

Autarkiewunsch kontra Gleichstromtrassen

Ganzheitliche Zusammenhänge zur Umsetzung einer erfolgreichen Energiewende

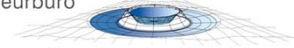
Vortrag mit Diskussion
am 5. Dezember 2014
zur

**7. Konferenz
des Bundestagsabgeordneten
Dr. Hans-Peter Friederich
im
Wahlkreis Hof - Wunsiedel**

Haus des Schützenvereins Frohsinn
Brunnenstraße 5
95191 Leupoldsgrün

MATTHIAS POPP

Ingenieurbüro



Erneuerbare Energien, Energiespeicherung
Simulationen, Software-Entwicklung

Prof. Dr.-Ing. Matthias Popp
Technische Hochschule Nürnberg
Georg-Simon-Ohm
Fakultät Maschinenbau und Versorgungstechnik
Keßlerplatz 12,
D-90489 Nürnberg
Tel. 0911/5880-1354
matthias.popp@th-nuernberg.de

Büro und privat:
Schönbrunn-Burgstraße 19
D-95632 Wunsiedel
Telefon: 09232 / 9933-10
Telefax: 09232 / 9933-40
matthias@POPPware.de
www.poppware.de

1

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

Prof. 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.



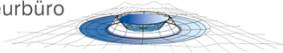
Dabei intensive Auseinandersetzung mit Fragen der Energieversorgung.

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 Erneuerbare Energien, Energiespeicherung
Ingenieurbüro 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.

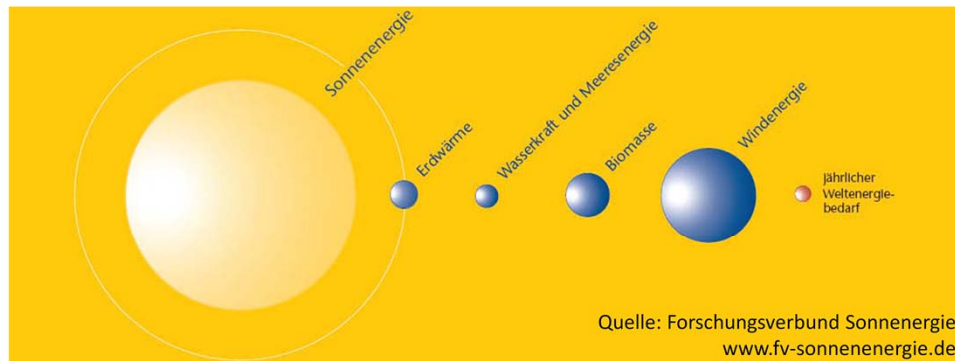
Damals gab es dazu in Deutschland weder eine Literatur noch eine Forschungseinrichtung, welche eine Antwort auf diese Frage geben konnte.

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 etwa 8000-Fache,
- das der damit angefachten Windbewegungen um das etwa 700-Fache.
- **Das Energieangebot der Sonne über Deutschland übertrifft den Energiebedarf Deutschlands um das etwa 160-Fache.**

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

3

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.

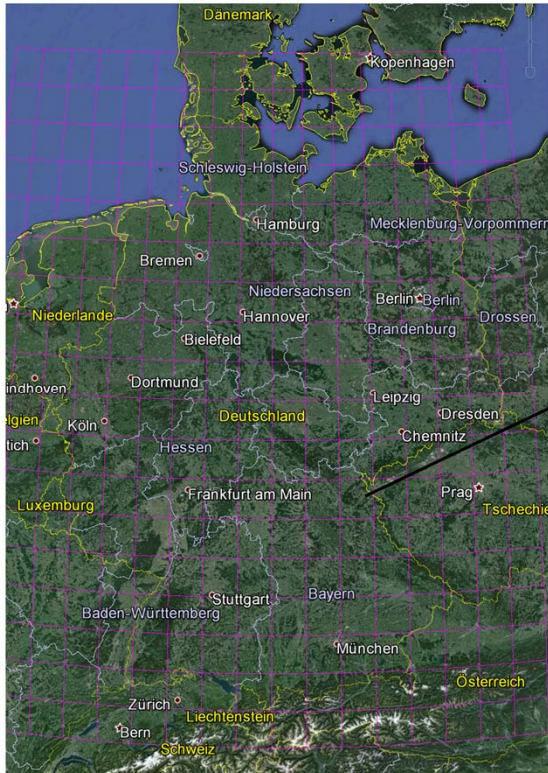
In den dicht besiedelten Ländern Europas wird man sich auf diese beiden großen Potentiale konzentrieren müssen, wenn der Stromverbrauch nachhaltig gedeckt werden soll.

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

Bezogen auf das dicht besiedelte Industrieland Deutschland übertrifft der jährliche Energieeintrag der Sonne den gesamten Primärenergieverbrauch immer noch etwa um das 160-Fache.

Bei einem Umwandlungswirkungsgrad für die Nutzbarmachung von 13% (einschließlich Übertragung und Speicherung) würden weniger als 5% der Landesfläche ausreichen, um den vollständigen Energiebedarf Deutschlands zu decken.

Das Energiewetter



Großraum Fichtelgebirge

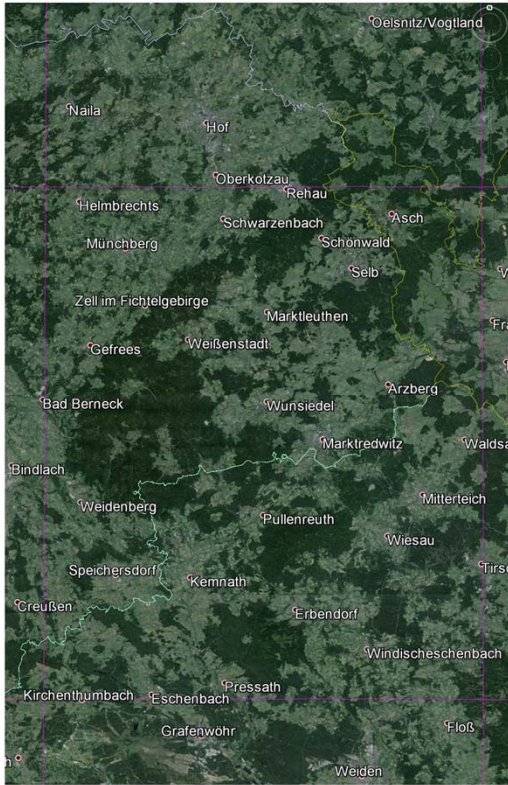
Quelle: unterlegte Karte: Google Earth, Zugriff 14.11.2014, Rastergebiete: Eigenanfertigung

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

4

Die NASA stellt mit dem MERRA Datenbanksystem eine mächtige, weltumspannende Plattform mit Wetterdaten für fein eingeteilte Rastergebiete zur Verfügung.

Daraus lassen sich für die einzelnen Regionen und für kooperierende Verbände von Regionen reale Einspeiseverläufe für Wind- und Solarenergieanlagen modellieren.



Energiewetter im Fichtelgebirge

- Der **Verbrauch** und die aus den natürlichen Energiekreisläufen zur energetischen Umwandlung **verfügbaren Potentiale** von
 - **Windenergie**
 - **Solarenergie**
 - **Wasserkraft** und
 - **Biomassezuwachs**definieren den **Ausgleichsbedarf** einer **systemverantwortlichen regenerativen Versorgung**

Quelle: unterlegte Karte: Google Earth, Zugriff 14.11.2014, Rastergebiete: Eigenanfertigung

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

5

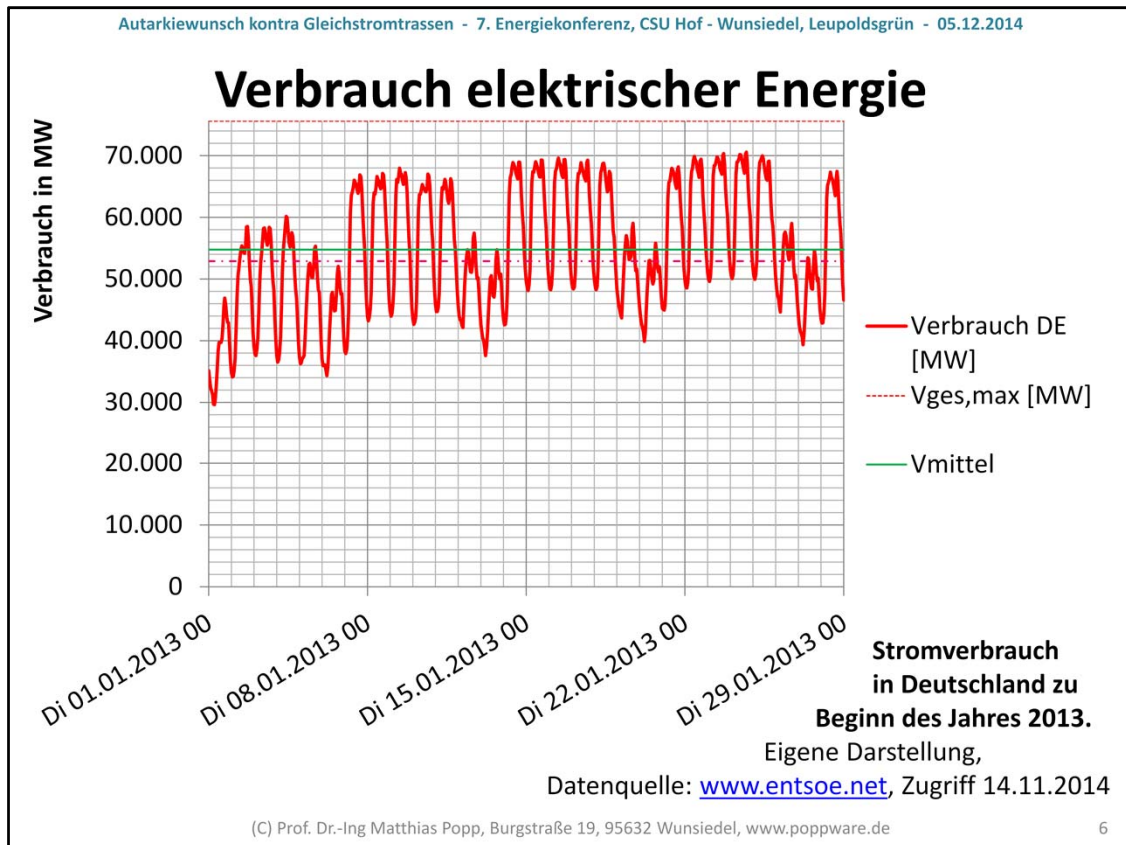
Der Landkreis Hof und der Großraum Fichtelgebirge weisen im bayernweiten Vergleich gute Energiewetterverhältnisse auf.

Neben den genannten Potentialen gibt es weitere regenerative Energiepotentiale wie

geothermische Energie, Planetenenergie die sich durch Ebbe und Flut über Gezeitenkraftwerke nutzen lässt, Wellenenergie, Fallwindkraftwerke die künstlich herbeigeführte Dichteunterschiede in trockener Luft ausnutzen, Osmosekraftwerke die natürliche Konzentrationsunterschiede nutzen und weitere in der Natur vorkommende Effekte, die prinzipiell auch energetisch genutzt werden können.

Im Vergleich zu den aufgeführten Hauptpotentialen spielen diese bisher und wahrscheinlich auch in Zukunft eine in der Regel untergeordnete Rolle, wegen eines begrenzten, nachhaltig nutzbaren Potentials und/oder hohen Umwandlungskosten im Vergleich zu den Hauptpotentialen.

In Deutschland spielen der Wind und die Sonne die entscheidende Rolle und bestimmen maßgeblich die Anforderungen, an eine Energiewende mit Systemverantwortung.



Der Verbrauch im elektrischen Stromnetz gibt vor, welche Leistung die liefernden Systeme bereitstellen müssen, damit die Stromversorgung funktioniert.

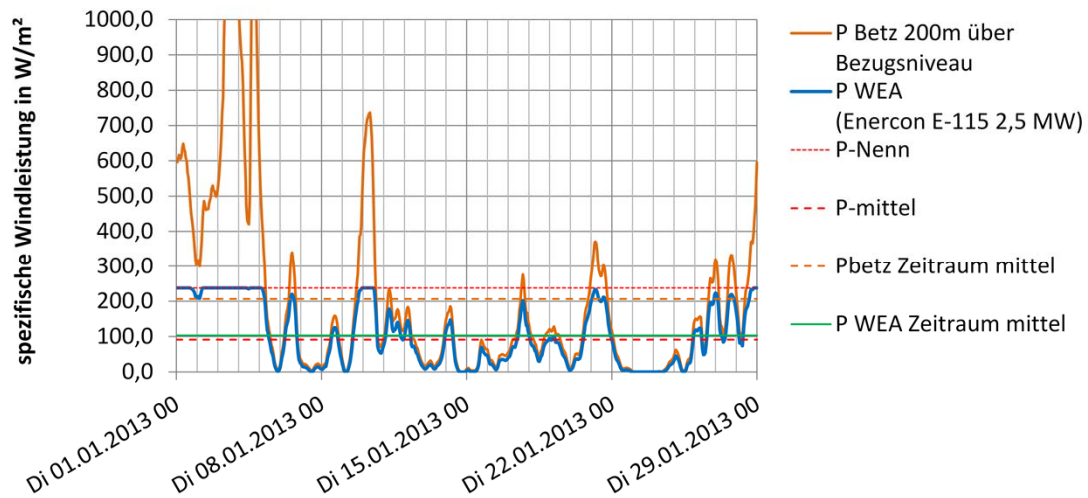
Der Verbrauch in den Stromnetzen hat einen typischen Verlauf, der vom Wochentag, der Uhrzeit, der Jahreszeit, von Ferien, Feiertagen, Wetterbedingungen, Konjunktur, besonderen Ereignissen und vielen weiteren Einflussfaktoren abhängt.

Dargestellt ist beispielhaft der Stromverbrauch in Deutschland während der ersten vier Wochen des Jahres 2013.

In den Teilregionen Deutschlands ist dieser Verlauf grundsätzlich ähnlich. Er kann je nach Verteilung von energieintensiven Betrieben, Industrie und Gewerbe gewisse regionale Unterschiede zum gesamtdeutschen Verlauf aufweisen.

Wird Verbrauch eingespart, dann würde sich zwar Energiebedarf und die absolute Höhe der benötigten Leistungen verringern, an der zeitlichen Charakteristik dieses Bedarfs würde sich allerdings grundsätzlich nichts ändern.

Verfügbare Windleistung



Windleistung im Großraum Fichtelgebirge zu Beginn des Jahres 2013. Eigene Darstellung, Datenquelle: <http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/daac-bin/DataHoldings.pl>, Zugriff 14.11.2014

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

7

Dargestellt ist in einem bräunlichen Farbton das theoretische Maximum der Windleistung, welches bei den real aufgetretenen Windgeschwindigkeiten aus den bewegten Luftmassen hätte abgegriffen werden können. Die physikalischen Grundlagen dafür wurden durch einen Physiker namens Betz in des 20-er Jahren des letzten Jahrhunderts beschrieben.

Reale Windenergieanlagen haben eine begrenzte Generatorleistung und erreichen diese theoretische Maximalleistung mit gewissen Wirkungsgradverlusten nur in einem bestimmten Windgeschwindigkeitsbereich. Diese ist beispielhaft für eine Enercon Anlage in blauer Farbe dargestellt. Bei höheren Windgeschwindigkeiten kann das theoretisch verfügbare Leistungspotential nur bis zur maximalen Generatorleistung, der Nennleistung der Windenergieanlage, abgegriffen werden.

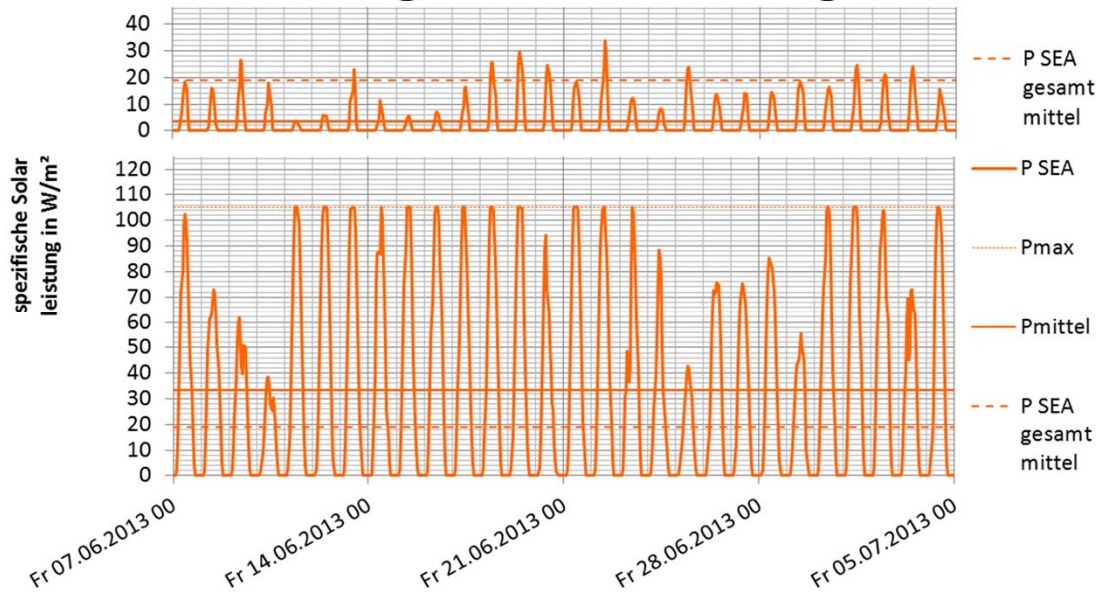
Dargestellt ist die Leistung in Watt pro Quadratmeter Fläche, welche von den Rotorblättern von Windenergieanlagen überstrichen wird.

Durch Aufstellung einer entsprechenden Anzahl von Windenergieanlagen kann der Windenergieertrag so eingerichtet werden, dass er im zeitlichen Mittel den Verbrauch decken oder auch übertreffen könnte.

Man erkennt, dass die verfügbare Windleistung im zeitlichen Verlauf keinen Zusammenhang mit der verbrauchten Leistung aufweist.

Man erkennt auch, dass es Zeitphasen gibt, in denen die abgegebene Leistung gegen Null geht und andere Zeitphasen, in denen die Nennleistung erreicht wird.

Verfügbare Solarleistung



Solarleistung im Großraum Fichtelgebirge zu Beginn und Mitte des Jahres 2013. Eigene Darstellung, Datenquelle: <http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/daac-bin/DataHoldings.pl>, Zugriff 14.11.2014

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

8

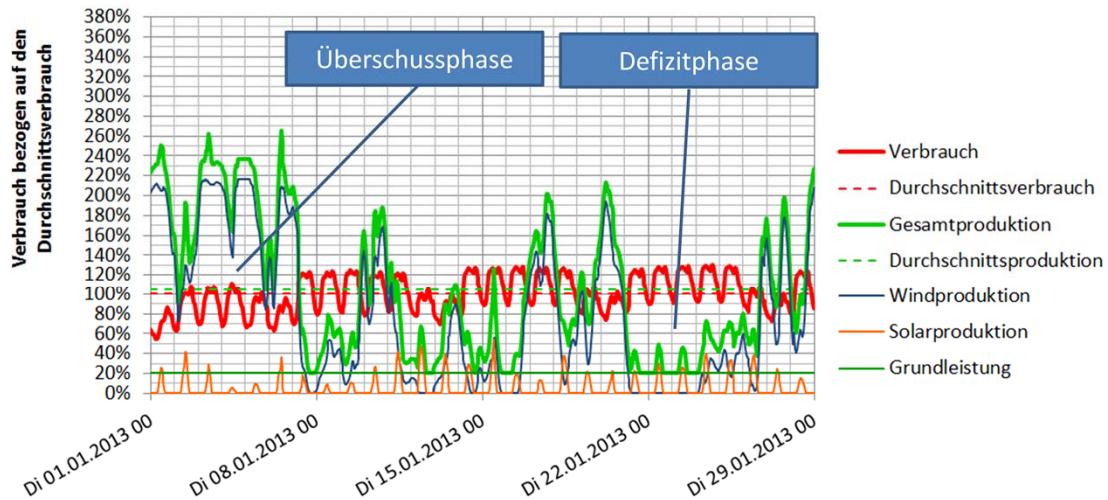
Dargestellt ist die von Solarenergieanlagen im regionalen Mittel abrufbare Leistung in Watt pro Quadratmeter Modulfläche.

Solarenergie steht nur während des Tages, abhängig von der Bewölkung, in Leistungspulsen entsprechend dem Sonnenstand zur Verfügung. Im Sommer ist die verfügbare Leistung und die Sonnenscheindauer erheblich höher als im Winter.

Um einen bestimmten Anteil der Stromversorgung mit Photovoltaikanlagen bereitstellen zu können, ist, abgestimmt auf den Verbrauch, über die Region verteilt, eine entsprechende Solarmodulfläche aufzubauen.

Auch die verfügbare elektrische Leistung aus umgewandelter Solarstrahlung stimmt nicht ansatzweise mit den Verbrauchsanforderungen überein.

Regenerative Versorgung



Eigenversorgung mit Wind, Sonne und Biomassegrundleistung im Großraum Fichtelgebirge zu Beginn des Jahres 2013. Eigene Darstellung.

Annahmen: Durchschnittlicher Jahresverbrauch = 100%, 120% Erzeugungsvermögen, davon 70% aus Wind, 30% aus Sonne und 20% konstante Grundleistung aus z.B. Biomasse

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

9

Dargestellt ist die Situation einer regenerativen Eigenversorgung im Großraum Fichtelgebirge unter den Energiewetterbedingungen zu Anfang des Jahres 2013. Angenommen ist ein günstiger Mix aus Wind- und Solarenergieanlagen und eine permanent verfügbare Grundversorgungsleistung aus beispielsweise Biomasse, Geothermik, Müllverbrennung, Klärgas, Deponiegas und/oder Laufwasserkraftanlagen. Im Jahresdurchschnitt könnten mit diesem angenommenen Anlagenpark zur nachhaltig rein regenerativen Energieumwandlung 20% mehr Energie umgewandelt werden, als tatsächlich verbraucht wird.

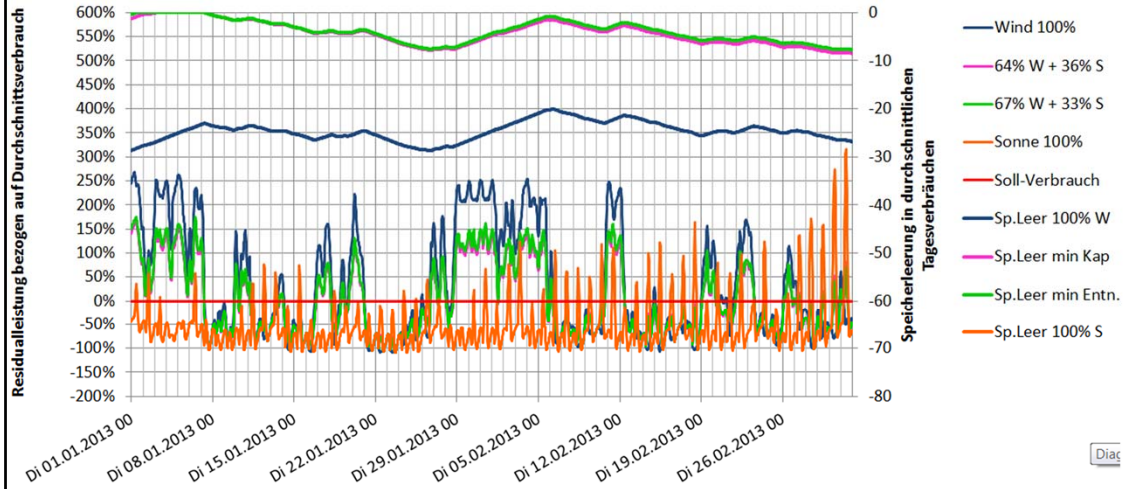
Alle dargestellten Leistungskurven sind bezogen auf den Jahresdurchschnittsverbrauch dieser Region (=100%).

Man erkennt, dass die in grün dargestellte Gesamterzeugung (Summe aus Grundleistung, Solarleistung und Windleistung) entweder höher oder niedriger als der in rot dargestellte Verbrauch ausfällt.

Ein Elektrizitätsversorgung funktioniert aber nur, wenn die bereitgestellte Leistung exakt dem Verbrauch folgt.

Wenn Überschüsse nicht einfach durch Abschalten verfügbarer Erzeugungsleistung verhindert werden sollen und Defizite mit Energie aus regenerativen Quellen ausgeglichen werden sollen, dann kann das nur über Speicher erfolgen, die auf diese Anforderungen ausgelegt sind, die uns das Energiewetter vorgibt.

Energiemix und Speicherbedarf



Speicherbeanspruchung in Abhängigkeit der regenerativen Erzeugungsstruktur im Großraum Fichtelgebirge zu Beginn des Jahres 2013. Eigene Darstellung.

Annahmen: Durchschnittlicher Jahresverbrauch = 100%, bezogen darauf 120% Erzeugungsvermögen, davon 20% konstante Grundleistung, der Rest kommt aus Wind, Sonne oder einem daraus gebildeten vorteilhaften Mix, Speicherwirkungsgrad 75% mit einer maximalen Speicheraufladeleistung von 130% der im Durchschnitt verbrauchten Leistung

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

10

Dargestellt ist bezüglich der linken Leistungsskala die Abweichung der verfügbaren Erzeugungsleistung vom Verbrauch (Residualleistung) bei einer regenerativen Eigenversorgung des Gebietes im Großraum Fichtelgebirge unter den Energiewetterbedingungen zu Anfang des Jahres 2013. Das betrifft die vier unteren Zeitverläufe. Diese setzen sich zusammen aus einer angenommenen Grundversorgungsleistung, die 20% des durchschnittlichen Verbrauchs abdecken könnte und

1. (blau) 100% Wind,
2. (goldgelb) 100% Sonne,
3. (lila) 64% Wind und 36% Sonne - dieser Erzeugungsmix erfordert, aufsummiert über das gesamte Jahr, ein Minimum an Speicherentnahmen,
4. (grün) 67% Wind und 33% Sonne – dieser Erzeugungsmix ermöglicht einen Speicher mit der kleinsten Kapazität.

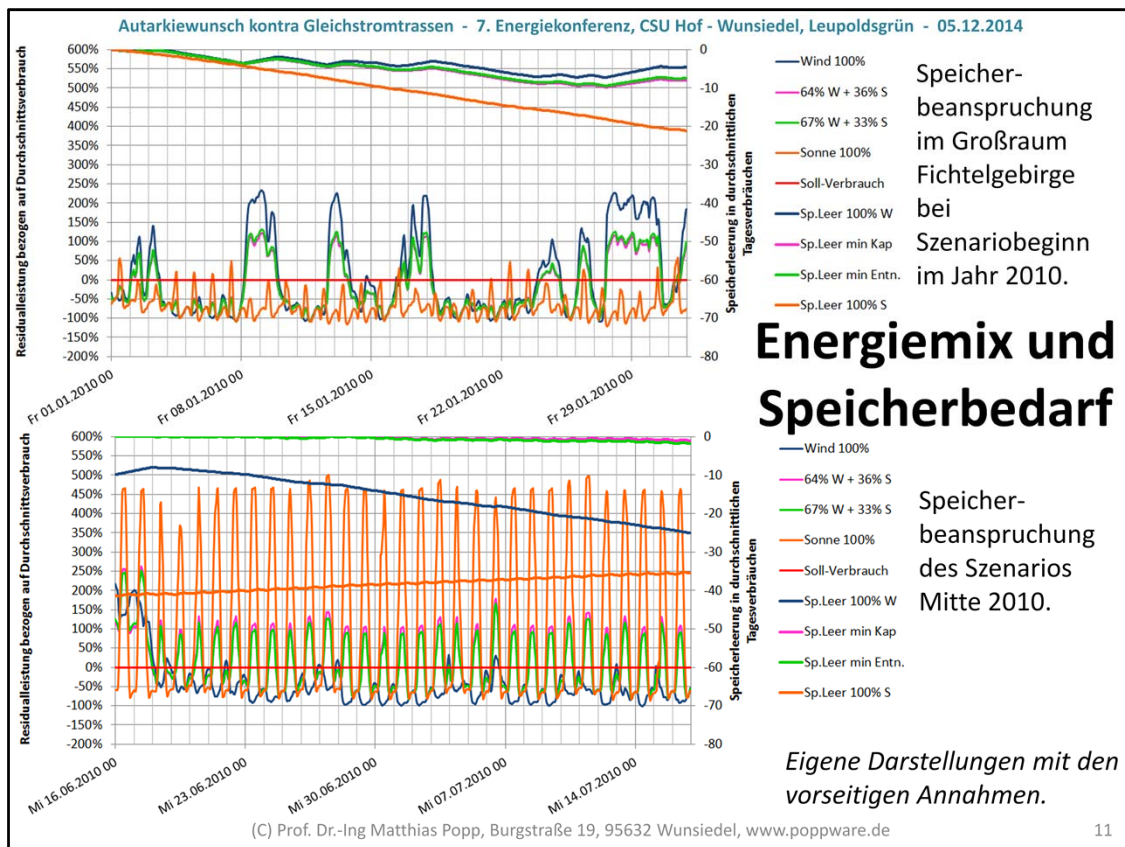
Die oberen Kurven beziehen sich auf die rechte Skala und zeigen die Speicherleerung in durchschnittlichen Tagesverbräuchen an.

Mit einer Tagesladung könnte der durchschnittliche Verbrauch eines vollständigen Tages gedeckt werden.

Als Speicher wurden im vorliegenden Fall Pump- oder Ringwallspeicher mit 75% Wirkungsgrad angenommen, die in der Lage wären, Überschussleistungen aufzunehmen, die bis zu 130% den durchschnittlichen Verbrauch übersteigen können. Noch höhere Erzeugungsleistungen würden im angenommenen Szenario abgeregelt.

Langzeituntersuchungen und weitergehende Analysen zeigen, dass Speichersysteme bei einer auf Deutschland begrenzten Energiewende bei einer günstigen Erzeugungsstruktur eine Kapazität von etwa 10 bis 14 Tagesladungen erfordern. Bei einer sich bis heute nicht abzeichnenden europaweiten regenerativen Versorgungsstruktur und einer leistungsstarken kontinentalen Vernetzung ließe sich der regionale Speicherbedarf auf etwa vier bis sechs Tagesladungen reduzieren.

Damit sind die Kapazitätsanforderungen an Speichersysteme einer zukünftigen, zu 100% regenerativen Stromversorgung beschrieben.



Die Solarenergie steht gegenüber den Verbrauchsanforderungen nach elektrischer Energie so ungünstig zur Verfügung, dass mit der bei diesem Szenario angenommenen Versorgungsstruktur keine dauerhafte Bedarfsdeckung möglich wäre. Trotz eines unterstellten Produktionsvermögens, das im Untersuchungszeitraum 20% mehr regenerative Energie in Elektrizität umwandeln könnte, als verbraucht wurde, wären in diesem Szenario die Speicherentnahmen über die Zeit größer als die Aufladungen.

Im Winter ist wegen der langen Nächte, der niedrigen Sonnenstände, häufiger Nebelwetterlagen und Schneebedeckung das Solarenergieangebot sehr niedrig. Im Sommer steht im Gegensatz dazu ein hohes Überangebot zur Verfügung. Eine reine Solarstromversorgung würde daher sehr große Speicher erfordern, welche die Überschüsse des Sommers in den Winter übertragen kann. Zudem müssten die Speicher im Sommer mit sehr hohen Aufladeleistungen ausgestattet sein, damit sich diese Überschüsse überhaupt speichern ließen.

Im angenommenen Szenario mit 100% Solarproduktionsvermögen würden im Sommer Überschussleistungen bis zum etwa 5-fachen des durchschnittlichen Verbrauchs auftreten. Auf Deutschland hochgerechnet liegt der durchschnittliche Verbrauch bei einer Leistung von etwa 60 Gigawatt, der Jahresspitzenverbrauch bei etwa 90 Gigawatt. Zur Deckung dieses Verbrauchs steht ein entsprechender Kraftwerkspark zur Verfügung, der diese Leistungen bereitstellen kann. Zur Speicherung der solaren Leistungsspitzen müsste ein zusätzliches Speichersystem mit einer Aufladeleistung in vier- bis fünffacher Höhe von etwa 300 Gigawatt errichtet werden. In den untersuchten, hier gezeigten Szenarien, wurde allerdings nur eine maximale Aufladeleistung von 130% des Durchschnittsverbrauchs angenommen. Hochgerechnet auf Deutschland wäre das eine erforderliche Speichersystem mit einer Aufladeleistung von knapp 80 Gigawatt.

Ein vorteilhafter Mix des Produktionsvermögens aus Wind- und Solarenergieanlagen ermöglicht es, den Bedarf an Speicherkapazität und Speicheraufladeleistung für eine regenerative Versorgung niedrig zu halten.

Die dargestellten Szenarien mit vorteilhaftem Mix der regenerativen Energieumwandlungsanlagen für Wind und Sonne minimiert sowohl den Kapazitäts- als auch den Aufladeleistungsbedarf der notwendigen Speichersysteme und minimiert zugleich den Investitionsbedarf und den Landverbrauch.

Wechselwirkungen zwischen Stromnetzausbau, Speichertechnologie und Bedarf an Energieumwandlungsanlagen einer regenerativen Stromversorgung Deutschlands

(C) Prof. Dr.-Ing Matthias Popp, Technische Hochschule Nürnberg

12

Die vorausgegangenen Folien befassten sich mit dem Aufbau regional weitgehend autarker regenerativer Versorgungsstrukturen, die ohne Höchstspannungstrassen für Dreh- oder Wechselstrom auskommen würden. Sie haben gezeigt, dass die regenerative Verfügbarkeit elektrischer Leistung praktisch nie dem Bedarf entspricht und regional trotz im Durchschnitt vorhandener Überkapazität entweder zu viel oder zu wenig elektrische Leistung bereitsteht, die über entsprechend dimensionierte Speicher ausgeglichen werden könnte.

Diese Über- und Unterdeckungen treten jedoch in den einzelnen Teilregionen eines Landes oder eines Kontinents, entsprechend dem Durchzug von Hoch- und Tiefdruckgebieten, zu unterschiedlichen Zeiten auf. Deshalb liegt es nahe, diese regionalen Überschüsse und Defizite über leistungsstarke Stromleitungen zwischen den Teilregionen auszugleichen. Stromtransport zum direkten Verbrauch verursacht deutlich weniger Verluste als die Speicherung für einen zeitversetzten Verbrauch. Leistungsfähige Übertragungsnetze sind nach derzeitigem Stand der Technik gegenüber der Errichtung von damit eingesparten Speichersystemen und ansonsten zusätzlich erforderlichen regenerativen Energieumwandlungsanlagen sehr kostengünstig.

Die nachfolgend angewandte **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 müssten, 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.

Gezeigt wird ein optimales, jedoch auf Deutschland beschränktes Zielsystem, bei dem jede Teilregion entsprechend ihres Energieverbrauchs auch ihren Anteil zur regenerativen Energieumwandlung beiträgt. Dies führt zu einem insgesamt minimalen Gesamtaufwand für das regenerative Energieversorgungssystem und einer robusten Versorgungsstruktur, die nicht zwangsweise von stets einsatzbereiten Fernübertragungsleitungen abhängt. Die Wertschöpfung und die Systemverantwortung bleibt in der Region. Die Auswirkung leistungsstarker Leitungstrassen auf den regional erforderlichen Aufwand zur regenerativen Stromversorgung soll damit aufgezeigt werden.

Umgang mit regionalen Überschüssen und Defiziten

Verwendung

regionaler Erzeugungsüberschüsse

1. Regionaler Eigenverbrauch
2. Export zum direkten Verbrauch in Defizitgebiete
3. Aufladung der eigenen regionalen Speichersysteme
4. Aufladung von Speichersystemen in entfernten Gebieten
5. Abregelung nicht nutzbarer Überproduktion (Erzeugungsmanagement)

Deckung

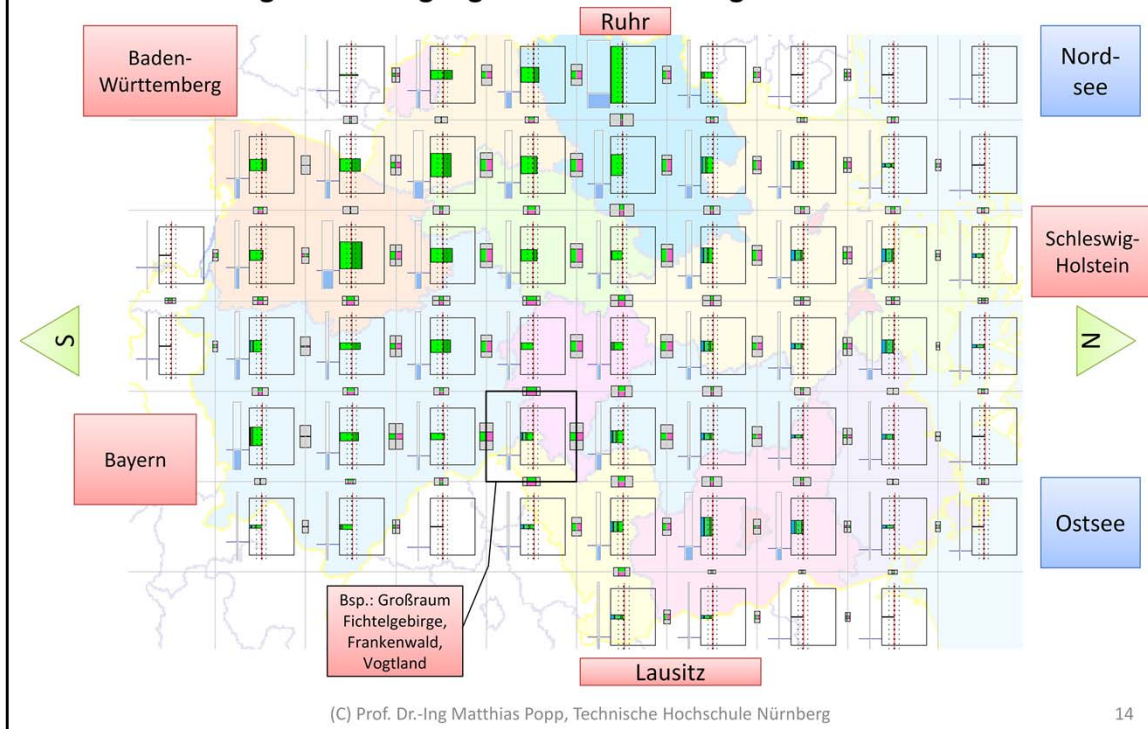
regionaler Erzeugungsdefizite

1. Vollständige Nutzung der unzureichenden Eigenproduktion
2. Import von Erzeugungsüberschüssen aus entfernten Gebieten
3. Entnahme aus den eigenen Speichersystemen
4. Entnahme aus Speichersystemen entfernter Gebiete
5. Lastabwurf (Lastmanagement)

Die aufgezeigte Strategie im Umgang mit regionalen Überschuss- und Defizitsituationen kommt dabei zur Anwendung.

Zeitschrittanalyse

Darstellung der Versorgungssituation einer Region im Gesamtkontext



(C) Prof. Dr.-Ing Matthias Popp, Technische Hochschule Nürnberg

14

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.

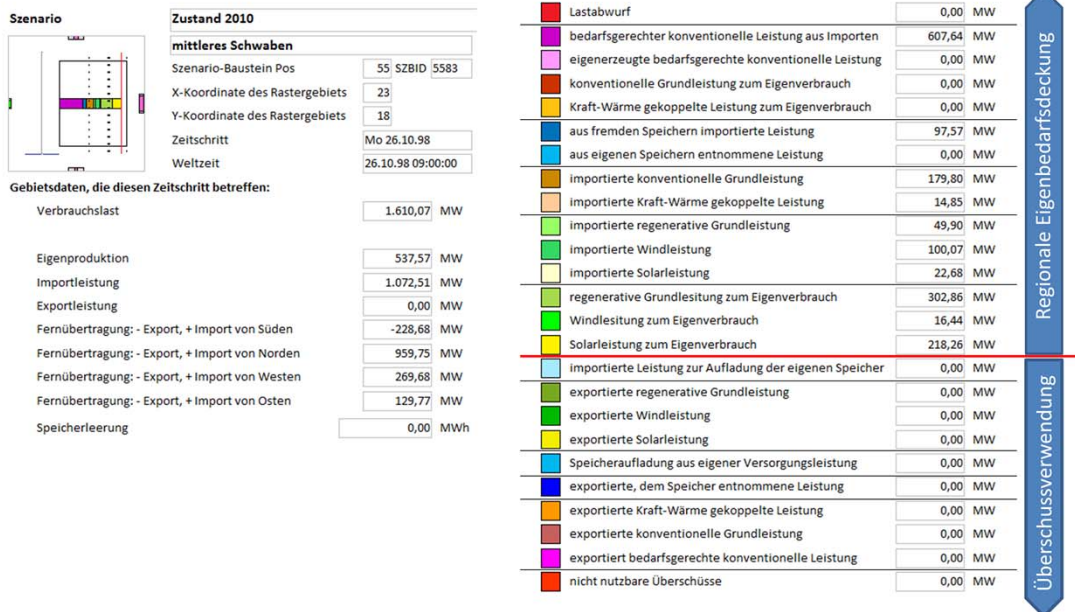
Für das modellierte Szenario erkennt man die jeweils stattfindenden Leistungsumsätze nach Energieträgern in den Teilregionen, den Ladezustand der dort angenommenen oder existierenden Speichersysteme, die überregionalen Stromflüsse zwischen den Teilregionen und den jeweiligen Stromverbrauch.

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



(C) Prof. Dr.-Ing Matthias Popp, Technische Hochschule Nürnberg

15

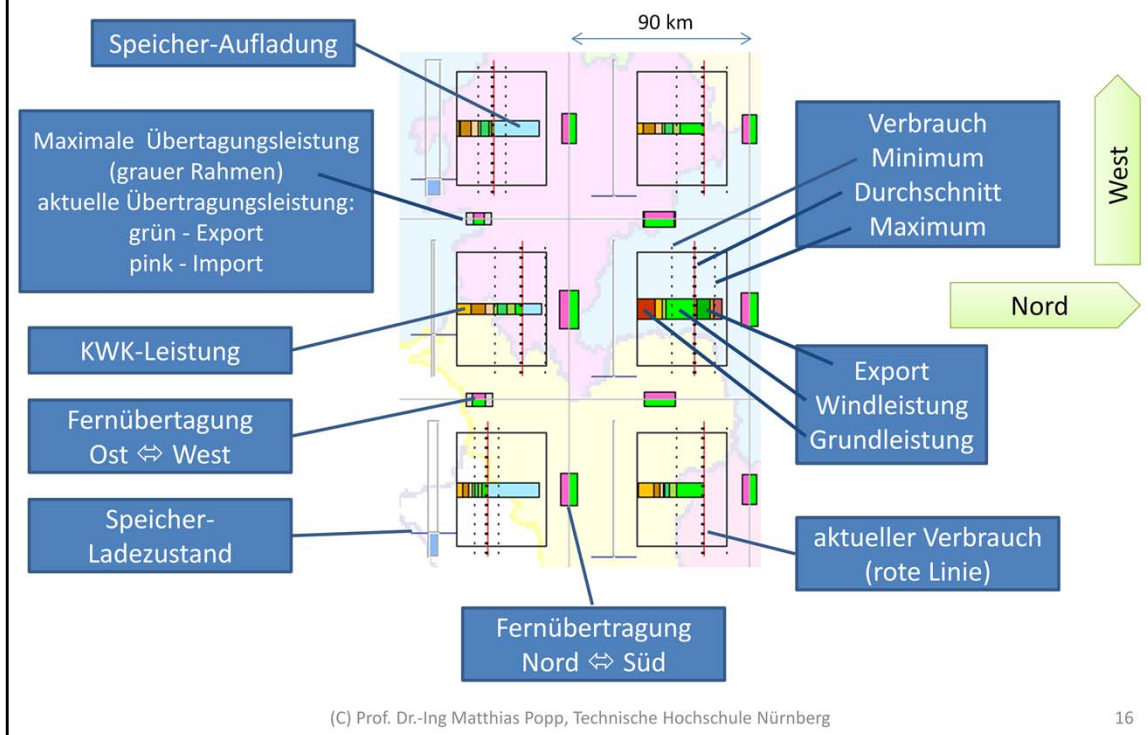
Im Detail kann aus der Zeitschrittanalyse für jede berücksichtigte Region und für jeden Zeitschritt entnommen werden, wie die dort vorherrschende Stromnachfrage erfüllt wird, wie Überschüsse und Defizite ausgeglichen werden und welcher Leistungsaustausch mit den Nachbarregionen erfolgt.

Die Analysen eignen sich sowohl für konkret vorhandene Versorgungsstrukturen als auch zur Untersuchung zukünftiger Ausbauszenarien.

Zeitschritt für Zeitschritt wird dabei untersucht, wie die real aufgetretenen Energiewetterbedingungen in den Teilregionen die Versorgungssituation geprägt hätte.

Indem das reale Energiewetter vieler Jahre durchgespielt wird, werden auch kritische Versorgungssituationen erkennbar, mit denen auch in Zukunft gerechnet werden kann.

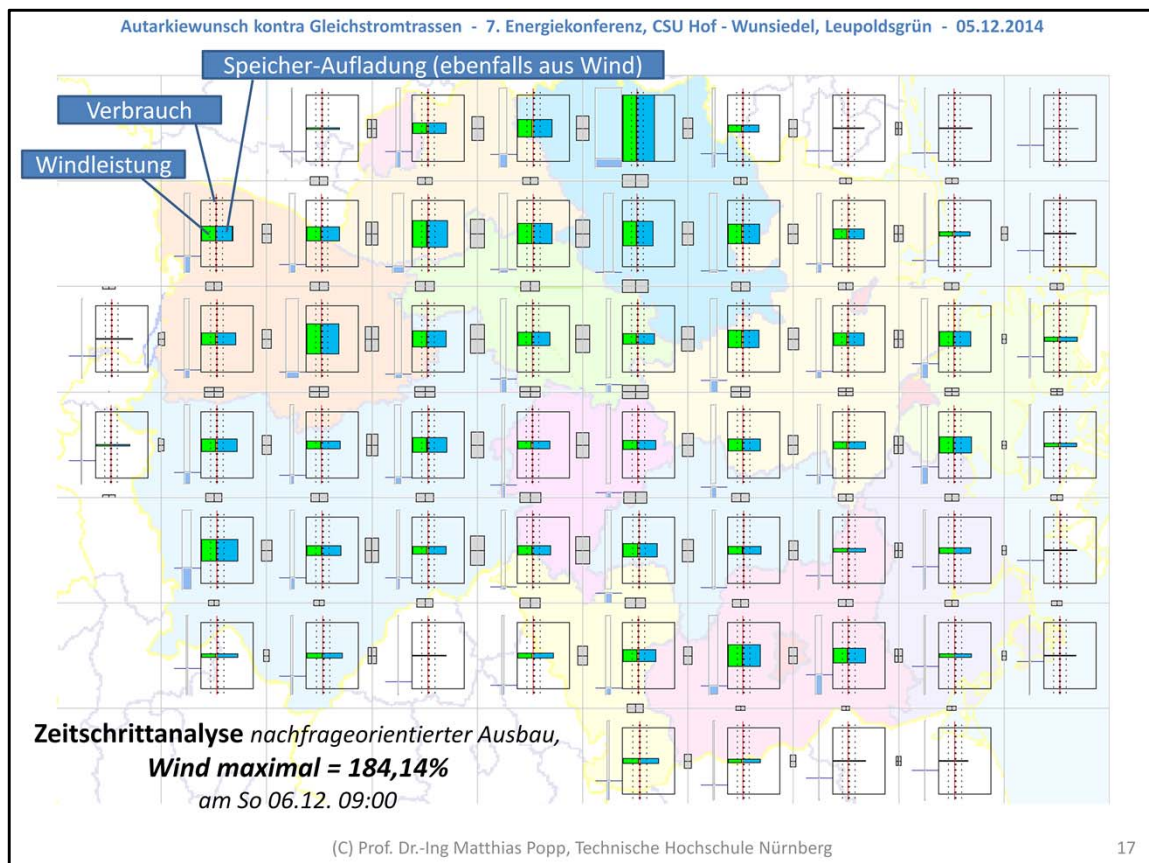
Zeitschrittanalyse - Symbolik



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.

Im Nachfolgenden werden eine Reihe von Extremwettersituationen aufgezeigt, für von einer systemverantwortlichen regenerativen Stromversorgung beherrscht werden sollten.

Unterstellt ist dabei eine ideal verteilte, mit vorteilhaftem Mix ausgelegte, bedarfsgerechte und rein regenerative Versorgungsstruktur.



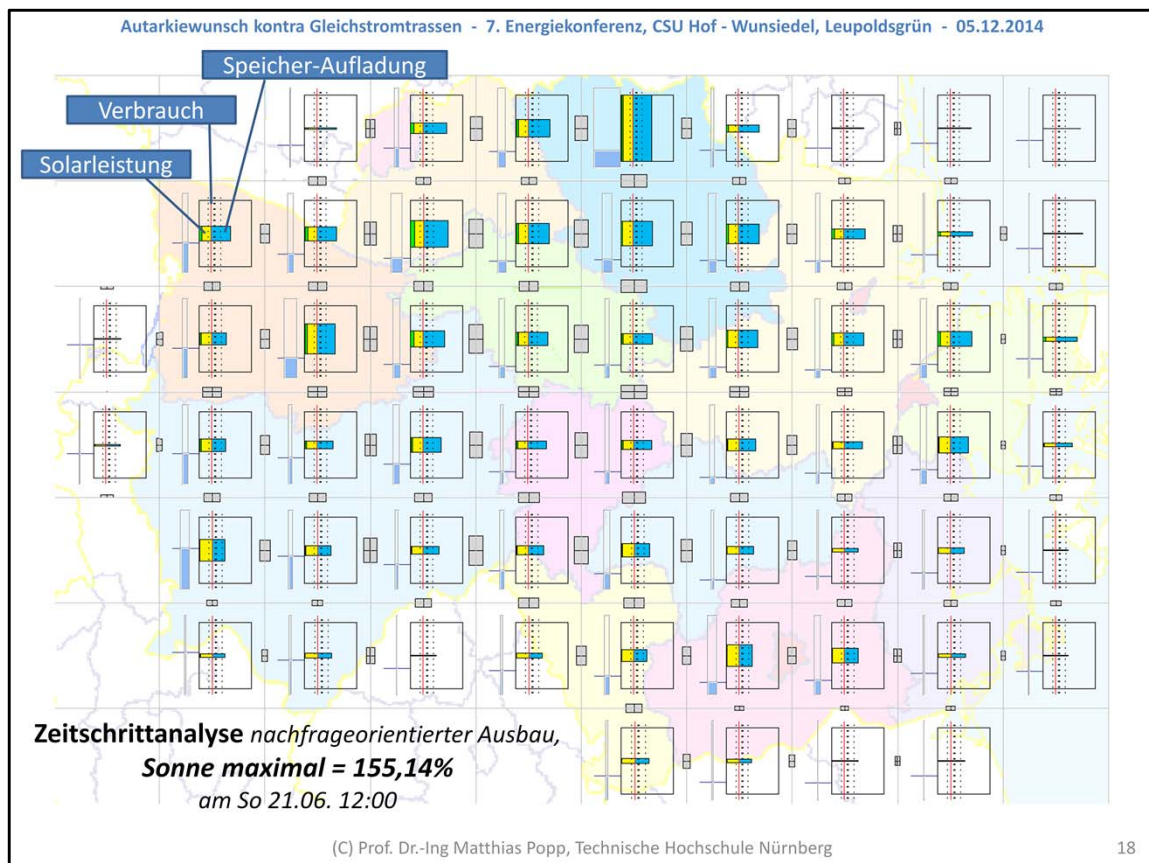
Extremwertanalysen gestatten es, gezielt Versorgungssituationen herauszufiltern, die besondere Systemanforderungen hervorrufen. Diese müssen jeweils beherrscht werden, wenn das Gesamtsystem in einem dauerhaft stabilen Zustand gehalten werden soll.

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.

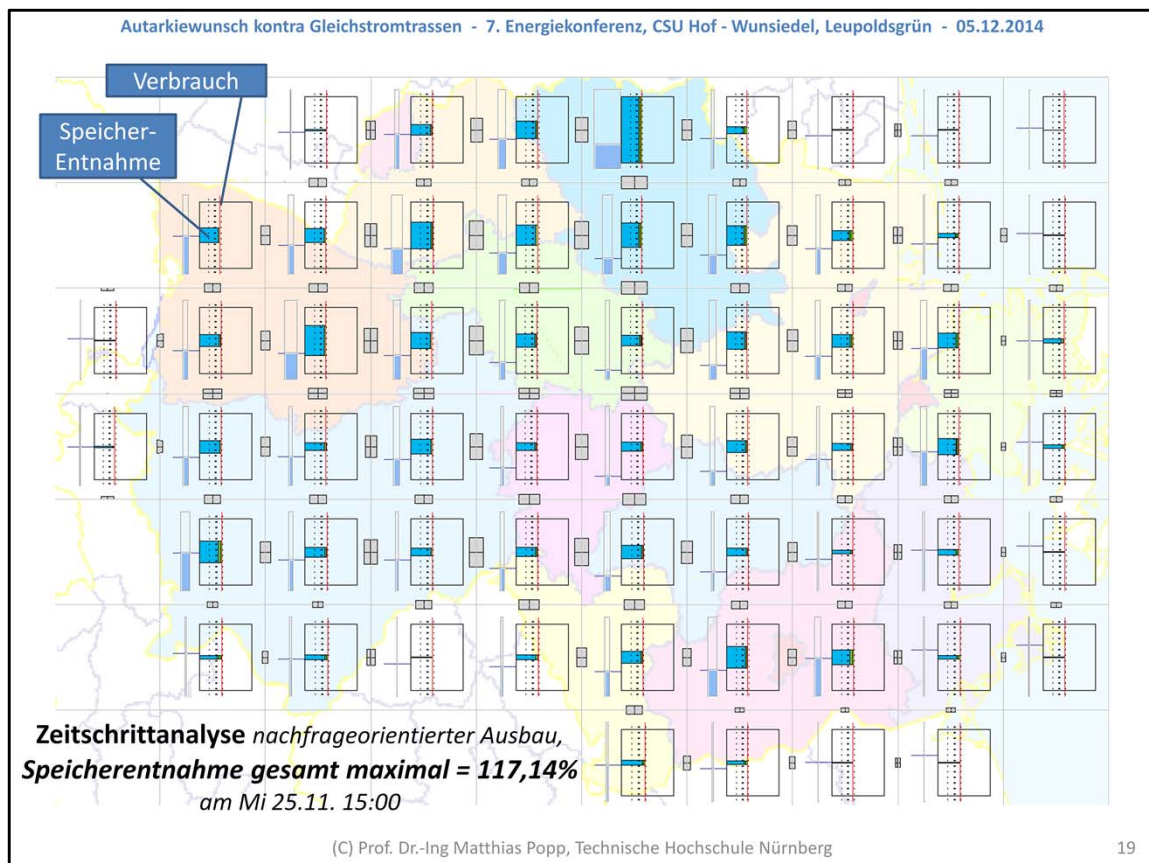
Weiter wird von einem sowohl in Nord-Süd als auch in Ost-West Richtung optimal ausgebauten Übertragungsnetz ausgegangen, mit dem temporär auftretende Überschüsse und Defizite ausgeglichen werden können.

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.

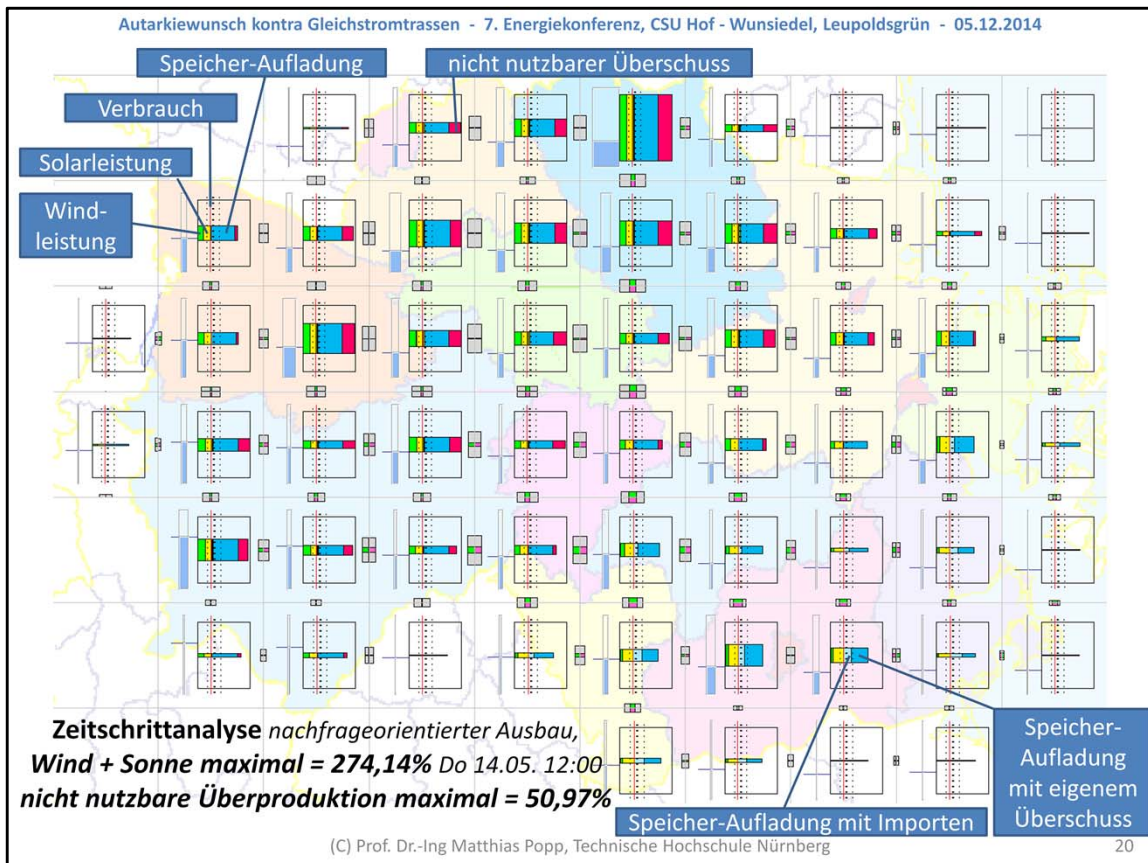
Wegen landesweiter Überschüsse findet auch hier keine großräumige Leistungsübertragung statt.



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.

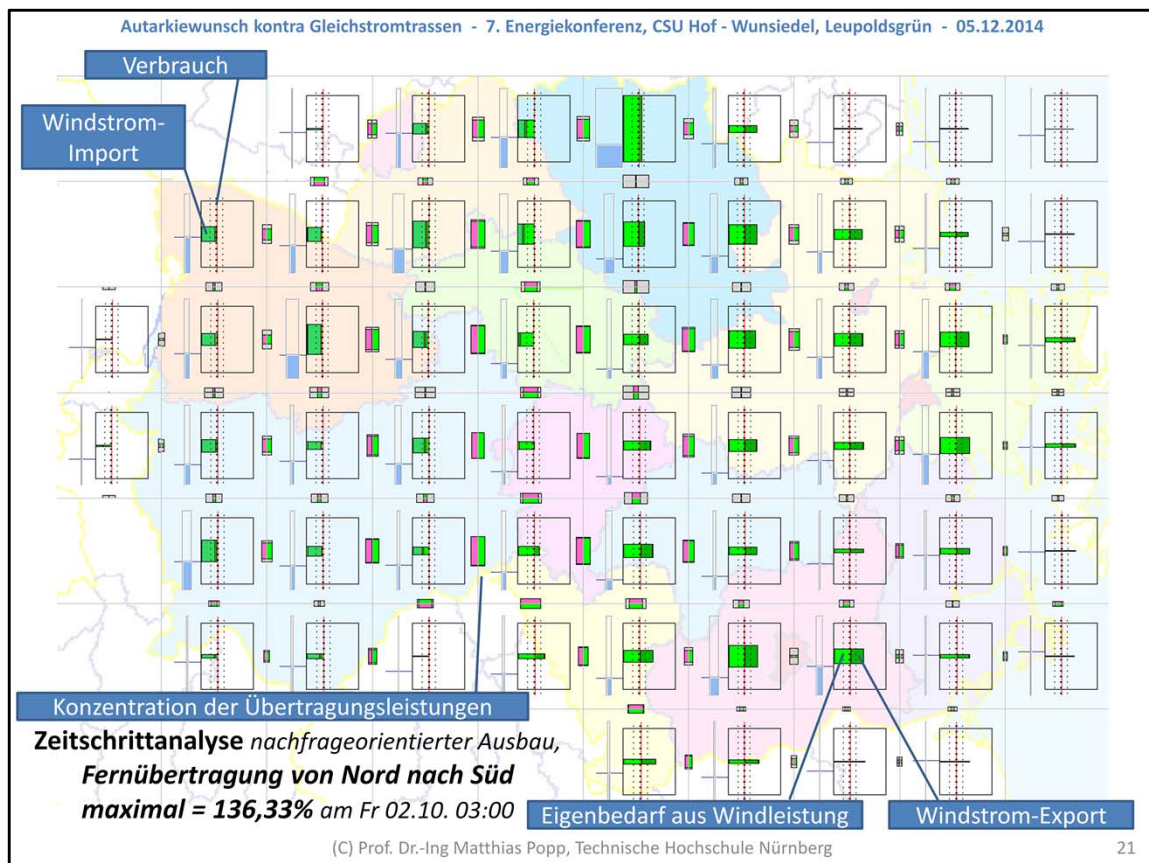
Dies würde auf ein weniger optimal ausgelegtes Versorgungssystem hindeuten.



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 Aufladeleistung der Speichersysteme nicht überschritten werden.

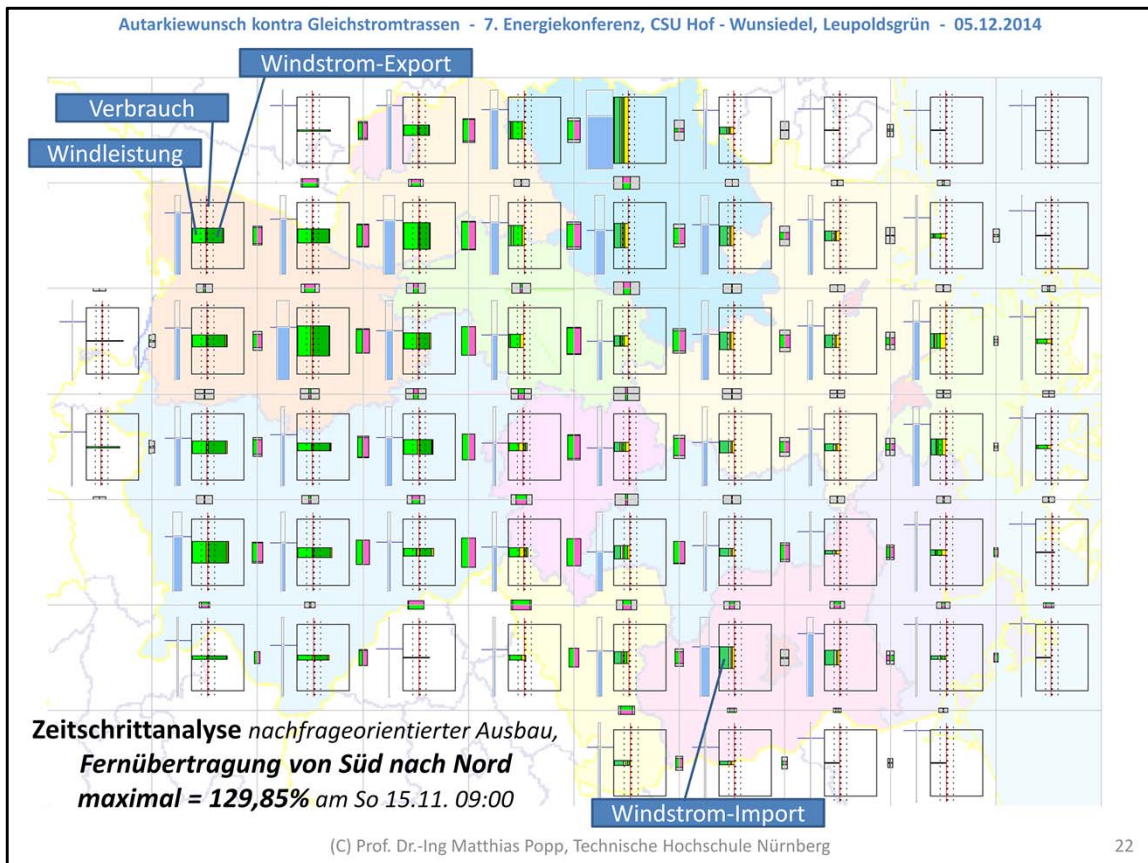


Es gibt aber auch Situationen, in denen in bestimmten Landesteilen besonders gute Erzeugungsbedingungen vorliegen, während andere Landesteile Defizite aufweisen.

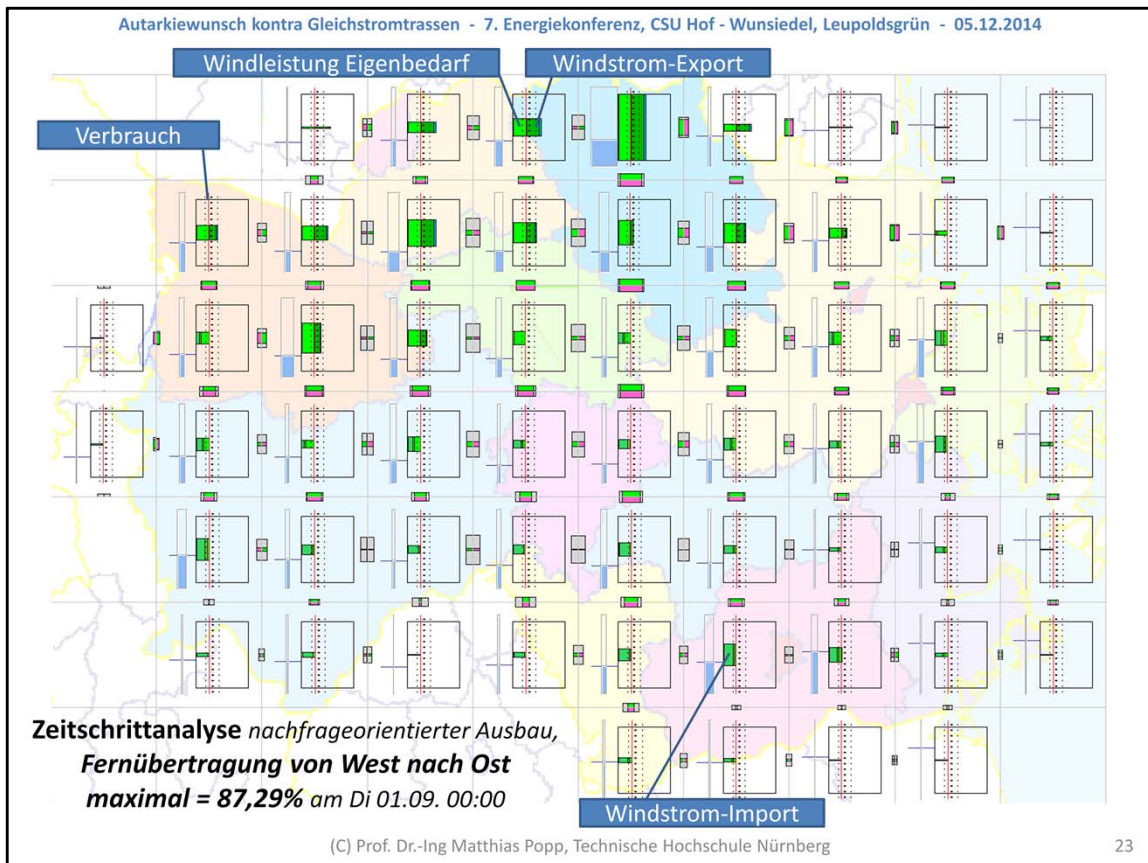
Dann würden sich erhebliche Fernübertragungsleistungen einstellen, die diese Unterschiede ausgleichen.

Wegen der Einschnürung Deutschlands auf dem Breitengrad des Fichtelgebirges und der Mittelbereichslage konzentrieren sich hier im nationalen Szenario die auftretenden Übertragungsleistungen in Nord↔Süd Richtung.

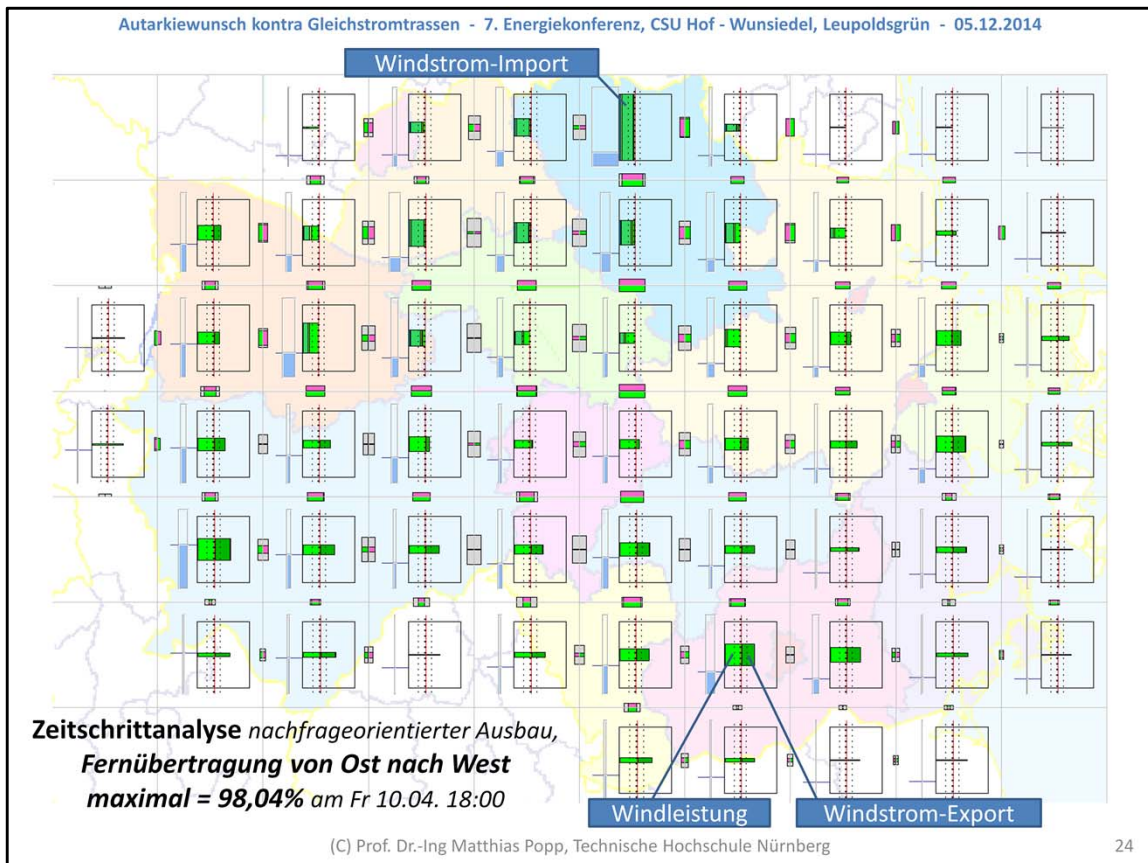
Je nach Lage der Hoch- und Tiefdruckgebiete kommt es dabei zu erheblichen Übertragungsleistungen vom Norden in den Süden, ...



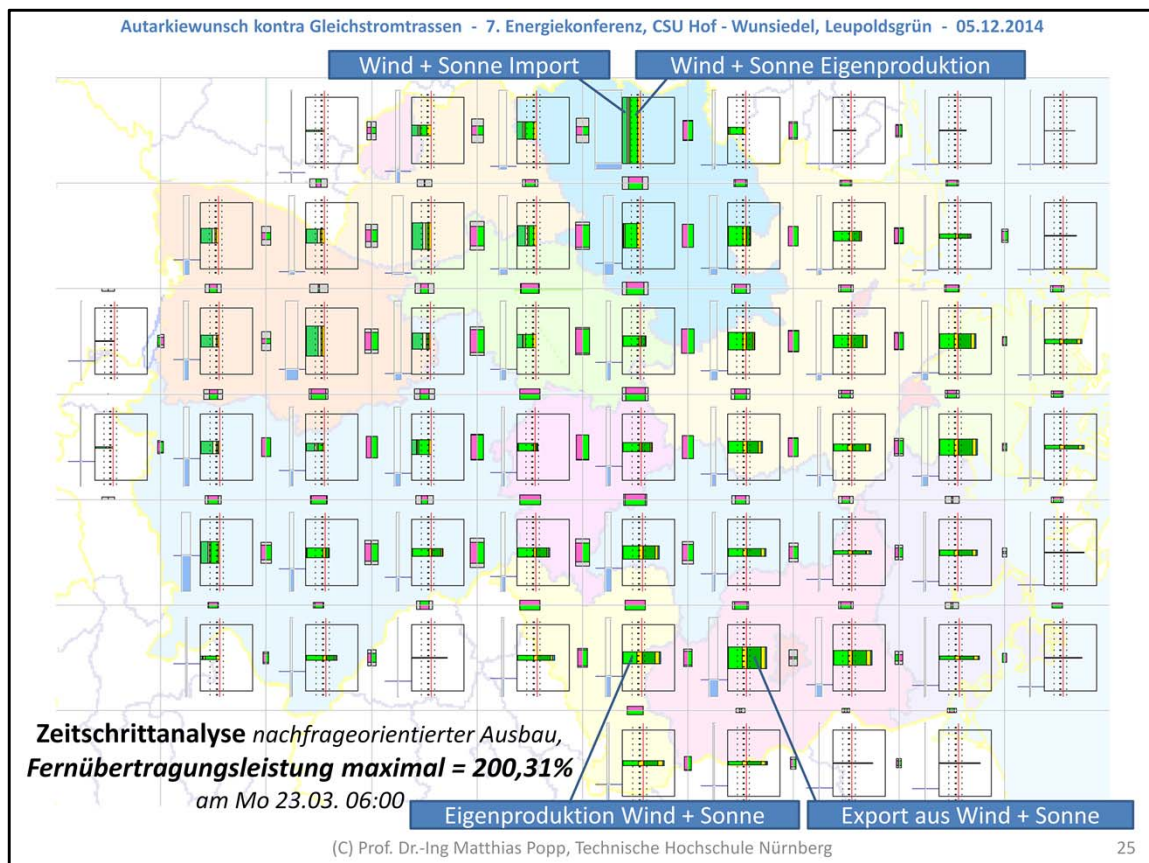
..., vom Süden in den Norden, ...



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



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



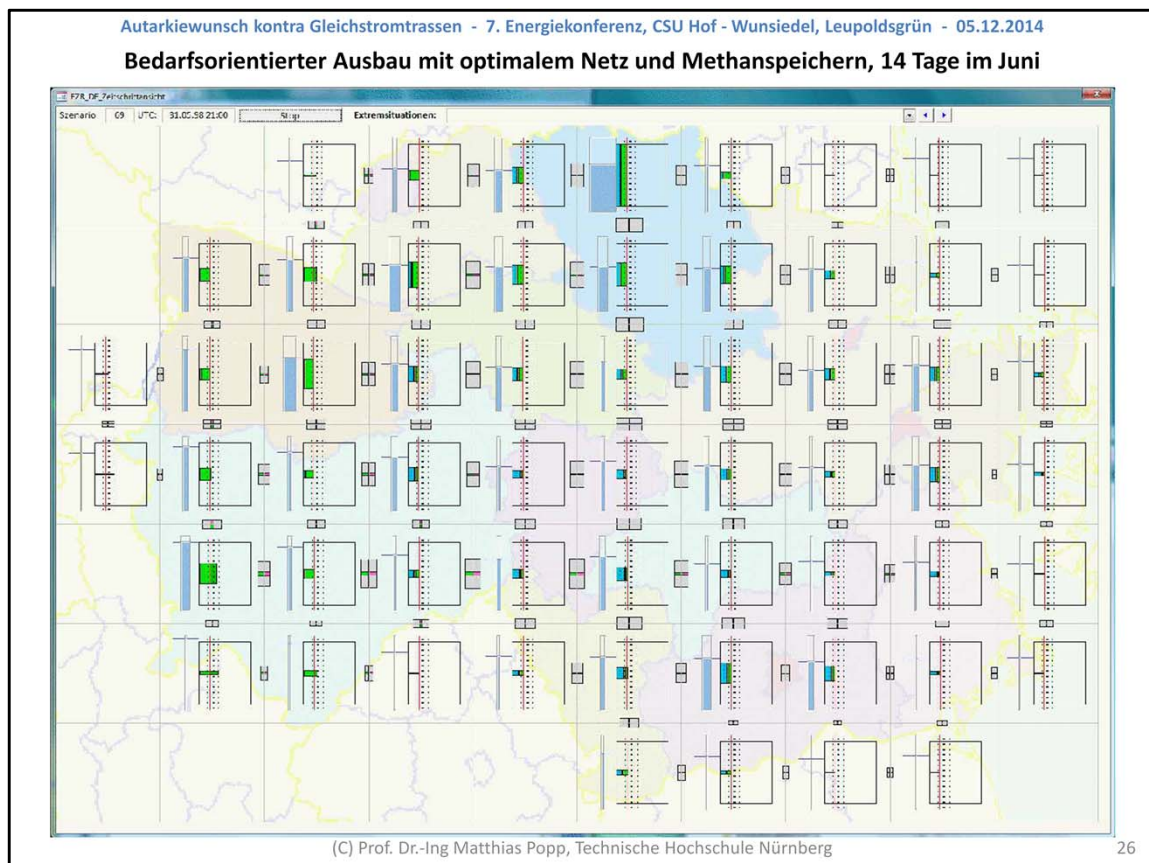
... oder vom Nordosten in den Südwesten oder umgekehrt.

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 in der übernächsten Folie die zugehörigen Speicherladungskurven eingeführt.



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 BMUs, 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:

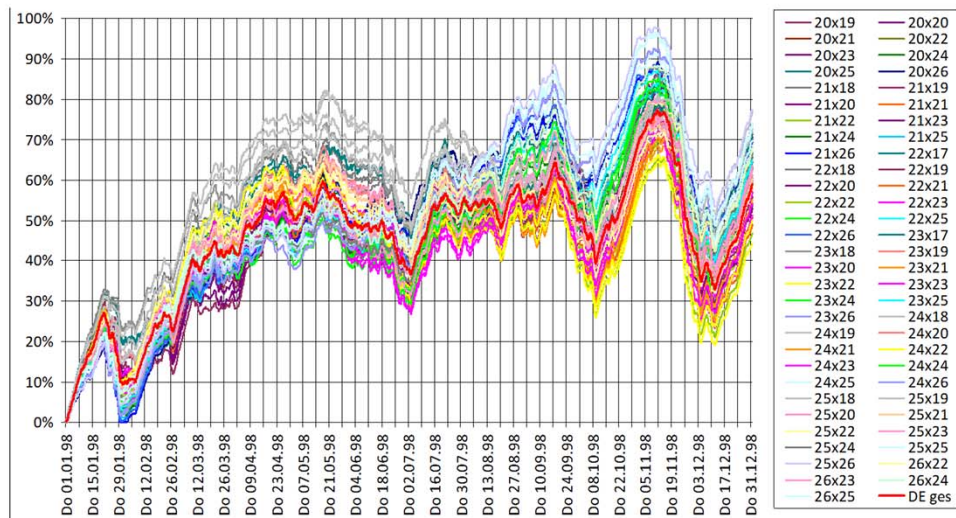
Der Ausbau erfolgt bevorzugt dort, wo die höchsten Energieerträge erwartet werden können. Solarenergie wird verstärkt im Süden, Windenergie verstärkt im Norden und im Meer vor der Küste ausgebaut. Das bedingt ganz besonders den Ausbau leistungsstarker Stromnetze um die dadurch wesentlich stärker hervorgerufenen regionalen Unterschiede auszugleichen.

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. Das erfordert noch mehr und zudem die Landesgrenzen überschreitenden Leitungsausbau. Eine regionale Eigenverantwortung für die Energieversorgung spielt in diesen Szenarien keine Rolle.

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, Technische Hochschule Nürnberg

27

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 mit einem vorteilhaften Mix von Wind und Sonne hervorgerufen würde.

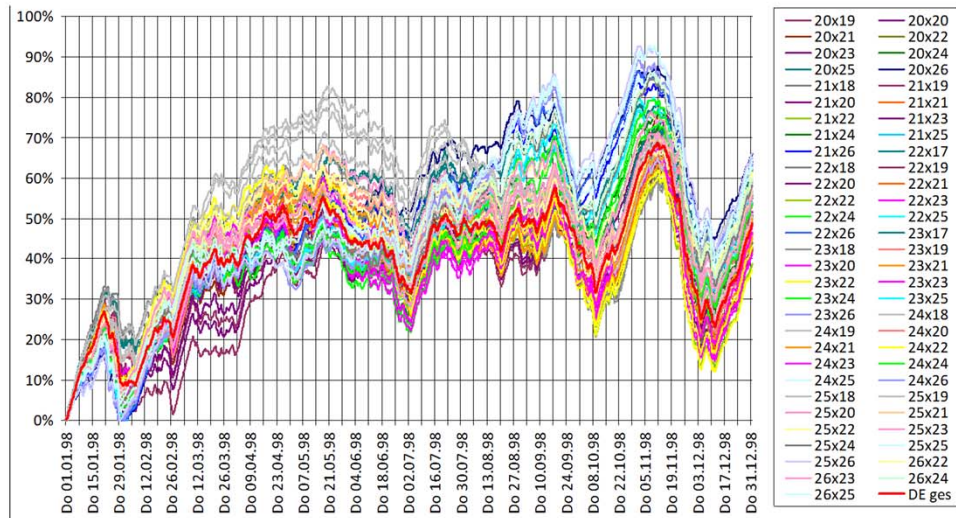
Eine wichtige Erkenntnis dieser Analyse mit realen Wetterdaten, ist die sehr ähnliche Volatilität des Energiewetters in allen Gebieten Deutschlands.

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, Technische Hochschule Nürnberg

28

Die Speicherbewirtschaftung würde sich kaum verändern.

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

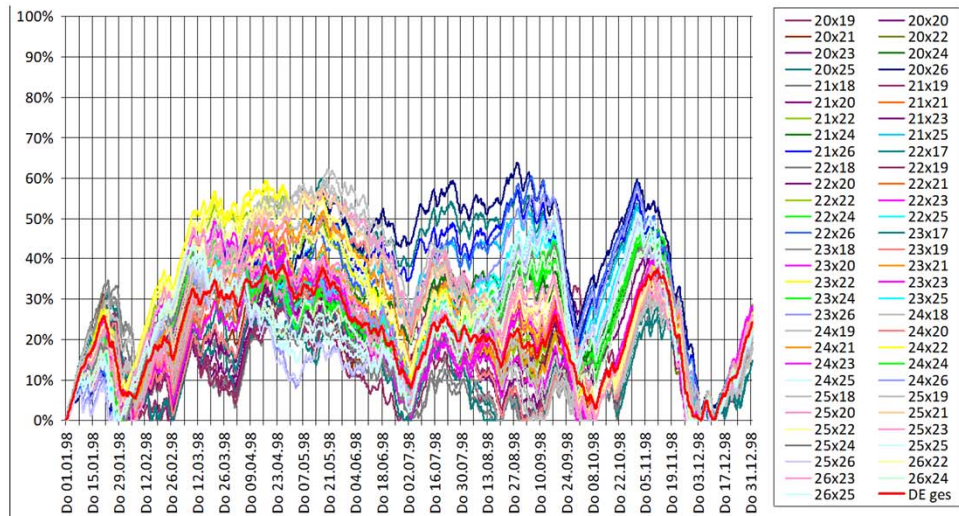
Bei gleichem Erzeugungspark wie vorher, wurden Stromnetze angenommen, die maximal 50% der durchschnittlichen Nachfrage übertragen könnten. Überregionaler Netzausbau müsste dafür im Vergleich zu heute kaum erfolgen.

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)**

(C) Prof. Dr.-Ing Matthias Popp, Technische Hochschule Nürnberg

29

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.

30% Erzeugungsreserve bedeutet ein regeneratives Energieumwandlungsvermögen, das im Langzeitdurchschnitt 30% mehr Elektrizität aus natürlichen Energiekreisläufen umwandeln könnte, als verbraucht wird.

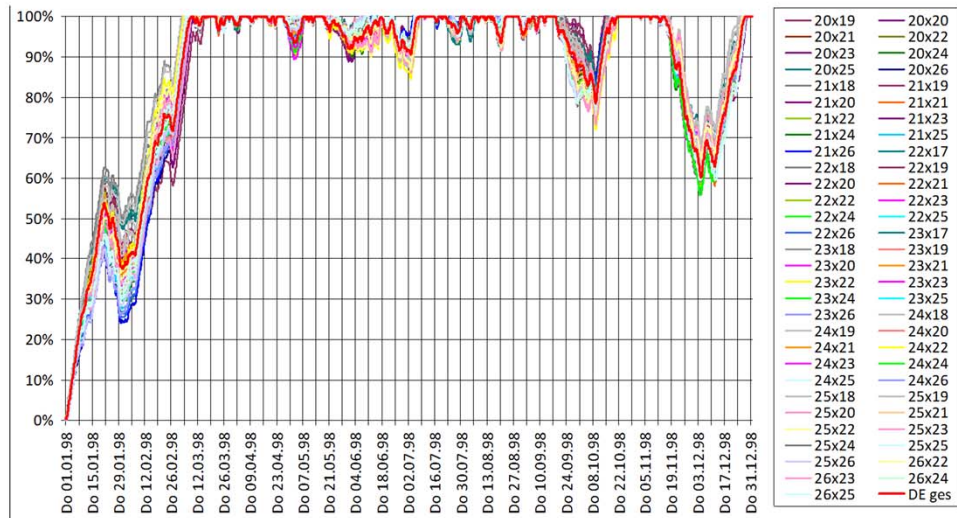
Nicht großräumig leistungsstark vernetzte Regionen müssten zum Ausgleich von Speicherverlusten mehr Wind und Solarenergieanlagen aufstellen und dazu größere Speichersysteme bereithalten, um die einhergehenden größeren Verluste ausgleichen zu können, als Regionen, die sich großräumig leistungsstark vernetzen.

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

Kritisch sind Situationen, in denen die Speichervorräte aufgebraucht sind. Dann müsste in Stadtteilen und Ortschaften zeitweise der Strom abgeschaltet werden, um einen Blackout (Zusammenbruch), des Gesamtversorgungssystems zu vermeiden.

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, Technische Hochschule Nürnberg

30

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.

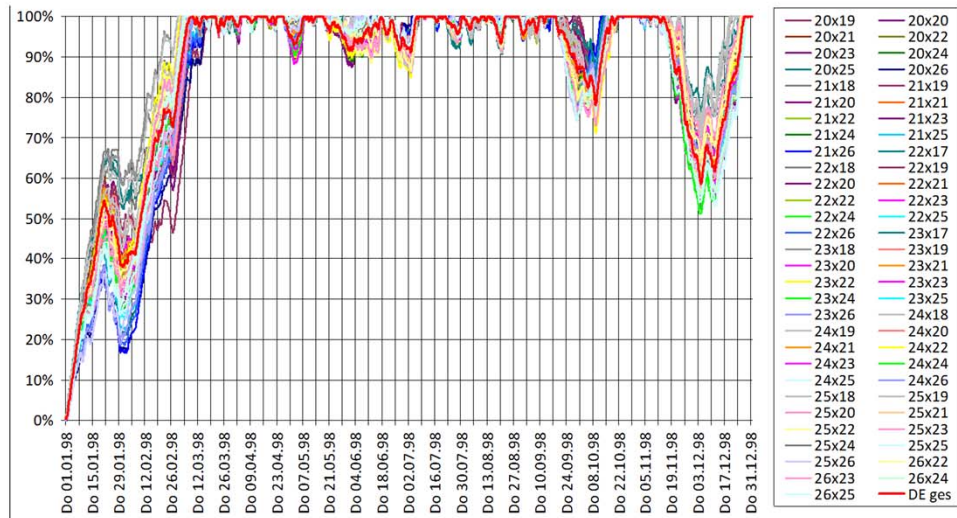
Die Speicherleerungen zur Überbrückung der Flauten würden aber in der gleichen Größenordnung anfallen.

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.

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**

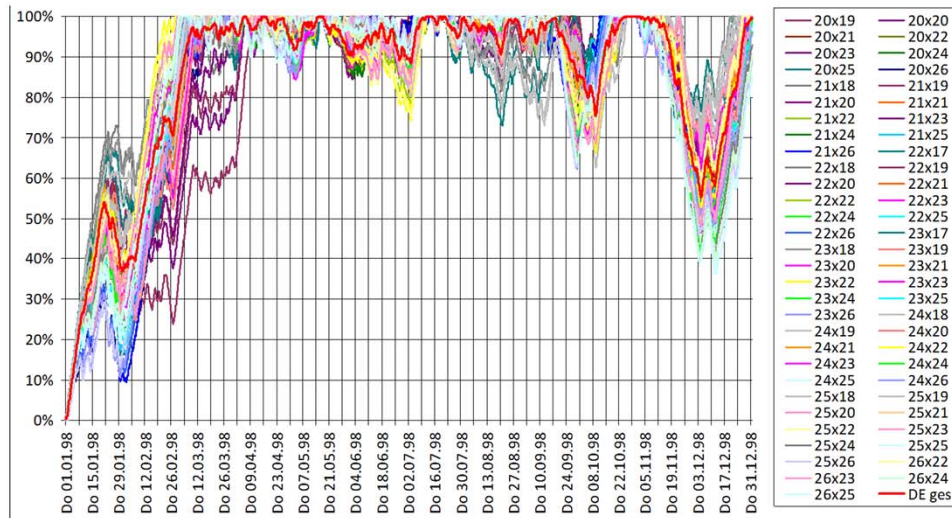
(C) Prof. Dr.-Ing Matthias Popp, Technische Hochschule Nürnberg

31

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 76% Wirkungsgrad, 50% Wind-Benutzungsgrad, **keine Fernübertragungsleistung (nur Theorie, da Leitungsnetz existiert)**

(C) Prof. Dr.-Ing Matthias Popp, Technische Hochschule Nürnberg

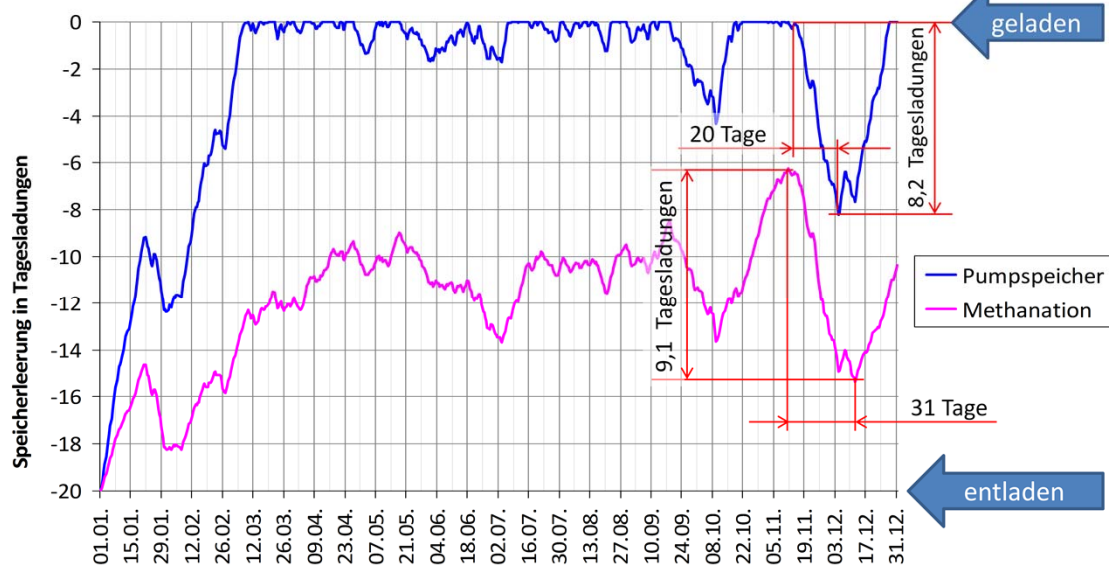
32

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

Je geringer die Wirkungsgradverluste der verwendeten Speichersysteme gegenüber den Leitungsverlusten bei großräumiger leistungsstarker Fernübertragung ausfallen, desto weniger reduziert der Leitungsba den regionalen Bedarf an Energieumwandlungsanlagen.

Der großräumige, möglichst länderübergreifende leistungsstarke Leitungsba reduziert aber erheblich die erforderliche Leistungsfähigkeit und Kapazität der regional für eine sichere Versorgung vorzuhaltenden Speichersysteme.

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, Technische Hochschule Nürnberg

33

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 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.

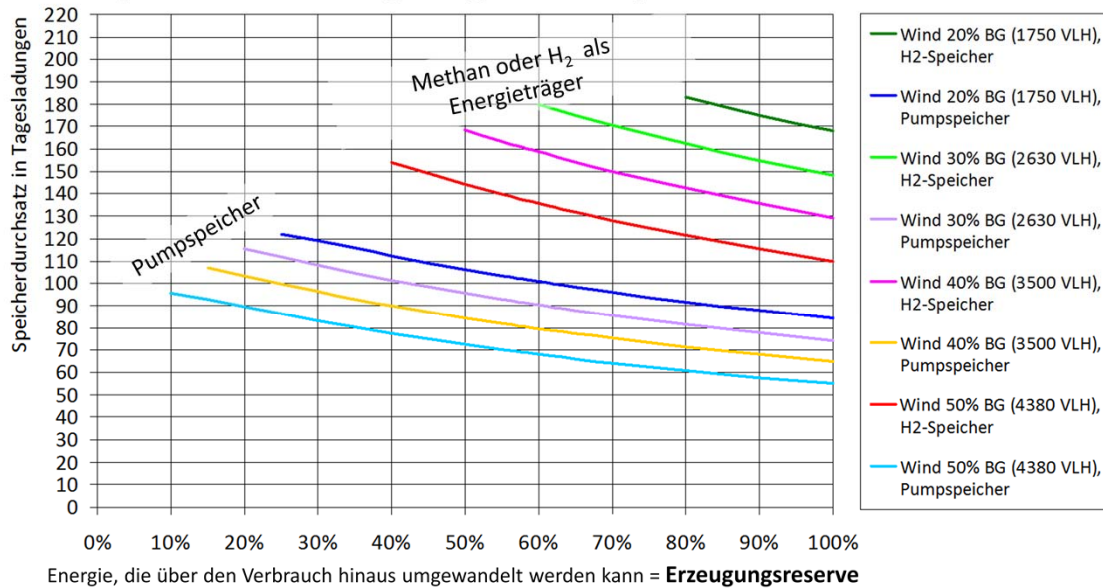
Speicher - Anforderungen und Systeme

Speicherdurchsatz

Speicherkapazität

Die nachfolgenden Folien zeigen die Systemzusammenhänge.

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

35

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.

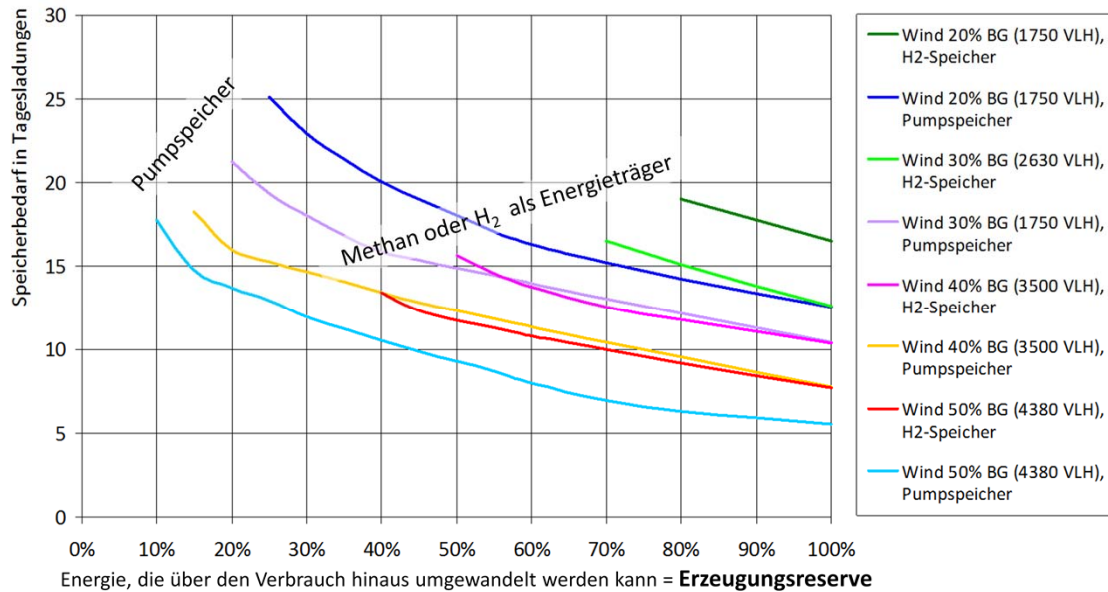
Mit wirkungsgradstarken Speichern ließe sich dieser Wert auf ca. einen viertel Jahresverbrauch reduzieren, der in hohem Maße zeitversetzt wieder abgerufen wird.

Der Unterschied resultiert aus den Speicherverlusten aufgrund des schlechteren Wirkungsgrads.

Um überhaupt ein stabiles, systemverantwortliches regeneratives 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



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

36

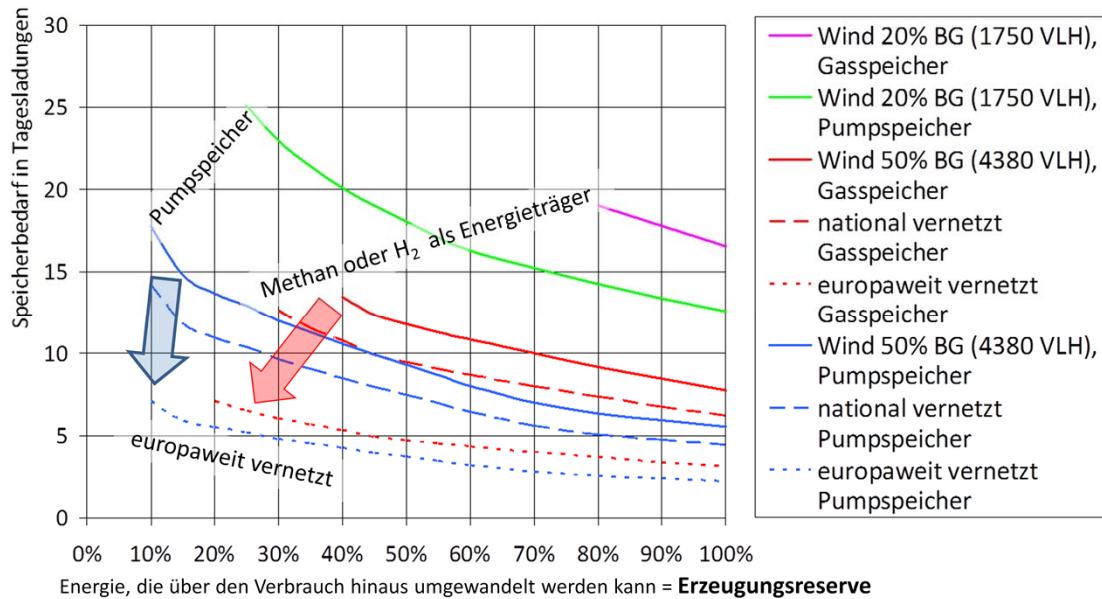
Sowohl die Auslegung des Erzeugungssystems als auch der Speicherwirkungsgrad haben erheblichen Einfluss auf die vorzuhaltende **Speicherkapazität**.

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.

Großräumig leistungsstarke Vernetzung und Speicherbedarf



Speicherkapazitätsbedarf bei regional autarker Versorgung und **reduzierende Wirkung einer leistungsstarken nationalen und europaweiten Vernetzung.**

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

37

Die vorzuhaltende **Speicherkapazität** reduziert sich durch großräumig leistungsstarke Vernetzung möglichst vieler Regionen, die über einen gut an den Eigenbedarf angepassten Erzeugungsmix verfügen.

Die Vernetzung ermöglicht häufig, den verlustarmen Export temporärer Überschüsse aus der Region. Sie ermöglicht ebenso häufig den verlustarmen Ausgleich temporärer Defizite durch Import von andernorts auftretenden Überschüssen.

Die Ausgleichswirkung nimmt erheblich zu, je größer der leistungsstark vernetzte Verbund ausfällt.

Bei steigender Versorgungssicherheit reduziert sich durch großräumige Kooperation sowohl der Speicherkapazitätsbedarf als auch der Bedarf an Erzeugungssystemen.

Mit kleineren erforderlichen Erzeugungsreserven verringert sich zudem der Aufladeleistungsbedarf und damit die Kosten der bereitzustellenden Speichersysteme. Das liegt daran, dass die auftretenden Überschussleistungen, die gespeichert werden können, niedriger ausfallen.

Diese ganzheitlichen Zusammenhänge können abgewogen werden, wenn für oder gegen Leitungsbauprojekte eine grundsätzliche Position bezogen wird.

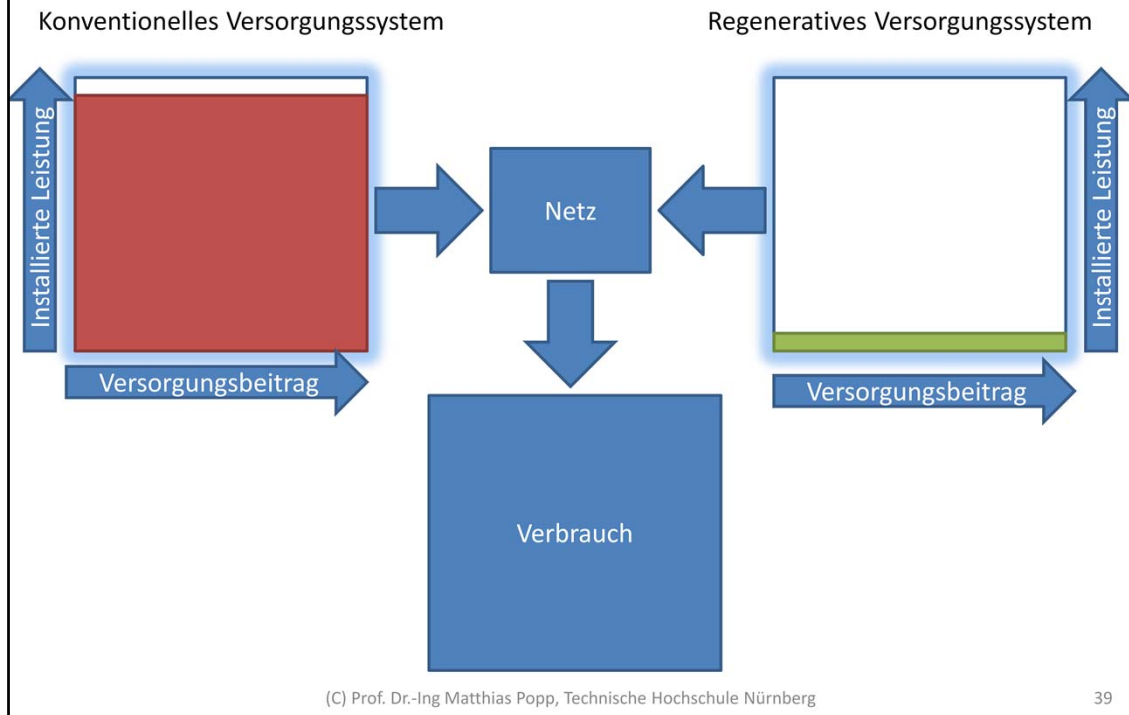
Energiewende ohne Eingriffe und Veränderungen im Landschaftsbild wird sich schwerlich realisieren lassen. Ob zukünftig zusätzliche Windräder, Solarmodulflächen und größere Speichersysteme bei reduzierter Versorgungssicherheit anstelle von leistungsstarken Fernstromleitungen eine erstrebenswerte Alternative sind, kann persönlich abgewogen und demokratisch entschieden werden.

ideale und reale Transformation

ideal: Regenerative ersetzen Konventionelle

**real: Regenerative überlassen Konventionellen
die Versorgungssicherheit**

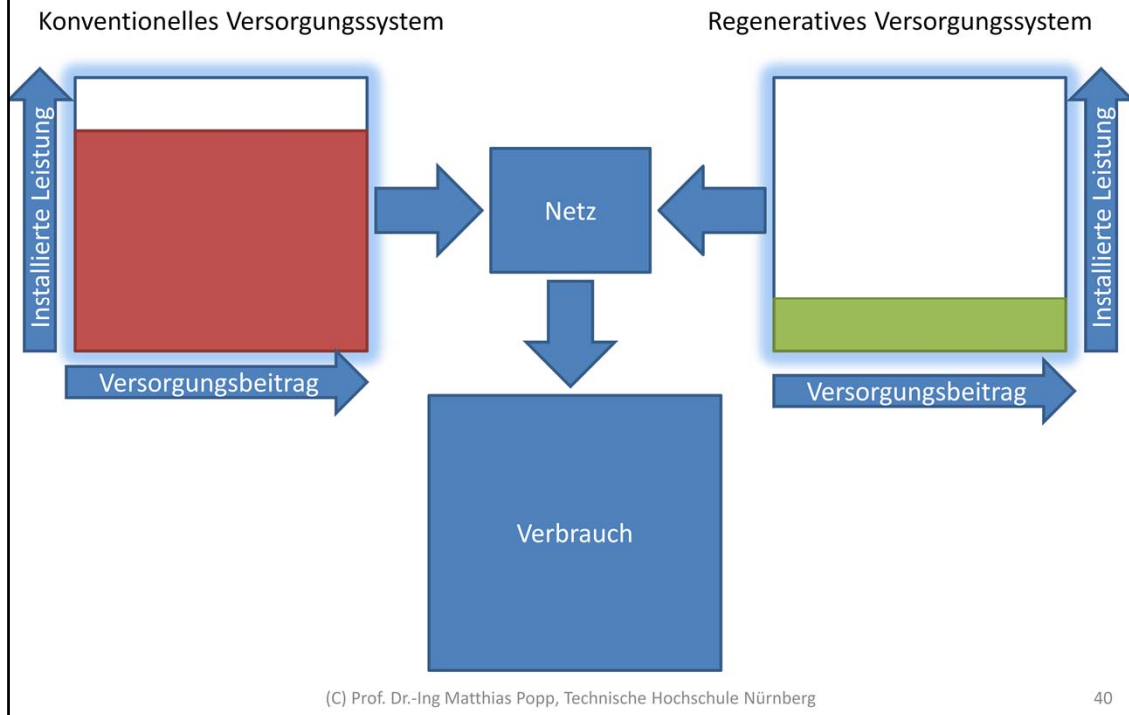
ideale Transformation der Stromversorgung mit Speichern



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

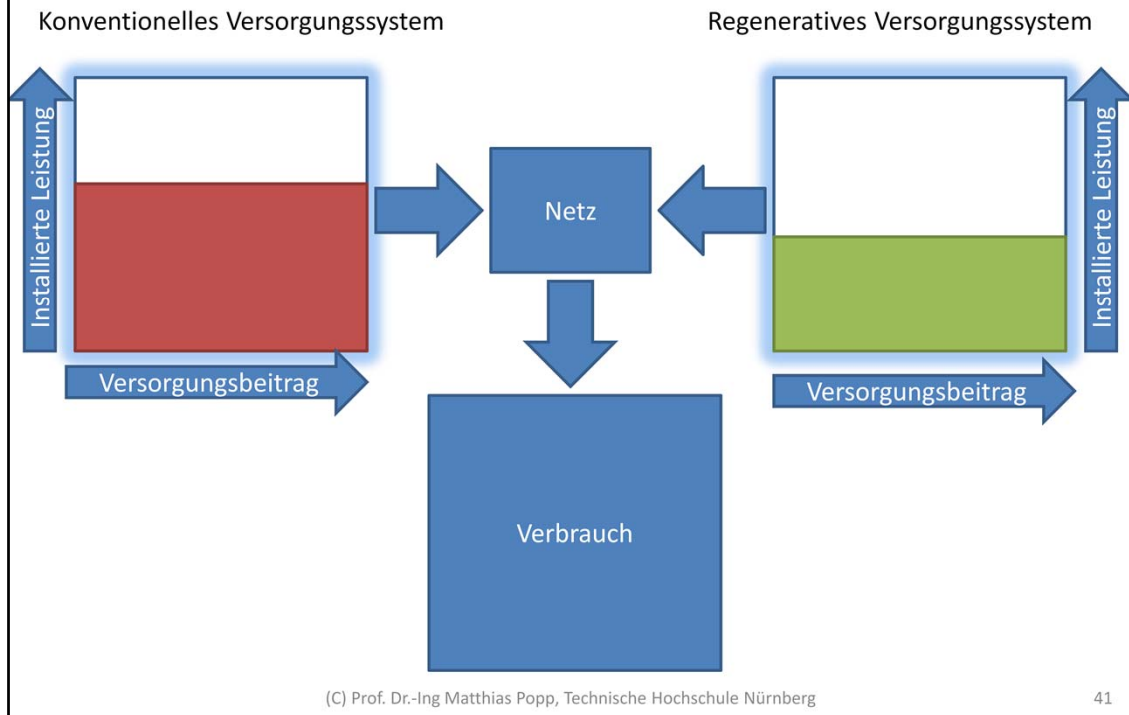
Mit der Wasserkraft in Form von Speicherwassersystemen (z.B. Walchensee, Saaletalsperren, usw.) stand von Anfang an auch ein regenerativer Anteil zur Verfügung, der einen eigenständigen Versorgungsbeitrag leisten konnte.

ideale Transformation der Stromversorgung mit Speichern



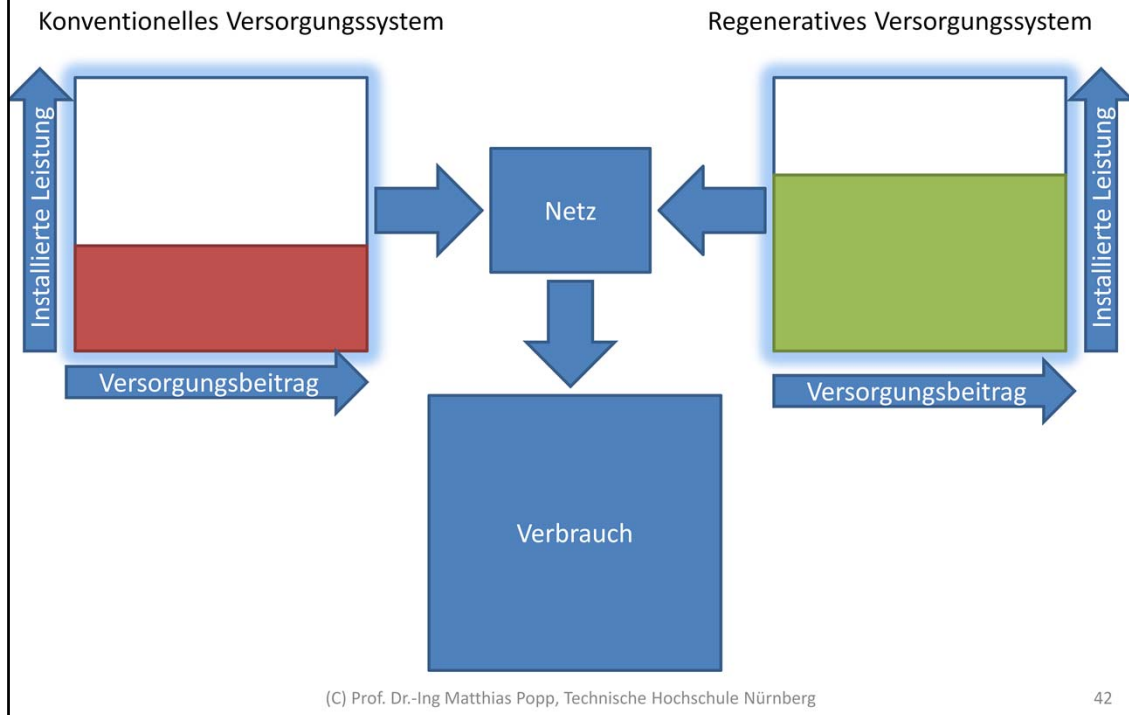
Bei einer idealen Transformation des Stromversorgungssystems könnte mit dem Zubau regenerativer Versorgungseinheiten die entsprechende Kapazität konventioneller Systeme stillgelegt werden.

ideale Transformation der Stromversorgung mit Speichern



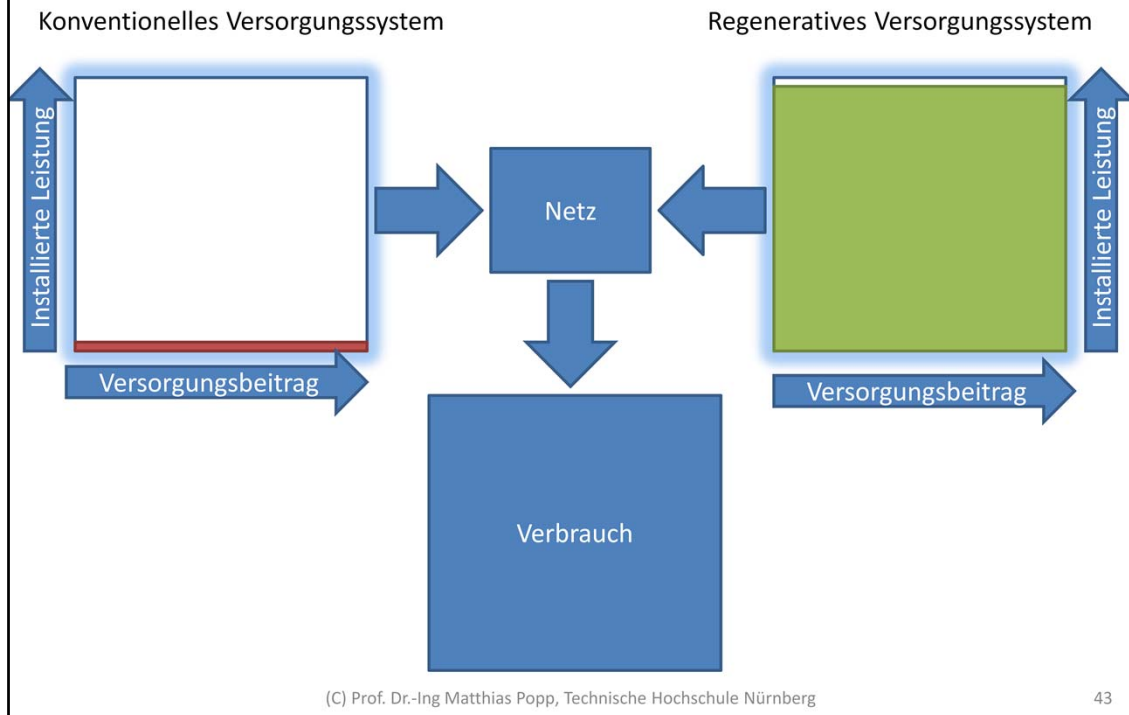
Erneuerbare Energiesysteme, die von Anfang an darauf ausgelegt wären, den Bedarf nachfragegerecht zu decken, würden es ermöglichen, auf konventionelle Kraftwerke zu verzichten.

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.

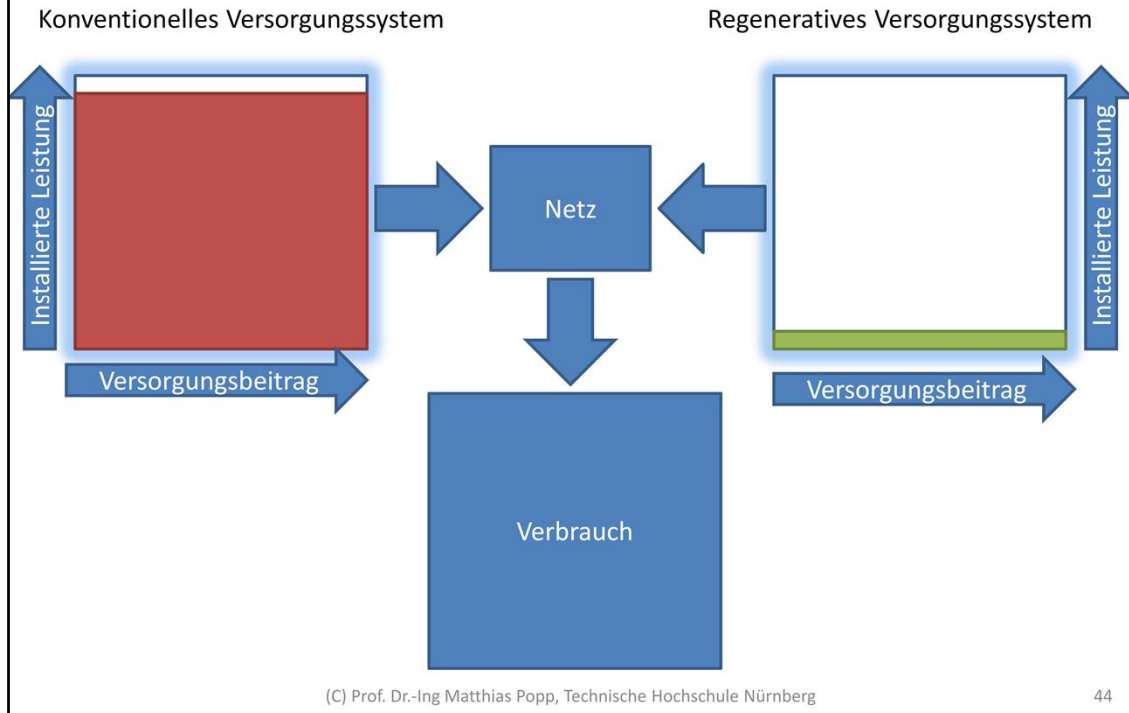
ideale Transformation der Stromversorgung mit Speichern



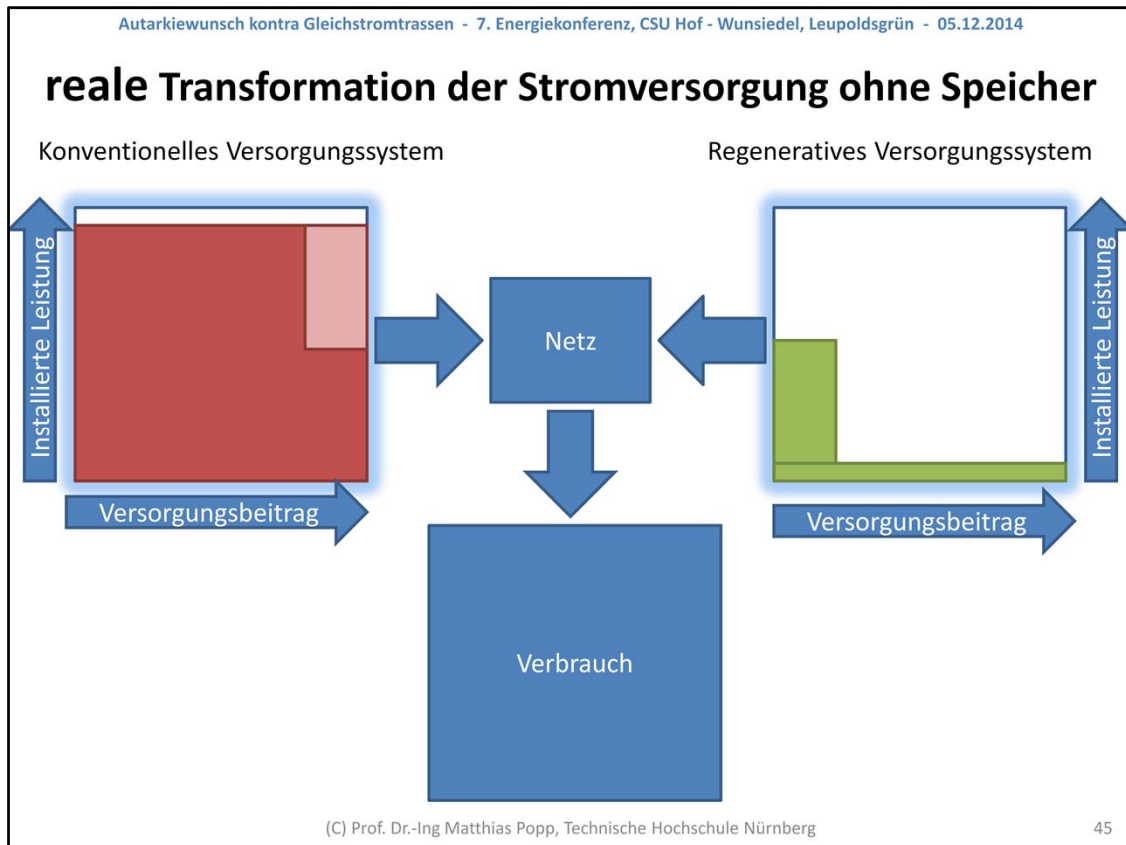
Am Ende hätten die regenerativen Versorgungssysteme die konventionellen abgelöst.

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.

Die zugebauten Energieumwandlungsanlagen sind damit nicht in der Lage, für Ihren Anteil die Systemverantwortung zu übernehmen.

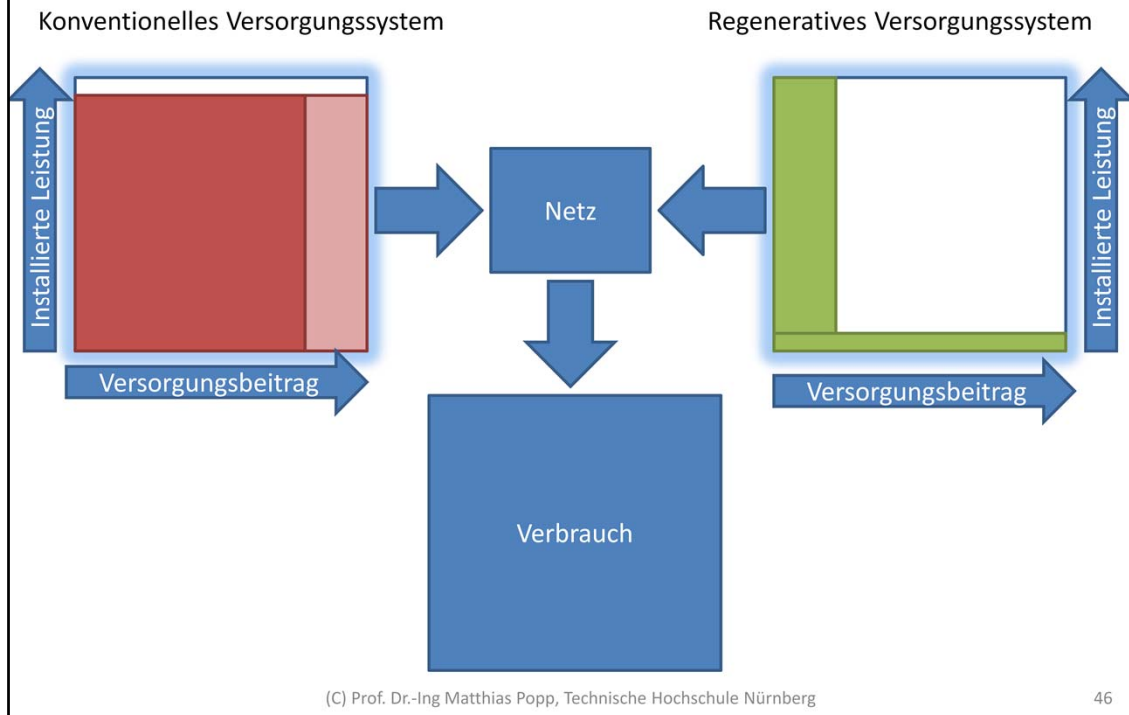
Das ist ein fundamentaler Unterschied zu vielen Wasserkraftanlagen, die über entsprechende Stauhaltungen über einen Energiespeicher verfügen und in der Lage sind, Leistung nach Bedarf zu liefern.

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



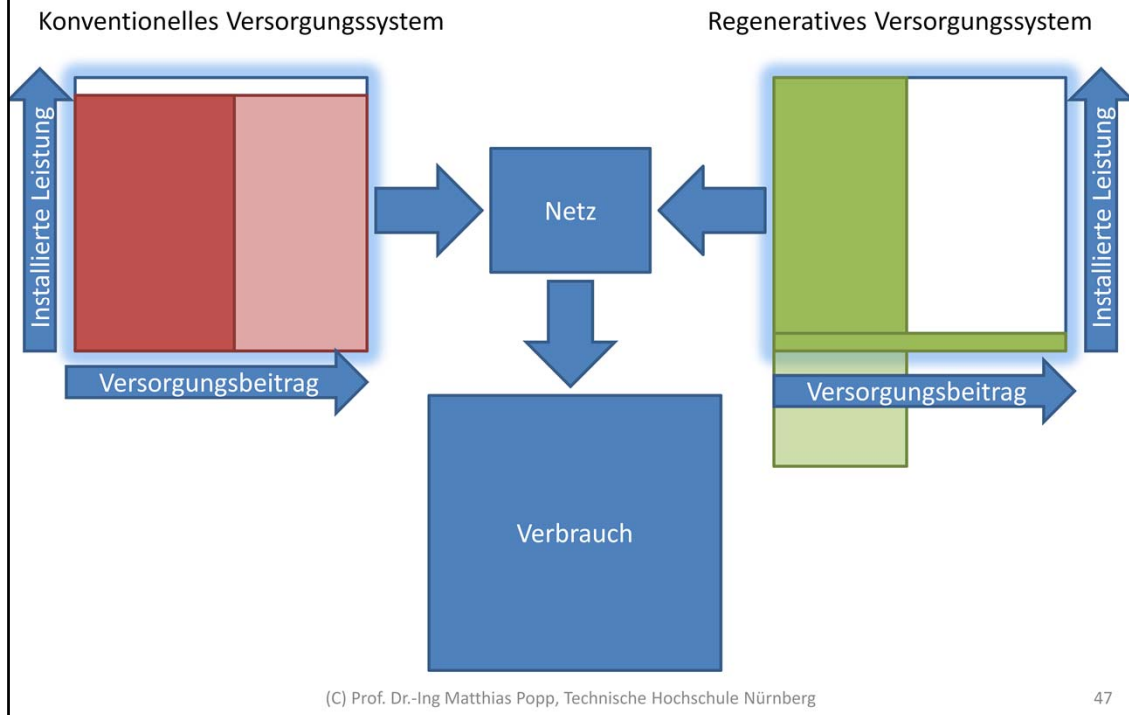
Mittlerweile erreicht die installierte Leistung der regenerativen Erzeugungssysteme die nachgefragte Leistung.

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

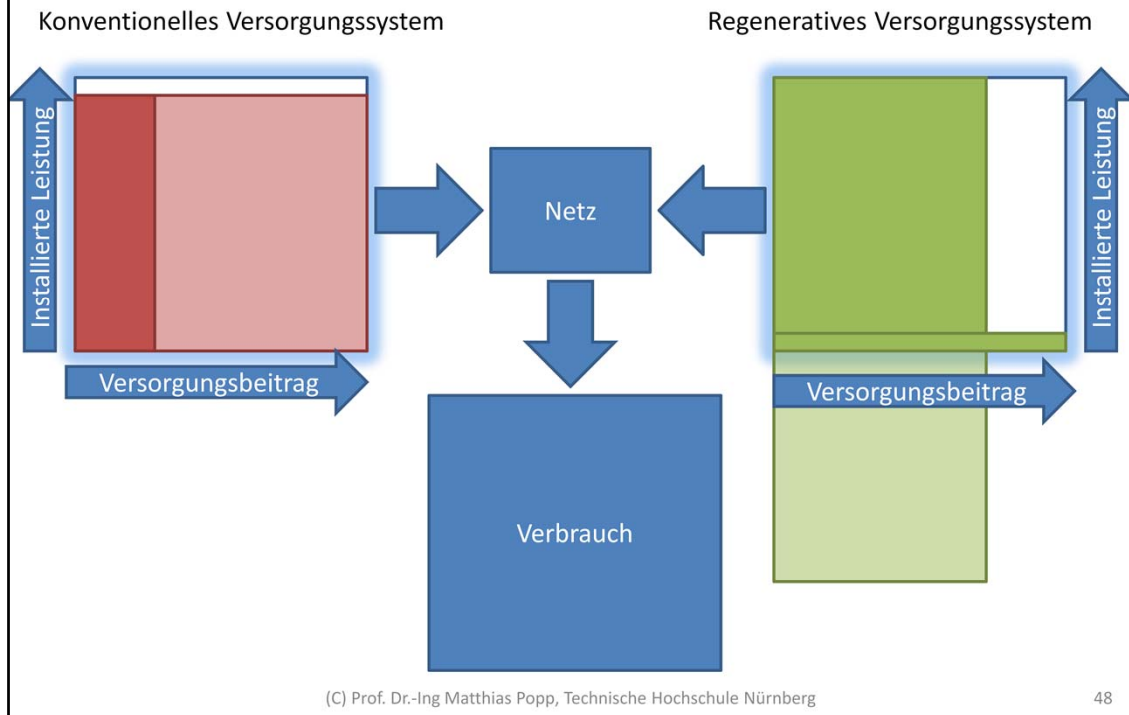


Baut man die volatilen regenerativen Erzeugungssysteme weiter aus, ohne dabei Einrichtungen zum bedarfsgerechten Ausgleich dieser meist von der Nachfrage abweichenden Erzeugungsleistung zu errichten, dann kann nur noch ein Teil der installierten Leistung zur Versorgung beitragen.

Die Überkapazität muss ungenutzt bleiben.

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

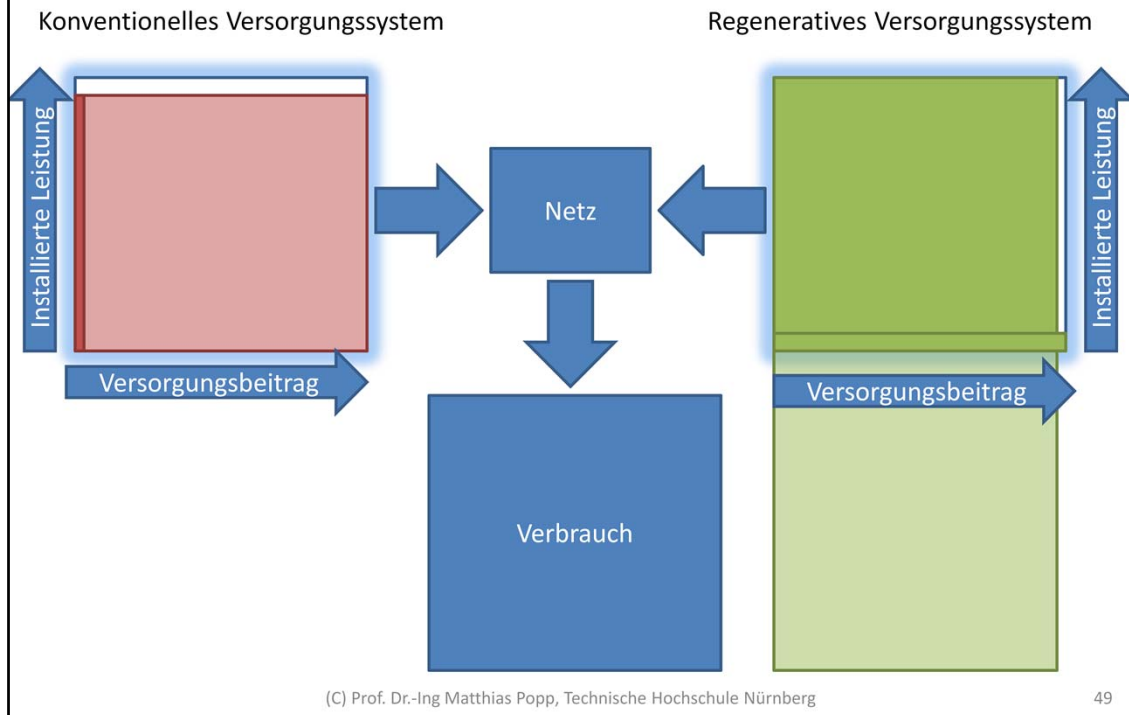
reale Transformation der Stromversorgung ohne Speicher



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

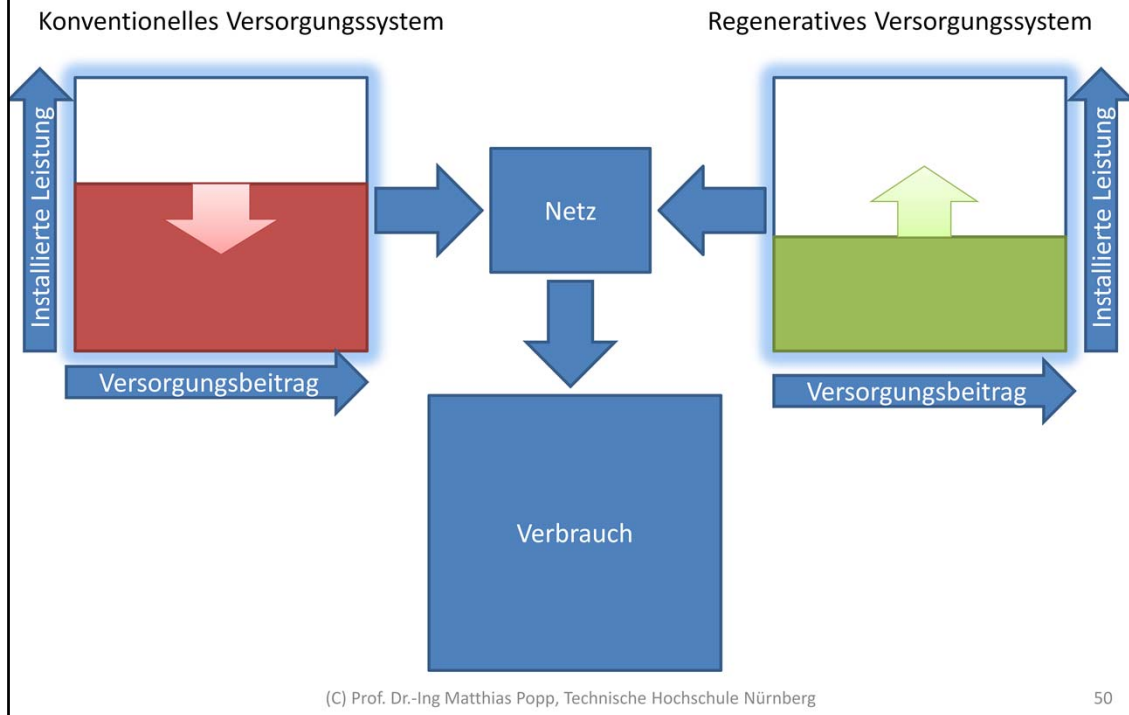


Am Ende unterhält man zwei Kraftwerksparks, die ein Mehrfaches der benötigten Energie umwandeln könnten.

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 Systemverantwortung übernehmen und 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.

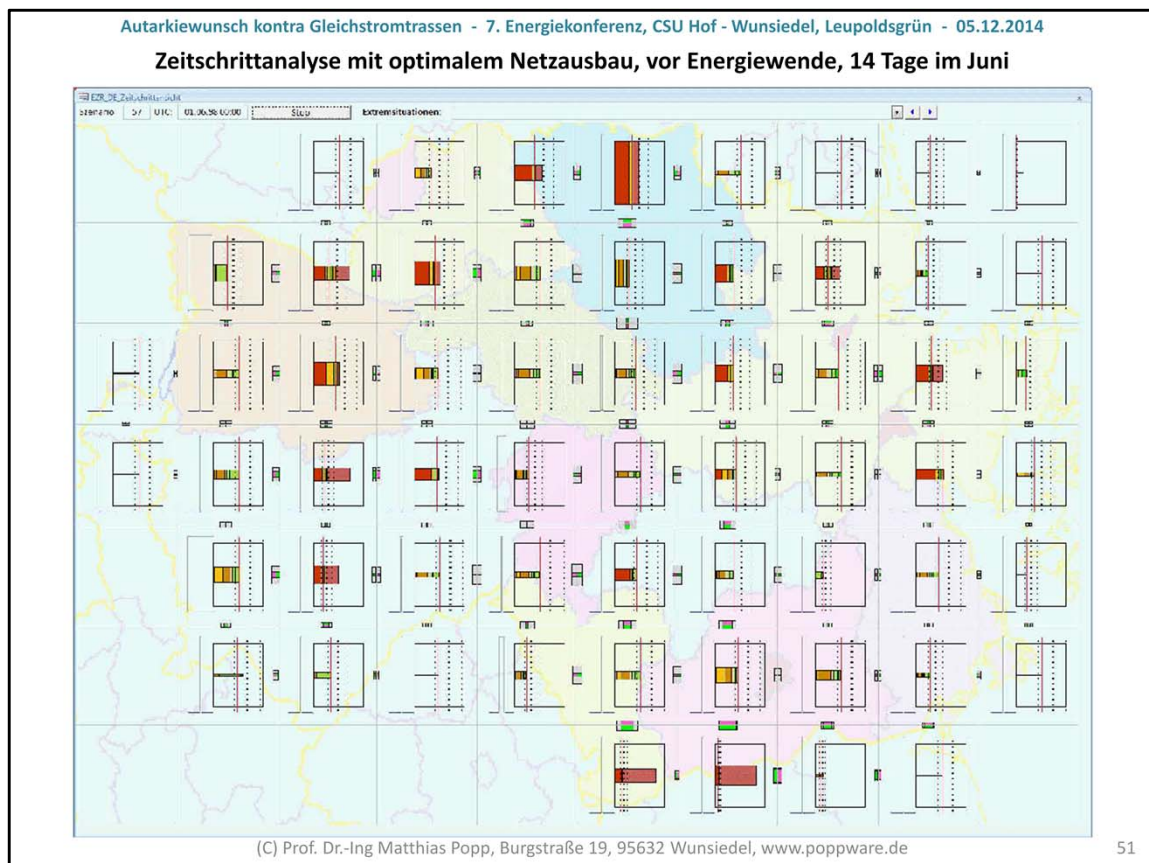
Dann sind regenerative Stromversorgungssysteme in der Lage, konventionelle zu ersetzen, anstelle allein deren Auslastung zu reduzieren.

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.



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



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

52

Hinweis:

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

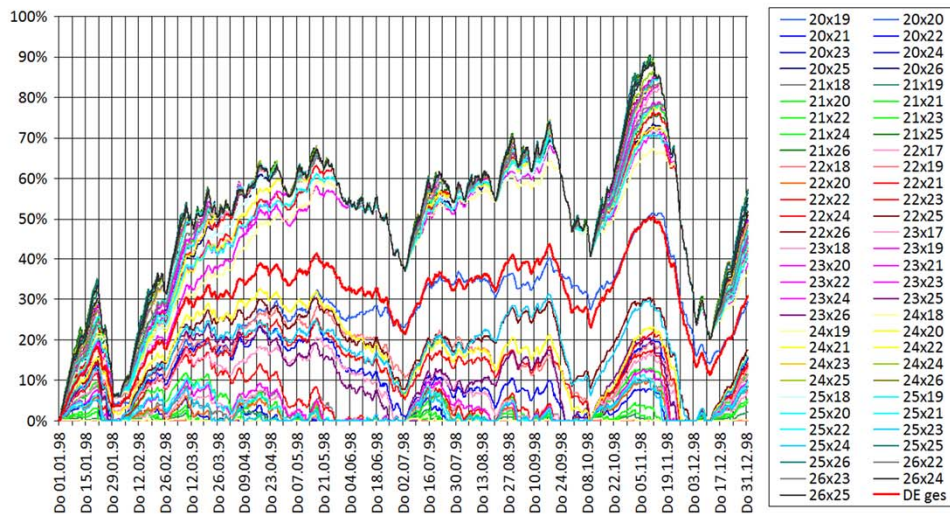
Die potentialorientierte Erzeugung von Strom entspricht der gängigen Vorstellung zur Umsetzung der Energiewende.

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

53

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 Flauteperioden, 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.

Explizit sei darauf hingewiesen, dass die immer wieder vorgetragene Auffassung, Offshore könne mit beständigen Windverhältnissen gerechnet werden, **nicht zutrifft!**

Offshore kommt es ebenso regelmäßig wie Onshore zu Flauteperioden. Offshore findet alles nur auf einem höheren Windgeschwindigkeitsniveau in den für Windenergieanlagen erreichbaren Höhenschichten statt. Vom Durchzug der Hoch- und Tiefdruckgebiete und damit einhergehenden stetigen Windgeschwindigkeitsänderungen sind Offshore und Onshorestandorte gleichermaßen betroffen.

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

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

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

54

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.

Erst ein erneuerbares Energiesystem, das finanzielle Vorteile gegenüber den konventionellen Systemen bietet, wird weltweit Vorbildwirkung entfalten können.

Nicht eine „Luxusenergiewende“ für Deutschland, sondern ein besseres und finanziell attraktiveres Energiesystem für die Welt wird helfen, die globalen Klima- und Umweltherausforderungen zu meistern.

Anhänge

- I. Benutzungsgrad von Windenergieanlagen (4 Folien, 56 - 59)
- II. Speicherbedarf einer bedarfsgerechten Stromversorgung in Abhängigkeit von Erzeugung, länderübergreifender Kooperation und Speichersystemen (1 Folie, 60)
- III. Herausforderung der Transformation (3 Folien, 61 - 63)
- IV. Erdgas als Speichermedium (1 Folie, 64)
- V. Druckluft als Speichermedium (1 Folie, 65)
- VI. Pumpspeicher und erforderlicher Land und Wasserbedarf (5 Folien, 66 - 70)
- VII. Ringwallspeicher und Vergleich mit Braunkohleverstromung (13 Folien, 71 - 83)
- VIII. Speicherwassersysteme der Schweiz (1 Folie, 84)
- IX. Stülpmembranspeicher (4 Folien, 85 – 88)
- X. Schlussbemerkung und Internetverweise (2 Folien, 89 – 90)

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 Windenergieanlagen auf größere Volllaststundenzahlen oder gleichbedeutend auf einen höheren Benutzungsgrad ausgelegt, dann reduziert sich der Ausgleichsbedarf 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.

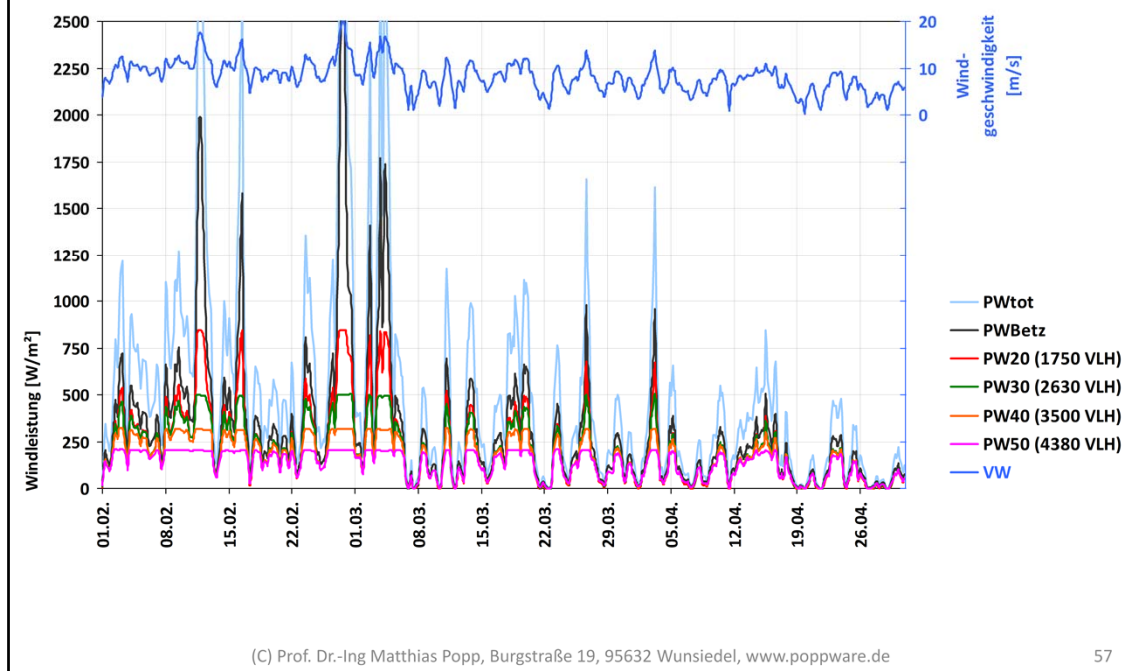
Würden Offshore-Anlagen, bei erhöhtem Bauaufwand, mit stärkeren Generatoren ausgerüstet, dann würde deren Energieertrag zunehmen, bei gleichzeitig abnehmender Volllaststundenzahl.

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

57

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.

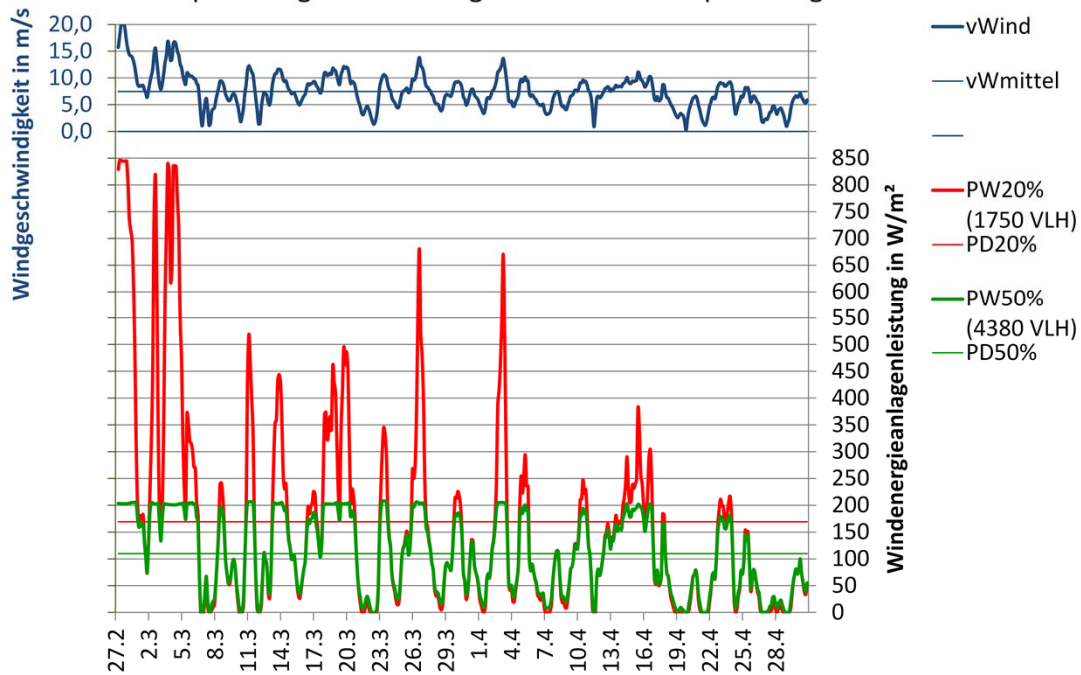
Je höher diese Abregelungswindgeschwindigkeit gewählt wird, desto seltener wird die Nennleistung der Windenergieanlage erreicht, desto weniger Volllaststunden kommen zustande und desto niedriger bleibt der Benutzungsgrad.

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

58

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

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

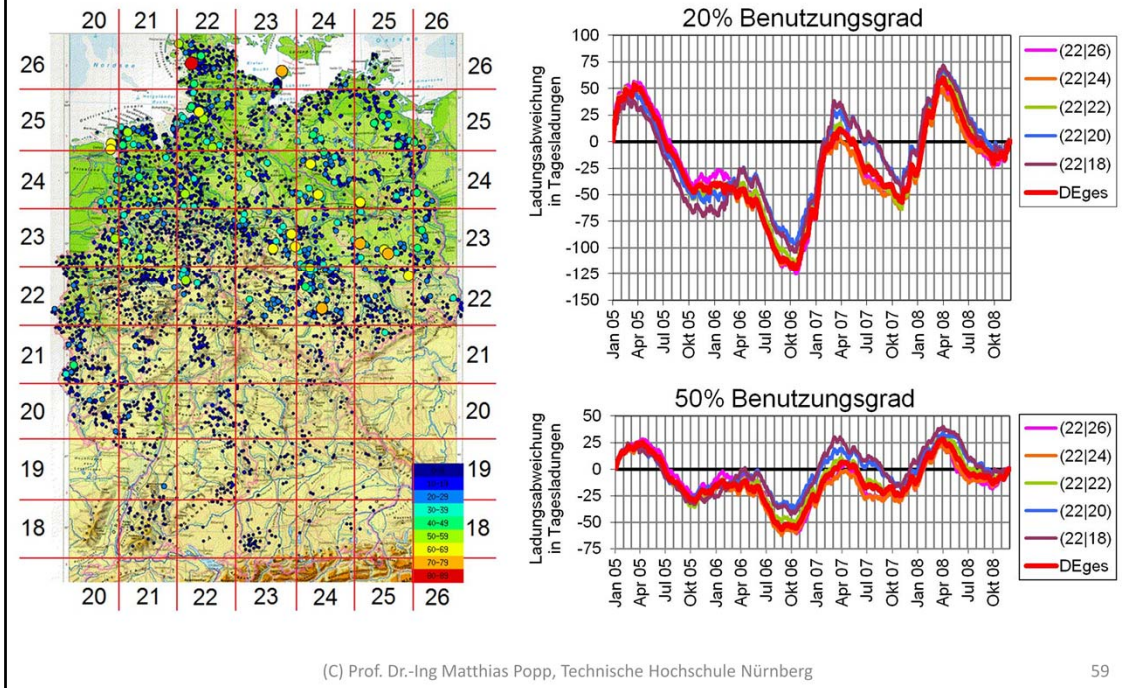
Während die Nennleistungen (= Maximalleistungen) in Abhängigkeit des Benutzungsgrades einen erheblichen Unterschied aufweisen, liegen die erreichten Durchschnittsleistungen viel näher beisammen.

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.

Benutzungsgrad und Ladungsabweichung



59

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.

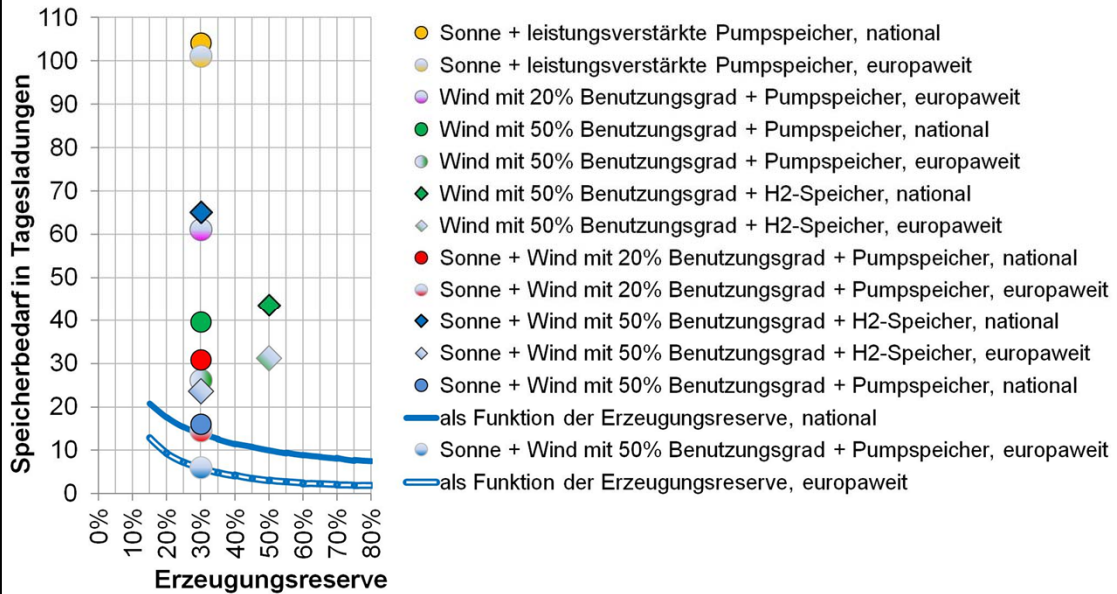
Die Diagramme zeigen beispielhaft für vier Jahre von Nord nach Süd die Ladungsabweichungen einiger Gebiete.

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.

Wie groß müsste die „Batterie“ sein?



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

Eine Auswahl der im Buch des Autors „Speicherbedarf bei einer Stromversorgung mit erneuerbaren Energien“ 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 Erzeugungreserve 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 Erzeugungsrerven und Speicherkapazitäten erfordern.

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"> • Geothermikkraftwerke, • 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, Technische Hochschule Nürnberg

63

Die mit Zusatzinvestitionen und -Aufwand verbundenen Maßnahmen ermöglichen über unterschiedliche Ansätze einen teilweisen oder vollständigen Ausgleich zwischen Erzeugerwetter abhängigen Erzeugungssystemen und der verbrauchten Leistung.

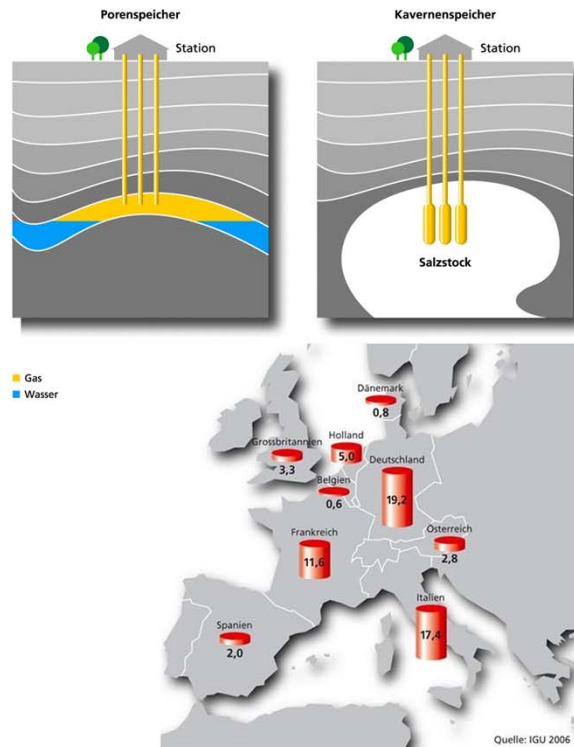
Nachfrageseitige Ausgleichsmaßnahmen können eine reduzierte Versorgungsqualität bewirken.

Passend ausgelegte Speichersysteme ermöglichen eine bedarfsgerechte Stromversorgung.

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



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

64

Wegen des immensen Speicherbedarfs, der mit dem weiteren Ausbau der erneuerbaren Stromversorgung auf Deutschland 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.

Problematik dieser Technologien ist der geringe Wirkungsgrad bei der Umwandlungskette:

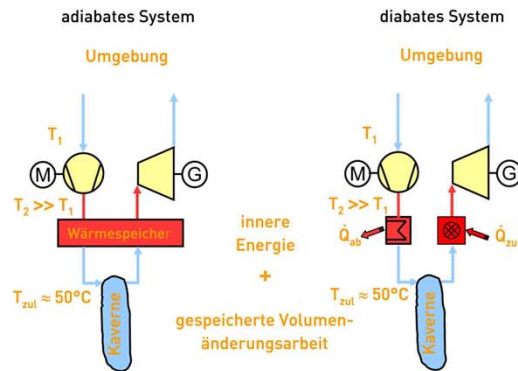
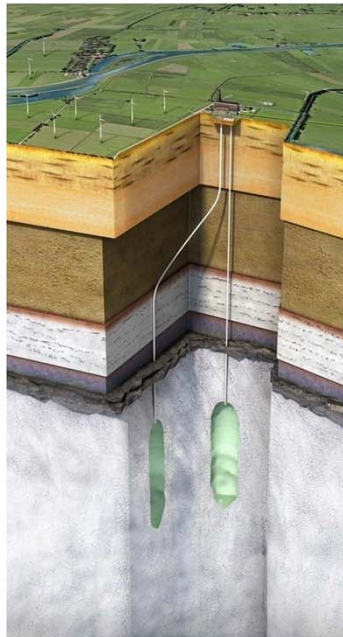
Strom > Gas > speicherbarer Zustand > Transport und Einbringung in Speicher > Rückholung aus Speicher und Transport zum Kraftwerk > Strom.

Der Wirkungsgrad der Kette liegt unter 40%. Mehr als die 2 ½-fache Energie muss aus regenerativen Energiekreisläufen in Elektrizität umgewandelt werden, als nach dem Speichern abgerufen werden kann.

Trotz kostengünstiger und mit ausreichender Kapazität verfügbarer Speicherräume, erfordert dieses Konzept einen erheblichen Mehraufwand für Energieumwandlungsanlagen, die allein dazu benötigt werden, die auftretenden Speicherverluste auszugleichen.

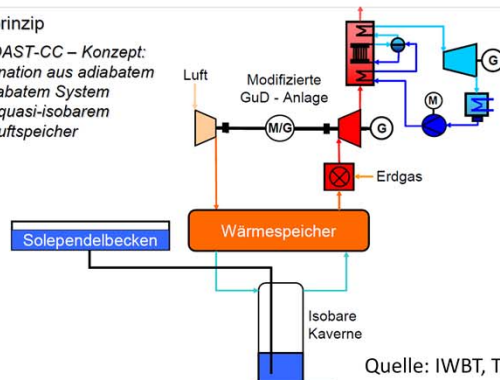
Trotz dieser Wirkungsgradproblematik erscheint es technisch umsetzbar, eine so strukturierte regenerative Stromversorgung zu realisieren.

Druckluftspeicher



Grundprinzip

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



Quelle: IWBT, TU-BS

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

65

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. Ein Durchbruch bei diesen Forschungen steht aktuell nicht in Aussicht, ein darauf ausgerichtete Forschungsprojekt „ADELE“ wurde eingestellt.

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

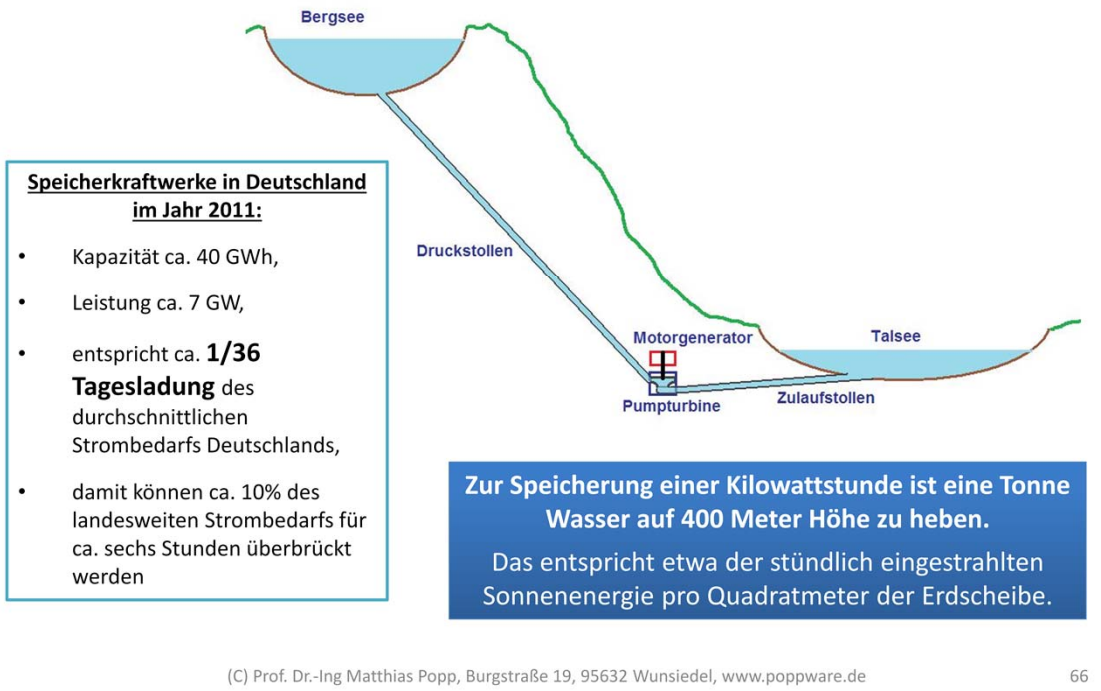
Die Abfuhr des beim Ausspülen der Kavernen in großen Mengen anfallenden Salzwassers hat ökologisch unschädlich zu erfolgen.

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

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

Die beim Verdichten entstehende Wärme wird bei den bestehenden Anlagen als verlorene Energie an die Umgebung abgeführt. Damit es beim Entspannen der Druckluft nicht zu Turbinenvereisung kommt, wird mit Erdgas nachgeheizt.

Pumpspeicher



Die in Deutschland existierenden Pumpspeicherkraftwerke wurden errichtet, um den Betrieb von Grundleistungskraftwerken zu optimieren. Grundleistungskraftwerke sind Kernkraftwerke und Braunkohlekraftwerke, die möglichst lange Zeit ohne Unterbrechung und ohne Schwankung ihre Ausleistungsleistung abgeben.

Dazu wurden die Pumpspeicher als Tagesspeicher konzipiert, die in wenigen (4 bis 8) Stunden auf- und entladen werden können. Sie wurden mit kostengünstigem Strom während der Nacht aufgeladen, um die Energie während des Tages bei hohen Strompreisen wieder abzugeben. Der massive Ausbau der Photovoltaik macht diesem Bewirtschaftungskonzept derzeit einen Strich durch die Rechnung. Im Sommer gibt es nun tagsüber Stromüberschüsse und die maßgeblichen Börsenstrompreise insgesamt sind durch die Marktwirkungen des Erneuerbare Energien Gesetzes im Keller.

Überschuss und Defizit treten mit dem massiven Ausbau regenerativer Energien nicht mehr in der schönen Regelmäßigkeit der Vergangenheit auf.

Speicher für die Energiewende müssten über viel längere Zeitphasen aufgeladen werden können und müssten viel längere Defizitphasen überbrücken können, als die in der Vergangenheit in Deutschland errichteten Pumpspeichersysteme.

Technisch spricht allerdings nichts dagegen, diese bewährte Technologie an die neuen Anforderungen anzupassen.

Die Energiewirtschaft insgesamt erfordert dazu aber neue Marktregeln, wenn das Versorgungssystem insgesamt nicht in eine Sackgasse geraten soll.

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 optimierter 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 Pumpspeicherkapazität**

Speicherbedarf Deutschlands im europäischen Verbund:

bei optimierter 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 Pumpspeicherkapazität,**
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.

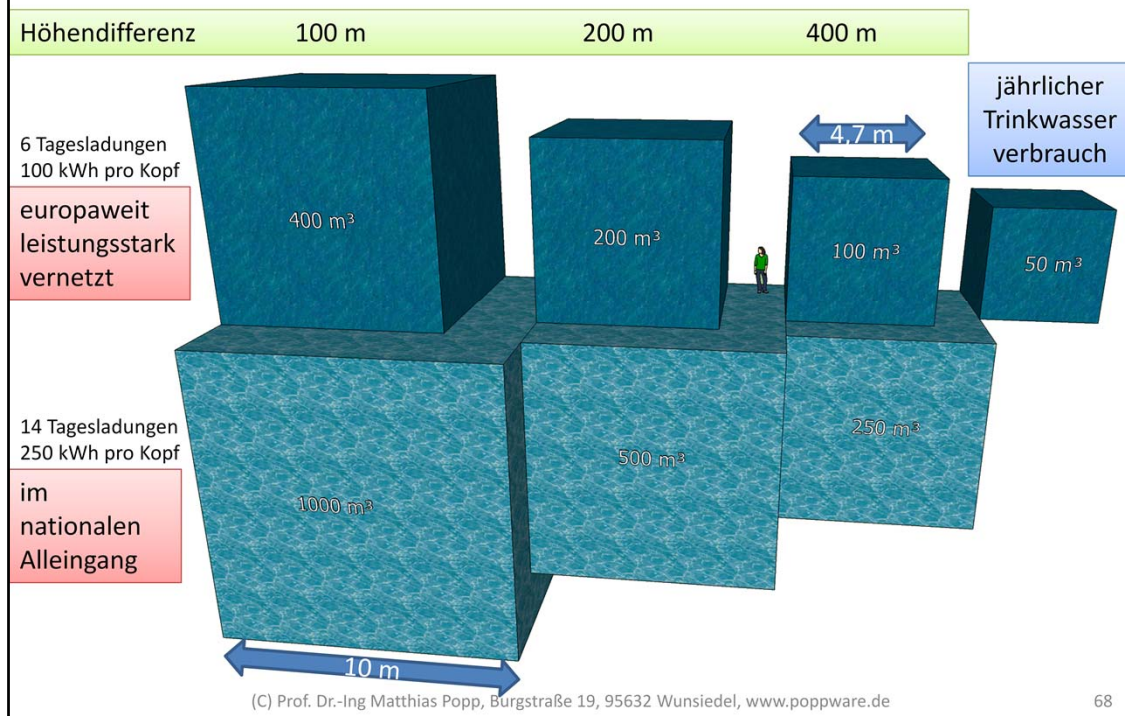
Die Leistung dieser Systeme müsste jedoch lediglich beim etwa 13-fachen von heute liegen.

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 für Deutschland 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 entladener 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

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

69

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%	

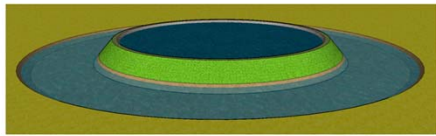
Die landesweit zu schaffenden Wasserflächen zur Energiespeicherung wären marginal im Vergleich zu vielen anderen Landnutzungen.

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

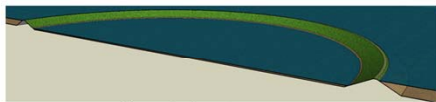
All diese Überlegungen führen zum Vorschlag des Ringwallspeichers.

Ringwalspeicher

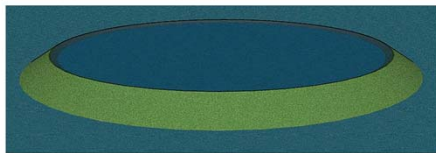
als geotechnische Option zur Schaffung großer Speicherkapazitäten



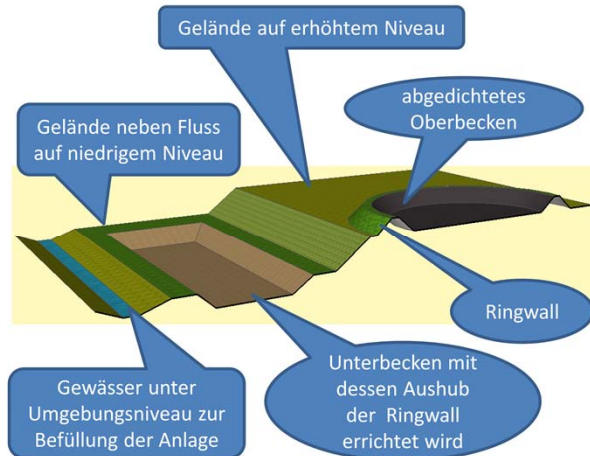
für das „flache Land“



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.

Ringwalspeicher 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“, so dass er einen Grafiker beauftragte, die im Anhang gezeigte Illustration anzufertigen.

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

72

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 (verteilt auf ca. 10.000 km²) 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.

Als Zusatznutzen könnten damit beispielweise Schifffahrtswege in bisher damit nicht erschlossenen Regionen entstehen. Auch bei Jahrhunderthochwässern, von denen in den letzten Jahren einige miterlebt werden konnten, böten die Speichersysteme als Nebeneffekt genügend Stauraum, um Überschwemmungen von Siedlungsgebieten und Kulturlandschaften zu verhindern.

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

73

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.

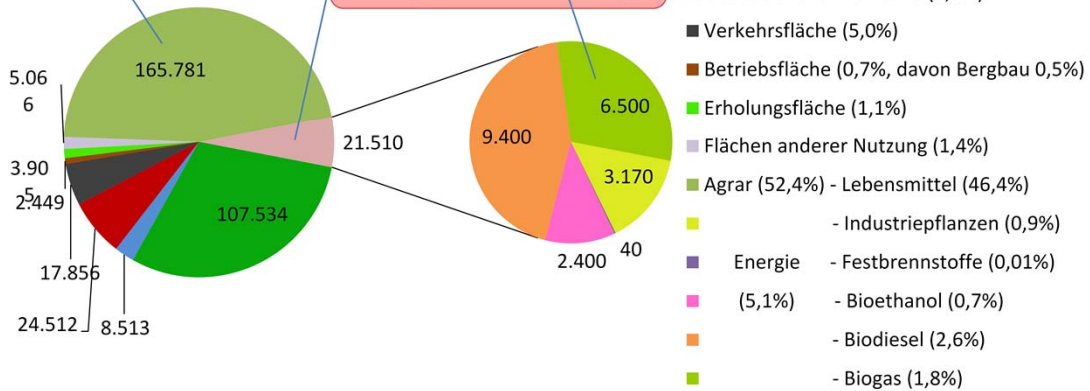
Bodennutzung Deutschlands

in km² (Gesamtfläche 357.126 km²)

landwirtschaftlich genutzte Flächen 2010 für

Lebensmittelproduktion

Energie- + Industriepflanzen
Stromerzeugung



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

74

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 Ringwallspeicher / Biomasse

**Etwa die Hälfte
der heute in Deutschland bereits zur
Biogasproduktion eingesetzten
Bodenfläche würde ausreichen,
um mit Ringwallspeicher-
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 Ringwallspeicher 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 Ringwalspeicher / 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 Ringwalspeicher sind in Deutschland Realität.

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

77

Braunkohletagebaue sind die einzigen Bauwerke, bei denen noch viel mehr Erde bewegt wird, als es für die Errichtung großer Ringwalspeichersysteme 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 im Süden des Erzgebirges, 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.

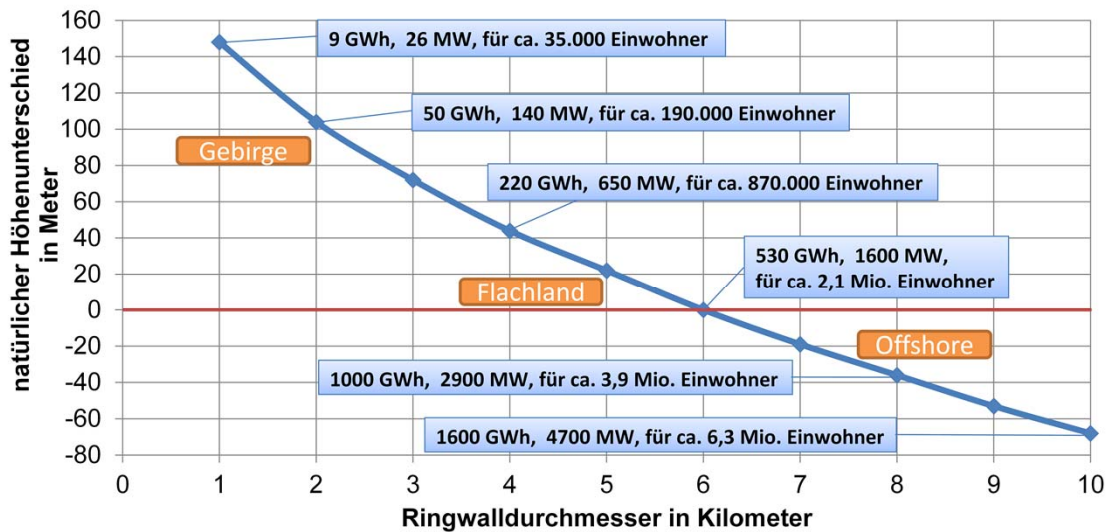
Dafür besteht auch keine Notwendigkeit.

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.

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

80

Dämme verschlingen das größte Bauvolumen im Fußbereich.

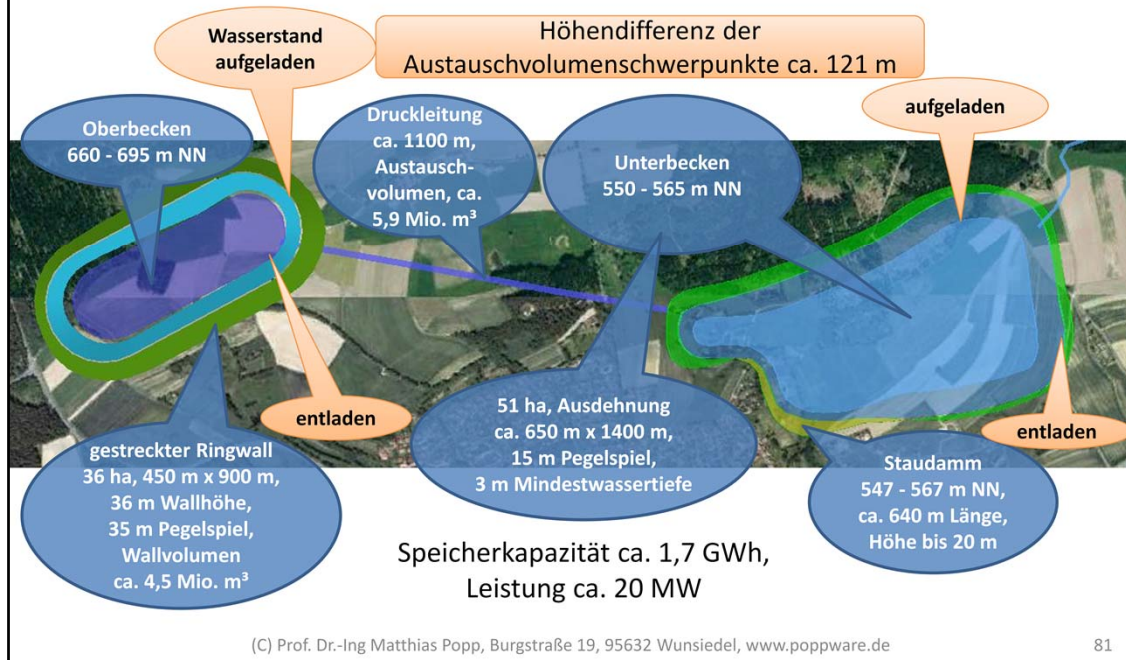
Bereits geringe Höhenunterschiede, bei denen man kaum an die Errichtung eines klassischen Pumpspeicherkraftwerks denken würde, ermöglichen die Errichtung von Ringwallspeichern.

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

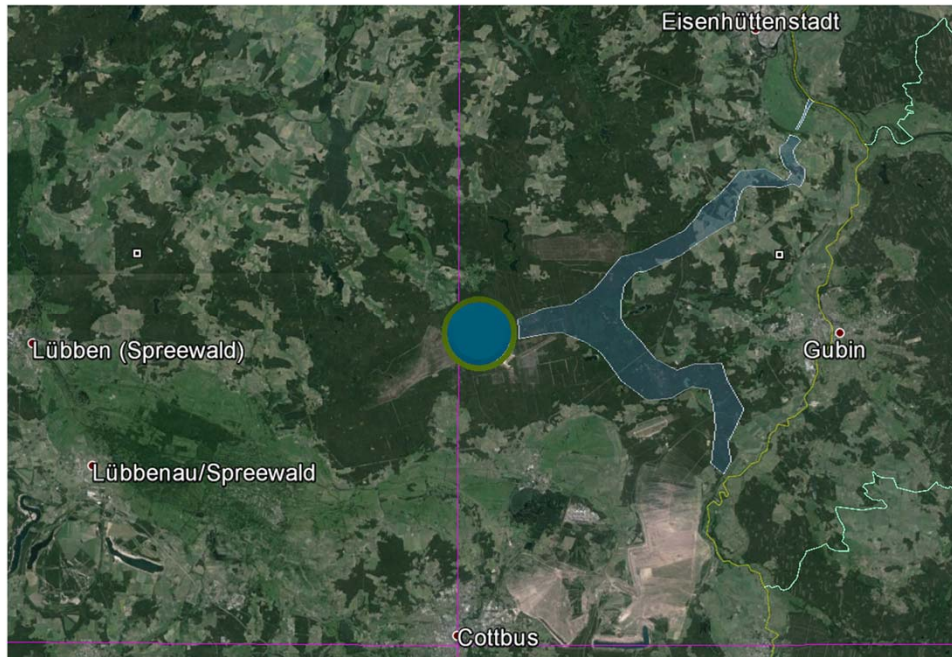


Ein Beispiel, wie so ein Speichersystem für ein kleines Versorgungsgebiet in eine hügelige Mittelgebirgslandschaft integriert werden könnte, sehen sie hier im Norden und Nordosten der Festspielstadt Wunsiedel.

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

Nachfolgend ein Vorschlag aus dem Bundesland Brandenburg mit einem größeren Ringwallspeicher auf einem ehemaligen sowjetischen Truppenübungsplatz in der Nähe eines großen Braunkohletagebaus.

Einstiegsüberlegung Ringwallspeicher Lieberose



Quelle: unterlegte Karte: Google Earth, Zugriff 14.11.2014, Rastergebiete und Ringwallspeicher: Eigenanfertigung

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

82

Das Unterbecken zu einem Ringwallspeicher im Gebiet des Truppenübungsplatzes Lieberose sollte

- durch natürlichen Wasserzulauf ohne Energieaufwand befüllt werden können und
- vor dem Grundwasserdruck durch Filterschichten unter dem Beckenbodens und der Beckenabdichtung bewahrt werden.

Deshalb ist hier als Einstiegsüberlegung angedacht, die Entwässerung des Untergrunds zur Oder hin anzulegen, die im Bereich vor Eisenhüttenstadt noch etwa 28 Meter über Normal Null liegt.

Zur Befüllung ist angedacht, die Neiße, nahe Grieben, auf einem Höhenniveau von etwa 60 Metern über Normal Null anzuzapfen.

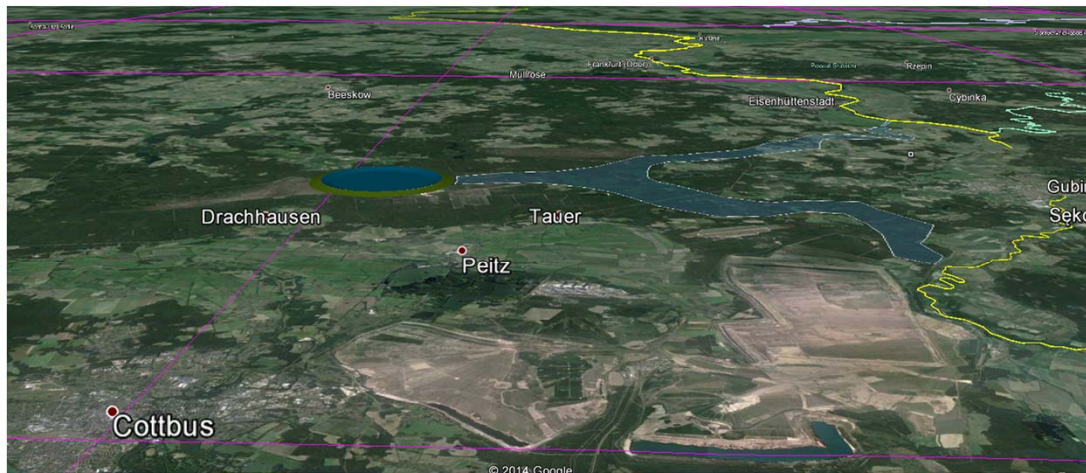
Bei einem unteren Wasserstand im Unterbecken bei etwa 40 m NN und einem oberen Wasserstand von 65 bis 75 m NN ergäbe sich ein maximales Pegelspiel im Unterbecken von 25 bis 35 Metern. Die Entwässerung des Beckenuntergrunds ohne Energieaufwand erscheint möglich. Die Erstbefüllung des Beckens ohne Energiezufuhr ebenso.

Der Ringwallspeicher selbst würde auf ein Gelände mit einer Höhenlage von etwa 80 Metern über NN aufgesetzt und könnte eine Wallhöhe von etwa 200 m bekommen.

Nordöstlich vom eingezeichneten Standort gibt es noch höhere unbewohnte Gebiete, die aus energietechnischer Sicht ggf. noch besser geeignet sein könnten.

Im östlich und nordöstlich von Cottbus gelegenen Braunkohletagebau stehen die Technik und das Wissen zur Verfügung, um die erforderlichen Erdbewegungen kostengünstig zu organisieren.

Einstiegsüberlegung Ringwallspeicher Lieberose



Quelle: unterlegte Karte: Google Earth, Zugriff 14.11.2014, Rastergebiete und Ringwallspeicher: Eigenanfertigung

Perspektivische Sicht über Cottbus und den Tagebau Jänschwalde auf einen als Einstiegsüberlegung skizzierten Ringwallspeicher.

Sollten sich im Zuge des Klimawandels Szenarien bewahrheiten, dass Wetterextreme zunehmen, dann wäre eine Region mit Ringwallspeicher dafür gut gerüstet.

Die Analysen des Energiewetters zeigen, dass die Ringwallspeicher meistens aufgeladen wären, und im Unterbecken in der Regel nur geringe Pegelschwankungen für den ständig stattfindenden Kurzzeitspeicherbetrieb ablaufen. Größere Entnahmen sind sehr selten und nur in mehrjährigen Abständen zu erwarten.

Das vom Wasserstand abgesenkte Unterbecken wäre fast immer aufnahmebereit für große Hochwasserereignisse, die bei Extremwettersituationen vermehrt zu erwarten wären. Die Wasseraufnahmekapazität eines Ringwallspeichers wäre so, dass dieser leicht die Abflussmengen eines gesamten Jahres aufnehmen kann. Diese könnten nach dem Hochwasserereignis geordnet abgelassen werden. In Niedrigwasser- und Trockenphasen könnte das zu viel gebunkerte Wasser aus dem Ringwallspeicher genutzt werden, um das Fließgeschehen der Flüsse zu stabilisieren und Bewässerung und Trinkwasserversorgung aufrecht zu erhalten.

Die Verdunstung, insbesondere aus dem Oberbecken eines Ringwallspeichers lässt sich verhindern, indem auf ihm schwimmende Solarenergieanlagen angebracht werden. Diese lassen sich drehen und immer optimal zur Sonne ausrichten. Die eingesetzte Fläche würde damit doppelt genutzt. Einerseits zur Energieumwandlung anstelle von Freiflächenphotovoltaik und andererseits zur Speicherung. Nach der Erstbefüllung des Systems, zu der über einige Jahre hinweg die Hochwasserereignisse der vorbeifließenden Gewässer ausgenutzt werden, müssen später nur noch die Verdunstungsverluste ausgeglichen werden.

Die bei dem hier zur Diskussion gestellten Langzeit-Ringwallspeicher nur sehr moderat stattfindenden Pegelveränderungen ähneln den Wasserstandschwankungen eines Flusses, der ab und zu einmal ein Hochwasser erlebt. Das sind ökologisch viel günstigere Bedingungen als die Verhältnisse in einem herkömmlichen Pumpspeicher, der im Kurzeitbetrieb innerhalb weniger Stunden sein gesamtes Arbeitswasservolumen möglichst oft zwischen Ober- und Unterbecken austauscht.



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 alpinen Speicher in der Schweiz werden im Wesentlichen im Sommerhalbjahr mit der Gletscherschmelze aufgefüllt und im Winterhalbjahr, mit dem Eingefrieren 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.

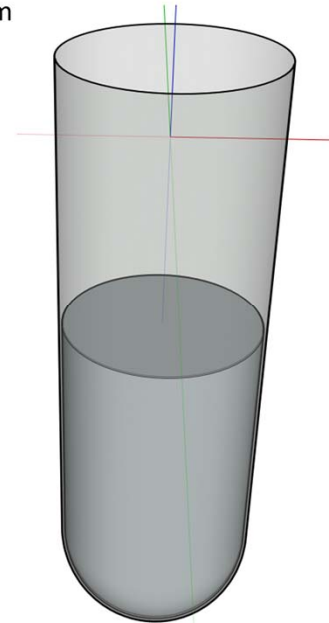
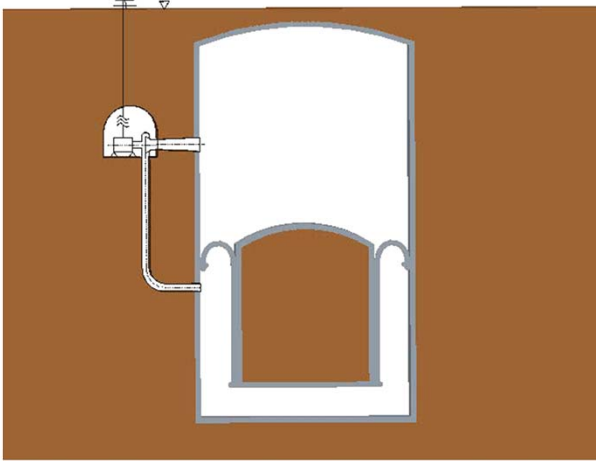
Mit Einzug der Kernenergie wurden, wie in vielen Ländern, Stimmungen laut (oder angeheizt), die in der Nutzung von Wasserkraft und den damit verbundenen Stauhaltungen eine Naturzerstörung sehen. Dies hat in einigen Ausprägungen dieser Systeme aus ökologischer Sicht sicher auch eine gewisse Berechtigung. 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 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.

Stülpmembranspeicher

Dezentrale unterirdische geotechnische Option mit minimalem Landflächenbedarf und paralleler Nutzbarkeit als saisonaler Wärmespeicher



doppelte geometrische Abmessungen schaffen 16-fache Speicherkapazität

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

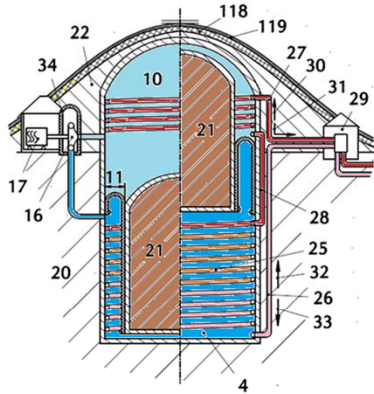
85

Pumpspeicher und Ringwallspeicher beanspruchen relativ große zusammenhängende Landflächen. Sie können Ängste vor Dammversagen hervorrufen und lösen häufig heftige Proteste und Einwendungen bei der Bürgerschaft aus, sobald entsprechende Planungen bekannt werden.

Der unterirdische Stülpmembranspeicher beansprucht nur einen Bruchteil der Landfläche eines Pumpspeichers. Im Havariefall stellt er keine Gefahr dar, weil bauartbedingt kein Wasser auslaufen und Überschwemmungen hervorrufen kann. Wegen der unabhängig vom Ladezustand stets gleichen Druckdifferenz zwischen dem Hochdruckbereich unter der Stülpmembran und dem drucklosen Wasservolumen darüber, kann auch das Pumpturbinensystem besser als bei klassischen Pumpspeichern ausgelegt und ausgelastet werden.

Der Aufbau des Stülpmembranspeichers ermöglicht zusätzlich den Einsatz als saisonalen Wärmespeicher.

Funktionsprinzip Stülpmembranspeicher



Beispiel: **Kolbendurchmesser 150 m**,
Kolbenhöhe 275 m, Hubweg 200 m
Flächenbedarf 20 ha, eigentlicher Speicher 3 ha

Stromspeicherkapazität 3,6 GWh,
überbrückt 14 Tage für über 14.000 Einwohner

Wärmespeicherkapazität über 93 GWh
zur vollkommen regenerativen Wärmeversorgung
für über 9000 Einwohner

- 4 untere Druckzone
- 10 obere Druckzone
- 11 Ringspalt
- 16 Pumpe, Turbine, Pumpturbine
- 17 Generator
- 20 Untergrundumgebung
- 21 Kolbenfüllmaterial
- 22 Aushubmaterial für Hügel
- 25 Wärmetauscherelemente
- 26 unterer (Kaltwasser-)Zu-/Ablauf
- 27 oberer (Warmwasser-)Zu-/Ablauf
- 28 Heizwasser Überleitung
- 29 Heizzentrale
- 30 Fließrichtung zur Wärmespeicherung
- 31 Fließrichtung zur Wärmeentnahme
- 32 Fließrichtung von Kaltwasser bei
Einspeicherung von Wärme
- 33 Fließrichtung von Kaltwasser bei
Wärmeentnahme
- 34 thermische Trennung
- 118 Wärmedämmung
- 119 Begehbare und bepflanzbare Abdeckung

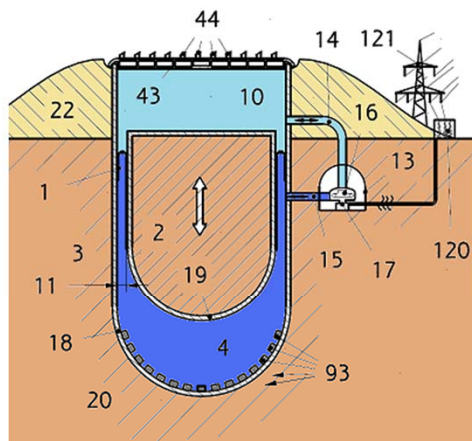
Der Spalt zwischen Kolben und Einfassung, in dem die wasserundurchlässige Stülpmembran für die Trennung der beiden Druckbereiche sorgt, ist in der vorliegenden Prinzip-Skizze zur Veranschaulichung übertrieben groß dargestellt. Er hätte etwa zwei Meter und ermöglicht die reibungsfreie Bewegung des Kolbens bei Veränderung des Speicherladezustands.

Der Spalt ermöglicht den Einbau von Wärmeübertragern zur gleichzeitigen Nutzung des Systems als saisonalen Wärmespeicher. Das Wasser kann im Sommer mit solarer Wärme auf über 90° C erwärmt werden. In der Heizperiode des Winters kann über einfache Umwälzpumpen die Wärme entnommen werden, indem das Wasser langsam auf etwa 70° C abgekühlt wird. 20°C Temperaturdifferenz liegt der im Beispiel angegebenen Wärmespeicherkapazität zu Grunde. Die Untergrundumgebung dient als Wärmedämmung. Aufgrund der Systemgröße sind die Wärmeverluste an die Umgebung von untergeordneter Bedeutung.

Die Herstellung des Speichersystems in Siedlungsnähe ließe sich in einem weitgehend automatisierten Prozess realisieren.

Die rotierende Massen des Motorgenerators und der Pumpturbine können bei entsprechender Systemauslegung auch stabilisierende Aufgaben für das Stromnetz übernehmen.

Funktionsprinzip Stülpmembranspeicher



- 1 Stülpmembran
- 2 Kolben aus Untergrundmaterial
- 3 Untergrundumgebung als Systemeinfassung
- 4 untere Druckzone, Wasser unter hohem Druck
- 10 obere Druckzone, Wasser unter statischem Druck
- 11 Ringspalt
- 13 Kraftwerkskaverne
- 14 Niederdruckverbindungsleitung
- 15 Hochdruckverbindungsleitung
- 16 Pumpe, Turbine, Pumpturbine
- 17 Generator
- 18 Außenschale
- 19 Kolbenummantelung
- 20 Untergrundumgebung
- 22 Aushubmaterial für Hügel
- 43 drehbare Abdeckung mit Wärmedämmung
- 44 Solarmodule
- 93 Stützkörper als Kolbenauflage für Bau und Wartung
- 120 Trafostation
- 121 Übertragungsnetz

Der Stülpmembranspeicher vermeiden Überflutungsängste bei Dammversagen, großen Flächenbedarf sowie Abdichtungsproblematiken und hohe Homogenitätsanforderungen an den Untergrund.

Er bietet gleichzeitig eine von der Stromspeicherung zeitlich entkoppelte Nutzbarkeit als dezentraler saisonaler Wärmespeicher.

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

87

Neue Techniken müssen für den Bau von Stülpmembranspeichern nicht erfunden werden. Vielmehr sind bekannte Techniken nur anders als bisher anzuwenden.

Im Gegensatz zu Pumpspeichern, welche die potentielle Energie von Wasser ausnutzen, wird im Untergrund ein freigeschnittener Kolben wiederum mit Wasser angehoben. Durch die Verwendung einer Stülpmembran kann ein großzügiger, gut zugänglicher Spalt zwischen Kolben und Umgebung freigelegt werden, der sich in einem automatisierbaren Prozess mit stabilen Betonschalen verkleiden lässt und eine reibungsfreie und berührungslose Kolbenbewegung gegenüber seiner Umgebung ermöglicht.

Die Stülpmembran sorgt für eine wasserdichte verlustfreie Abgrenzung der beiden Druckzonen. Die Auskleidung mit Betonschalen verhindert Wechselwirkungen mit dem Grundwasserregime der Umgebung.

Bisher durchgeführte überschlägige Berechnungen lassen auf vergleichsweise günstige Systemkosten schließen. Die gleichzeitige Nutzung als Strom- und Wärmespeicher ermöglicht eine zusätzliche Kostenteilung. Die vergleichsweise kleinen Baugrößen lassen erwarten, dass viele Investoren die Finanzkraft zur Errichtung derartiger Speichersysteme aufbringen können.

Landesweiter Flächenbedarf für Stülpmembranspeicher

Reine Speicherfläche für Stromspeicher mit einer
Überbrückungskapazität von etwa 14 Tagen, Stromspeicherkapazität etwa 20 TWh:

Etwa **120 km²** oder 0,032% der Landesfläche von 360.000 km²

(Das ist weniger als die für Windenergieanlagen landesweit erforderliche Aufstellfläche)

Speicherbauwerksflächen mit großzügigem Umgriff gerechnet:

Etwa 1000 km² oder 0,28% der Landesfläche

(Das ist weniger als die landesweit für Photovoltaikanlagen erforderliche Fläche. Zudem kann Photovoltaik über den Speichern angebracht werden, so dass die Flächen doppelt genutzt werden.)

Stülpmembranspeicher würden wegen ihres Einbaus in den Untergrund kaum das Landschaftsbild verändern.

Gegenüber Wasserstoff- und Methanspeichersystemen ermöglichen Sie die zeitlich entkoppelte Systemnutzung zur Strom- und Wärmespeicherung.

Stülpmembranspeicher erreichen die gleichen hohen Wirkungsgrade wie moderne Pumpspeichieranlagen und tragen so zu einer Minimierung des Bedarfs von Energieumwandlungsanlagen bei, die über den Stromverbrauch hinaus betrieben werden müssen, um Speicherverluste auszugleichen.

Zum Schluss

Eine sichere, robuste und bedarfsgerechte zu 100% regenerative Stromversorgung erfordert heute in Deutschland eine Windenergieanlage pro etwa 1300 Einwohner, dazu pro Einwohner etwa 10 bis 20 m² Solarmodulfläche und beispielsweise etwa 40 m² Wasserfläche oder 10 m² Stülpmembranspeicherfläche für wirkungsgradstarke, dezentral, gut über das Land verteilte Pump-, Ringwall oder Unterspeichieranlagen.

Zusammen beansprucht das maximal 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.

Weitere Informationen unter

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

Internetseiten:

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

Email: matthias.popp@t-online.de