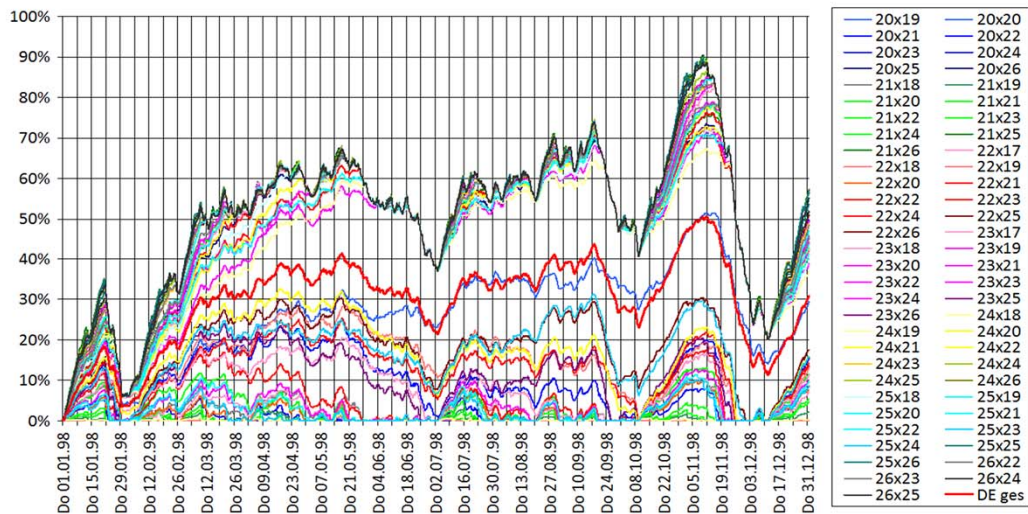
Die potentialorientierte Erzeugung von Strom entspricht der gängigen Vorstellung zur Umsetzung der Energiewende.

Potentialorientiert bedeutet, dass Wind und Sonne verstärkt dort umgewandelt werden, wo sie in der bodennahen Schicht mit der größten Leistungsdichte anfallen (Wind Offshore und im Norden, Sonne im Süden).

Diese Strategie erfordert einen erheblichen Aus- und Neubau von Stromnetzen, weil sich die Verbrauchszentren meist anderswo befinden und weil sich die Ausgleichswirkungen zwischen Sonne und Wind nur über die großen Distanzen der jeweiligen Erzeugungsschwerpunkte realisieren lassen.

Methan Speicher Ladezustand, potentialorientierte Erzeugung

Annahmen: 30% Erzeugungsreserve, 10% Grundleistung, 120% volatile Erzeugung mit Wind und Sonne, 20 Tagesladungen Speicherkapazität, Start mit leeren Speichern, reale Wetterdaten beispielhaft von 1998



Speicher Ladezustand für alle Rastergebiete Deutschlands
Potentialorientierter Ausbau von Wind und Sonne, Speichern mit 38% Wirkungsgrad,
50% Wind-Benutzungsgrad, **Fernübertragungsleistung orientiert am maximalen Exportpotential**

(C) Prof. Dr.-Ing Matthias Popp, Burgstraße 19, 95632 Wunsiedel, www.poppware.de

88

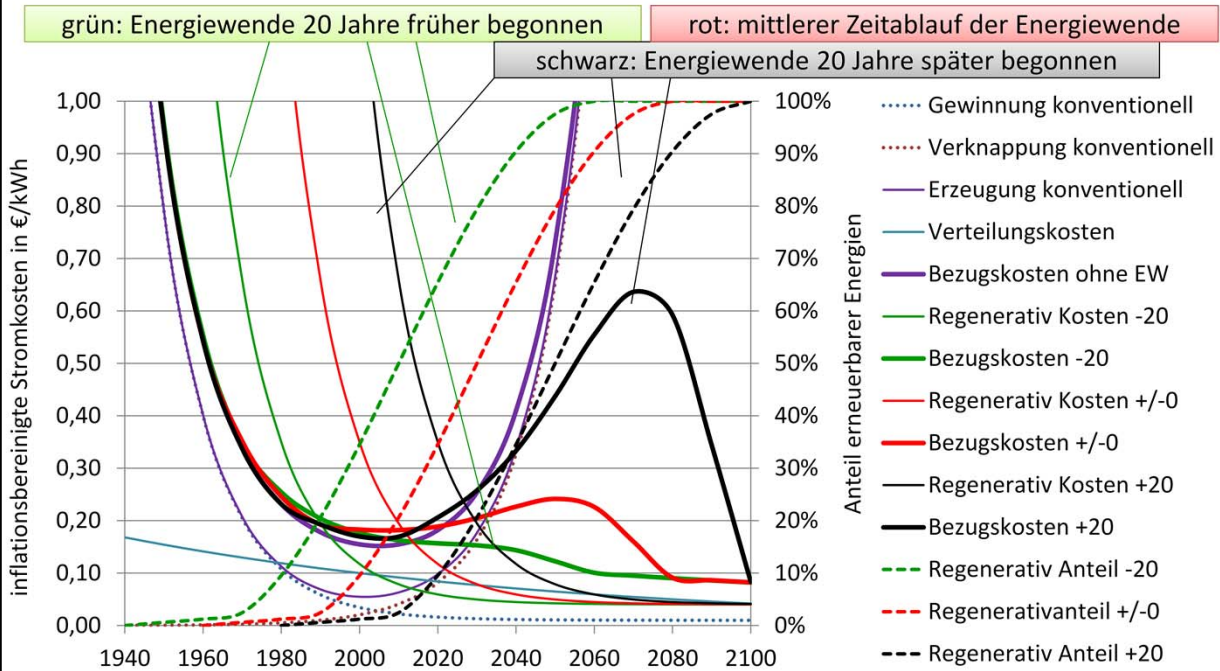
Würde man nicht, wie vorher angenommen, die Erzeugungssysteme bevorzugt dort aufstellen, wo auch die Nachfrage stattfindet, sondern möglichst dort anhäufen, wo besonders gute Erträge zu erwarten sind (Wind im Norden, Photovoltaik im Süden), dann müsste ein deutlich stärkerer Netzausbau dafür sorgen, dass überall, auch bei längeren Flauten, genügend elektrische Leistung bereitgestellt werden kann.

Gasnetze hätten bei dieser Systemauslegung gegenüber Pumpspeichern den Vorteil, dass Methanisierung und Rückverstromung an unterschiedlichen Stellen erfolgen könnte. Dies könnte die hier dargestellten Ungleichgewichte bei der Speicherbewirtschaftung relativieren.

Wichtig ist, dass die für Gesamtdeutschland gemittelte Speicherladungskurve sich in ihrem qualitativen Verlauf kaum von der Speicherladungskurve unterscheidet, die sich bei bedarfsorientierter Verteilung der Erzeugungssysteme einstellt.

Die höheren Speicherverluste dieser Systemgestaltung mit gleicher Erzeugungskapazität erkennt man an der insgesamt niedrigeren Speicherladung am Ende des beispielhaften Untersuchungszeitraums.

Prinzipielle Entwicklung der Stromkosten während der Energiewende in Abhängigkeit des Zeitplans



(C) Prof. Dr.-Ing Matthias Popp, Burgstraße 19, 95632 Wunsiedel, www.poppware.de

89

Energiewende braucht Zeit und erfordert selbst Energie, um die Strukturen für eine regenerative Versorgung aufzubauen. Für die Gesamtkosten der Transformation ist es deshalb entscheidend, auf welchem Kostenniveau für konventionelle Energie die Umstellung stattfindet.

Die Gewinnungskosten für konventionelle Energieträger würden unter gleichen Gewinnungsbedingungen durch Technologiefortschritte ständig abnehmen. Die Verknappung der fossilen Rohstoffe macht die Gewinnung jedoch zunehmend aufwändig. Die Erzeugung von Energie aus konventionellen Primärenergieträgern durchläuft deshalb eine Phase minimaler Preise, bis die Verknappung einen Preisanstieg bewirkt, der durch Gewinnungstechnologiefortschritt nicht mehr ausgeglichen werden kann.

Die Stromverteilungskosten nehmen durch Technologiefortschritt stetig ab.

Die Lernkurve zur Nutzung regenerativer Energien (inklusive der Speicherung!) kommt, wie bei den konventionellen von einem hohen Niveau. Da bei den Regenerativen keine Verknappung eintritt, bewirkt der Technologiefortschritt jedoch eine stetige Kostenreduzierung.

Je nach Beginn und zeitlichem Ablauf der Transformation, findet diese auf einem unterschiedlichen Kostenniveau für konventionelle Energie statt. Obwohl die Transformationskosten immer in gleicher Höhe angesetzt wurden, ist davon auszugehen, dass eine zu spät begonnene Transformation erheblich höhere Energiekosten verursachen würde. Am kostengünstigsten ist die Transformation auf niedrigem bzw. noch fallendem Kostenniveau für konventionelle Energieträger zu erreichen. In der Anfangsphase entstehen dabei jedoch Kostennachteile gegenüber Energiesystemen, die keine Vorsorge für die Zeit danach treffen. Das Zeitfenster minimaler Gesamttransformationskosten könnte aber bereits abgelaufen sein. Verzögerungen der Energiewende können daher tendenziell zu einer Erhöhung der Energiekosten während der Umstellungsphase führen. Über die richtige Vorgehensweise wird man aber erst im Nachhinein urteilen können, da die tatsächliche Kostenentwicklung sowohl der konventionellen als auch der regenerativen Energiekosten nicht sicher vorhergesagt werden kann.

Diese hier nur prinzipiell aufgezeigten Zusammenhänge sollten berücksichtigt werden, wenn über die zeitliche Umsetzung der Energiewende diskutiert wird. Die Kosten zur Technologieentwicklung werden immer anfallen. Anfängliche Kostennachteile werden jedoch ab dem Zeitpunkt kompensiert, ab dem Kostengleichheit für konventionell und regenerativ gewonnene Energie eintritt.

Wartet man mit dem Beginn der Transformation auf Marktsignale dahingehend, dass die Kosten der neuen Technologie kleiner gleich der alten Technologie sind, dann ist eine deutliche Hochpreisphase zu erwarten, weil von einem konventionellen auf ein regeneratives Energiesystem nicht wie beim Umlegen eines Schalters umgestellt werden kann. Eine zu spät eingeleitete Energiewende kann durchaus die Leistungsfähigkeit einer Volkswirtschaft überfordern.

Weitere Informationen unter

- www.ringwallspeicher.de
- www.poppware.de

MATTHIAS POPP

Ingenieurbüro


Erneuerbare Energien, Energiespeicherung
Simulationen, Software-Entwicklung

Prof. Dr.-Ing. Matthias Popp
Schönbrunn-Burgstraße 19
D-95632 Wunsiedel
Telefon: 09232 / 9933-10
Telefax: 09232 / 9933-40
matthias@POPPware.de
www.poppware.de

Auswahlmenü

[Startseite](#)

[Ingenieurbüro Popp](#)

[Regenerative Stromversorgung](#)

[Ringwallspeicher](#)

[Hybridkraftwerke](#)

[Transformation der Energieversorgung](#)

[Wunsiedler See Projekt](#)

[Dezentrale Endlager](#)

[Dissertation](#)

[Forschung und Entwicklung](#)

[Leistungsangebot](#)

[Matthias Popp](#)

[Veranstaltungen und Vorträge](#)

[Downloadbereich](#)

[Impressum](#)