

Speicher für sicheren Strom aus Wind und Sonne

- lösbar mit Bau- und Umweltingenieurwesen

Festvortrag zur Absolventenfeier
am **Tag der Fakultät 2012**
für **Bauingenieur- und Vermessungswesen**
am 07. Juli 2012
im
Auditorium Maximum
der
TECHNISCHEN UNIVERSITÄT MÜNCHEN,
Arcisstraße 21
80333 München

MATTHIAS POPP
Ingenieurbüro


Erneuerbare Energien, Energiespeicherung
Simulationen, Software-Entwicklung

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

1

Die Kunst, Land zu Vermessen und Bauwerke zu schaffen, prägen fortschrittliche Kulturen der Menschheit seit Jahrtausenden.

Kosmische und geotektonische Prozesse verändern unsere Erde permanent in einem großen Zeitmaßstab.

Sie schaffen dabei Landschaften mit Lebens- und Umweltbedingungen, in die wir als Menschen hineingeboren sind.

Ingenieurskunst, befähigt uns dazu, diesen vorgefundenen Zustand der Erde so zu verändern, dass sich unsere Lebensbedingungen verbessern.

Diese Kunst konnten Sie in den letzten Jahren erlernen und durch Ihre persönlichen Beiträge in Form von Bachelor-, Master-, Diplom-, Doktor- und Habilitationsarbeiten weiter entwickeln.

Der Blick auf die Welt, den uns die Raumfahrt und die weltweite moderne Kommunikation eröffnen, schärft dabei unser Bewusstsein, die erworbenen Fähigkeiten mit ganzheitlichem Blick und hoher Verantwortung anzuwenden.

Die Energieversorgung, der Umgang mit den natürlichen Ressourcen und die Belastungen die davon für die Lebensbedingungen auf unserer Erde ausgehen, erfordern ein weltweites Umsteuern, wenn wir auch in Zukunft unsere liebgewonnene hohe Lebensqualität erhalten und ausbauen wollen.

Dr.-Ing. Matthias Popp

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

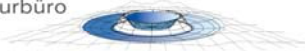
Dabei intensive Auseinandersetzung mit Fragen der Energieversorgung.

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

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

- 2010 Doktor-Ingenieur an der TU Braunschweig
- 2011 Finalist um den RWE Zukunftspreis 2011

MATTHIAS POPP
Ingenieurbüro



Erneuerbare Energien, Energiespeicherung
Simulationen, Software-Entwicklung



**Sehr geehrter Herr Präsident Herrmann,
Herr Dekan Müller, Herr Professor Vogt,
sehr geehrte Absolventinnen und Absolventen,
Eltern, Lebenspartner, Freunde, Gäste und Ehrengäste,**

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

Die Arbeit analysiert mit realen europaweiten Windgeschwindigkeits- und Solarstrahlungsdaten über mehrere Jahrzehnte, die Möglichkeiten für eine sichere und bedarfsgerechte regenerative Stromversorgung.

Eine erneuerbare Stromversorgung, die ohne Rückgriff auf fossile und nukleare Energieträger zurecht kommt, erweist sich als eine reale Option, die auf vielfältige Weise umgesetzt werden kann.

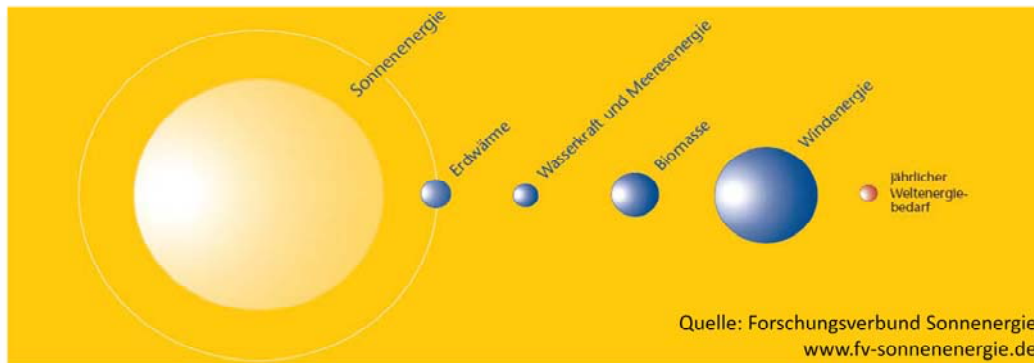
Bei geschicktem Vorgehen entsteht ein dezentral strukturiertes, robustes Versorgungssystem, bei dem Aufwand und Kosten in vertretbaren Grenzen bleiben.

Geotechnik kann dazu einen entscheidenden Beitrag leisten.

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

Sie wird vom Springer Verlag als Buch herausgegeben.

Ist eine zu 100% erneuerbare Stromversorgung überhaupt möglich?



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

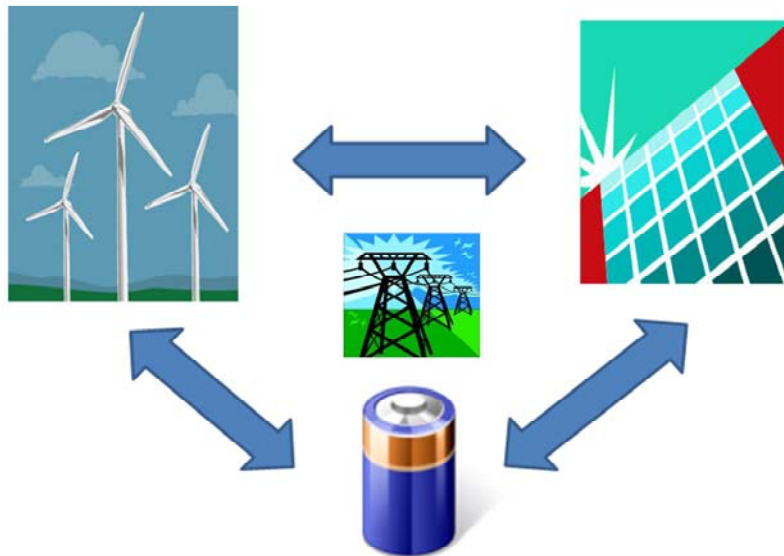
Der Weltenergiebedarf wird von der einstrahlenden Sonne und den dadurch angefachten Winden um viele Größenordnungen übertroffen.

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

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

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

Wind, Sonne und Speicher



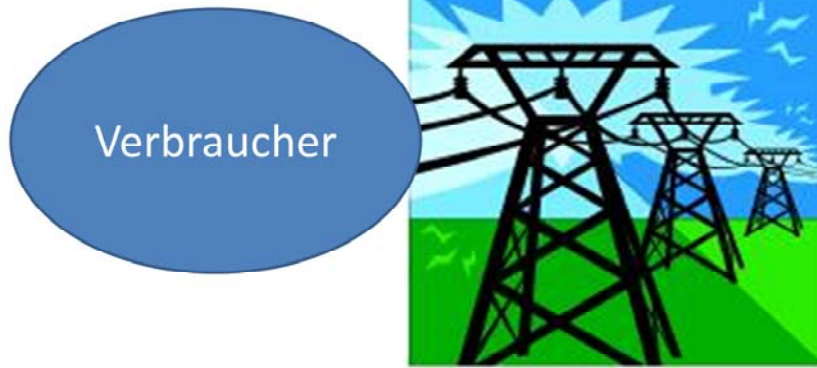
(C) Dr.-Ing Matthias Popp, Burgstraße 19, 95632 Wunsiedel, www.poppware.de

4

Diese Energien stehen aber volatil, also wetterlaunig zur Verfügung.

Durch Speichereinsatz können sie der Nachfrage angepasst werden.

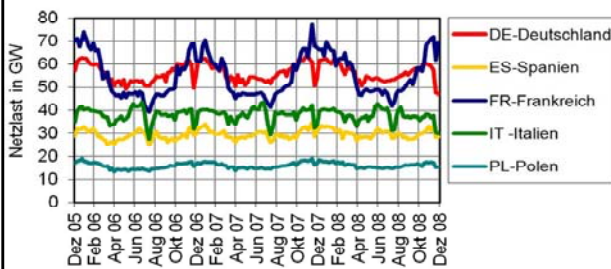
Die Stromnachfrage



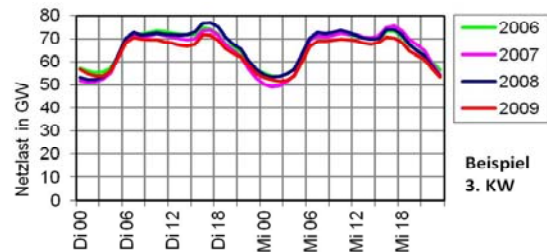
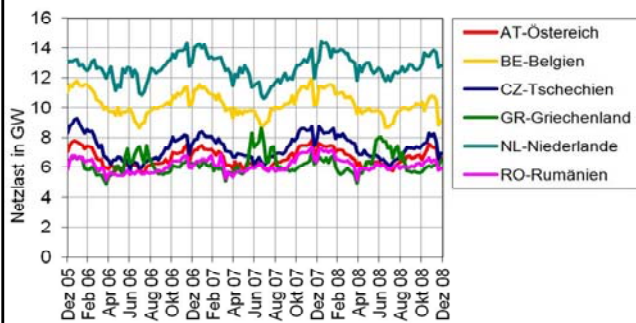
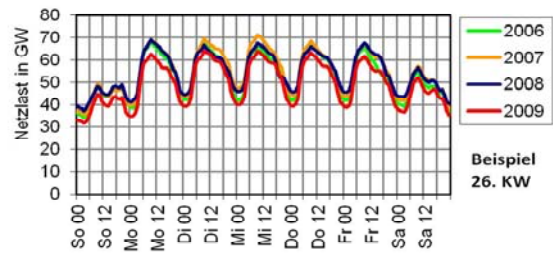
Betrachten wir die Stromnachfrage.

Der Stromverbrauch in Europa

wöchentliche Netzlasten europäischer Länder



tageszeitliche Netzlasten in Deutschland



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

6

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

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

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

Windenergie

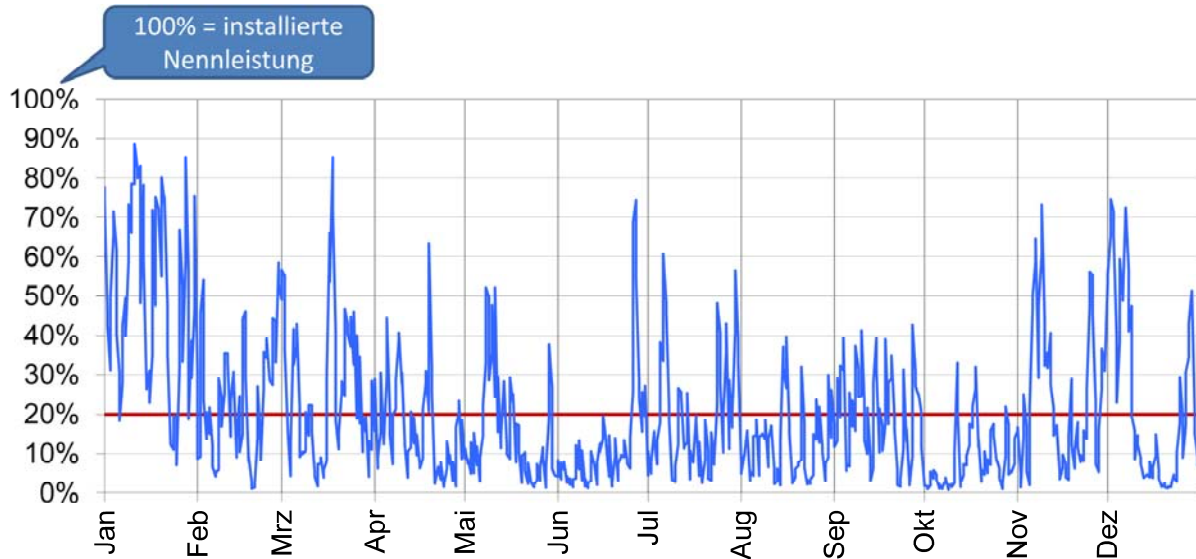


Was kann Windenergie dazu beitragen?

Charakteristik der Windenergie

tatsächliches Windleistungsaufkommen in Deutschland

beispielhaft für 2005 (blau), **Benutzungsgrad etwa 20%** (1750 Volllaststunden)



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

8

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

Ab und zu gibt es landesweite Flauten, in denen die Windstromproduktion fast vollständig ausbleibt.

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

Mit einem weiteren Ausbau der Windenergie, so dass damit zukünftig im Durchschnitt der Bedarf gedeckt werden könnte, werden sich Phasen mit Leistungsüberschüssen und Defiziten abwechseln.

An der Qualität der zeitlichen Verfügbarkeit von Windenergie wird sich dabei wenig ändern.

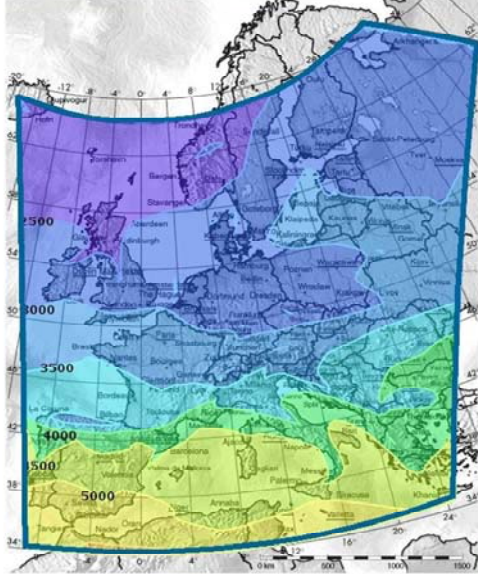
Speicher könnten diese Überschüsse aufnehmen um die Defizitphasen auszugleichen.

Solarenergie



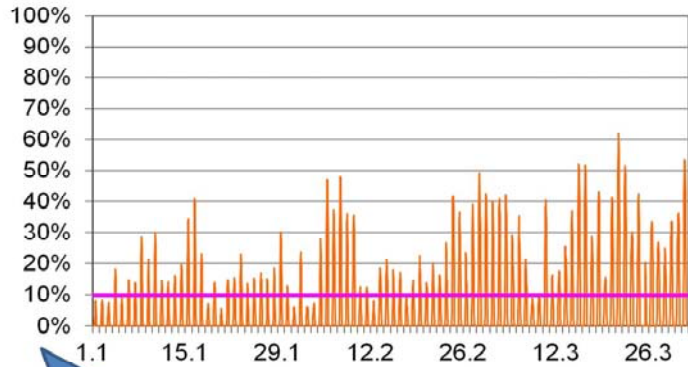
Kommen wir zur Solarenergie.

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



Solarenergie Dargebot

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



100% = installierte
Nennleistung (= Peakleistung)

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

Auch diese kurzzeitig sehr hohen Überschüsse, könnten mit Speichern aufgenommen und vom Tag auf die Nacht und vom Sommer auf den Winter übertragen werden.

Reale Versorgung und Speicherbedarf



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

11

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

Speicher können nur über begrenzte Kapazität und Übertragungsnetzte nur über begrenzte Übertragungsleistungen verfügen.

Sichere Stromversorgung durch Erzeugungsreserven

Erzeugungsreserven

dienen neben dem

Ausgleich von Speicher- und Übertragungsverlusten

auch dazu,

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

Damit sich mit wetterlaunigen Stromerzeugungssystemen eine sichere und jederzeit bedarfsgerechte Versorgung aufbauen lässt, sind Erzeugungsreserven erforderlich.

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

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

Speicherleerungskurven bei 30% Erzeugungsreserve

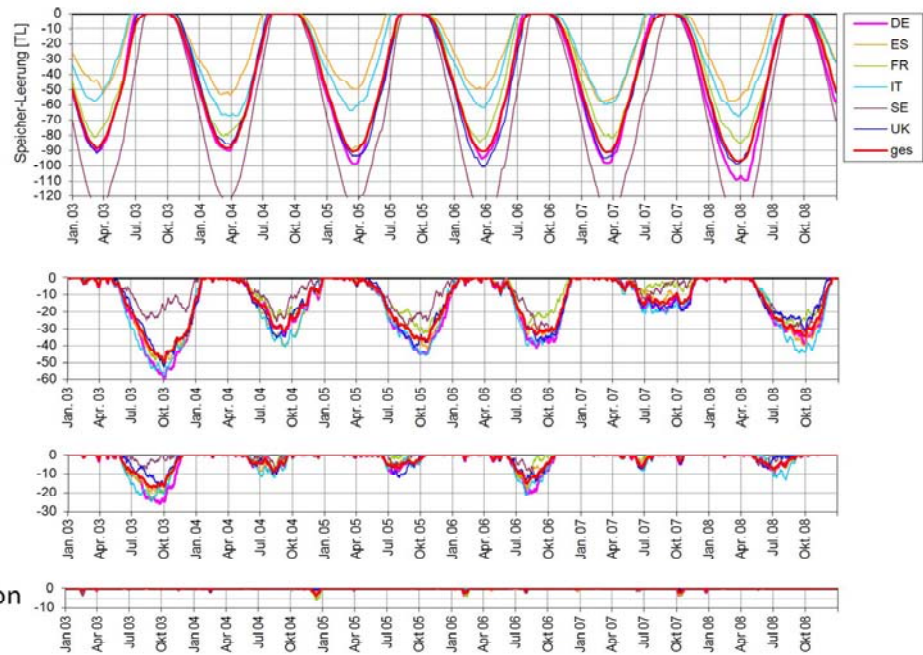
Solarenergie
mit leistungsverstärkten
Speichern

mit 80%
Speicherwirkungsgrad
bei leistungsstarker
kontinentaler Vernetzung

Windenergie mit
20% Benutzungsgrad

Windenergie mit
50% Benutzungsgrad

optimierte Kombination
aus Sonne und Wind
mit 50% Benutzungsgrad



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

13

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

Bei einer reinen Photovoltaik Versorgung ergäben sich die größten Speicherleerungen am Ende des Winters mit teilweise über 100 Tagesladungen des durchschnittlichen Stromverbrauchs der versorgten Regionen. Mit den Überschüssen des Sommers würden die Speicher immer wieder aufgeladen.

Windenergie, mit dem niedrigen, derzeit in Deutschland feststellbaren Benutzungsgrad von 20%, hätte die größten Speicherleerungen am Ende des Sommers mit bis zu 60 Tagesladungen. Die Winddatenanalyse Europas über einen fast 40-jährigen Zeitraum ergibt in allen Ländern Europas im Winterhalbjahr durchschnittlich höhere Windgeschwindigkeiten als im Sommerhalbjahr.

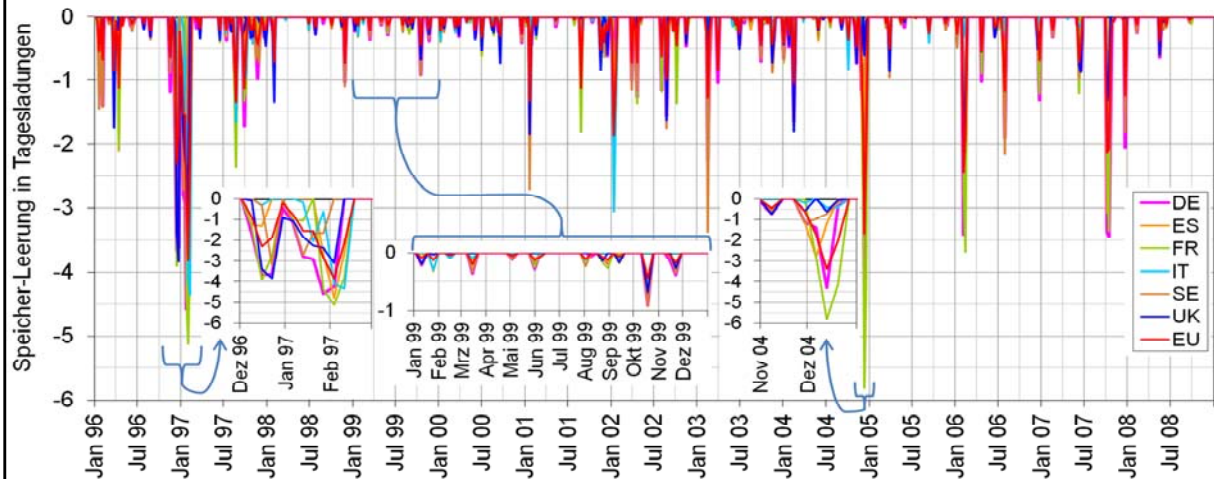
Speicher würden sich folglich im Sommerhalbjahr entladen und im Winterhalbjahr wieder aufladen.

Windenergieanlagen können aber auch so ausgelegt werden, dass sie einen höheren Benutzungsgrad oder gleichbedeutend, eine größere Anzahl von Volllaststunden erreichen. Damit ließe sich die Speicherleerung und damit die erforderliche Speicherkapazität deutlich, auf beispielsweise 26 Tagesladungen reduzieren.

Die Diagramme zeigen, dass Solarspeicher genau dann aufgeladen wären, wenn Windspeicher entladen sind und umgekehrt. Ein optimaler Mix dieser beiden Energiearten würde deshalb zu einer drastischen Reduzierung der maximal notwendigen Speicherkapazität führen.

Speicherbedarf minimierende Kombination

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



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

14

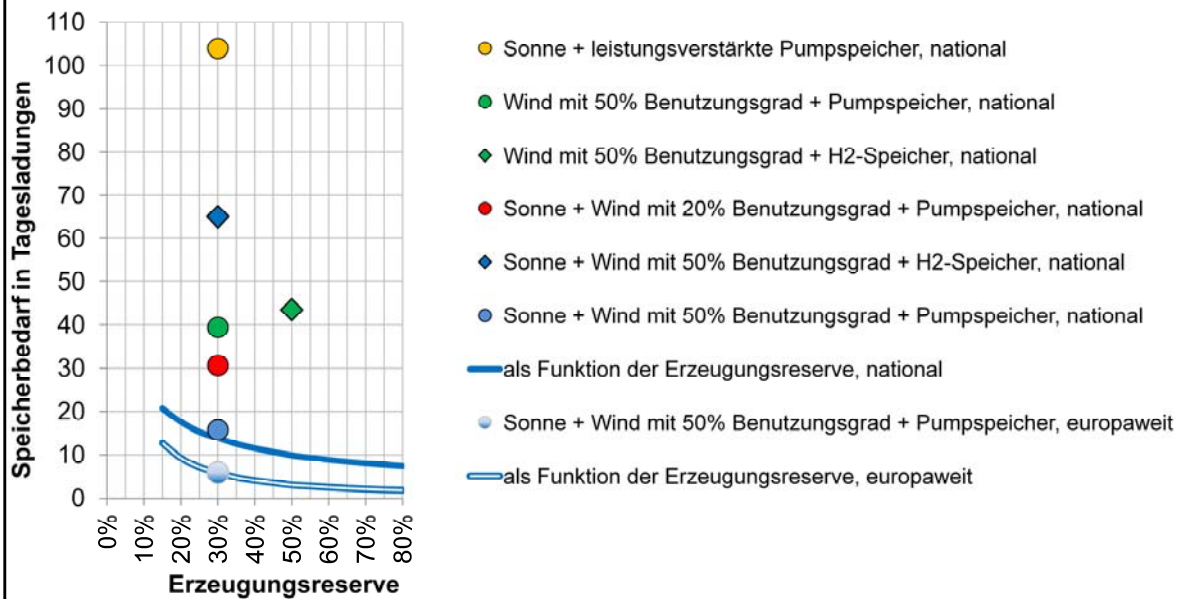
Diese Verhältnisse werden hier über einen längeren Zeitraum mit einer höheren Auflösung des Speicherbedarfs aufgezeigt.

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

Häufig würden die Speicher über viele Monate hinweg mit weniger als einer halben Tagesladung beansprucht.

Meistens wären die Speicher gut gefüllt.

Speicherbedarf einer sicheren Stromversorgung aus Wind und Sonne



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

Eine Reihe von untersuchten Szenarien zeigt dieses Diagramm.

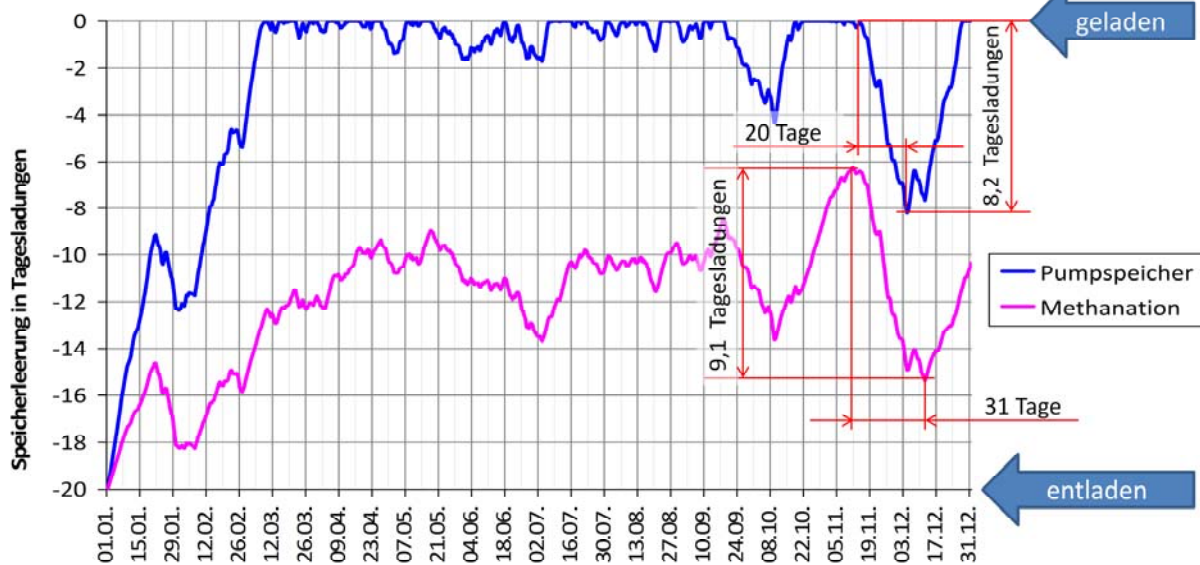
Jeder Eintrag repräsentiert eine regenerative Stromversorgung allein mit Wind und Sonne, welche die Nachfrage bedarfsgerecht decken könnte.

Der notwendige Speicherbedarf variiert von mehr als 100 Tagesladungen bei reinen Solarenergieszenarien, herunter bis auf einige Tagesladungen, mit einem optimierten Erzeugungsmix aus Wind- und Solarenergie in Verbindung mit Speichersystemen hohen Wirkungsgrads.

Je besser die Abstimmung und die grenzüberschreitende Kooperation der Länder gelingt, je höher die Erzeugungsreserve und je höher der Speicherwirkungsgrad, desto niedriger wird die erforderliche Speicherkapazität – und umgekehrt.

Dabei sind nationale Lösungen mit einer Speicherkapazität von 14 Tagesladungen und darunter, und länderübergreifende Lösungen von ca. 6 Tagesladungen und weniger erreichbar.

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



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

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

16

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

Bei entsprechend lang anhaltenden großräumigen Wetterbedingungen können weder ein leistungsstarkes Übertragungsnetz noch intelligentes Verbrauchsmanagement den Fehlbedarf ausgleichen.

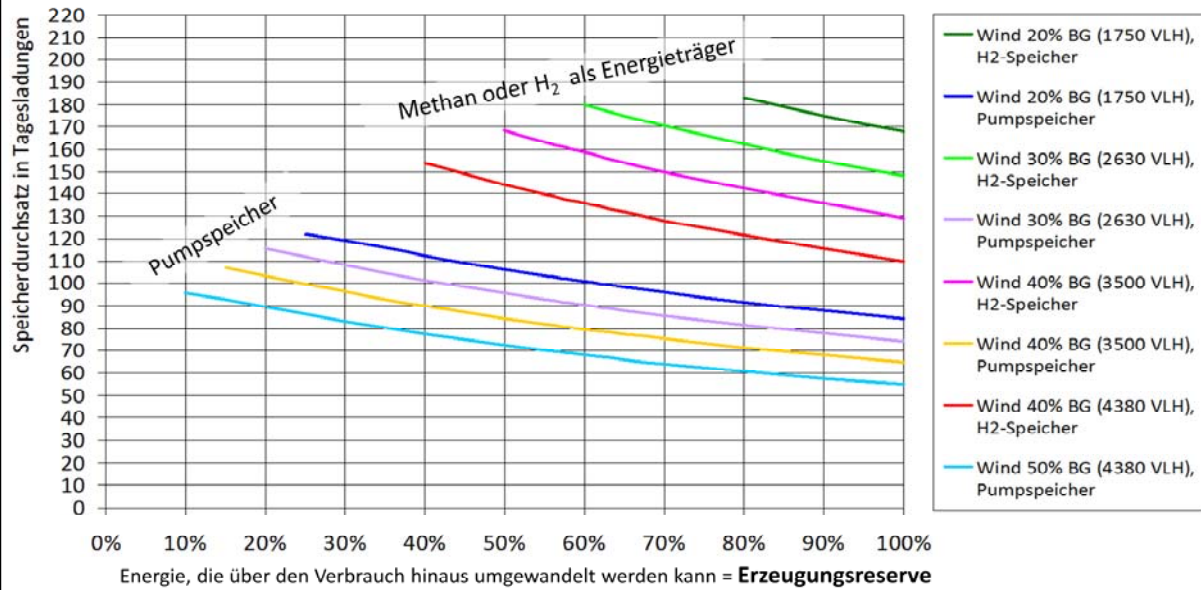
Wenn nicht auf Dauer ein leistungsstarker konventioneller bedarfsgerecht anforderbarer Kraftwerkspark in ständiger Einsatzbereitschaft gehalten werden soll, benötigt man Speichersysteme, die über die erforderlichen Kapazitätsreserven verfügen.

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

Das alles können dann die Langzeitspeicher mit erledigen.

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

Systemauslegung und Speicherdurchsatz



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

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

17

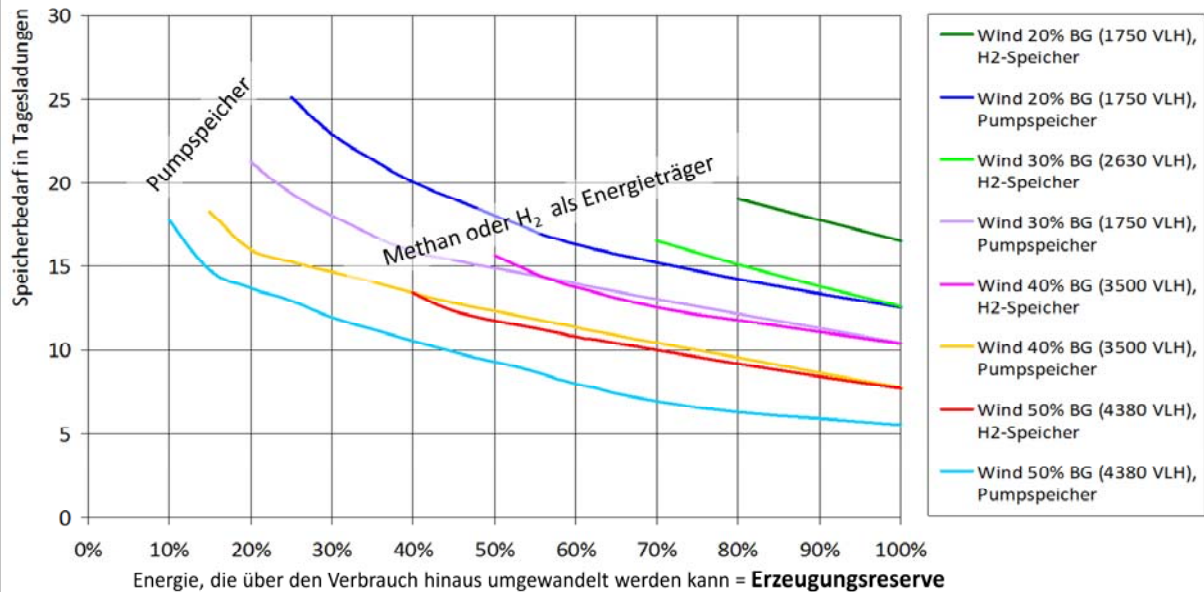
Die Begründung liefert der stattfindende **Speicherdurchsatz**.

Das ist die pro Jahr im Durchschnitt aufzuwendende Energie, um die Speicher nach Entladephasen immer wieder aufzuladen.

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

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

Systemauslegung und Speicherbedarf



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

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

18

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

Das ist die größte, einmalig im Langzeitbetrieb zu erwartende, Speicherleerung.

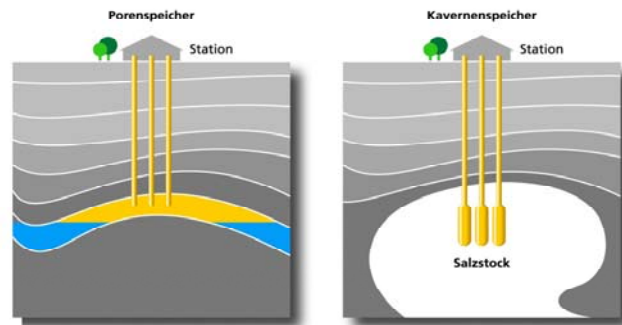
Die Kennlinien zeigen unter der Annahme eines jeweils optimal auf die regionalen Verhältnisse abgestimmten Energiemix, das Minimum an vorzuhaltender Erzeugungsleistung und die größten zu erwartenden Speicherleerungen.

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

Erdgasspeicher

Erdgasspeicher in Deutschland im Jahr 2011:

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



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

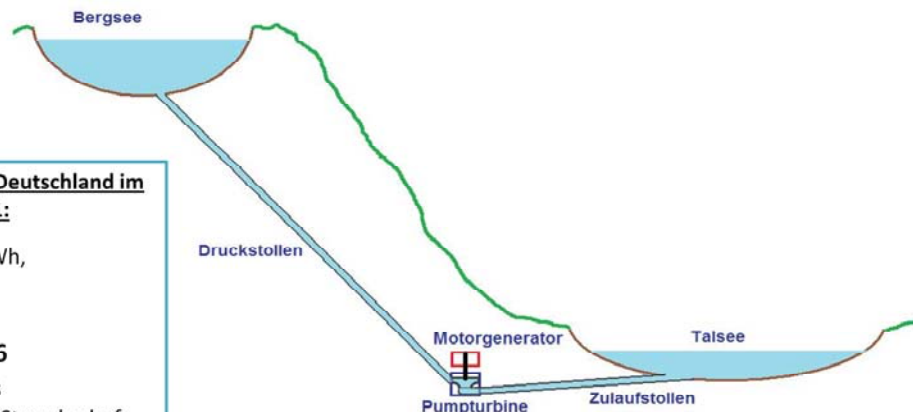
Die im Erdgasnetz vorhandene Speicherkapazität würde ohne Weiteres ausreichen, um Stromdefizite auch über die längsten Flauten hinweg ausgleichen zu können.

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

Pumpspeicher

Speicherkraftwerke in Deutschland im Jahr 2011:

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



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

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

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

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

Erforderliche Speicherkapazität

Speicherbedarf Deutschlands im nationalen Alleingang:

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

Kapazität ca. 20 TWh, Leistung ca. 90 GW

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

Speicherbedarf Deutschlands im europäischen Verbund:

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

Kapazität ca. 9 TWh, Leistung ca. 90 GW

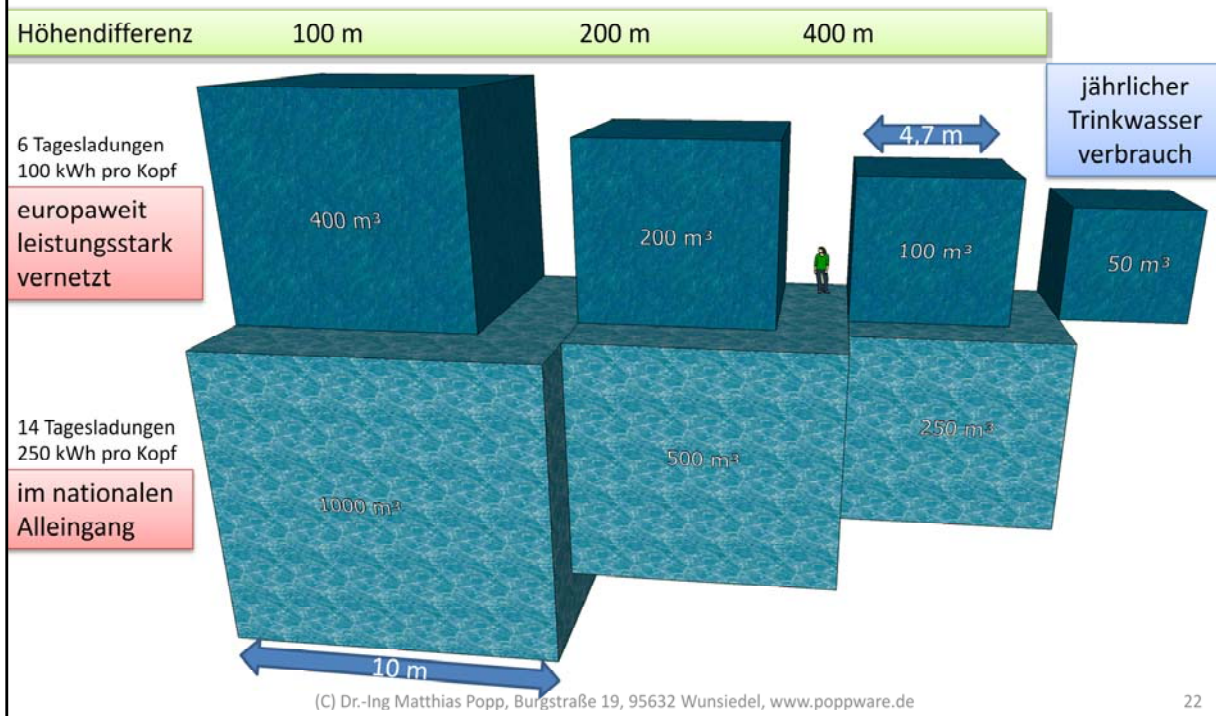
entspricht ca. **6 Tagesladungen** der Durchschnittsnachfrage,
erfordert ca. **200 Mal die vorhandene Speicherkapazität,**
leistungstarken Ausbau der europäischen Stromnetze und einen Ausbau der Wind- und Solarenergie in allen Ländern Europas

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

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

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

Wasserbedarf zur Energiespeicherung pro Person



Die notwendige Speicherkapazität pro Kopf läge, zwischen 100 und 250 Kilowattstunden. Je nach Höhenunterschied der Wasserflächen von Pumpspeichersystemen, würde das pro Einwohner Austauschvolumen zwischen 100 und 1000 m³ erfordern.

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

Ein Wasserproblem würde es zur Befüllung der Pumpspeichersysteme nicht geben.

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

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

Bodenflächenbedarf zur Energiespeicherung

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

Wasserflächenbedarf pro Kopf der Bevölkerung zur Schaffung von Speichervolumen							
Speicherbedarf	Wasservolumen						Einheit
	100 kWh/Pers. (europäisch)			250 kWh/Pers. (national)			
Höhenunterschied	400	200	100	400	200	100	m
Pegelspiel	100	200	400	250	500	1000	m 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) Dr.-Ing Matthias Popp, Burgstraße 19, 95632 Wunsiedel, www.poppware.de

23

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.

Ein Flächenbedarf, der sich zwischen 20 und 50 m² pro Kopf der Bevölkerung bewegt, erscheint dabei aus technischer Sicht gut umsetzbar.

Bodenflächenbedarf zur Energiespeicherung

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

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

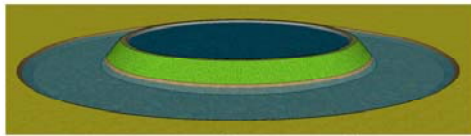
Die landesweit zu schaffenden Wasserflächen zur Energiespeicherung wären marginal im Vergleich zu vielen anderen Landnutzungen.

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

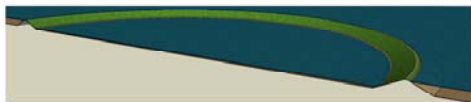
All diese Überlegungen führen zum Vorschlag des Ringwallspeichers.

Ringwallspeicher

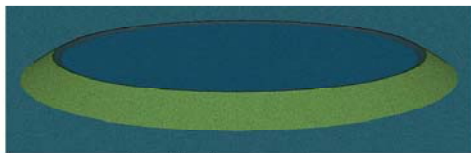
als geotechnische Option zur Schaffung großer Speicherkapazitäten



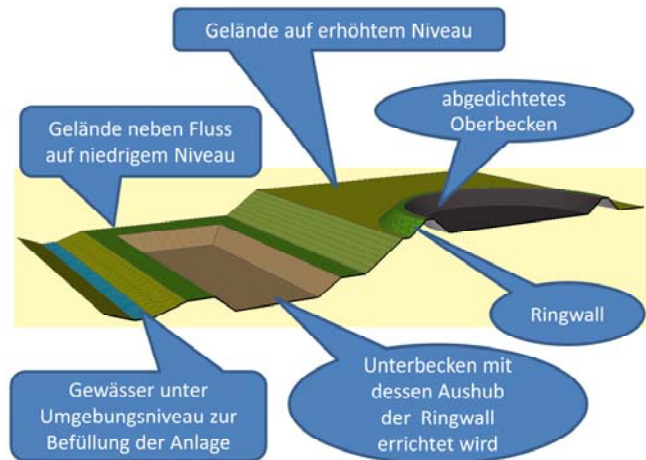
für das „flache Land“



für tiefe Gewässer



für flache Gewässer



bei natürlichen Höhenunterschieden

doppelte geometrische Abmessungen schaffen 16-fache Speicherkapazität

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

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

Die Anlage würde wie ein Pumpspeicherkraftwerk betrieben.

Ringwallspeicher unterscheiden sich von klassischen Pumpspeichern dadurch, dass auf die direkte Flutung sensibler Flusstäler verzichtet werden kann. Zudem führen bereits geringere Höhenunterschiede, sowie weniger markante und sensible Höhenlagen, zu wirtschaftlich interessanten Konfigurationen.

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

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

Ringwallspeicher-Hybridkraftwerk

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



„Ringwallspeicher as technical building and tourism paradise“

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

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

26

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

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

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

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

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

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

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

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

Beispiel Edersee

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



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

27

Derartige Wasserflächen gibt es.

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

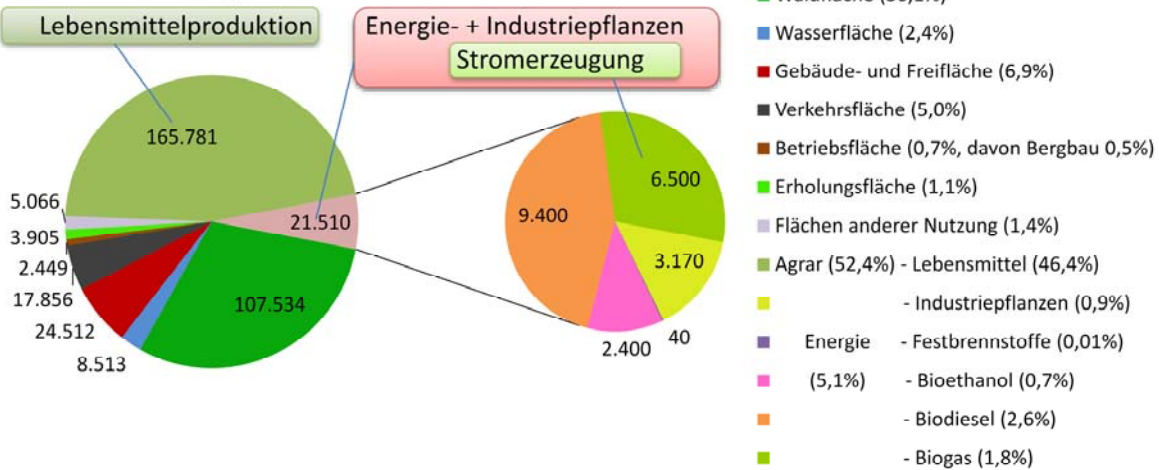
Als ich im Jahr 2008 diese Bilder machte betrug die Absenkung etwa 20 Meter. An diesem Tag ging es noch einmal um mehr als einen Meter nach unten.

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

Bodennutzung Deutschlands

in km² (Gesamtfläche 357.126 km²)

landwirtschaftlich genutzte Flächen 2010 für



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

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

28

Etwas mehr als die Hälfte Deutschlands wird landwirtschaftlich genutzt.

Der größte Teil davon dient der Lebensmittelproduktion.

Die industriell und energetisch genutzten Agrarflächen sind hier weiter aufgeschlüsselt.

Davon wird heute 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.

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

Die erforderliche Gesamtfläche läge bei ca. 3000 km².

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 Deutschlands 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 Ringwallspeicher / Braunkohle



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

Landschaftseingriffe größeren Ausmaßes als für Ringwallspeicher sind in Deutschland Realität.

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

31

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

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

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

Vergleich Ringwallspeicher / Braunkohle

Braunkohletagebau Hambach (zwischen Köln und Aachen)

- siehe z.B.: http://de.wikipedia.org/wiki/Tagebau_Hambach
- 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 auf die ca. 200 Meter hohe Halde gekippte Volumen des abzutragenden Deckgebirges würde ausreichen, um etwa sieben Ringwallspeicher in der gezeigten Größe zu errichten.

Die damit geschaffenen Hybridsysteme könnten ein Mehrfaches an elektrischer Leistung bereitstellen, als dieser Tagebau.

Vergleich Ringwallspeicher / Tagebau



Kreisrunde **Ringwallspeichersysteme**

sind eine Idealvorstellung, die es so kaum geben wird.

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

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

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

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

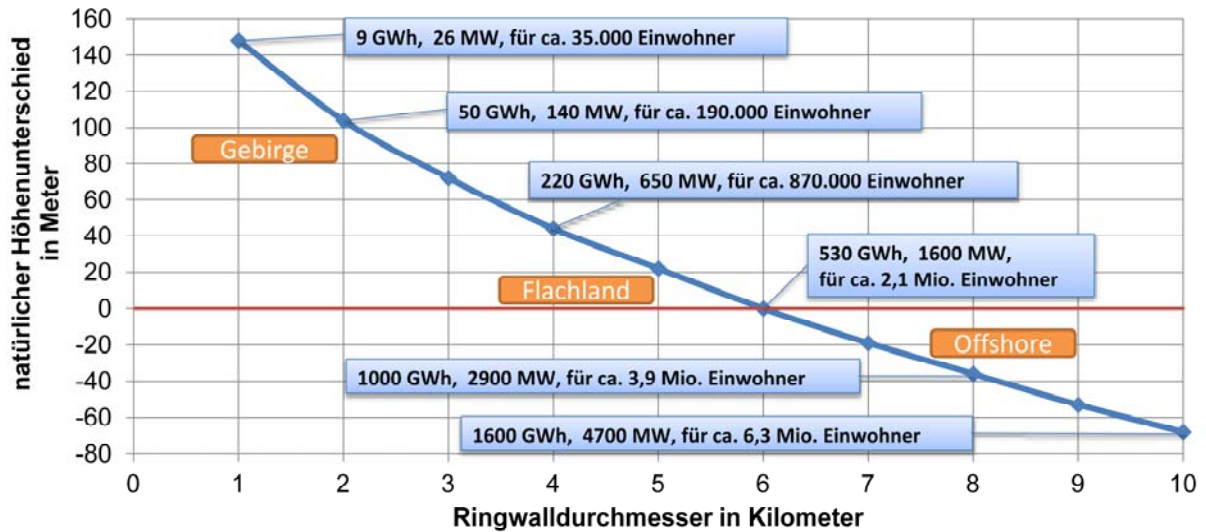
Dafür besteht auch keine Notwendigkeit.

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

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

Ringwallspeicher mit ähnlichem Bauaufwand

bei natürlich vorhandenen Höhenunterschieden



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

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

34

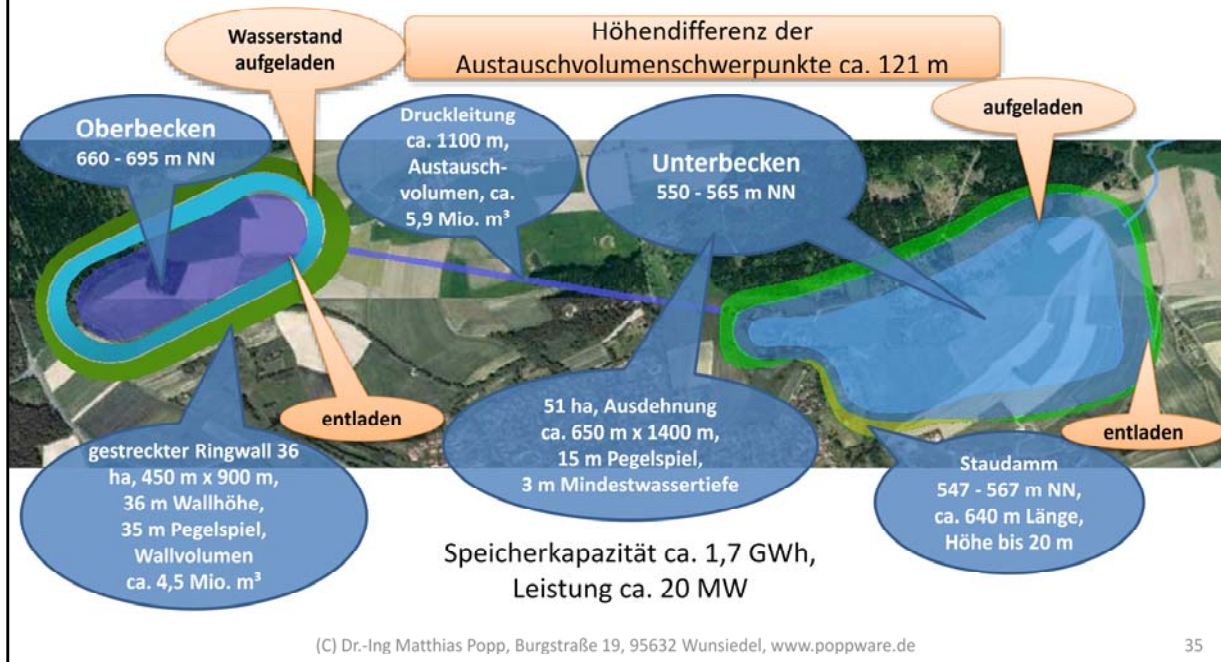
Dämme verschlingen das größte Bauvolumen im Fußbereich.

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

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

kleiner Ringwallspeicher mit Nutzung natürlicher Höhenunterschiede

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



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

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

Zum Schluss

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

Zusammen beansprucht das ca. 1% der Landesfläche.

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

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

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

Die Lernkurve dafür befindet sich noch ganz am Anfang.

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

Danke für Ihre Aufmerksamkeit

Herzlichen Glückwunsch zum erfolgreichen Abschluss Ihres Studiums und Ihrer wissenschaftlichen Arbeiten

an der renommierten

TECHNISCHEN UNIVERSITÄT MÜNCHEN



Alles Gute für den jetzt auf Sie zukommenden Lebensabschnitt

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

Entscheidend für wirtschaftlich attraktive, geotechnisch geschaffene Speichersysteme sind kostengünstige Lösungen für: Aushub, Transport und Wiedereinbau großer Bodenmassen, qualifizierte Herstellung sicherer großer Dammsysteme, Verformungsunabhängige, gut kontrollierbare großflächige Oberflächendichtsysteme .

Dies sind originäre Aufgaben der Geotechnik, die damit einen substantiellen Beitrag für ein nachhaltiges Energiesystem der Zukunft leisten und zu einer Schlüsseltechnologie für eine nachhaltig sichere Stromversorgung aus natürlichen Energiekreisläufen werden kann.

Die Weichen für die energiewirtschaftliche Zukunft werden aktuell gestellt. Das vorgestellte Konzept kann vielen Generationen dienen, ist robust und verwendet primär die überall verfügbaren Rohstoffe Boden und Wasser. Es kann dezentral politisch akzeptabel umgesetzt werden und es ist möglich, mit kleinen Anlagen zu beginnen, an denen optimiert, gelernt und sich dem Wettbewerb zu anderen Speichermöglichkeiten gestellt werden kann.

Der Vortrag möge Sie anregen, die Potentiale der Geotechnik und des Bau- und Umweltingenieurwesens offensiv zu vertreten.

Herzlichen Glückwunsch zu Ihrem heutigen Abschluss und alles Gute auf Ihrem spannenden Lebensweg.