

# **Speicherbedarf der zukünftigen Stromversorgung in Abhängigkeit von Erzeugungsstruktur, Netzausbau und Speicheralternativen von Methan bis Ringwall**

Vortrag mit Diskussion am 18. Juni 2012 17:00 Uhr  
zum  
**Energiewirtschaftlichen Seminar im Sommersemester 2012**  
am  
**Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik (IfE)**  
Komm. Leiter: Univ.-Prof. Dr.rer.nat. Thomas Hamacher  
Ordinarius: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Ulrich Wagner  
der  
**TECHNISCHEN UNIVERSITÄT MÜNCHEN,**  
Theresienstraße 90  
80333 München  
Nordgelände; Gebäude N8

**MATTHIAS POPP**  
Ingenieurbüro

  
Erneuerbare Energien, Energiespeicherung  
Simulationen, Software-Entwicklung

Dr.-Ing. Matthias Popp  
Schönbrunn-Burgstraße 19  
D-95632 Wunsiedel  
Telefon: 09232 / 9933-10  
Telefax: 09232 / 9933-40  
[matthias@POPPware.de](mailto:matthias@POPPware.de)  
[www.poppware.de](http://www.poppware.de)

1

Sehr geehrte Damen und Herren,

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.



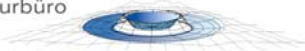
Dabei intensive Auseinandersetzung mit Fragen der Energieversorgung.

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

• **MATTHIAS POPP**  
Ingenieurbüro



Erneuerbare Energien, Energiespeicherung  
Simulationen, Software-Entwicklung

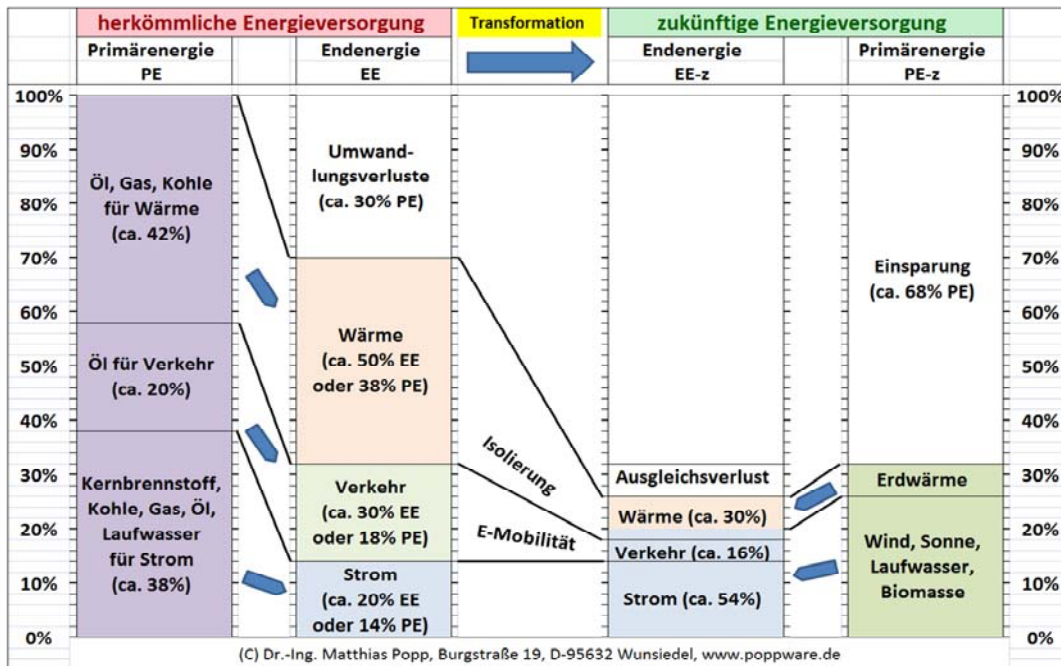


Im Jahr 2010 konnte ich mit dem Thema „Speicherbedarf bei einer Stromversorgung mit erneuerbaren Energien“ promovieren.

Die Arbeit schaffte es ins Finale um den RWE Zukunftspreis 2011.

Sie wird vom Springer Verlag als Buch herausgegeben.

# Transformation des Energiesystems



3

Die zukünftige Energieversorgung soll ohne fossile und nukleare Rohstoffe zurechtkommen.

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

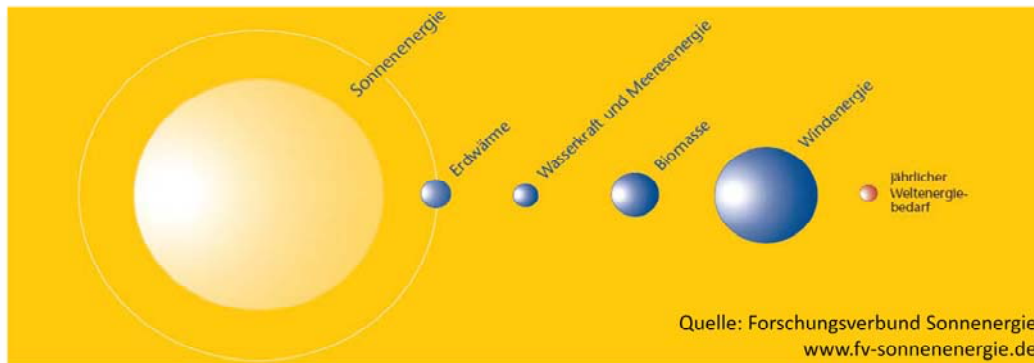
Der dabei voraussichtlich zunehmende Strombedarf wird aus natürlichen Energiekreisläufen zu decken sein.

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.

## Ist eine zu 100% erneuerbare Stromversorgung überhaupt möglich?



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

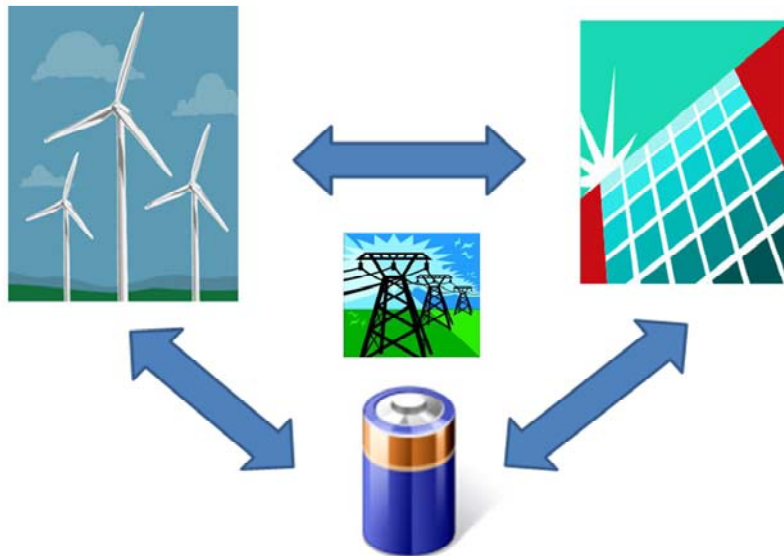
Der Weltenergiebedarf wird von der einstrahlenden Sonne und den dadurch angefachten Winden um viele Größenordnungen übertroffen.

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.

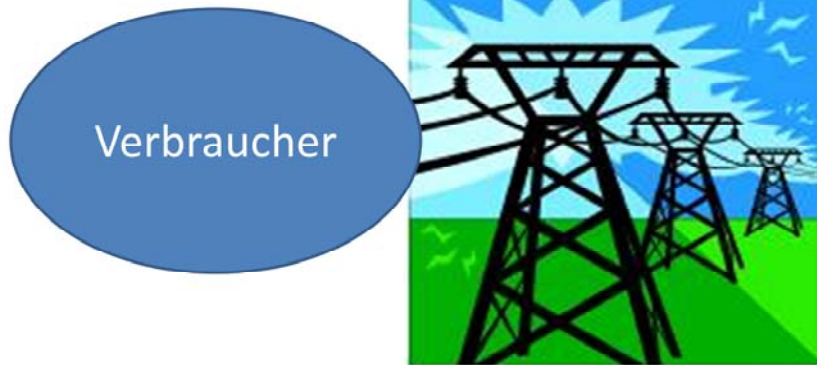
## Wind, Sonne und Speicher



Diese Energien stehen aber volatil, also wetterlaunig zur Verfügung.

Durch Speichereinsatz können sie der Nachfrage angepasst werden.

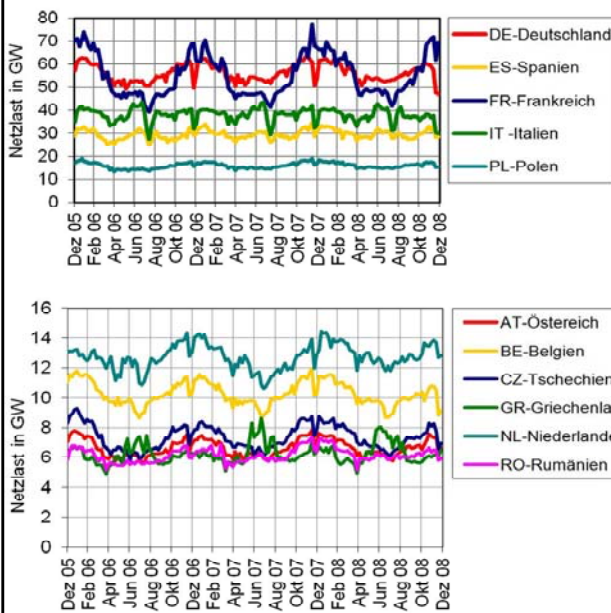
## Die Stromnachfrage



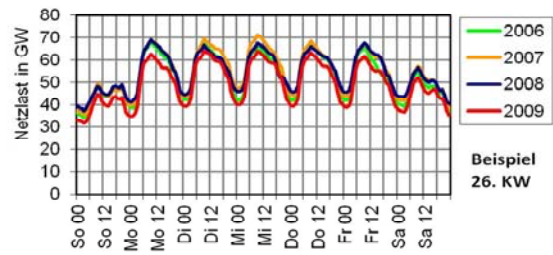
Betrachten wir die Stromnachfrage.

# Der Stromverbrauch in Europa

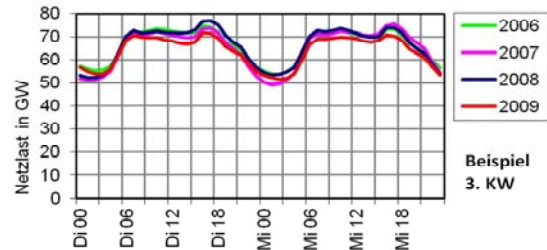
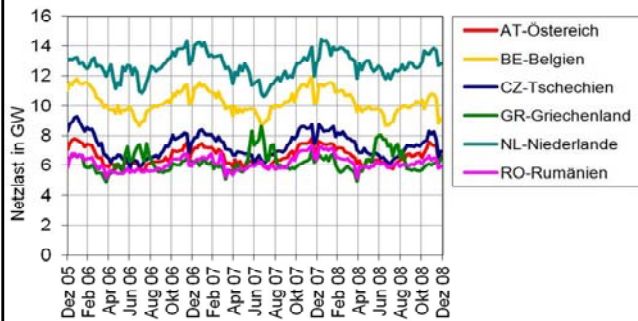
wöchentliche Netzlasten europäischer Länder



tageszeitliche Netzlasten in Deutschland



Beispiel 26. KW



Beispiel 3. KW

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

7

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

Er zeigt in Abhängigkeit von der Jahreszeit einen typischen wöchentlichen Verlauf.

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

# Windenergie

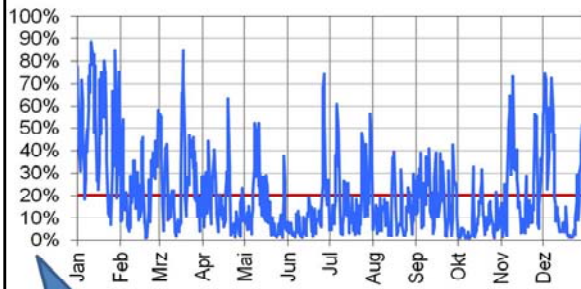


Was kann Windenergie dazu beitragen?



## Charakteristik der Windenergie

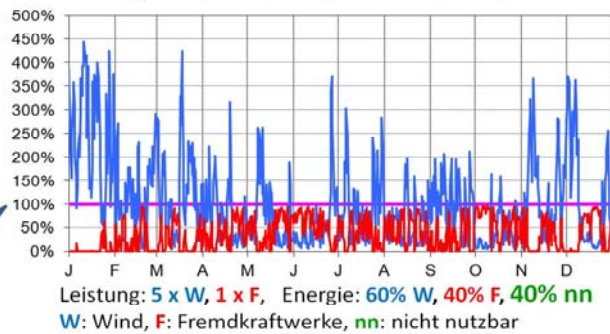
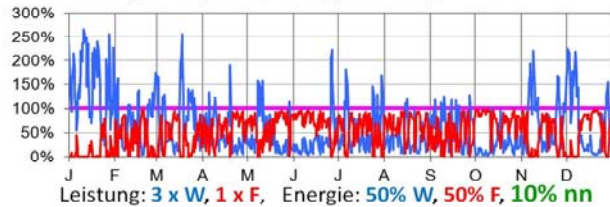
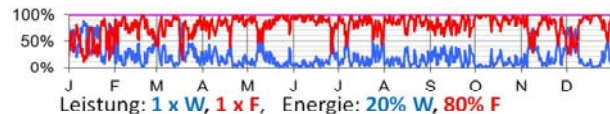
**Tatsächliche  
Windstromeinspeisung in  
Deutschland  
beispielhaft für 2005 (blau)  
Benutzungsgrad ca. 20%**



100% = installierte  
Nennleistung

100% =  
durchschnittliche  
Nachfrage

### Ausbauszenarien ohne Speicher



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

9

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 auf null abfällt.

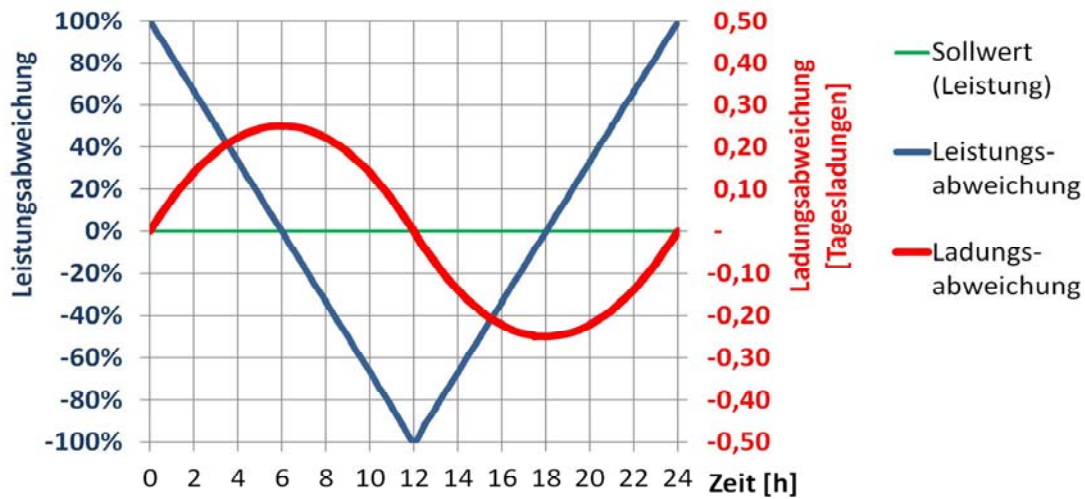
Immer dann, wenn der Windstrom nicht ausreicht, um die ihm zugedachte Versorgungsaufgabe zu erfüllen, müssen andere Kraftwerke einspringen, um das Defizit auszugleichen.

Im Durchschnitt liefern die Windenergieanlagen in Deutschland etwa 20% der Leistung auf die sie ausgelegt sind.

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

## Ladungsabweichung

als charakteristisches Merkmal volatiler Stromquellen



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

10

Sie 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

Mit diesem Konzept wurde die Windenergie in Europa untersucht.

Zur Verfügung stand ein digitaler Windatlas.

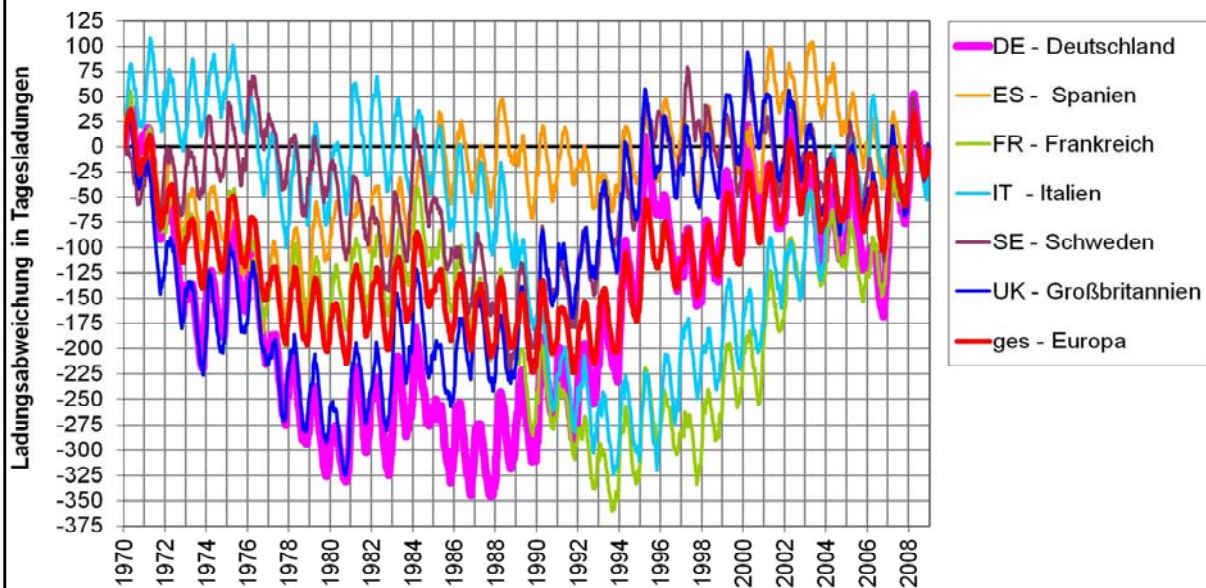
In dreistündigen Zeitschritten wurden Windleistungen für alle Länder Europas berechnet, die sich an den Kennlinien realer Windenergieanlagen orientieren.

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

12

Für den Untersuchungszeitraum ergeben sich für einige große Stromverbrauchsländer und für Europa insgesamt die dargestellten Ladungsabweichungen.

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, wie gleichzeitig 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.

## Erhöhung des Benutzungsgrads (Volllaststundenzahl)

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

Die Windleistung

- erhöht sich mit dem Quadrat der Rotordurchmesser  
**doppelter Durchmessers => 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.**

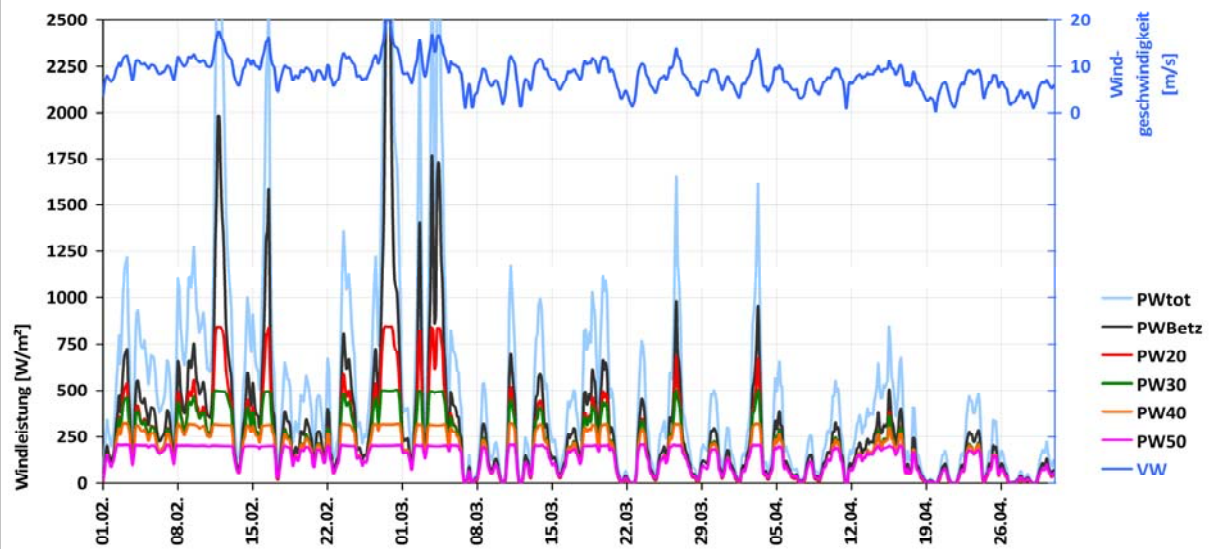


Werden diese auf größere Volllaststundenzahlen oder gleichbedeutend auf einen höheren Benutzungsgrad ausgelegt, dann kann die Ladungsabweichung der damit umgewandelten Windenergie deutlich reduziert werden.

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

14

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.

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 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.

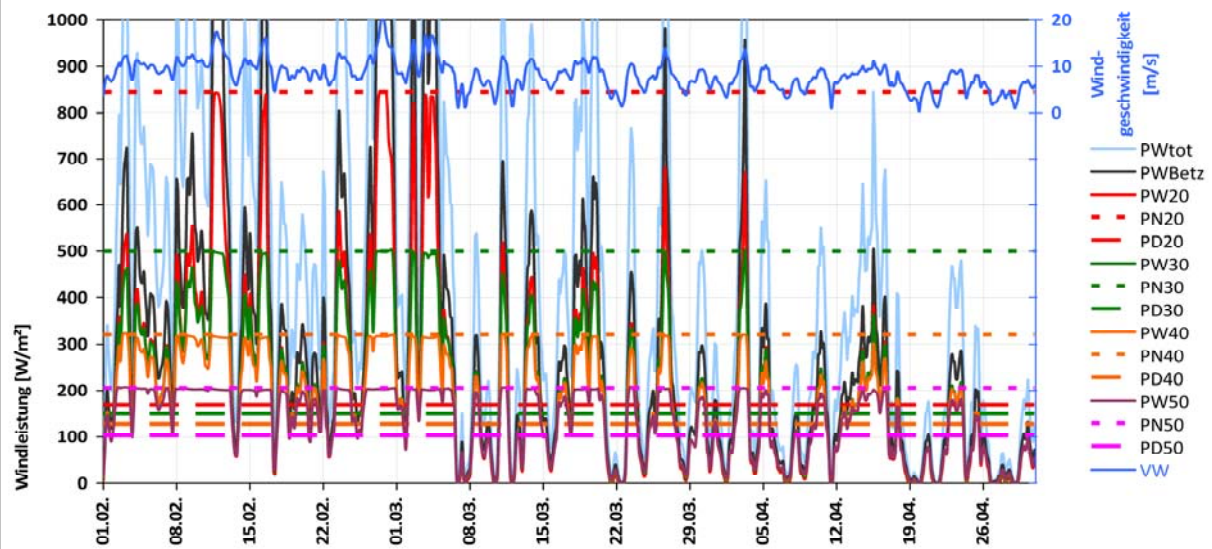
Je nach technischer Auslegung der Windenergieanlage kann diese Abregelung bei niedrigeren oder höheren Windgeschwindigkeiten einsetzen.

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% ( $PW_{20}$ ) bis 50% ( $PW_{50}$ ) dargestellt.

## Benutzungsgrad, Nenn- und Durchschnittsleistung in einer beispielhaft gewählten Region für einen beispielhaft gewählten Zeitraum



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

15

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

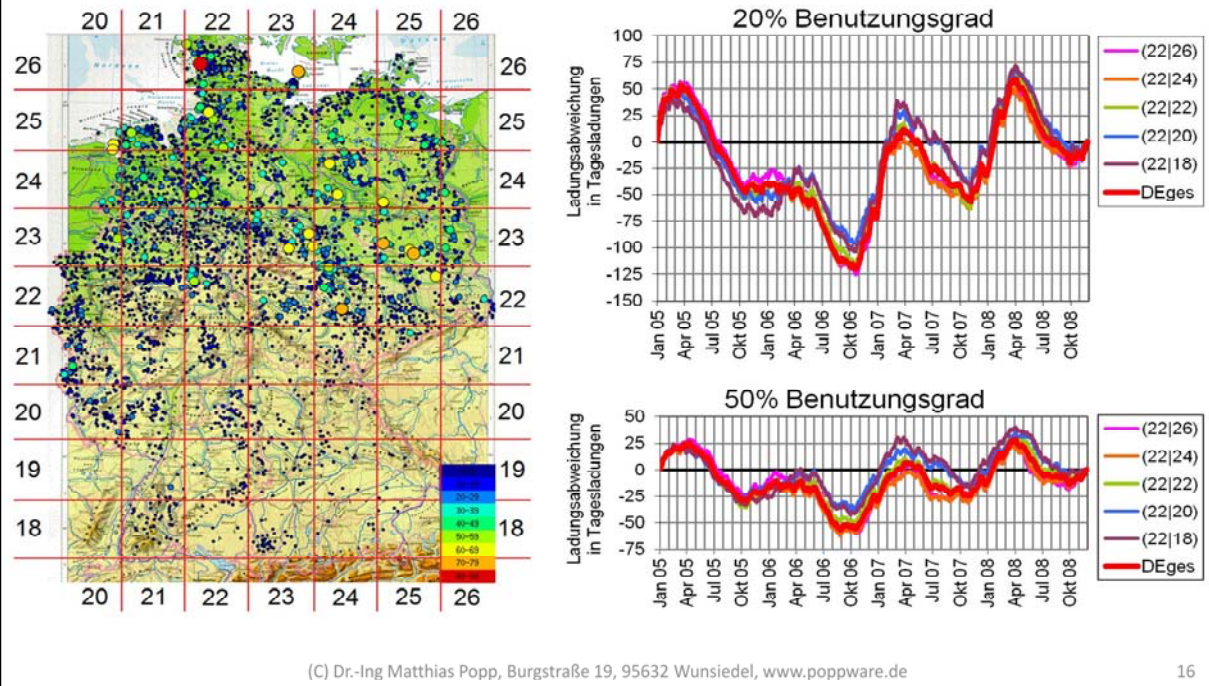
Zusätzlich sind darin die Nennleistungen als gepunktete Linien und die sich ergebenden Langzeitdurchschnittsleistungen als gestrichelte Linien eingezeichnet.

Während die Nennleistungen in Abhängigkeit des Benutzungsgrades erhebliche Unterschiede aufweisen, liegen die erreichten Durchschnittsleistungen viel näher beieinander.

Im gezeigten Beispiel läge bei ca. 25% der installierten Nennleistung bei gleichem Rotordurchmesser die abgegebene Leistung bei 50% Benutzungsgrad immer noch bei 60% der Durchschnittsleistung, die bei 20% Benutzungsgrad erreicht wird.

Bei einem hohen Benutzungsgrad nimmt die Gleichmäßigkeit der umgewandelten Leistung, bei reduziertem Bauaufwand für die Windenergieanlagen, erheblich zu.

## Benutzungsgrad und Ladungsabweichung



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.

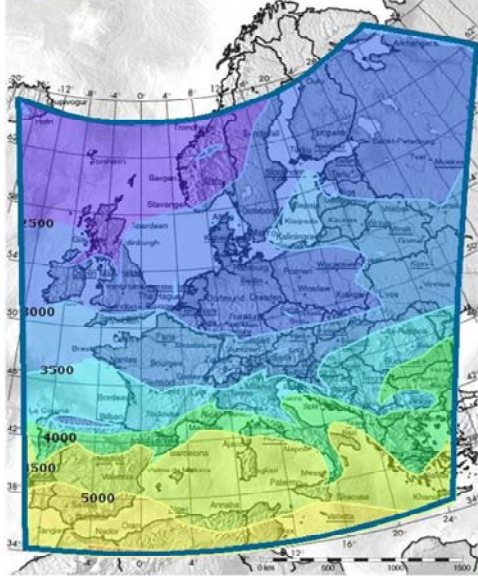


# Solarenergie



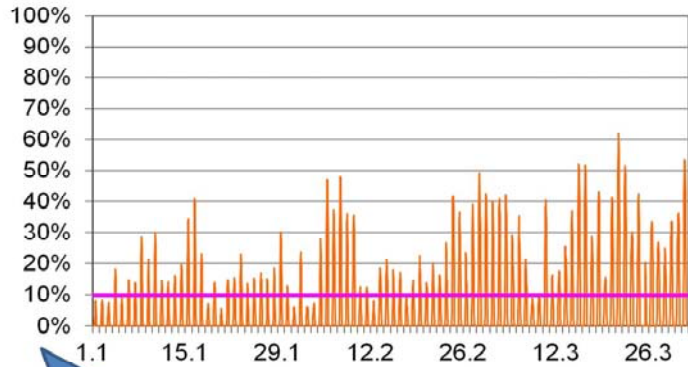
Kommen wir zur Solarenergie.

Satellite Light Zone: Europe From: Sunrise To: Sunset Clock Time, 1996 to 2000  
Jan Feb Mar Apr May Jun Jul Aug Sep Oct Nov Dec All Year  
Information: Mean Daily Global Horizontal Irradiation  
1500 2000 2500 3000 3500 4000 4500 5000 5500 6000 Date: 12/05/09  
wfi/m2/www.satellite-light.com



## Solarenergie Dargebot

tatsächliche Solarstromerzeugung  
in Deutschland im 1. Quartal 2005 (orange)  
Benutzungsgrad, bezogen auf das Gesamtjahr ca. 10%



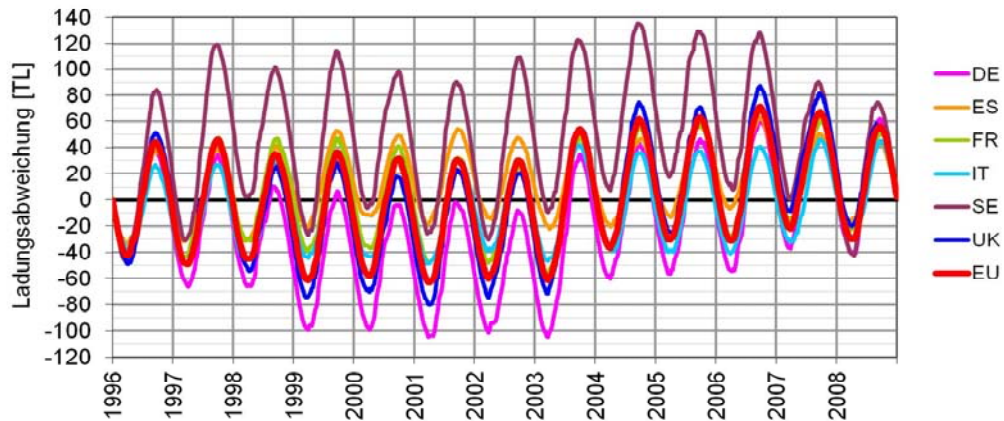
100% = installierte  
Nennleistung (= Peakleistung)

Dafür 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.

Auch dafür wurden die Ladungsabweichungen ermittelt.

## Ladungsabweichung einer Solarstromversorgung



(C) Dr.-Ing Matthias Popp, Burgstraße 19, 95632 Wunsiedel, [www.poppware.de](http://www.poppware.de)

19

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.

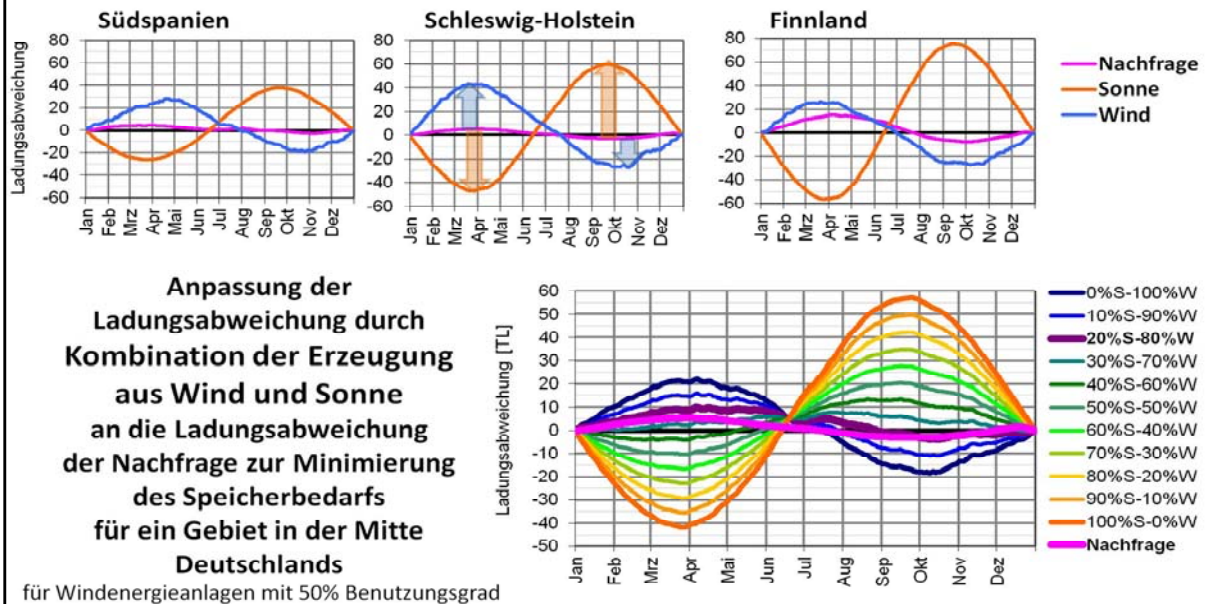
## Kombination von Wind und Sonne



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

## jahresdurchschnittliche Ladungsabweichungen

der Nachfrage sowie des Solar- und Windenergiedargebots in Beispielregionen



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

21

Zur Veranschaulichung dieser Verhältnisse wurden die Ladungsabweichungen von Wind, Sonne und der Nachfrage 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.

Die orangenen Pfeile ergeben 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 nach erzeugungsschwächeren Perioden die Speicher immer wieder aufladen zu können.

## Speicherleerungskurven bei 30% Erzeugungsreserve

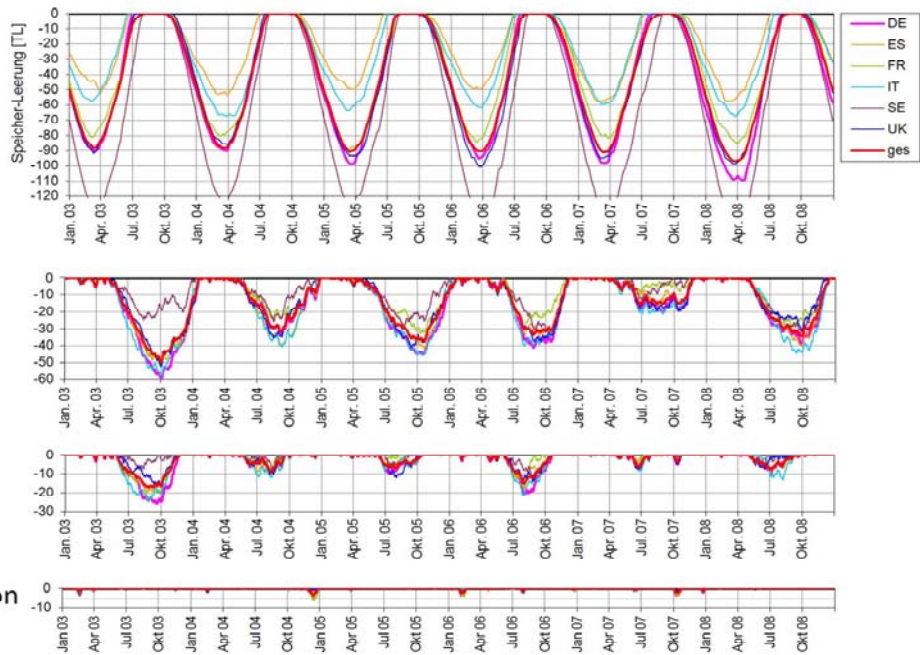
Solarenergie  
mit leistungsverstärkten  
Speichern

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

24

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

Bei einer reinen Fotovoltaik 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.

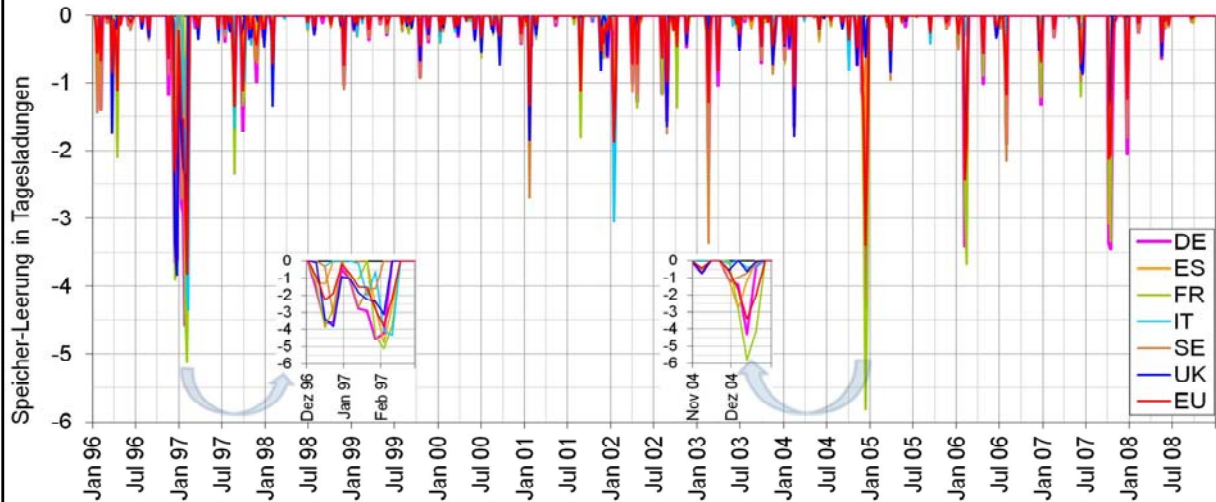
Windenergie mit höherem Benutzungsgrad könnte die Speicherleerung und damit die für eine sichere Stromversorgung erforderliche Speicherkapazität auf ca. 26 Tagesladungen reduzieren.

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

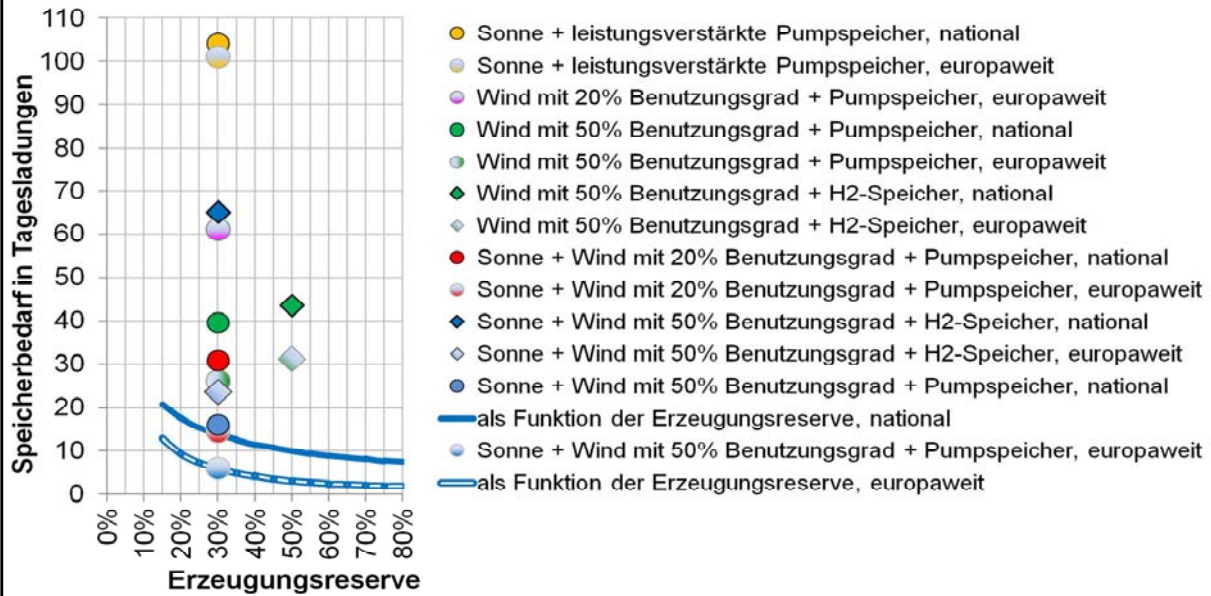
25

Diese Verhältnisse werden in diesem Diagramm 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.

## Wie groß müsste die „Batterie“ sein?



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

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

26

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.

=====  
ausführlich:

Eine Reihe von Untersuchungsergebnissen ist in diesem Diagramm zusammengefasst.

Alleinige Sonnenenergie würde den größten Speicherbedarf erfordern. Eine leistungsstarke länderübergreifende Vernetzung könnte ihn kaum reduzieren.

Windenergie mit 20% Benutzungsgrad würde mit normalen Pumpspeichersystemen nur unter Ausnutzung der Ausgleichseffekte einer leistungsstarken länderübergreifenden Zusammenarbeit funktionieren und ca. 60 Tage Kapazität erfordern.

Windenergie mit 50% Benutzungsgrad benötigt mit 26 Tagesladungen deutlich weniger Speicherkapazität und ermöglicht mit ca. 40 Tagesladungen auch im nationalen Alleingang eine sichere bedarfsgerechte Versorgung.

Eine speicherbedarfsminimierende Kombination aus Sonne und Wind mit niedrigem Benutzungsgrad von 20% würde national ca. 30 Tage, bei europaweitem Zusammenwirken ca. 14 Tage Speicherkapazität erfordern.

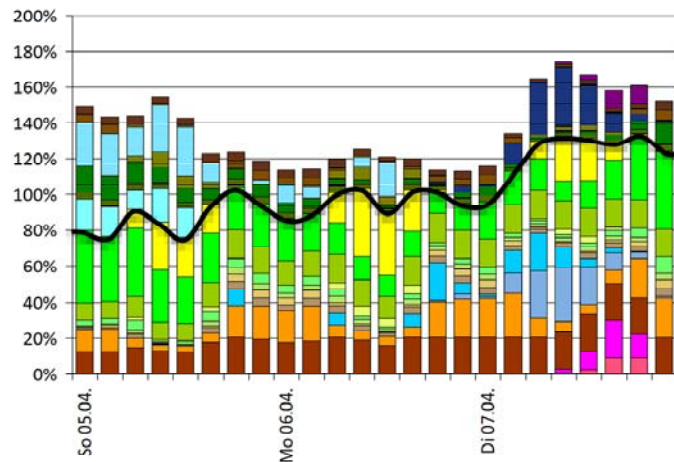
Eine speicherbedarfsminimierende Kombination aus Sonne und Wind mit hohem Benutzungsgrad von 50% würde national mit ca. 14 und europaweit mit ca. 6 Tagesladungen Speicherkapazität auskommen.

Speicher mit niedrigem 40% Wirkungsgrad würden bei Windenergie mit 50% Benutzungsgrad und 50% Erzeugungsreserve national Speicher für ca. 43, europaweit für ca. 31 Tage erfordern.

Bei einer optimierten Erzeugung kann bei diesem niedrigen Wirkungsgrad mit einer Speicherkapazität von ca. 65 Tagesladungen eine bedarfsgerechte Versorgung bei 30% Erzeugungsreserve noch funktionieren.

## Volatilitätsanalyse

Wissensbasis für eine strategisch vorteilhafte Transformation des Energiesystems



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

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



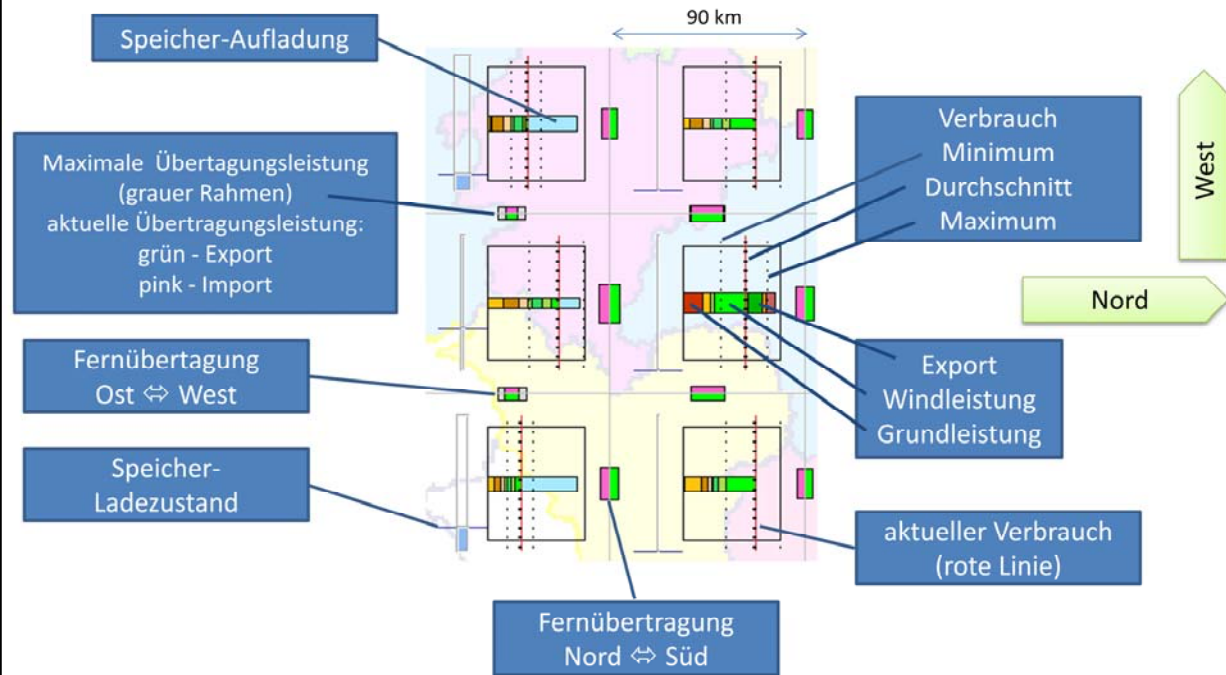
(C) Dr.-Ing Matthias Popp, Burgstraße 19, 95632 Wunsiedel, www.poppware.de

28

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.

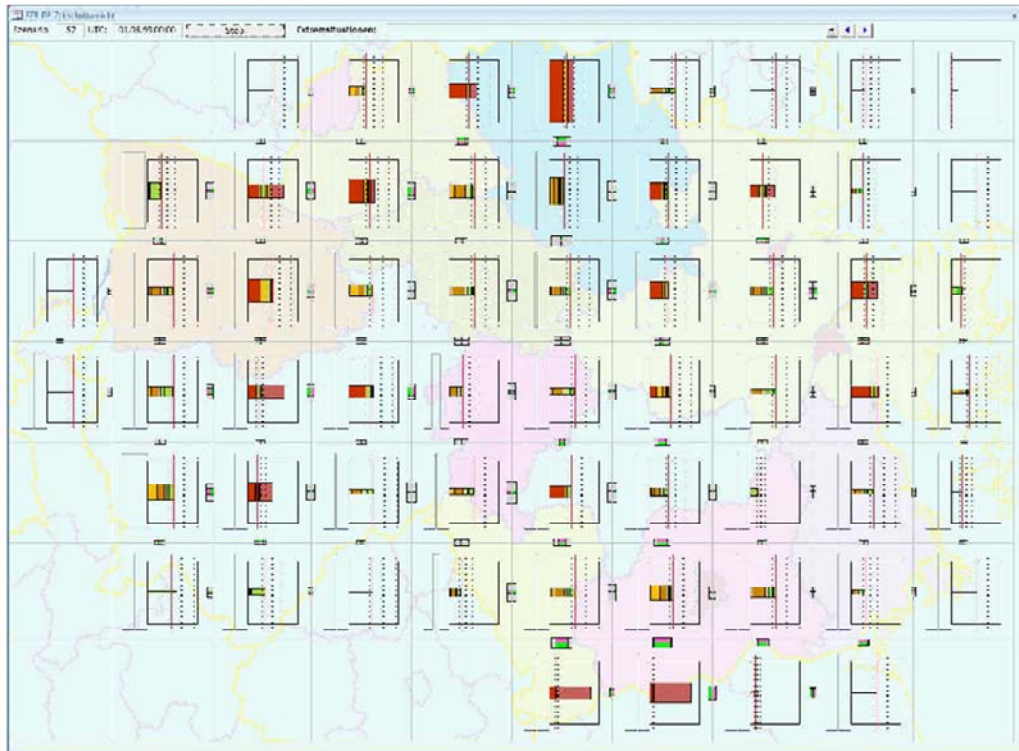
Zeitschrittanalysen lassen sich für unterschiedlich große Untersuchungsräume, wie ein einzelnes Land, einen Kontinent oder auch kleinere Regionen erstellen.

## Zeitschrittanalyse



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.

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



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

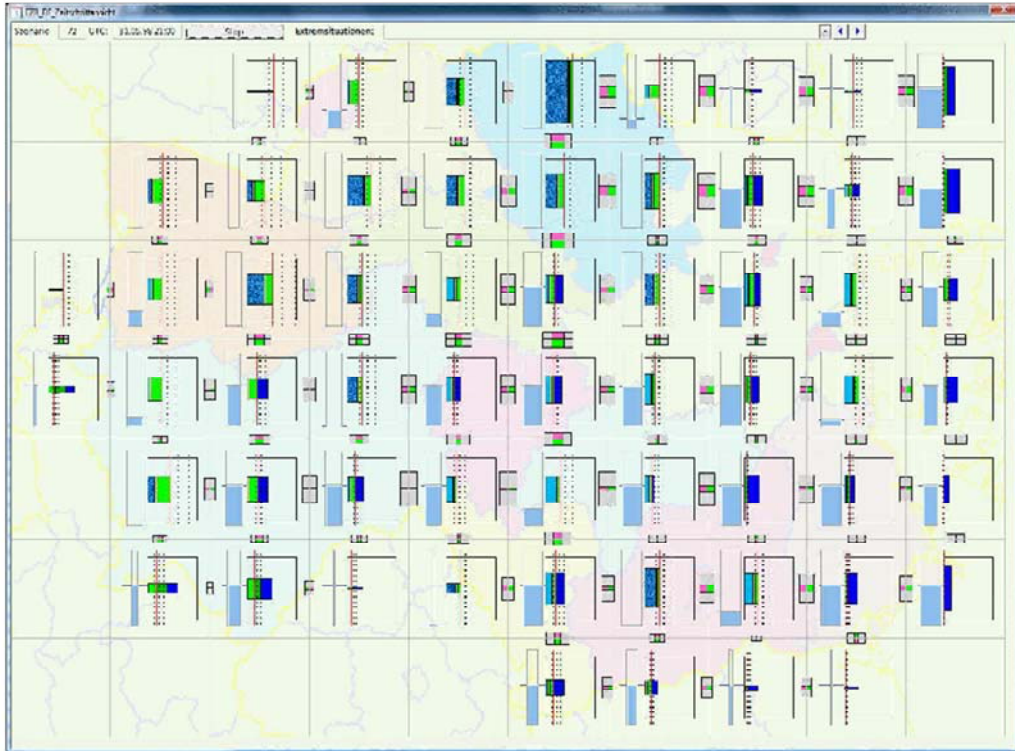
30

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

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

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

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



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

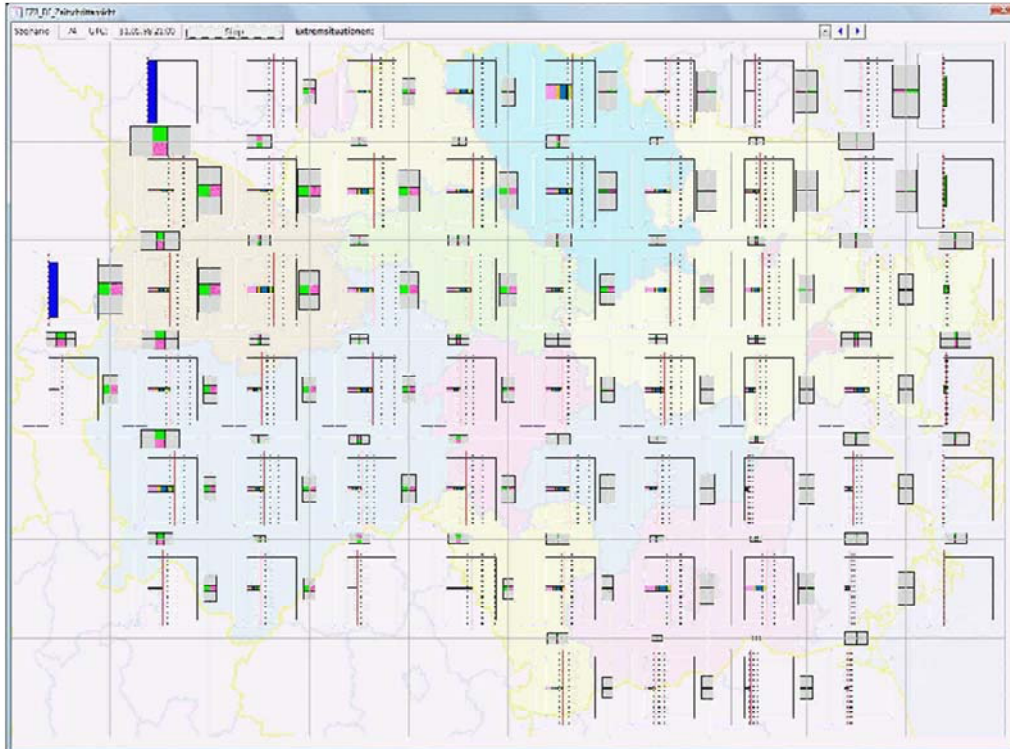
31

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 mit der größten Leistungsdichte anfallen.

Diese Strategie erfordert einen erheblichen Aus- und Neubau von Stromnetzen, weil sich die Verbrauchszentren meist anderswo befinden.

Angelehnt an BMU Leitszenario 2050 mit optimalem Netz, Desertec und Norwegenspeicher, 14 Junitage



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

32

Diese Sequenz betrachtet ein Szenario, das sich an den Annahmen in den Leitstudien des Bundesumweltministeriums für das Jahr 2050 orientiert. Dabei spielt Strom aus dem Desertec Projekt eine große Rolle.

Weiterhin wird bei diesem Szenario angenommen, dass in erheblichem Umfang auf die Speicherkapazitäten Norwegens zugegriffen wird.



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



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

33

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

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

**Bedarfsorientierter Ausbau mit optimalem Netz und Pumpspeichern, 14 Tage im Juni**



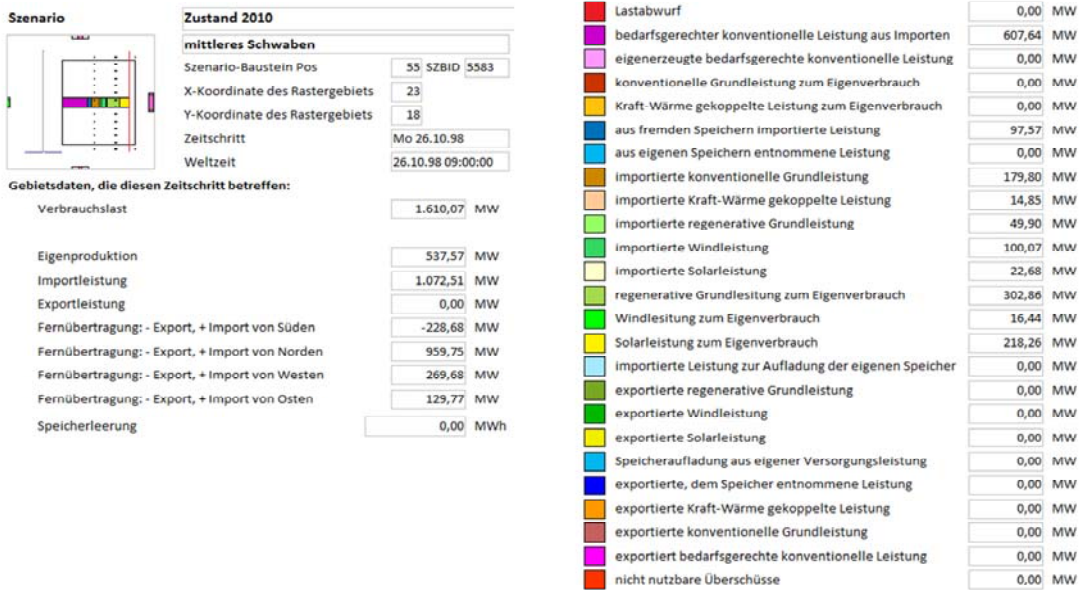
(C) Dr.-Ing Matthias Popp, Burgstraße 19, 95632 Wunsiedel, www.poppware.de

34

Diese Sequenz gehört zu einem Szenario mit bedarfsorientierter Erzeugung und Speicherung, bei dem Pumpspeicherkraftwerke mit hohem Wirkungsgrad angenommen werden. Weil diese deutlich geringere Verluste als Gasspeichersysteme aufweisen, werden die Speicher dabei deutlich schneller aufgeladen.

# Zeitschrittanalyse im Detail

## Beispiel einer regionalen Versorgungssituation während eines einzelnen Zeitschritts



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

## Extremwert-Analyse

systemrelevanten Zustände, für die eine sichere Stromversorgung gewappnet sein muss

Extremwert-Ereignis	Relativwert	Absolutwert	Zeitschritt	Anzahl	
bedarfsgerechte konventionelle Eigenproduktion maximal	0,00%	0,00 MW	Do 01.01.98 00:00	2920	
bedarfsgerechte konventionelle Eigenproduktion minimal	0,00%	0,00 MW	Do 01.01.98 00:00	2920	
bedarfsgerechte konventionelle Exportproduktion maximal	0,00%	0,00 MW	Do 01.01.98 00:00	2920	
bedarfsgerechte konventionelle Exportproduktion minimal	0,00%	0,00 MW	Do 01.01.98 00:00	2920	
bedarfsgerechte konventionelle Produktion maximal	0,00%	0,00 MW	Do 01.01.98 00:00	2920	
bedarfsgerechte konventionelle Produktion minimal	0,00%	0,00 MW	Do 01.01.98 00:00	2920	
Exportleistung maximal	0,63%	8,20 MW	Sa 21.06.98 12:00	1	
Exportleistung minimal	0,00%	0,00 MW	Do 01.01.98 00:00	2919	
Fernübertragung in Nord-Süd Richtung betragsmäßig maximal	23,51%	303,89 MW	Sa 14.03.98 06:00	1	
Fernübertragung in Nord-Süd Richtung betragsmäßig minimal	gewollter Import zum Direktverbrauch maximal	77,06%	996,08 MW	Mi 07.01.98 21:00	1
Fernübertragung in West-Ost Richtung betragsmäßig maximal	gewollter Import zum Direktverbrauch minimal	0,00%	0,00 MW	So 21.06.98 12:00	1
Fernübertragung in West-Ost Richtung betragsmäßig minimal	KWK Produktion maximal	0,00%	0,00 MW	Do 01.01.98 00:00	2920
Fernübertragung von Nord nach Süd maximal	KWK Produktion minimal	0,00%	0,00 MW	Do 01.01.98 00:00	2920
Fernübertragung von Ost nach West maximal	Lastabwurf maximal	4,31%	55,66 MW	Mo 30.11.98 15:00	1
Fernübertragung von Süd nach Nord maximal	Leistungsumsatz maximal	136,73%	1.767,46 MW	Mi 04.11.98 15:00	1
Fernübertragung von West nach Ost maximal	Leistungsumsatz minimal	60,16%	777,59 MW	Mo 25.05.98 00:00	1
Fernübertragungsleistung maximal	nicht nutzbare Überproduktion maximal	0,00%	0,00 MW	So 21.06.98 12:00	1
Fernübertragungsleistung minimal	Sonne maximal	55,00%	711,30 MW	So 21.06.98 12:00	1
gewollte Gesamterzeugung - Gesamtverbrauch maximal	Speicheraufladung gesamt maximal	0,00%	0,00 MWh	Do 01.01.98 00:00	2920
gewollte Gesamterzeugung - Gesamtverbrauch minimal	Speicheraufladung mit Eigenproduktion maximal	0,00%	0,00 MWh	Do 01.01.98 00:00	2920
gewollte Gesamterzeugung maximal	Speicheraufladung mit Import maximal	0,00%	0,00 MWh	Do 01.01.98 00:00	2920
gewollte Gesamterzeugung minimal	Speicherentnahme für Eigenbedarf maximal	0,00%	0,00 MWh	Do 01.01.98 00:00	2920
gewollter Export maximal	Speicherentnahme gesamt maximal	0,00%	0,00 MWh	Do 01.01.98 00:00	2920
gewollter Export minimal	Speicherelexport maximal	0,00%	0,00 MWh	Do 01.01.98 00:00	2920
	Speicherladezustand bezogen auf Speicherkapazität maximal	0,00%	0,00 MWh	Do 01.01.98 00:00	2920
	Speicherladezustand bezogen auf Speicherkapazität minimal	0,00%	0,00 MWh	Do 01.01.98 00:00	2920
	Verbrauch maximal	136,73%	1.767,46 MW	Mi 04.11.98 15:00	1
	Verbrauch minimal	60,16%	777,59 MW	Mo 25.05.98 00:00	1
	Wind + Sonne maximal	55,03%	711,30 MW	So 21.06.98 12:00	1
	Wind + Sonne minimal	0,00%	0,00 MW	Fr 23.01.98 21:00	133
	Wind maximal	3,92%	50,66 MW	Fr 06.11.98 06:00	1
	Wind minimal	0,00%	0,00 MW	Fr 23.01.98 21:00	427

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

36

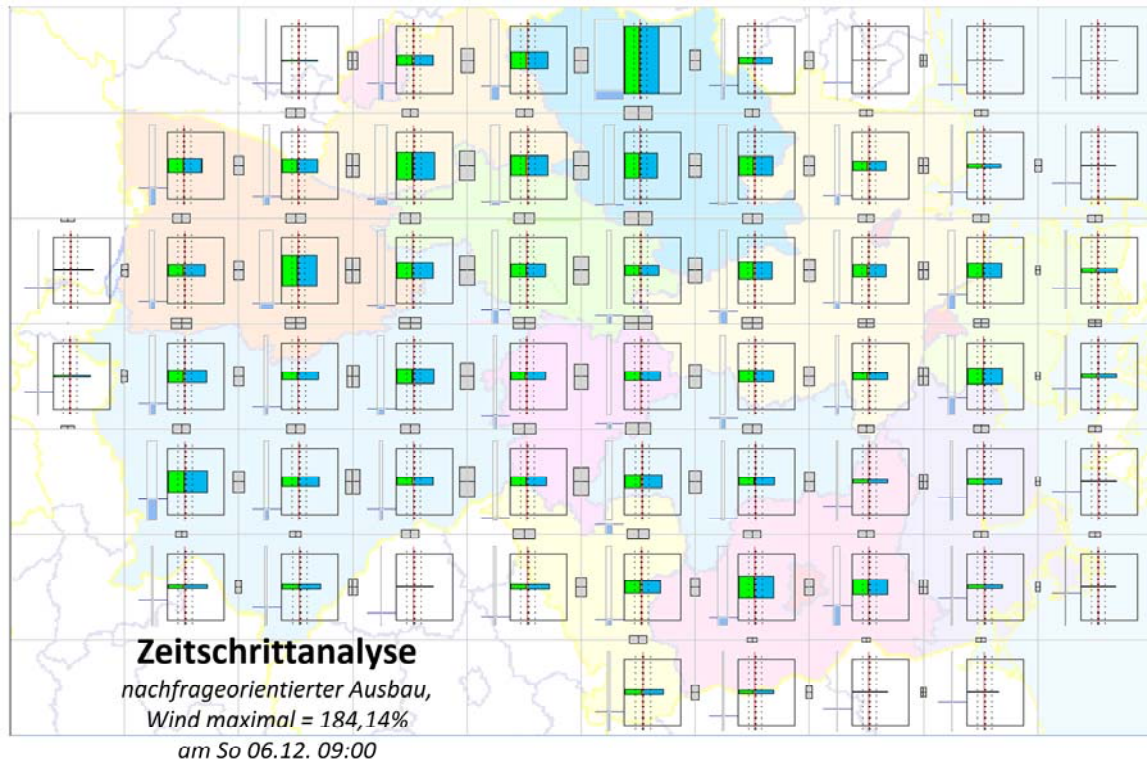
Extremwertanalysen gestatten es, gezielt die Versorgungssituationen herauszufiltern, die besondere Anforderungen an das Versorgungssystem stellen. Diese müssen jeweils beherrscht werden, wenn das Gesamtsystem in einem dauerhaft stabilen Zustand gehalten werden soll.

Nachfolgend sind beispielhaft für einen angenommenen regenerativen Erzeugungspark eine Reihe von Extremzuständen dargestellt, mit denen aufgrund des Wettergeschehens eines ganz normalen Jahres zu rechnen wäre. Dabei liegt ein fiktiver Erzeugungspark zu Grunde, bei dem mit Windenergie bei einem hohen Benutzungsgrad von 50% (4380 Vollast Stunden) soviel elektrische Energie umgewandelt werden könnte, wie nachgefragt wird. 20% der Nachfrage könnten zusätzlich mit Photovoltaik gedeckt werden und 9% stünde aus regenerativer Grundleistung, z.B. aus Wasser- und Biomassekraftwerken bereit. Insgesamt läge die Erzeugungskapazität 29% über dem Verbrauch.

Zusätzlich wird angenommen, dass alle Regionen über Methanspeichersysteme verfügen würden, die bei 38% Speicherwirkungsgrad in der Lage wären, Defizitphasen zu überbrücken.

Bei den Wind- und Solarenergieanlagen wird angenommen, dass diese in idealer Weise, der regionalen Nachfrage entsprechend auf die Teilregionen verteilt wären. Dieses idealisierte Erzeugungssystem liefert folglich einen Hinweis darauf, wie die Versorgungssituation mit möglichst wenig Netzausbau aussehen könnte.

Die derzeit öffentlich kursierenden Vorstellungen zum Ausbau der erneuerbaren Stromversorgung weichen stark von diesen Annahmen ab. Sie gehen von erheblichen Ungleichgewichten beim regionalen Ausbau der regenerativen Energieträger aus. Wind soll beispielsweise bevorzugt im Norden, Sonne im Süden aus den natürlichen Energiekreisläufen abgegriffen werden. Diese Pläne erfordern einen wesentlich stärkeren Netzausbau und führen zu einer deutlich geringeren Dezentralität des entstehenden Versorgungssystems, als es sich bei den nachfolgend gezeigten Beispielen einstellen würde.



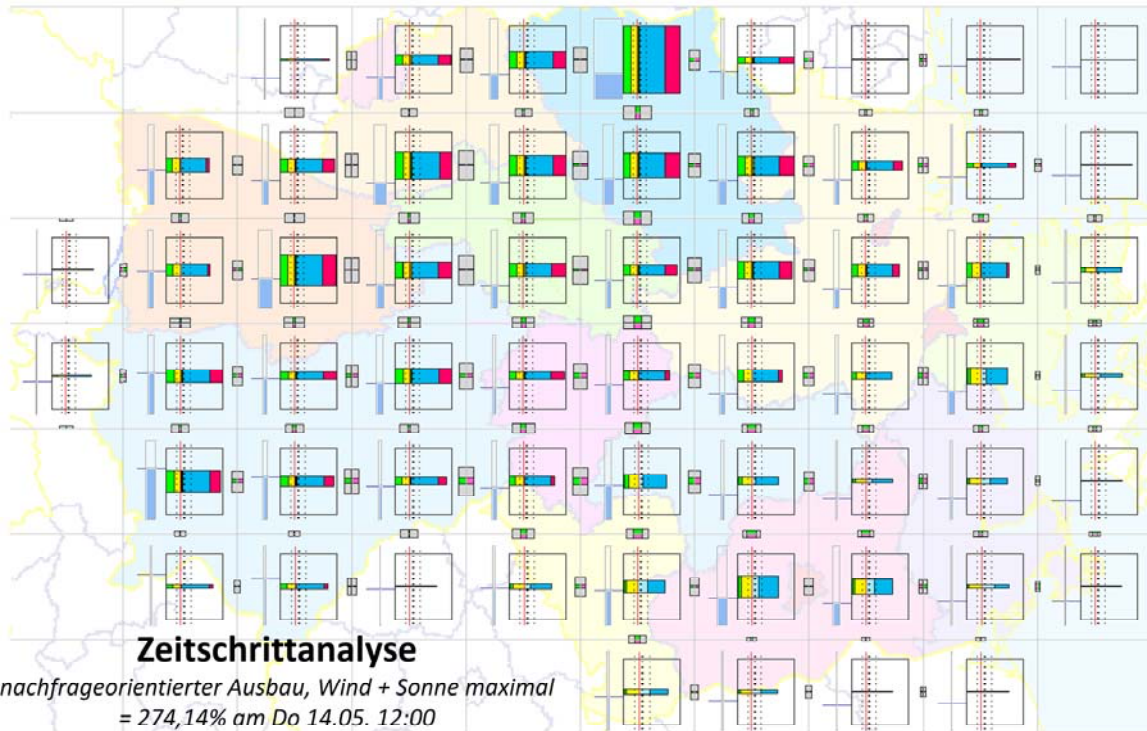
Gezeigt werden Versorgungssituationen, die sich bei einer landesweit optimierten, nachfrageorientierten Verteilung der regenerativen Erzeugungssysteme einstellen würden. Dabei ist angenommen, dass jede Region über Methanspeichersysteme verfügen würde, mit denen Defizitphasen überbrückt werden können.

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.

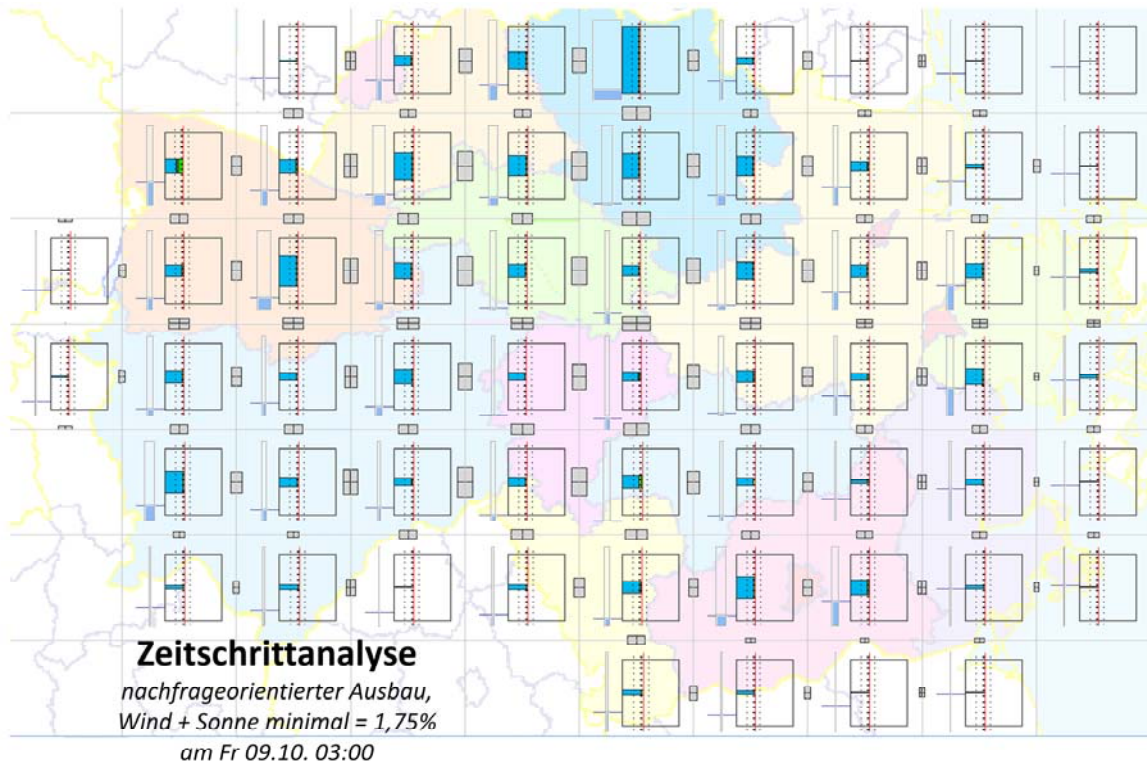
In Situationen, wie der gezeigten, mit landesweit guten Windverhältnissen würde keine Fernübertragung stattfinden, weil jede Region für sich in der Lage wäre die Eigenversorgung zu übernehmen und mit den Überschüssen die regionalen Speichersysteme aufzuladen.



Ähnlich würden sich die Verhältnisse bei optimalem Sonnenschein einstellen.



Wenn gute Sonnenscheinverhältnisse gleichzeitig mit starkem Wind auftreten, dann können so hohe Überschussleistungen auftreten, dass diese nicht mehr im vollen Umfang gespeichert werden können, wenn die Speicher nicht für diese seltenen Situationen ausgelegt wurden.

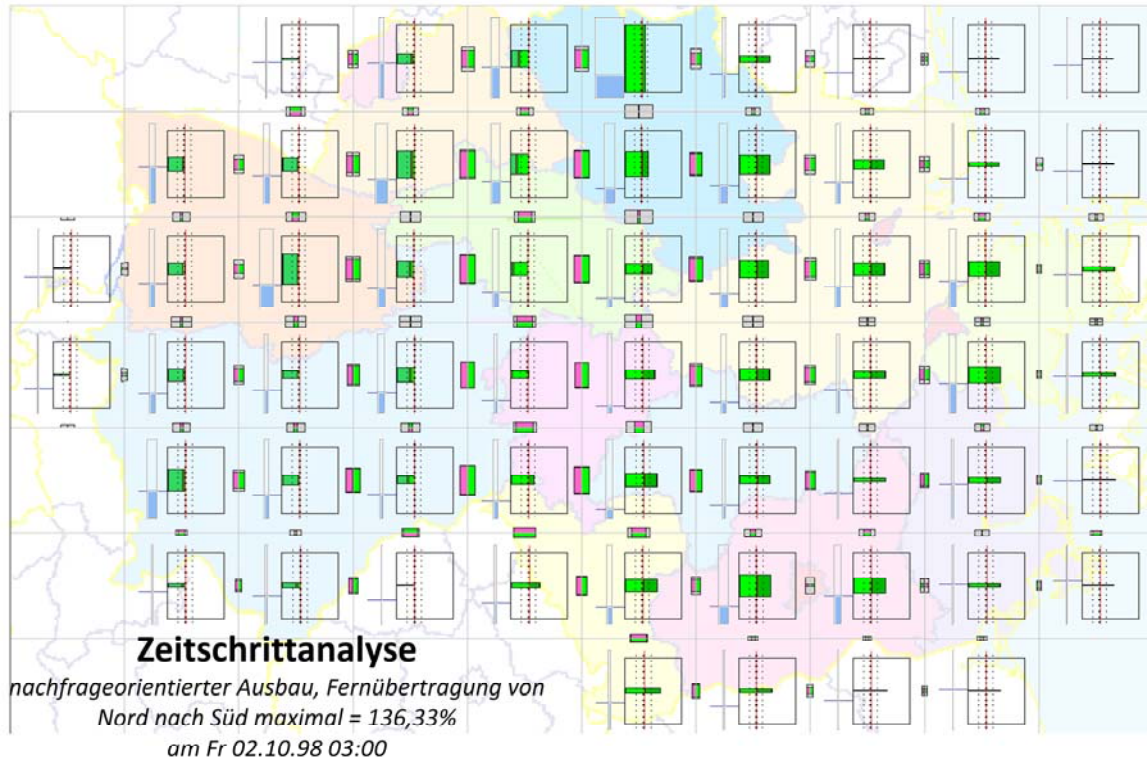


So wie es Situationen mit sehr guten Erzeugungsverhältnissen gibt, treten aber auch Situationen auf, wo das Leistungsdargebot von Wind und Sonne landesweit nahezu vollständig zum Erliegen kommt.

In diesem Fall kann die Versorgung, wie hier gezeigt, nur noch über die Entnahme von Speicherreserven erfolgen, wenn nicht parallel zum regenerativen Erzeugungssystem ein konventioneller Kraftwerkspark auf Dauer in Einsatzbereitschaft gehalten werden soll.

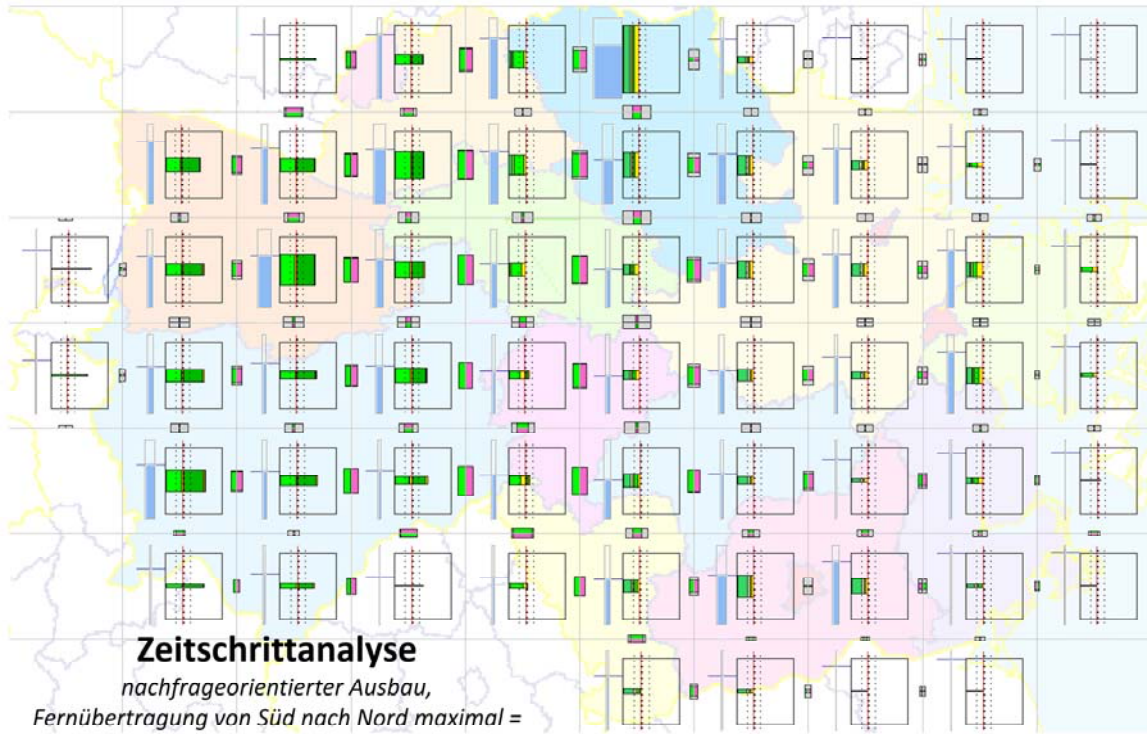
Die bisher gezeigten Situationen hätten alle keinen bedeutenden überregionalen Ausgleichsbedarf und somit keinen Leitungsausbau erfordert.



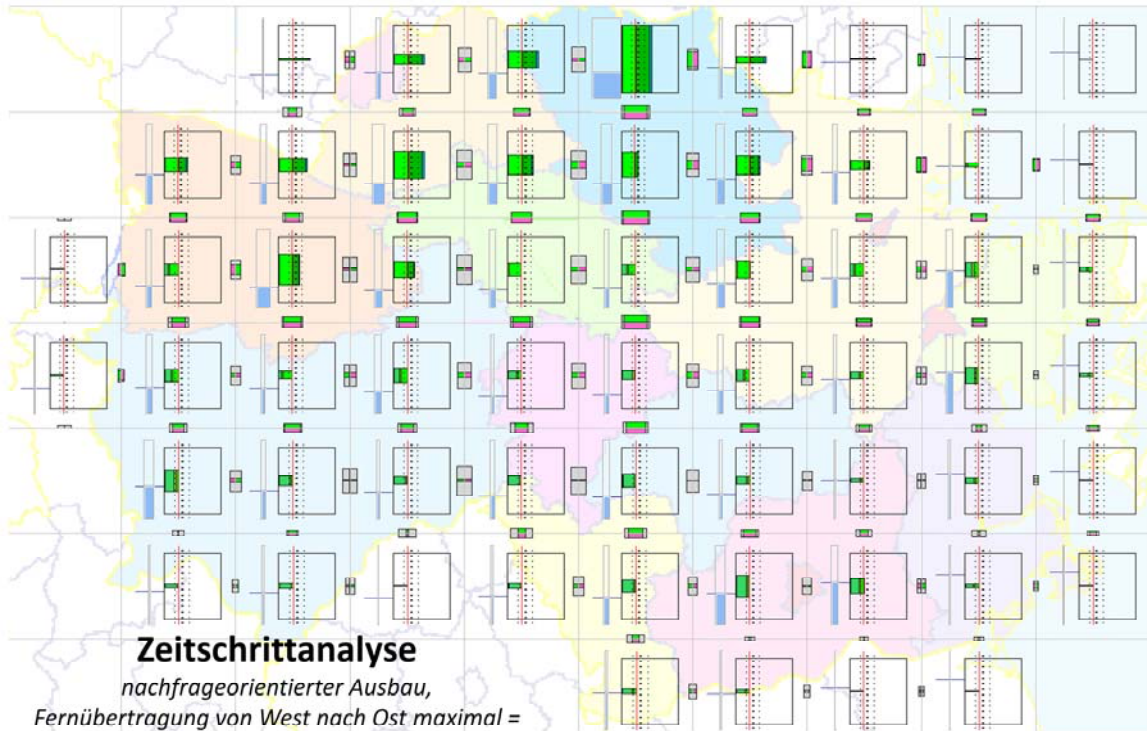


Es gibt aber auch Situationen, in denen in bestimmten Landesteilen besonders gute Erzeugungsbedingungen vorliegen während in anderen Landesteilen Defizite vorliegen. Dann würden sich erhebliche Fernübertragungsleistungen einstellen, mit denen diese Unterschiede ausgeglichen würden.

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



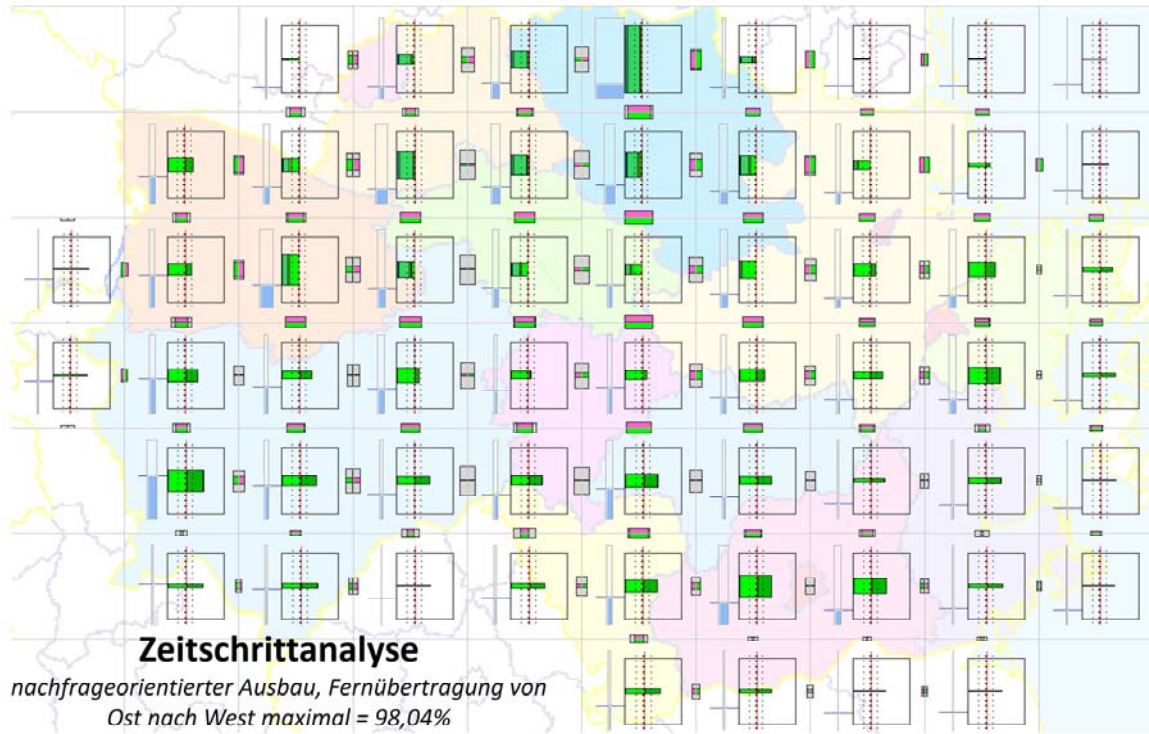
..., vom Süden in den Norden, ...



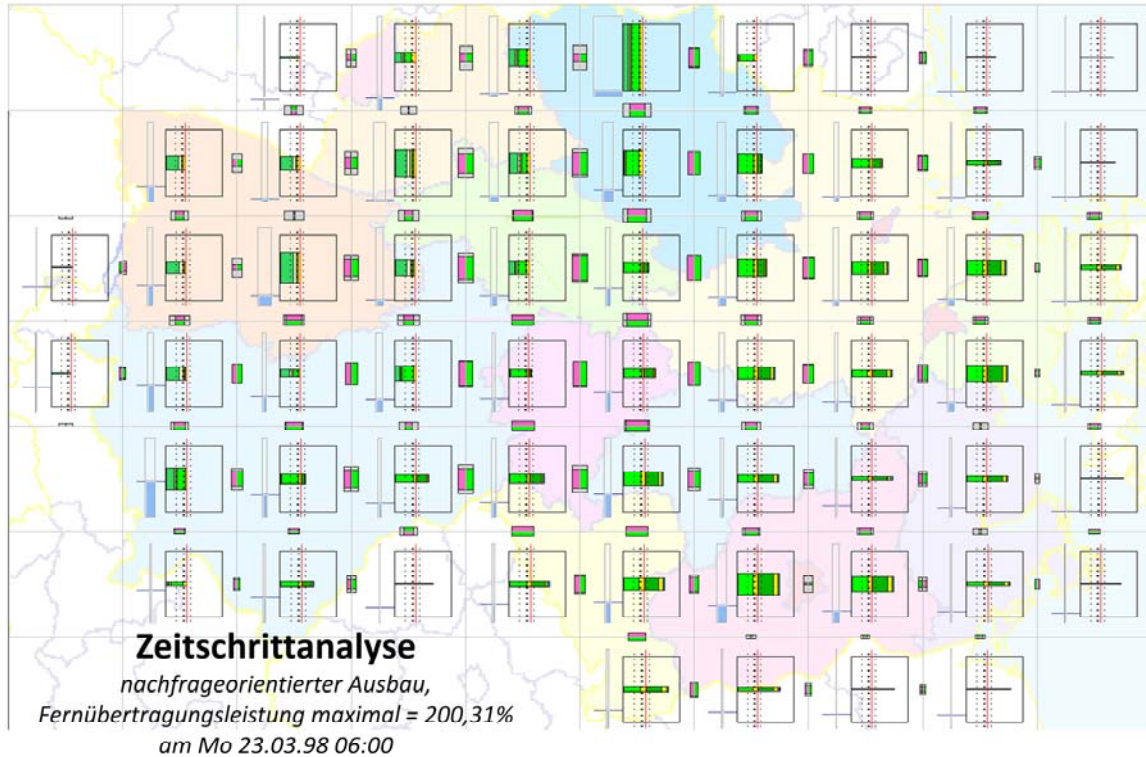
**Zeitschrittanalyse**

*nachfrageorientierter Ausbau,  
Fernübertragung von West nach Ost maximal =  
87,29% am Di 01.09.98 00:00*

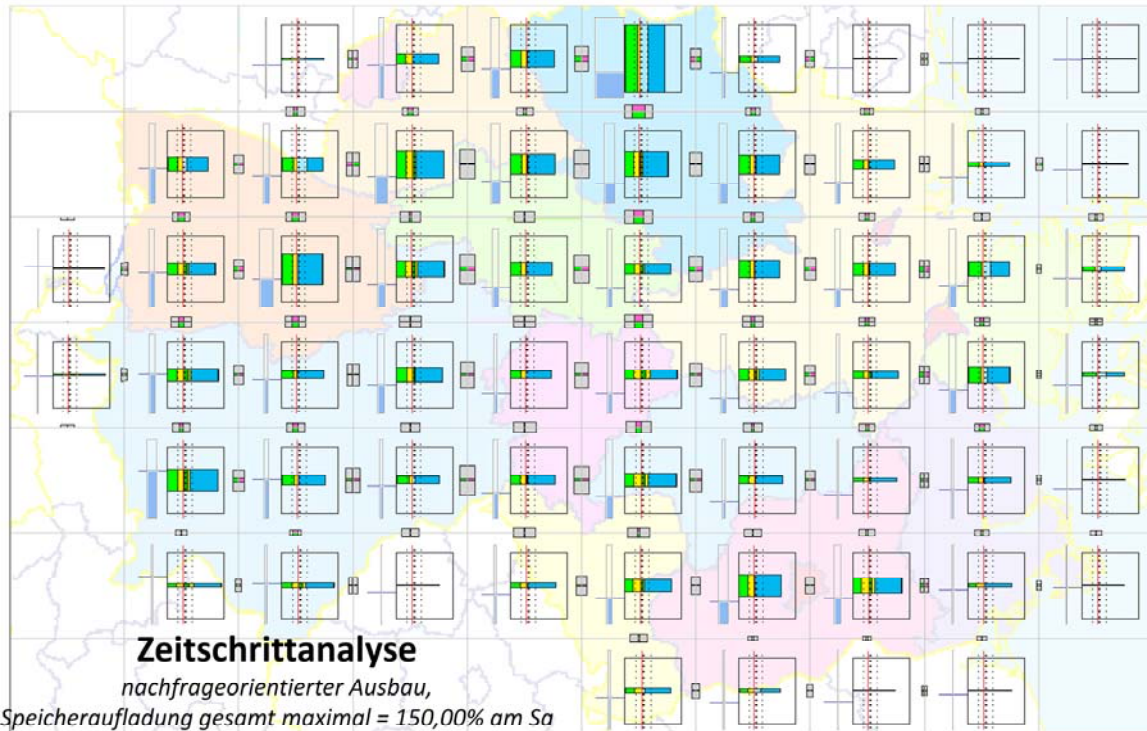
..., vom Westen in den Osten, ...



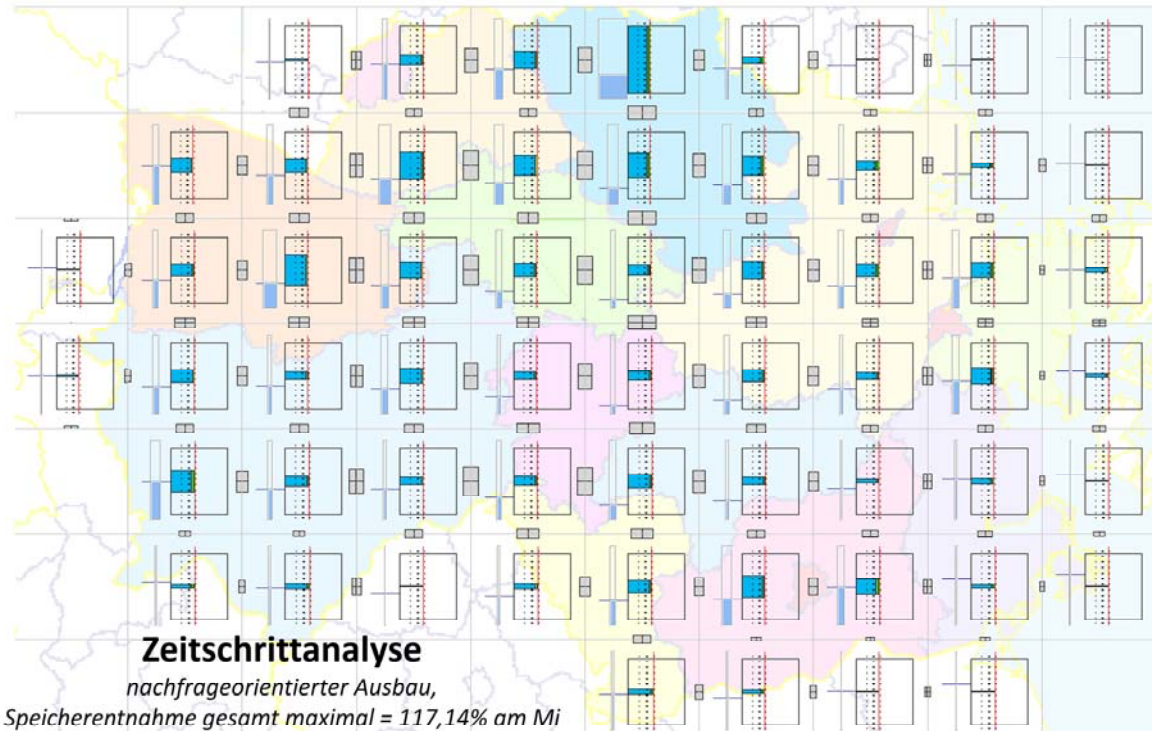
..., oder vom Osten in den Westen ...



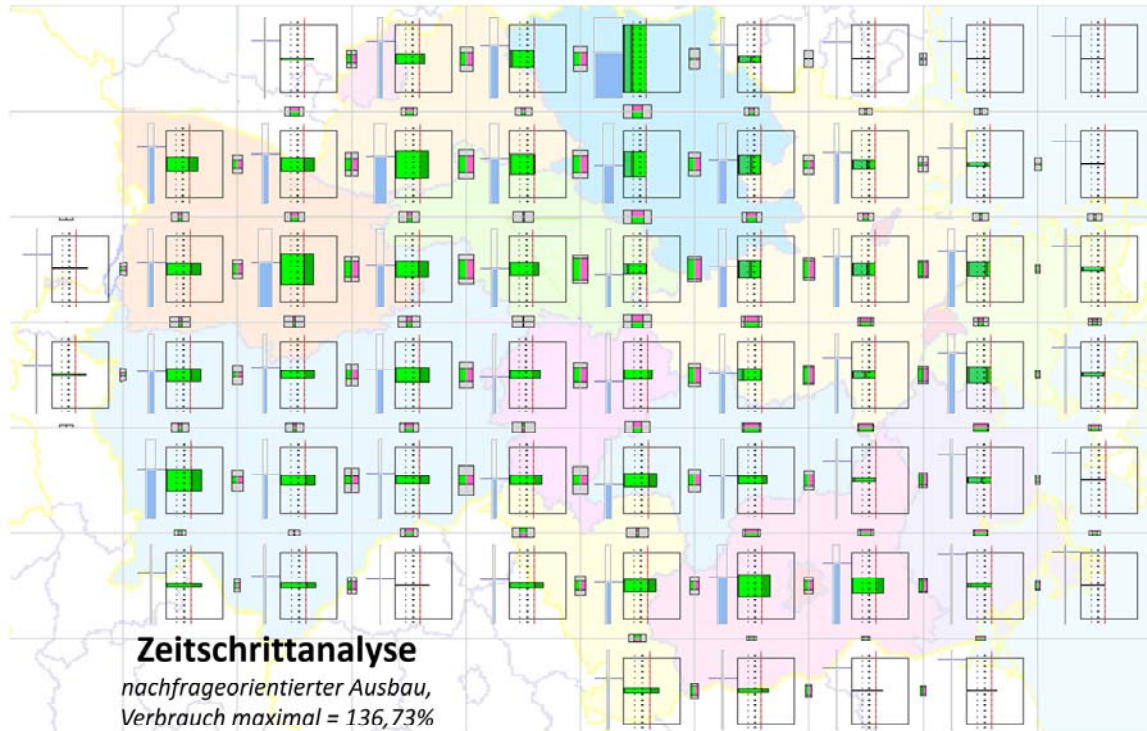
... oder vom Nordosten in den Südwesten oder umgekehrt.  
Temporär kann ein leistungsstarkes Stromnetz in diesen  
Situationen erhebliche Ausgleichseffekte ermöglichen, bei denen  
die Speicherreserven geschont werden.



Im hier gezeigten Szenario wurde von einer maximalen Methanisierungsleistung (= Speicheraufladeleistung) ausgegangen, mit der sich Überschüsse verarbeiten lassen, welche den Durchschnittsverbrauch um das 1,5-fache übersteigen. Diese Situationen würden häufiger auftreten.

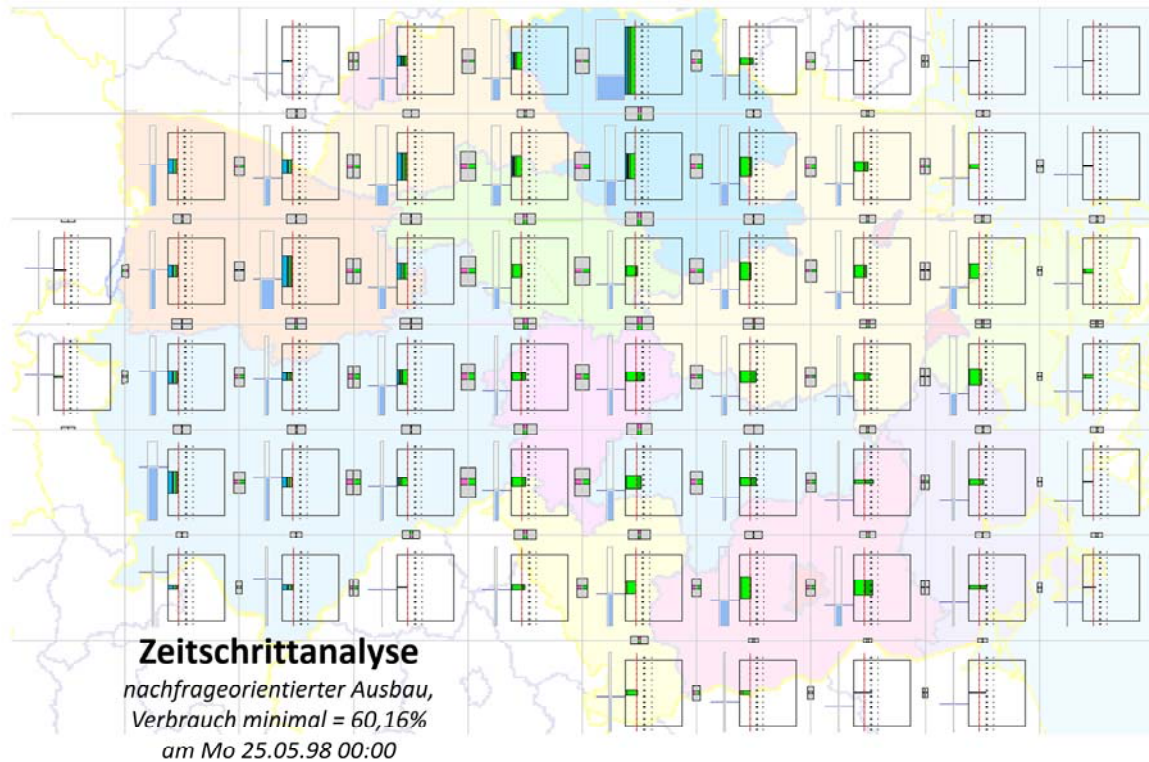


Ebenso ist mit Situationen zu rechnen, in denen überdurchschnittlich hohe Leistungen allein aus den Speichern zu entnehmen wären, weil bei hoher Nachfrage die Wetterbedingungen kaum eine regenerative Erzeugung ermöglichen.



Maximale Stromnachfrage kann aber auch bei guten Erzeugungsbedingungen auftreten.



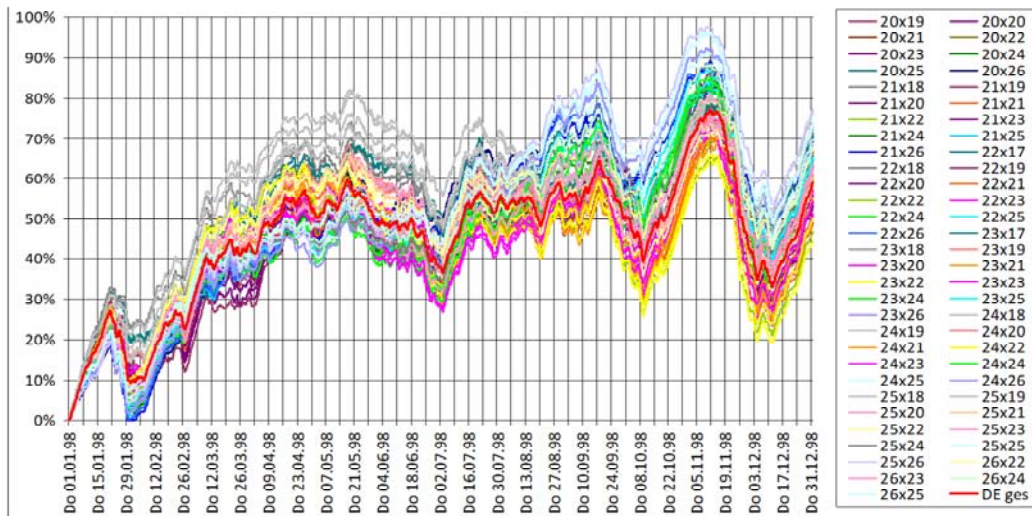


Hier ist der Zeitschritt mit dem niedrigsten Verbrauch dargestellt. Es ist davon auszugehen, dass zwischen Erzeugungsbedingungen und der Nachfrage nach elektrischer Leistung keine signifikante Korrelation erwartet werden kann.

Die Beispiele zeigen, dass Netzausbau in bestimmten Situationen erhebliche Ausgleichswirkungen entfalten kann, dass es andererseits aber auch Situationen gibt, in denen ein Netzausbau nicht weiter helfen würde.

Die diesbezüglichen Zusammenhänge werden anhand der nachfolgenden Speicherleerungskurven erklärt.

## Speicher-Ladezustand



Bedarfsorientierter Ausbau mit 80%/20% Mix von Wind und Sonne, Speichern mit 38% Wirkungsgrad, 50% Wind-Benutzungsgrad mit Fernübertragungsleistung orientiert am maximalen Exportpotential

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

50

Die Grafik zeigt die Auf- und Entladungen von Speichern eines ideal über Deutschland verteilten regenerativen Erzeugungssystems, für Rastergebiete mit jeweils 90x90 Kilometern Kantenlänge. Sie verdeutlicht, welche Anforderungen die Volatilität der erneuerbaren Energien aus Wind und Sonne an Speichersysteme stellen.

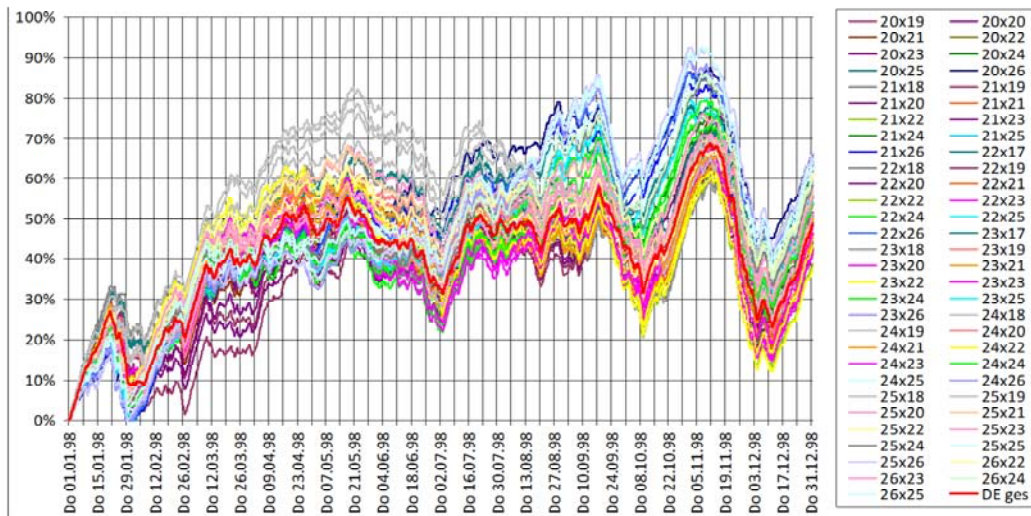
Nicht mehr, der Ausgleich zwischen Tag und Nacht und zwischen Arbeitstagen und Wochenenden definiert die Herausforderung an Speichersysteme, sondern längere windschwache Perioden, die großräumig auftreten und insbesondere im Winterhalbjahr nicht ausreichend durch Solarstromeinspeisung ausgeglichen werden können.

Diesen aus langanhaltenden, großräumigen Wetterlagen resultierenden Situationen kann weder mit einem leistungsstarken Ausbau der Stromnetze, noch mit Smart-Grid Lösungen abgeholfen werden.

Da können nur noch konventionell betriebene, bedarfsgerecht abrufbare Kraftwerke einspringen, oder Speichersysteme, die mit den notwendigen Reserven ausgelegt sind.

Dieses Diagramm zeigt eine Speicherbewirtschaftung, wenn dafür Wasserstoff- oder Methanspeichertechniken eingesetzt würden und die Stromnetze so leistungsstark ausgebaut wären, dass sich darüber alle Ungleichgewichte zwischen Erzeugung und Nachfrage zwischen den Teilregionen in voller Höhe ausgleichen lassen würden.

## Speicher-Ladezustand



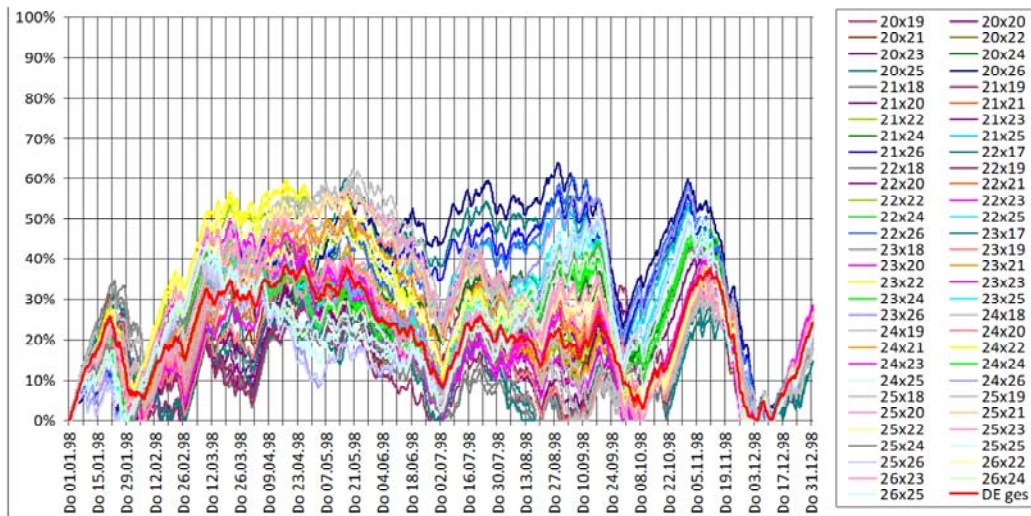
Bedarfsorientierter Ausbau mit 80%/20% Mix von Wind und Sonne, Speichern mit 38% Wirkungsgrad, 50% Wind-Benutzungsgrad mit Fernübertragungsleistung begrenzt auf 50% der mittleren regionalen Last

Dieses Diagramm zeigt eine Speicherbewirtschaftung, wenn dafür der gleiche Erzeugungspark wie vorher zum Einsatz käme, aber über die Stromnetze maximal 50% der Nachfrage übertragen werden könnte. Überregionaler Netzausbau müsste dafür im Vergleich zu heute kaum erfolgen.

Man erkennt, dass nur geringfügig mehr Energie über die Speicher ausgeglichen werden müsste, als wenn ein maximaler Netzausbau erfolgen würde.

Der Ladezustand der Speicher am Ende des zur Untersuchung herangezogenen Jahres läge lediglich ca. 10% unterhalb der Situation mit maximalem Netzausbau.

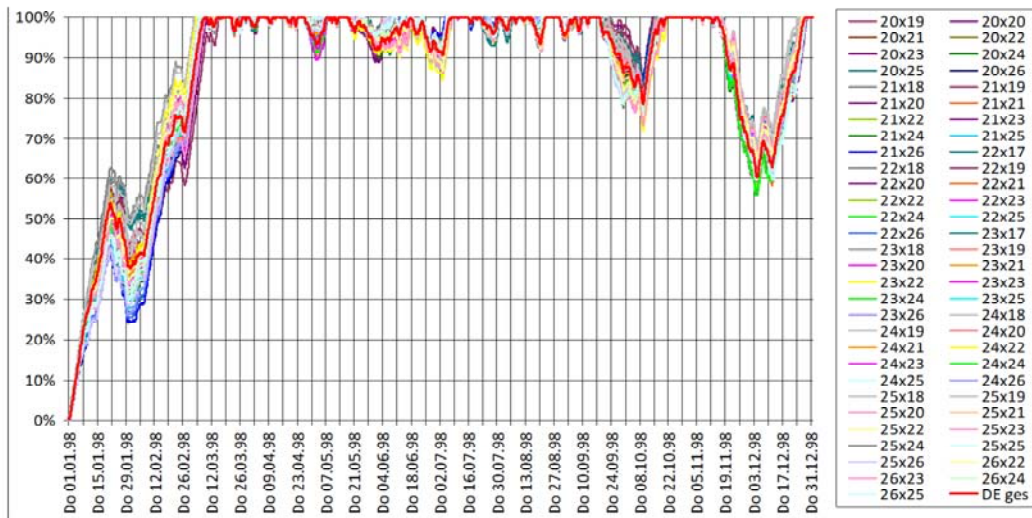
## Speicher-Ladezustand



Bedarfsorientierter Ausbau mit 80%/20% Mix von Wind und Sonne, Speichern mit 38% Wirkungsgrad, 50% Wind-Benutzungsgrad ohne Fernübertragungsleistung (regionale Autarkie)

Dieses Diagramm zeigt eine Speicherbewirtschaftung mit wiederum dem gleichen Erzeugungspark wie vorher, aber gänzlich ohne Stromnetze zur Fernübertragung von Leistungen über Regionsgrenzen hinweg. Bei diesem nur theoretischen und auch nicht anzustrebenden Szenario könnten die vorhandenen Höchstspannungsnetze sogar abgeschafft werden. Man erkennt, dass die Speicher meistens in der Lage wären, volatile Erzeugung und Nachfrage zum Ausgleich zu bringen. Für eine sichere Versorgung müsste jedoch eine etwas größere Erzeugungsreserve vorgehalten werden. In diesem Fall würde eine regionale Versorgungsautarkie entstehen.

## Speicher-Ladezustand

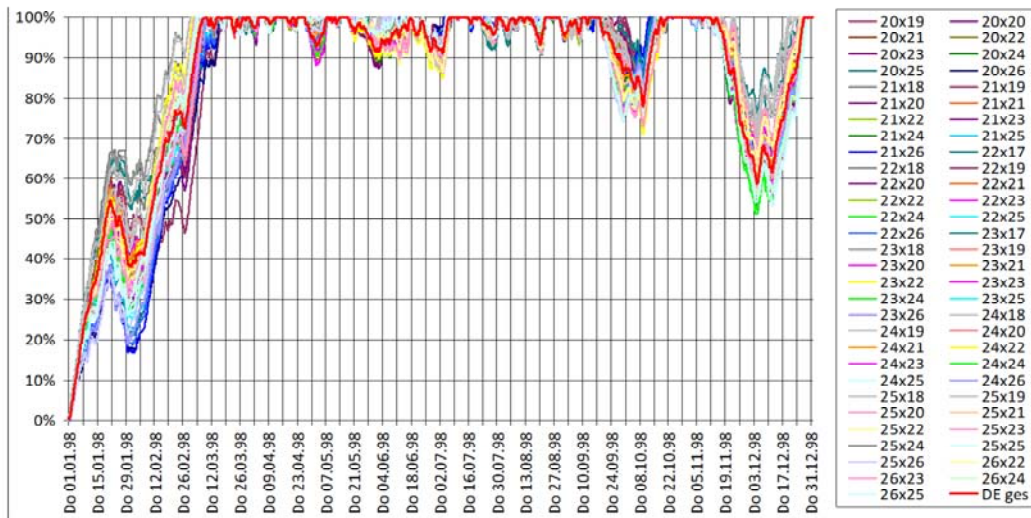


Bedarfsorientierter Ausbau mit 80%/20% Mix von Wind und Sonne, Speichern mit 76% Wirkungsgrad, 50% Wind-Benutzungsgrad mit Fernübertragungsleistung orientiert am maximalen Exportpotential

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 Flauten 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.

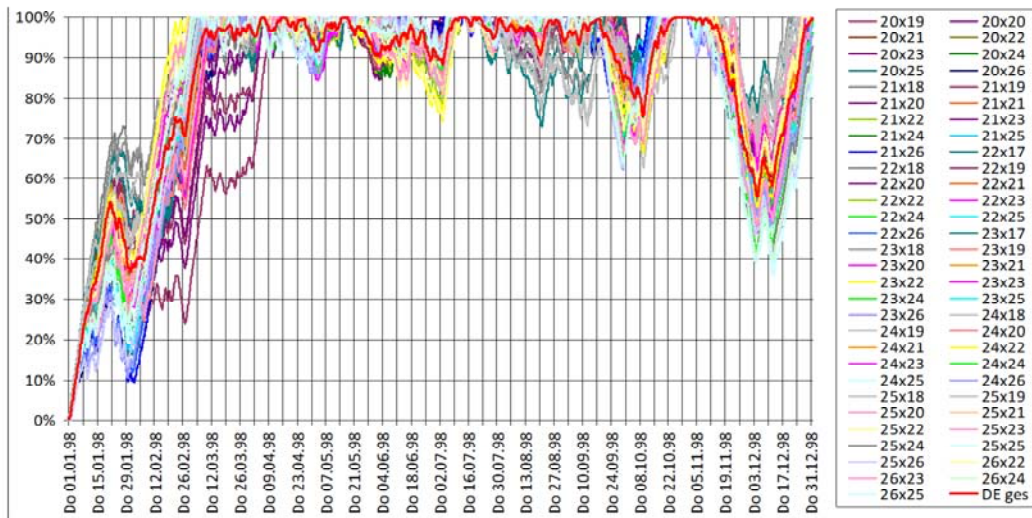
## Speicher-Ladezustand



Bedarfsorientierter Ausbau mit 80%/20% Mix von Wind und Sonne, Speichern mit 76% Wirkungsgrad, 50% Wind-Benutzungsgrad mit Fernübertragungsleistung begrenzt auf 50% der mittleren regionalen Last

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.

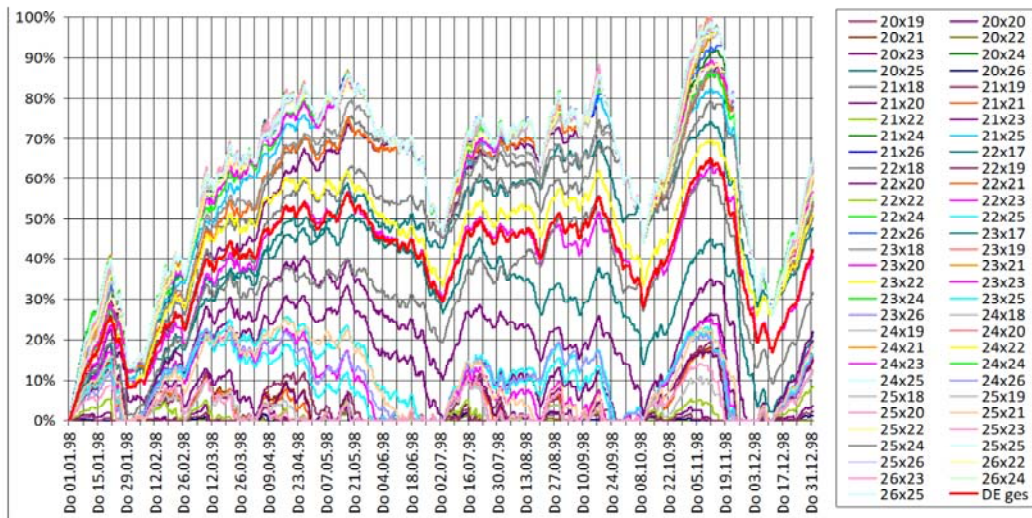
## Speicher-Ladezustand



Bedarfsorientierter Ausbau mit 80%/20% Mix von Wind und Sonne, Speichern mit 76% Wirkungsgrad, 50% Wind-Benutzungsgrad ohne Fernübertragungsleistung (regionale Autarkie)

Es ließe sich damit sogar eine sichere Versorgung ganz ohne überregionale Netze verwirklichen.

## Speicher-Ladezustand

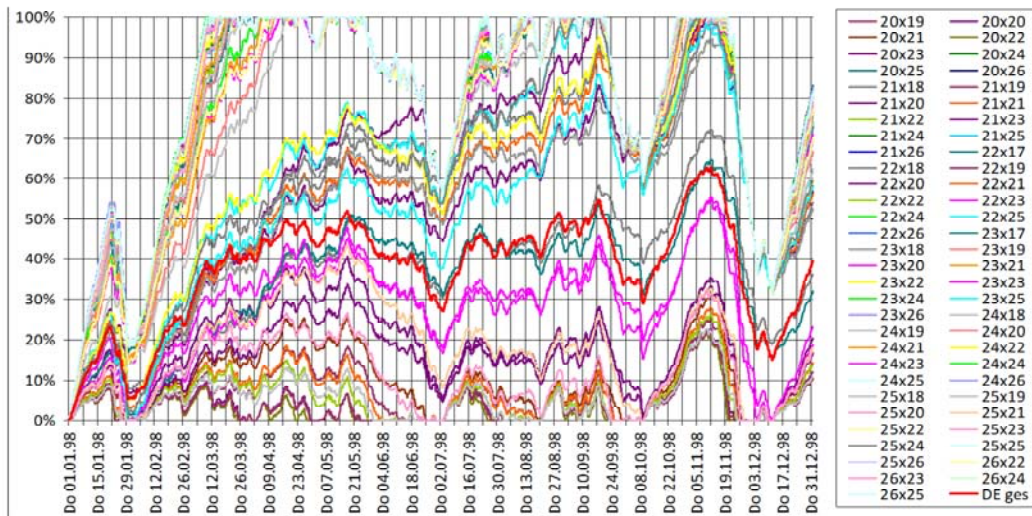


Landflächenorientierter Ausbau mit 80%/20% Mix von Wind und Sonne, Speichern mit 38% Wirkungsgrad, 50% Wind-Benutzungsgrad mit Fernübertragungsleistung orientiert am maximalen Exportpotential

Würde man nicht, wie vorher angenommen, die Erzeugungssysteme bevorzugt dort aufstellen, wo auch die Nachfrage stattfindet, sondern möglichst gleichmäßig auf die Landesfläche verteilt, dann müsste ein deutlich stärkerer Netzausbau dafür sorgen, dass überall, auch bei längeren Flauten, genügend elektrische Leistung bereitgestellt werden kann. Gasnetze hätten allerdings den Vorteil, dass Methanisierung und Rückverstromung an unterschiedlichen Stellen erfolgen könnte. Dies würde die hier dargestellten Unterschiede bei der Speicherbewirtschaftung relativieren.



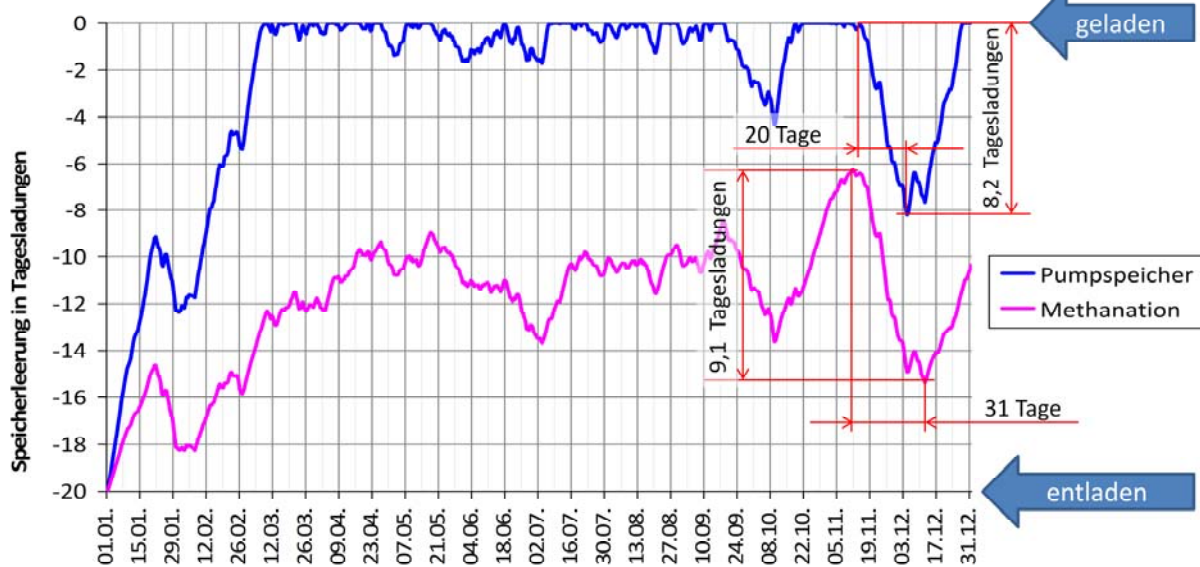
## Speicher-Ladezustand



Potentialorientierter Ausbau mit 80%/20% Mix von Wind und Sonne, Speichern mit 38% Wirkungsgrad, 50% Wind-Benutzungsgrad mit Fernübertragungsleistung orientiert am maximalen Exportpotential

Noch gravierender würden sich die Verhältnisse bei einem potentialorientierten Ausbau der erneuerbaren Erzeugungsanlagen auswirken. Unter potentialorientiert ist zu verstehen, dass die Energiegewinnungsanlagen bevorzugt dort konzentriert werden, wo die Bedingungen am besten sind. Gasspeicher im Norden würden sich schnell füllen, während Speicher in verbrauchstarken Gebieten kaum in den Genuss von Erzeugungsüberschüssen kämen. Ein wesentlich umfangreicherer Netzausbau würde damit notwendig. Gleichzeitig würden erhebliche Gasmengen über das Erdgasnetz in die Verbrauchsschwerpunkte übertragen werden. Bei dieser potentialorientierten Strategie ist weiter zu bedenken, dass sich die zeitlichen Ungleichgewichte zwischen Überschüssen und Defiziten stärker auswirken und einen höheren Speicherbedarf erfordern, als wenn ein landesweiter Ausgleich zwischen Überschüssen und Defiziten stattfinden kann.

## 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) Dr.-Ing Matthias Popp, Burgstraße 19, 95632 Wunsiedel, www.poppware.de

58

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

Bei entsprechend lang anhaltenden großräumigen Wetterbedingungen können weder ein leistungsstarkes Übertragungsnetz noch Smart Grid Lösungen den Fehlbedarf ausgleichen.

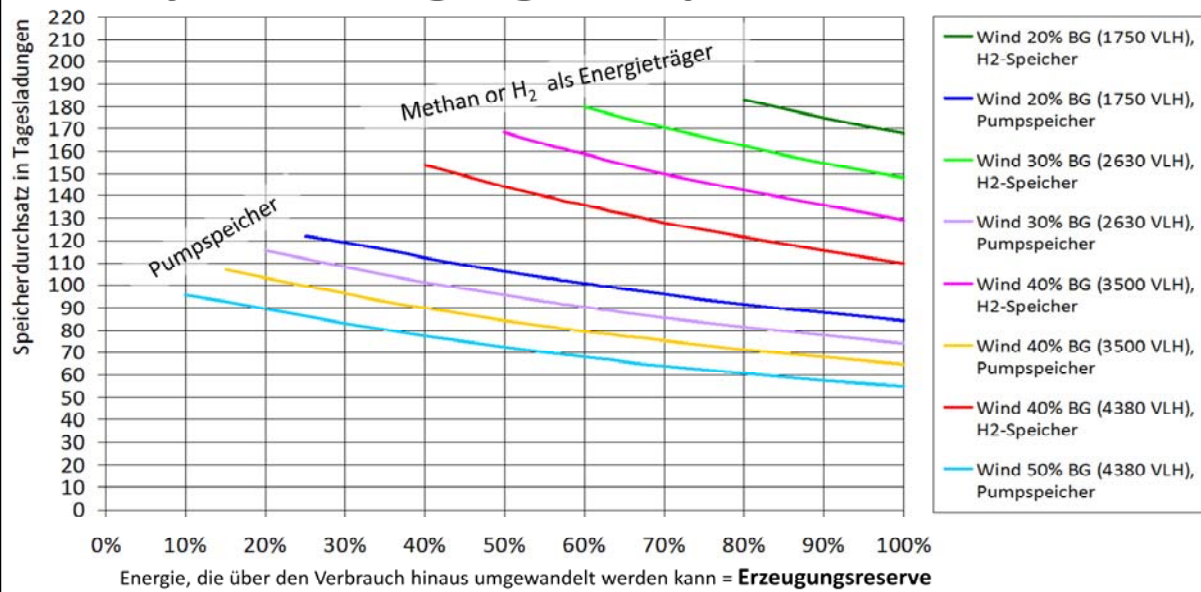
Wenn nicht ein leistungsstarker konventioneller bedarfsgerecht anforderbarer Kraftwerkspark in ständiger Einsatzbereitschaft gehalten werden soll, benötigt man Speichersysteme, die über die erforderlichen Kapazitätsreserven verfügen.

Sobald entsprechende Speichersysteme aber zur Verfügung stehen, entfällt sowohl der Bedarf für hochgerüstete Übertragungsnetze als auch für Smart Grid Lösungen und für Kurzzeitspeichersysteme.

Das alles können dann die Langzeitspeicher mit erledigen.

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

## Systemauslegung und Speicherdurchsatz



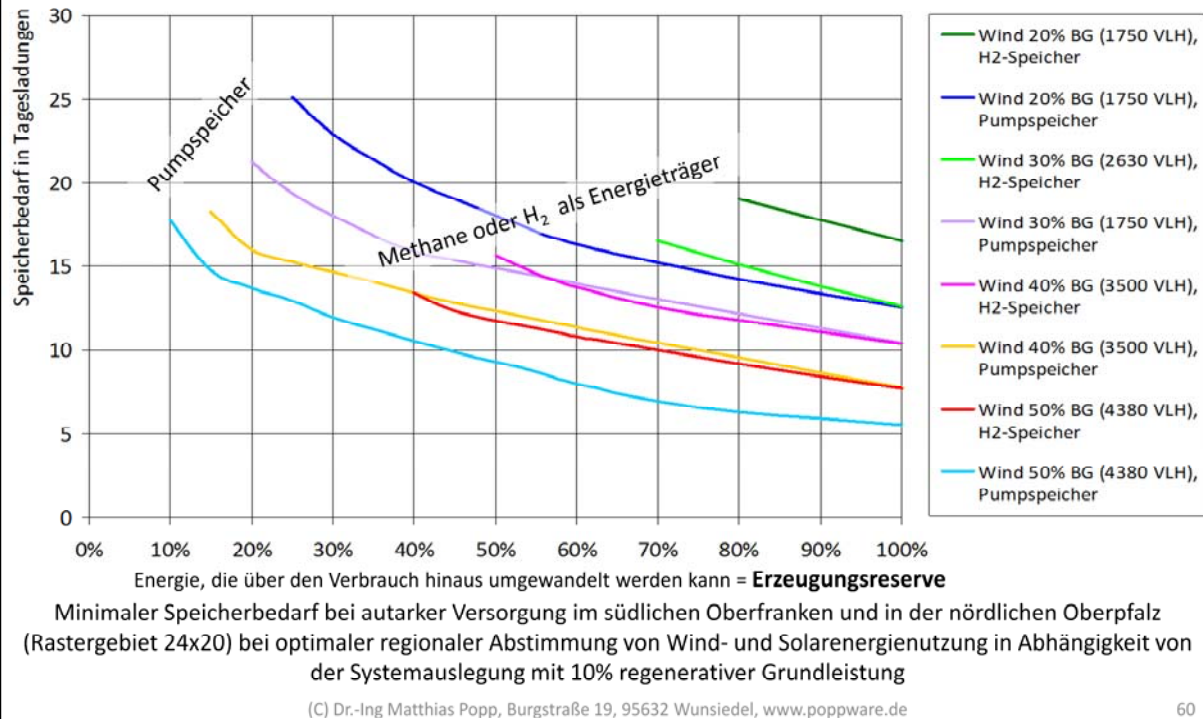
Jährlicher Speicherdurchsatz bei autarker Versorgung im südlichen Oberfranken und in der nördlichen Oberpfalz (Rastergebiet 24x20) bei optimaler regionaler Abstimmung von Wind- und Solarenergienutzung in Abhängigkeit von der Systemauslegung mit 10% regenerativer Grundleistung.

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

59

Die Begründung liefert der stattfindende Speicherdurchsatz. Energie für Verluste, die bei einem Speicherprozess anfällt, braucht bei wirkungsgradstarken Speichern nicht erzeugt werden. Neben der Akzeptanzgewinnung handelt es sich bei den zur Wahl stehenden Speichertechnologien 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.

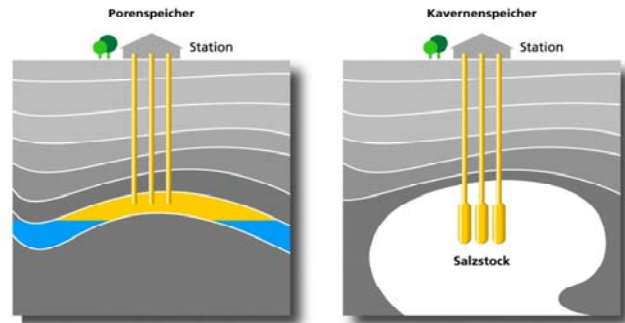
Die Kennlinien zeigen unter der Annahme eines jeweils optimal auf die regionalen Verhältnisse abgestimmten Energiemix, das Minimum an vorzuhaltender Erzeugungsleistung und die größten zu erwartenden Speicherleerungen.

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. m<sup>3</sup> V<sub>n</sub>,
- Maximale Arbeitsgaskapazität ca. 20.800 Mio. m<sup>3</sup> V<sub>n</sub>,
- Energiegehalt von Erdgas ca. 10 kWh/ m<sup>3</sup> V<sub>n</sub> = 10 GWh/Mio. m<sup>3</sup> V<sub>n</sub>,
- Energiespeicherkapazität ca. 208 TWh
- Verstromungswirkungsgrad (GuD) ca. 60%
- **Stromspeicherkapazität** ca. **125 TWh**, das entspricht ca. **87 Tagesladungen** des durchschnittlichen Strombedarfs Deutschlands

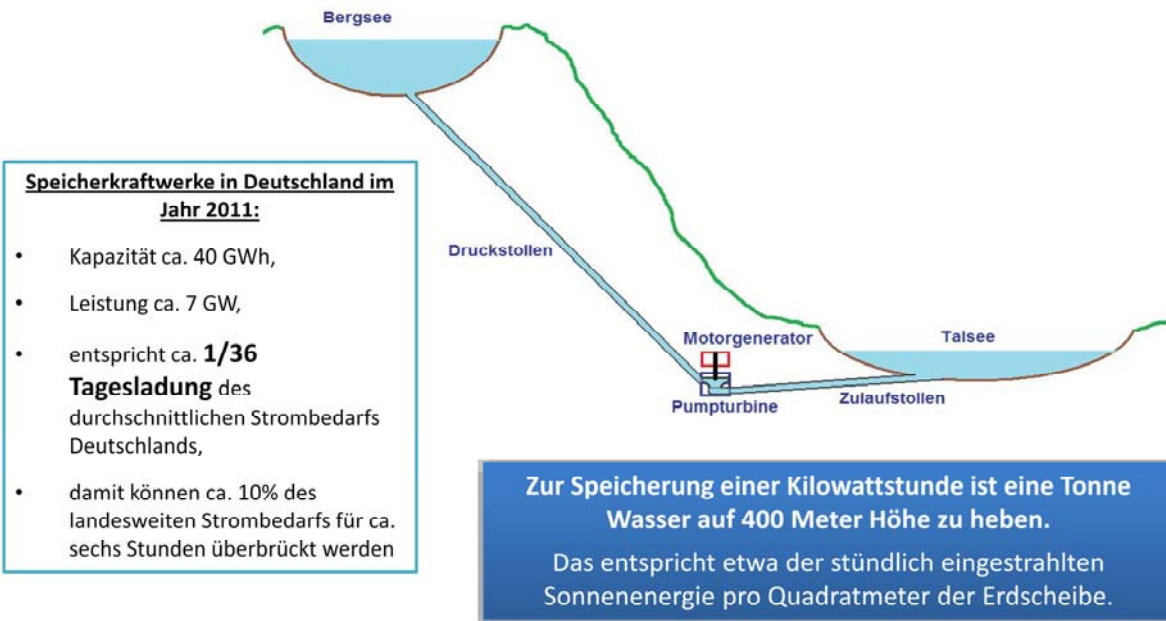


Wegen des immensen Speicherbedarfs, der mit dem weiteren Ausbau der erneuerbaren Stromversorgung auf uns zukommt, wird stark über Alternativen zu der bewährten und technisch ausgereiften Pumpspeichertechnik nachgedacht, mit Wasserstoff oder Erdgas als Energieträger.

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.

## 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 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

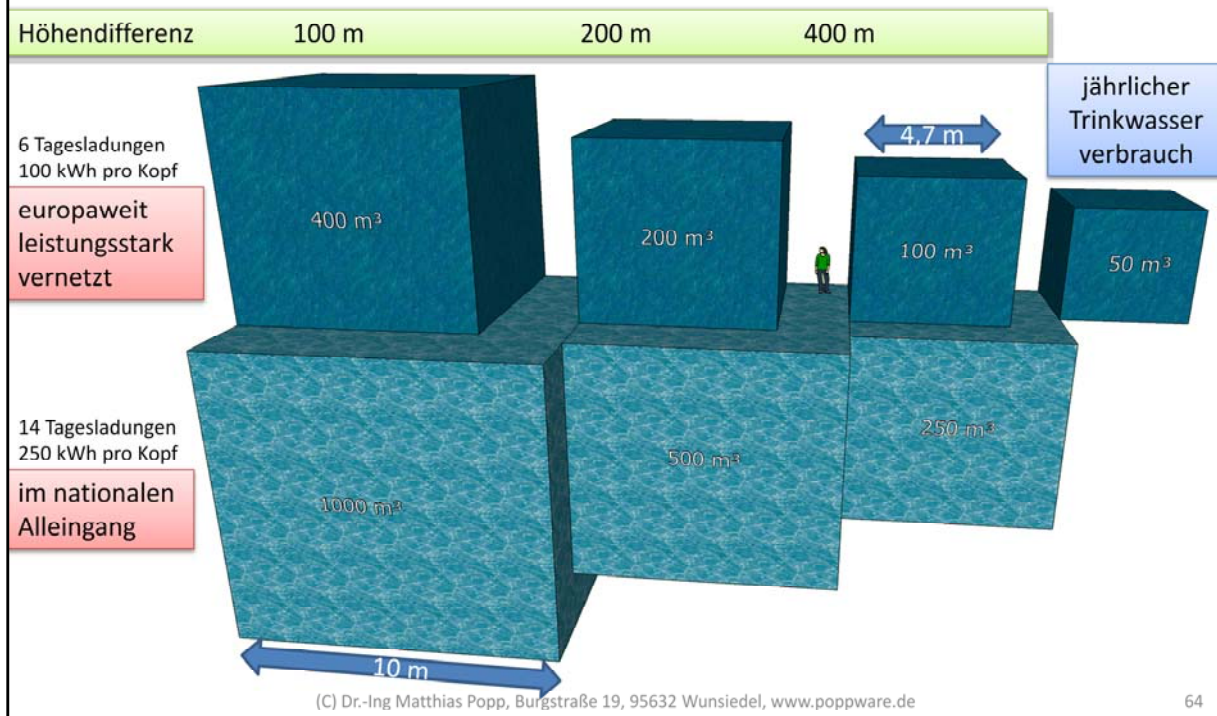
entspricht ca. **6 Tagesladungen** der Durchschnittsnachfrage,  
erfordert ca. **200 Mal die vorhandene Speicherkapazität,**  
**leistungstarken Ausbau der europäischen Stromnetze und einen Ausbau der Wind- und Solarenergie in allen Ländern Europas**

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

Bei einer, sich aus heutiger Sicht leider nicht abzeichnenden, optimalen europaweiten Kooperation 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 läge, zwischen 100 und 250 Kilowattstunden.

Je nach Höhenunterschied der Wasserflächen von Pumpspeichersystemen, würde das pro Einwohner Austauschvolumen zwischen 100 und 1000 m<sup>3</sup> erfordern.

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

Ein Wasserproblem würde es für die Befüllung der Pumpspeichersysteme nicht geben.

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 beim Blick auf die Planungs- und Umsetzungszeiten für derartige Systeme möglichst bald Rahmenbedingungen geschaffen werden, die es aus 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 <sup>3</sup>
1 m	200	400	800	500	1000	2000	m <sup>2</sup>
5 m	40	80	160	100	200	400	m <sup>2</sup>
20 m	10	20	40	25	50	100	m <sup>2</sup>
50 m	4	8	16	10	20	40	m <sup>2</sup>

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

65

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 <sup>3</sup>
1 m	16000	32000	64000	40000	80000	160000	km <sup>2</sup>
5 m	3200	6400	12800	8000	16000	32000	km <sup>2</sup>
20 m	800	1600	3200	2000	4000	8000	km <sup>2</sup>
50 m	320	640	1280	800	1600	3200	km <sup>2</sup>

Wasserflächenbedarf im Vergleich zur Landesfläche Deutschlands (Landesfläche 357.126 km <sup>2</sup> )							
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%	

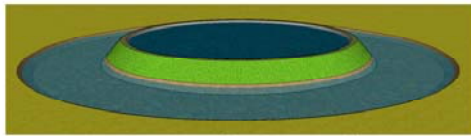
Die landesweit zu schaffenden Wasserflächen zur Energiespeicherung wären marginal im Vergleich zu vielen anderen Landnutzungen.

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

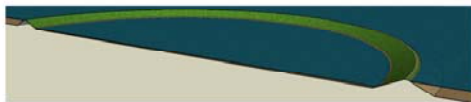
All diese Überlegungen führen zum Vorschlag des Ringwallspeichers.

## Ringwallspeicher

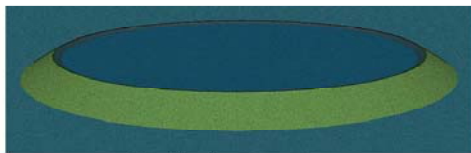
als geotechnische Option zur Schaffung großer Speicherkapazitäten



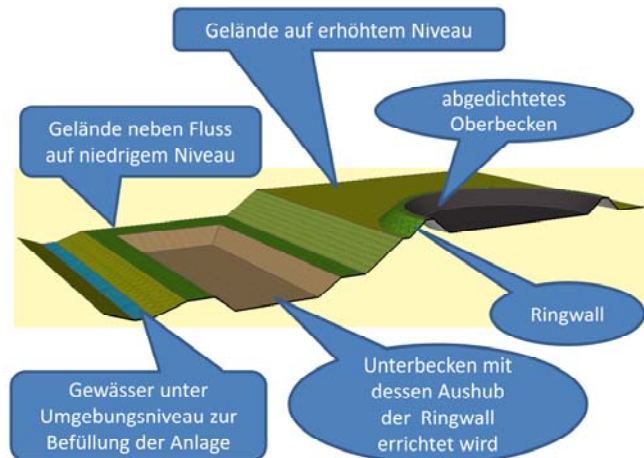
für das „flache Land“



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) 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 würden.

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 Fotovoltaik in der Lage sein, versorgungssicher zwei Kernkraftwerke zu ersetzen.

Natürlich geht das 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) Dr.-Ing Matthias Popp, Burgstraße 19, 95632 Wunsiedel, [www.poppware.de](http://www.poppware.de)

69

Derartige Wasserflächen gibt es.

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

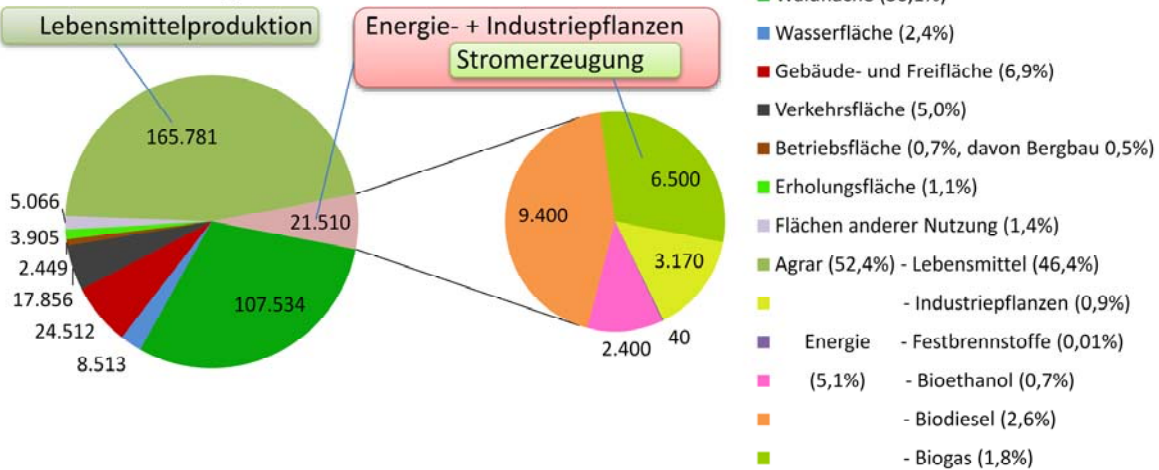
Als ich im Jahr 2008 diese Bilder machte betrug die Absenkung etwa 20 Meter. An diesem Tag ging es noch einmal um mehr als einen Meter nach unten.

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

## Bodennutzung Deutschlands

in km<sup>2</sup> (Gesamtfläche 357.126 km<sup>2</sup>)

landwirtschaftlich genutzte Flächen 2010 für



Ringwallspeicher Hybridsysteme zur vollständigen Stromversorgung Deutschlands würden über das Land verteilt eine Bodenfläche von zusammen ca. 3000 km<sup>2</sup> erfordern.

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

70

Etwas mehr als die Hälfte Deutschlands wird landwirtschaftlich genutzt. Der größte Teil davon dient der Lebensmittelproduktion. Die industriell und energetisch genutzte Agrarfläche ist hier weiter aufgeschlüsselt. Davon wird heute auf ca. 6500 km<sup>2</sup> Biomasse zur Stromerzeugung in Biogasanlagen angebaut.

Der idealisiert dargestellte Ringwallspeicher würde zusammen mit allen Wind- und Solarenergieanlagen eine Bodenfläche von ca. 100 km<sup>2</sup> erfordern.

30 derartige Hybridkraftwerke hätten eine durchschnittliche Erzeugungsleistung von 60 GW.

Die erforderliche Gesamtfläche läge bei ca. 3000 km<sup>2</sup>.

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 km<sup>2</sup>, auf der bereits heute Biomasse zur Stromerzeugung mit Biogasanlagen angebaut wird.

Durch Einsatz von weniger als 1 % der Landesfläche ließe sich Deutschlands 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 Hybridssysteme 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](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) Dr.-Ing Matthias Popp, Burgstraße 19, 95632 Wunsiedel, [www.poppware.de](http://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.

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 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](http://de.wikipedia.org/wiki/Tagebau_Hambach)
- Ausdehnung: am Ende ca. 85 km<sup>2</sup>
- 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 auf die ca. 200 Meter hohe Halde gekippte Volumen des abzutragenden Deckgebirges würde ausreichen, um etwa sieben Ringwallspeicher in der gezeigten Größe zu errichten.

Die damit 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 Tagebau in Tschechien, bei Sokolov, zeigt diese gewaltigen Erdbewegungen, die Realität sind, um Elektrizität aus Braunkohle zu erzeugen.

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

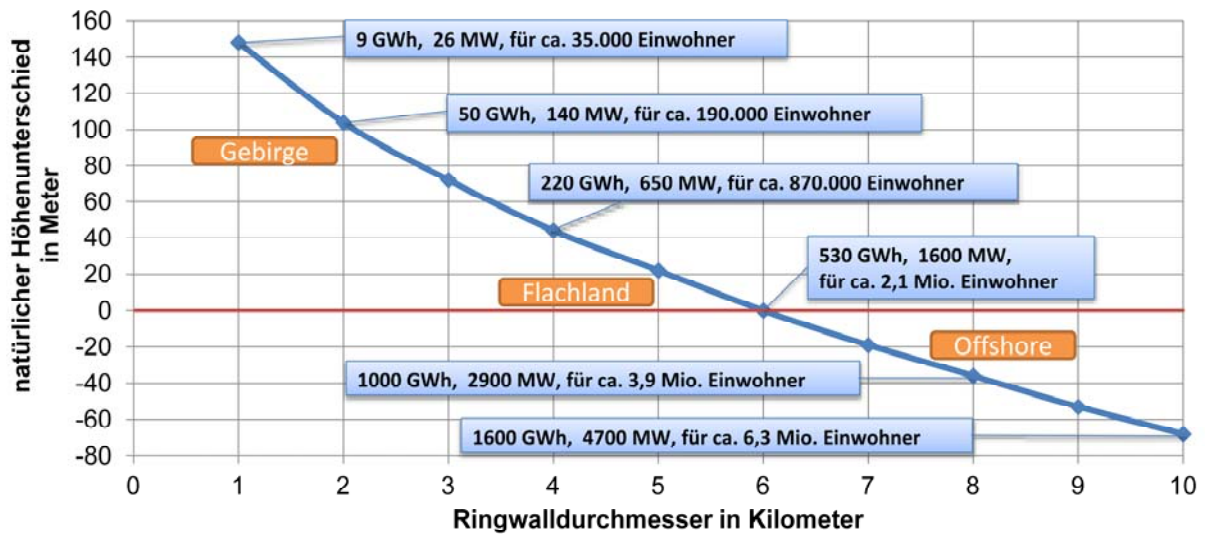
Dafür besteht auch keine Notwendigkeit.

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 m<sup>3</sup>/kWh, Flächenbedarf: ca. 0,15 bis 0,23 m<sup>2</sup>/kWh.

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

76

Dämme verschlingen das größte Bauvolumen im Fußbereich.

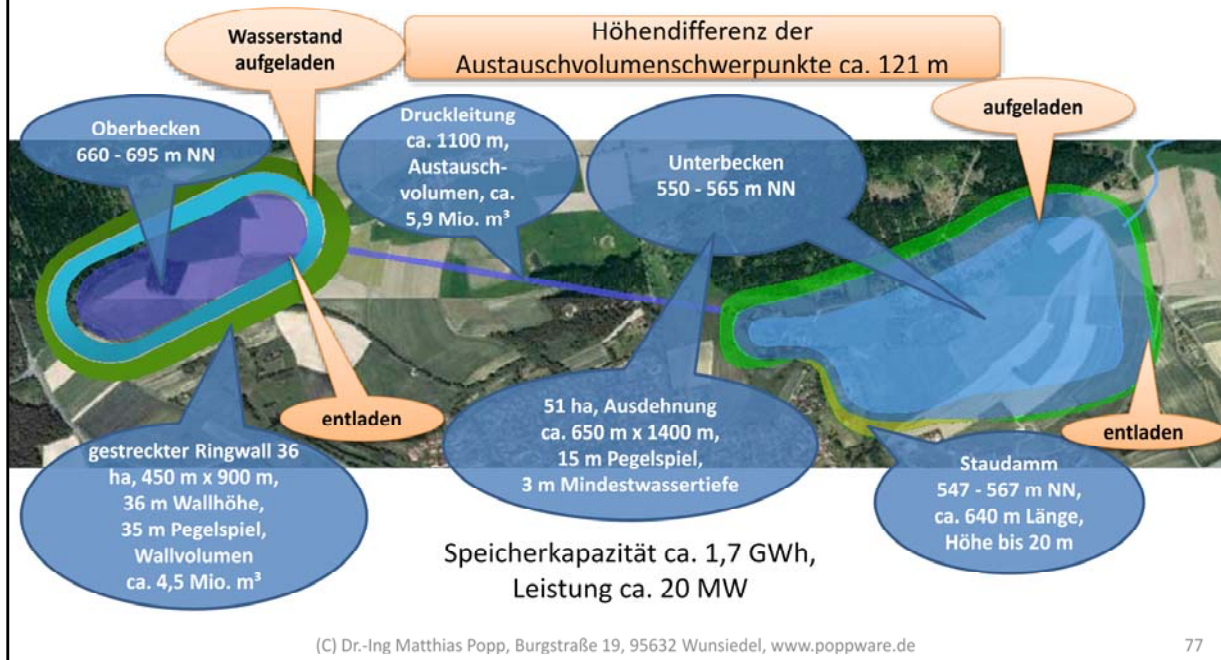
Bereits geringe Höhenunterschiede, bei denen man kaum an die Errichtung eines klassischen Pumpspeicherkraftwerks denken würde, ermöglichen die Errichtung von Ringwallspeichern.

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 überbrücken zu können.

Der spezifische Aufwand 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.

## Zum Schluss

Eine sichere, robuste und bedarfsgerechte zu 100% regenerative Stromversorgung erfordert heute in Bayern eine Windenergieanlage pro ca. 1300 Einwohner, dazu pro Einwohner ca. 20 m<sup>2</sup> Solarmodulfläche und beispielsweise ca. 40 m<sup>2</sup> 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 m<sup>2</sup> 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 Willensbildung sowie die Schaffung geeigneter rechtlicher und betriebswirtschaftlicher Rahmenbedingungen, welche die erforderlichen Investitionen in Gang bringen.

## Danke für Ihre Aufmerksamkeit



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

Die 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 auf einen massiven Ausbau von Stromnetzen verzichtet werden kann und die 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 Bundesländer, regionale Versorgungsunternehmen und Kommunen. Mit einer wohlüberlegten und bis ans Ende durchdachten ganzheitlichen Ausbaustrategie kann man sich von vornherein in eine vorteilhafte Position bringen, wenn es zukünftig darum gehen wird, mit regenerativ erzeugtem Strom den konventionellen Kraftwerkspark nicht nur zu ergänzen, sondern zu ersetzen.