

Energiewende- Wir schaffen das

Dr. Gerhard Luther

Universität des Saarlandes ,
Experimentalphysik , Bau E26
66123 Saarbrücken

luther.gerhard@ingenieur.io

0681-302-2737(d) und 0681-56310(p)

www.fze.uni-saarland.de/Speicher.htm

Inhalt

0. Einleitung: „**Blitzlichter zur allgemeinen Lage**“.

1. Die **Energiewende** „en marche“

2. Das **Speicherproblem von Sonne und Wind in Deutschland**

Aktuelles RE-Strom Dargebot und Fortschreibung: 100% RE -Zukunft

3. **LösungsSzenario:** Kurz- und Langzeit (Gas)- Speicher

3.1 Das Szenario

3.2 Die Optimierungsaufgabe; Ziel + Einstellparameter

3.3 Erste Ergebnisse: Kapazität und Umschlag der PSKW-Speicher

4. Spezial: Unkonventionelle Energiespeicher

4.1 Das **Meeresdruck- PSKW (STENSEA)**

Blitzlichter zur aktuellen Lage

Wir haben 3 wichtige grundlegende Weltprobleme:

1. Bevölkerungsdruck

2. Klimawandel

CO2 -merit order : Ein Beispiel für verpasste CO2- Vermeidungspolitik

3. Ressourcenverknappung

Einen wichtigen Lösungsansatz leistet die Energiewende

.

Bevölkerung der Erde in 2011: 7.0 GE

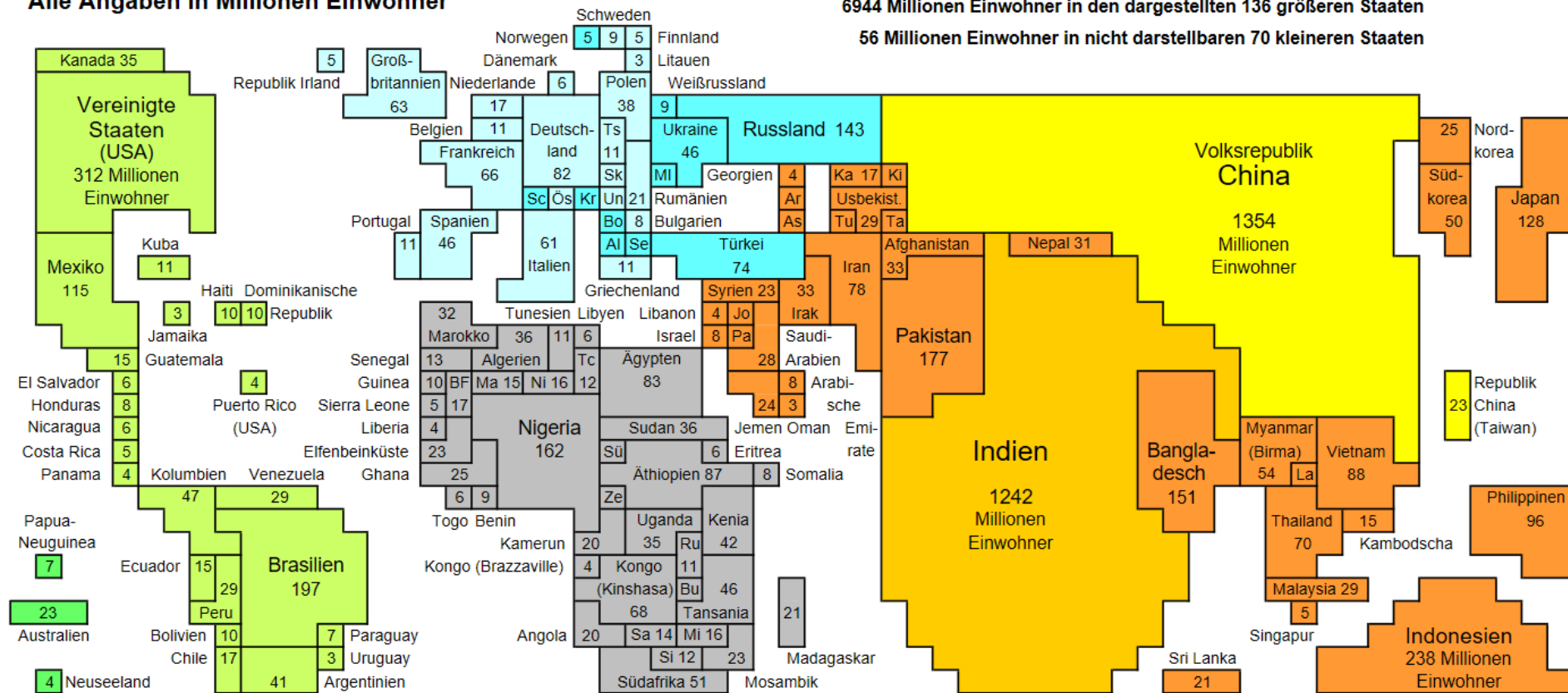
Fläche proportional zur Bevölkerung

Alle Angaben in Millionen Einwohner

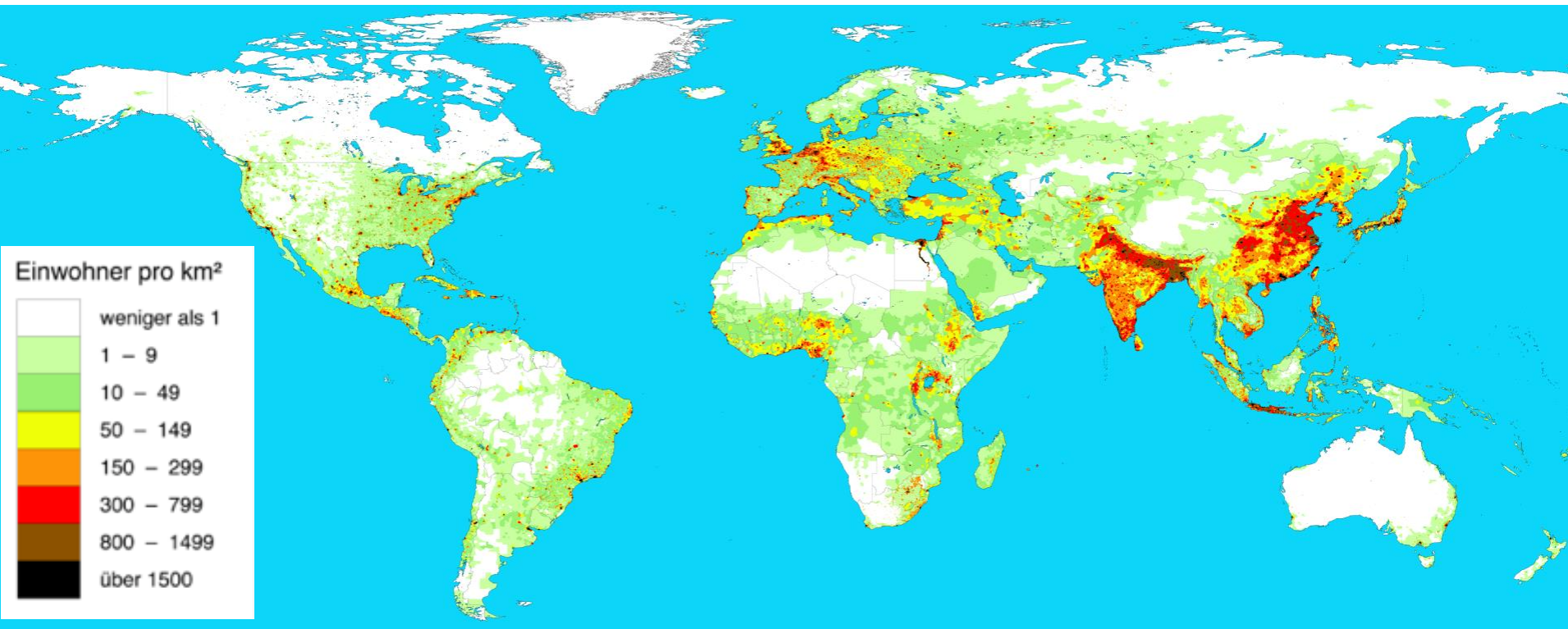
Weltbevölkerung: 7000 Millionen im Jahr 2011

6944 Millionen Einwohner in den dargestellten 136 größeren Staaten

56 Millionen Einwohner in nicht darstellbaren 70 kleineren Staaten



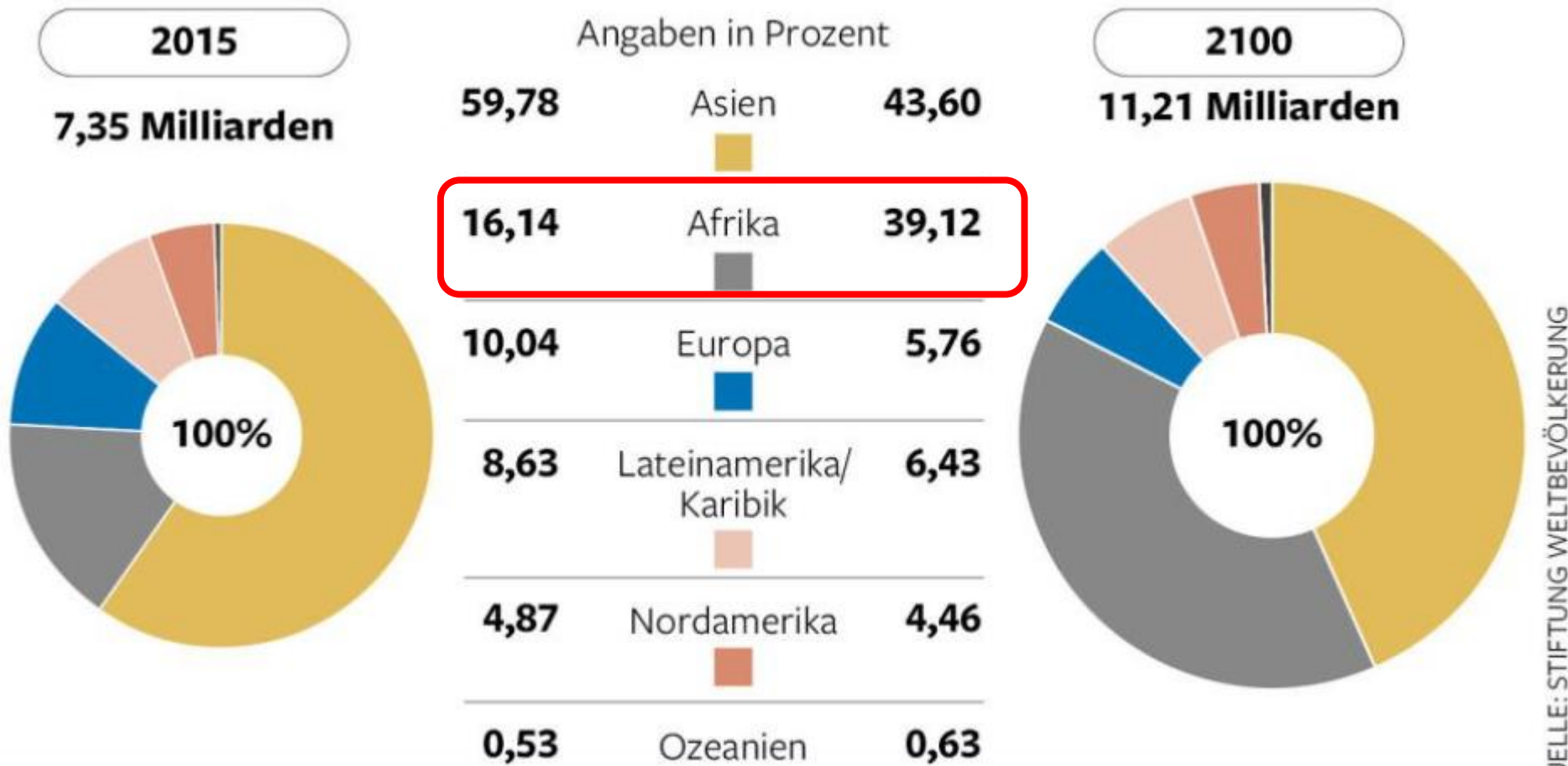
Bevölkerungsdichte (2005)



Quelle: Wikipedia Bevölkerungsdichte (Zugriff: 2016.0107)

<https://de.wikipedia.org/wiki/Bev%C3%B6lkerungsdichte>

UN Prognose (von 2015)



Quelle: Infografik Die Welt

Afrikaner vervierfachen sich bis 2100 AD auf 4.4 GE

Quelle: <https://www.welt.de/politik/deutschland/article144603847/Afrikas-Bevoelkerung-vervierfacht-sich.html>

Weitere Literatur: UNReport 2017: WorldPopulation Prospects : https://esa.un.org/unpd/wpp/Publications/Files/WPP2017_KeyFindings.pdf

Was hat das mit der Energiewende zu tun ?

Energiewende schafft Voraussetzungen für **preisgünstige RE**
überall in der Welt.



Wohlstand, Bildung, Zivilisation

Zurückdrängung atavistischer Urinstinkte



Befreiung von Unmündigkeit

(Sippe, Gesellschaft, fundamentalist. Religion)

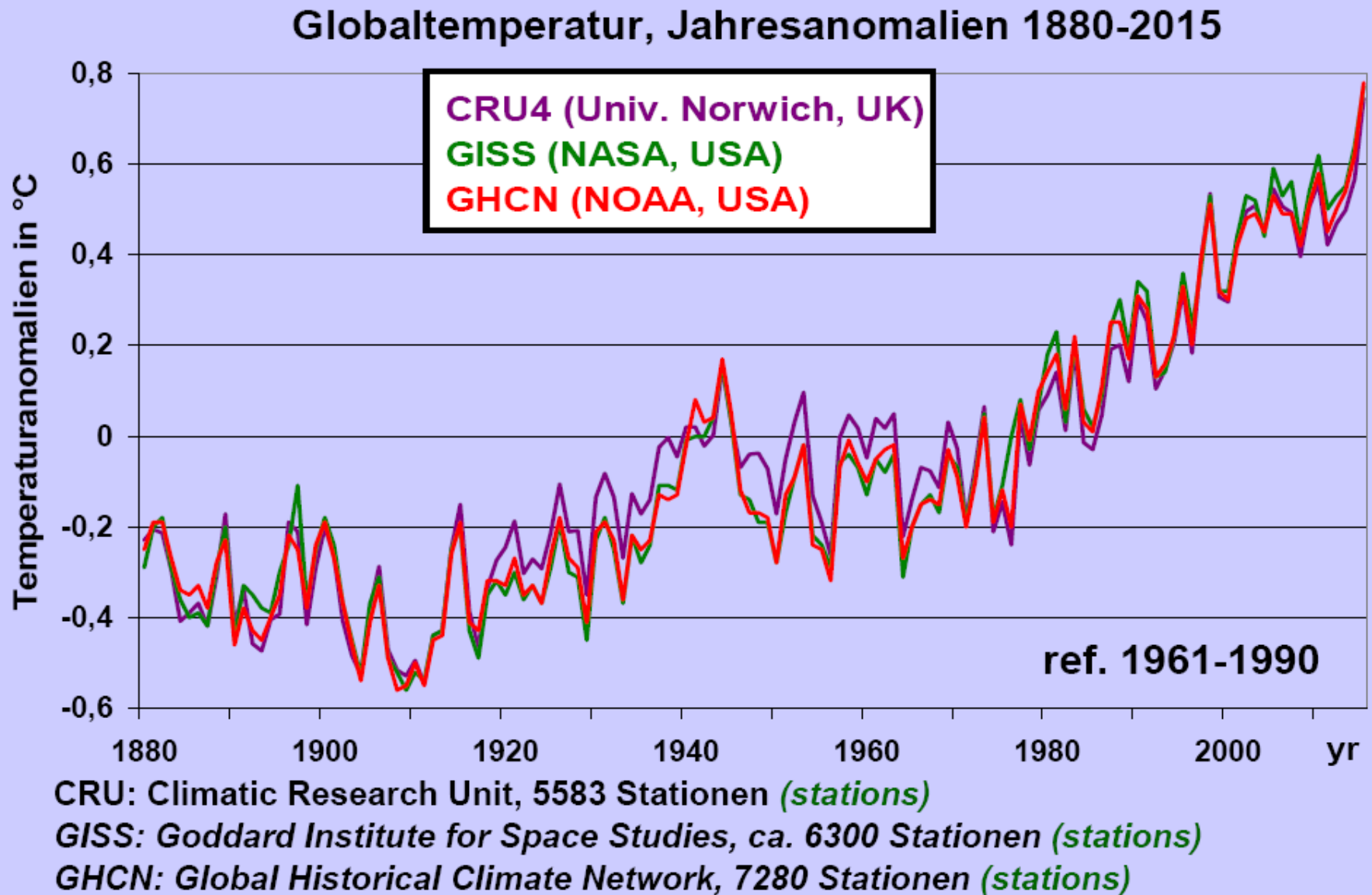
Geburtenplanung,

Beachte:

In den UN Projektionen ist schon ein **starker Rückgang der Geburtenrate** eingerechnet.

Ansonsten gäbe es **26 GE** in 2100 AD auf unserem Planeten!!

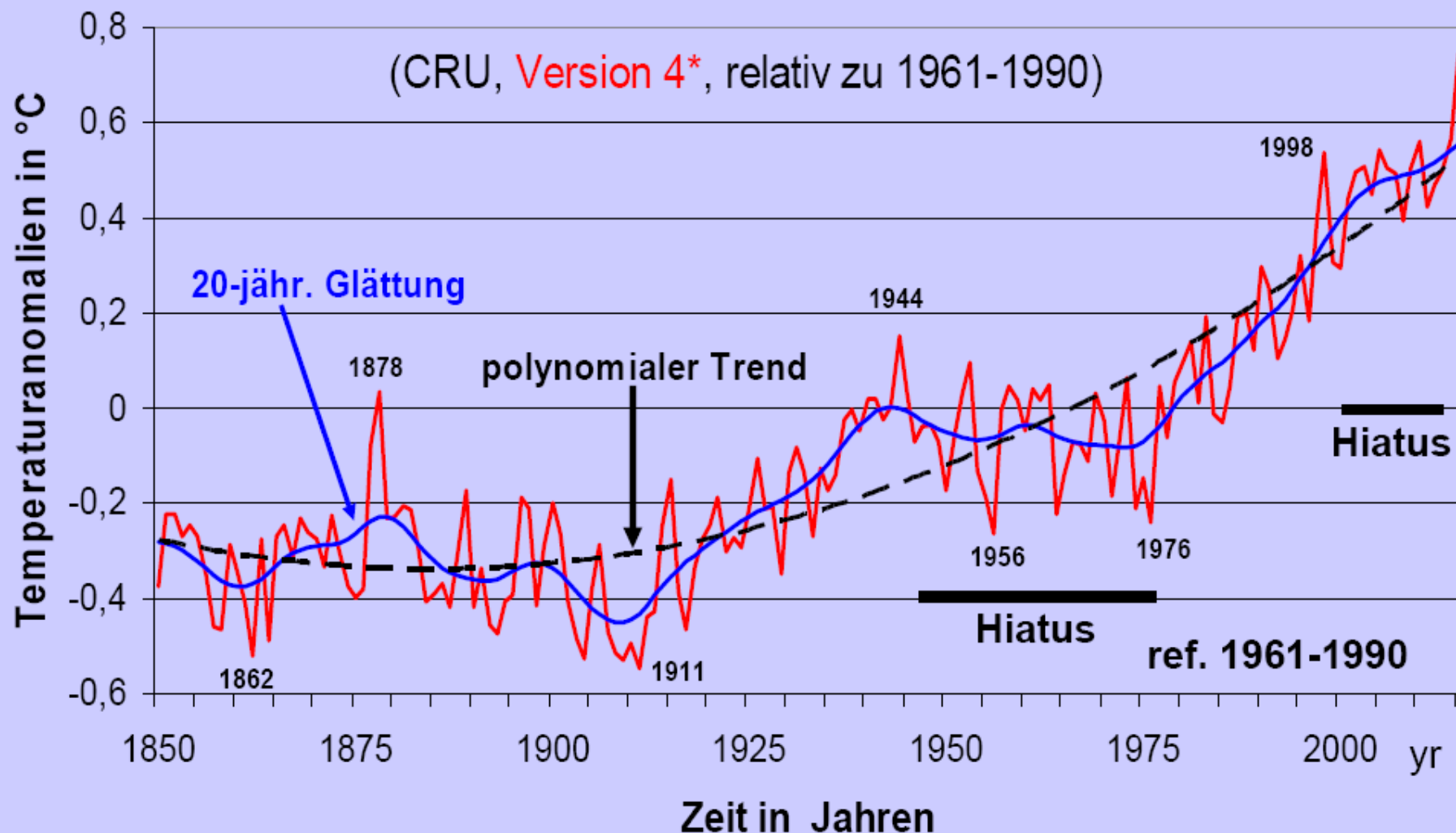
Der Tatbestand: z.B. Globaltemperatur



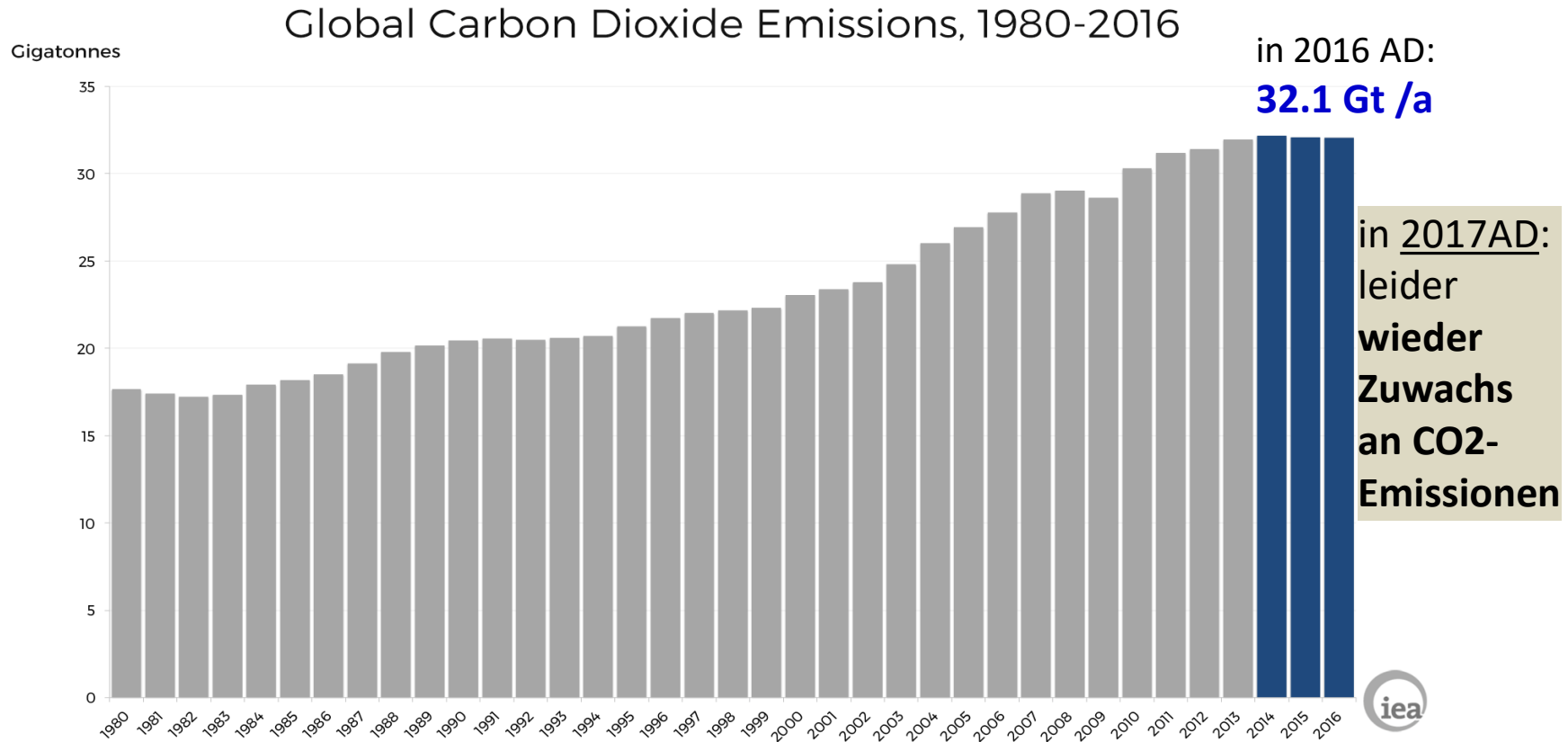
Globaltemperatur, Jahresanomalien 1850 - 2015

CRU - *annual anomalies*

(CRU, Version 4*, relativ zu 1961-1990)



IEA: “CO2 emissions **flat** for third straight year”



weil: mehr RE,
mehr Gas statt Kohle (Schiefergas),
mehr Effizienz
mehr AKW's (China, US, SKorea, India, Russ., Pakistan)

Eine gute Tendenz, aber:

**für 2 Grad-Ziel
noch nicht ausreichend !**

Quelle: IEA (2017), Pressemitteilung vom 2017.0317.

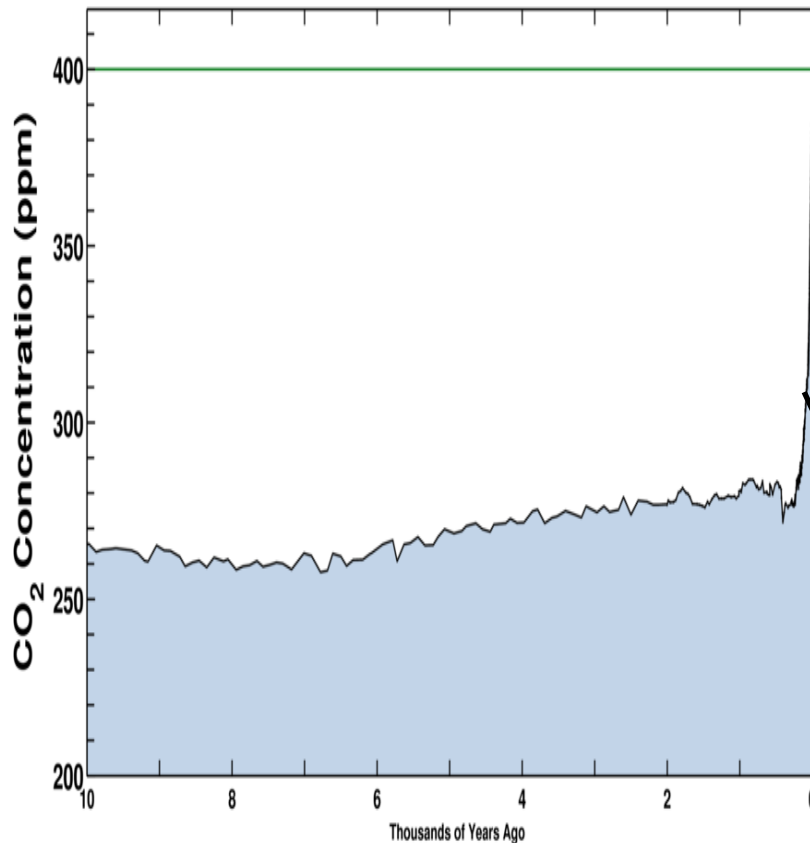
<http://www.iea.org/newsroom/news/2017/march/iea-finds-co2-emissions-flat-for-third-straight-year-even-as-global-economy-grew.html>

CO₂ seit 10 ka (ice core) und seit 1958 (Mauna Loa)

Latest CO₂ reading
November 11, 2017

404.50 ppm

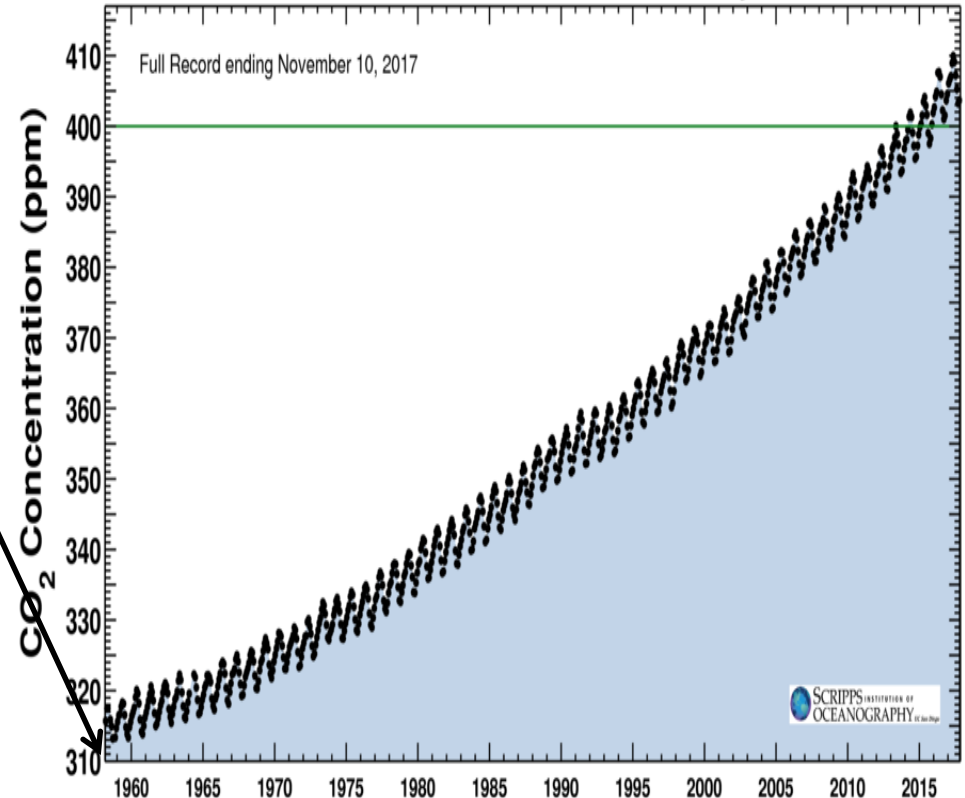
Ice-core data before 1958. Mauna Loa data after 1958.



Latest CO₂ reading
November 10, 2017

404.04 ppm

Carbon dioxide concentration at Mauna Loa Observatory



Quelle (tagesaktuell!): [Scripps Institution of Oceanography](https://scripps.ucsd.edu/programs/keelingcurve/wp-content/plugins/sio-blumoon/graphs/co2_10k.png).

https://scripps.ucsd.edu/programs/keelingcurve/wp-content/plugins/sio-blumoon/graphs/co2_10k.png

https://scripps.ucsd.edu/programs/keelingcurve/wp-content/plugins/sio-blumoon/graphs/mlo_full_record.png



Ein Beispiel für verpasste CO2- Vermeidungspolitik

Ökologische Merit Order Studie



C. Heinemann e.a.
(2016.1115)

Ökologische Bereitstellung von
Flexibilität im Stromsystem

https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/OEkologische_Flexibilitaetsoptionen.pdf

Eine sensationelle **Studie des ÖkoInstitutes** hat ausgerechnet, was schon lange zu vermuten war:

Deutschland könnte, fast **aus dem Stand**, durch einen administrativen Eingriff in die „merit order“ des vorhandenen Kraftwerksparks **effizient CO2 einsparen** und zwar:

79 Mt CO₂/a , also ca. **25 %** der Gesamtemissionen im Strombereich
(Stand 2015) .

Bei einem **Aufwand** von **1.1 G€/a** , also

nur 14 €/t CO₂

für die Mehrkosten durch **Gaseinsatz!**

Quelle: Öko-Institut (2016): „Ökologische MeritOrder-Studie“

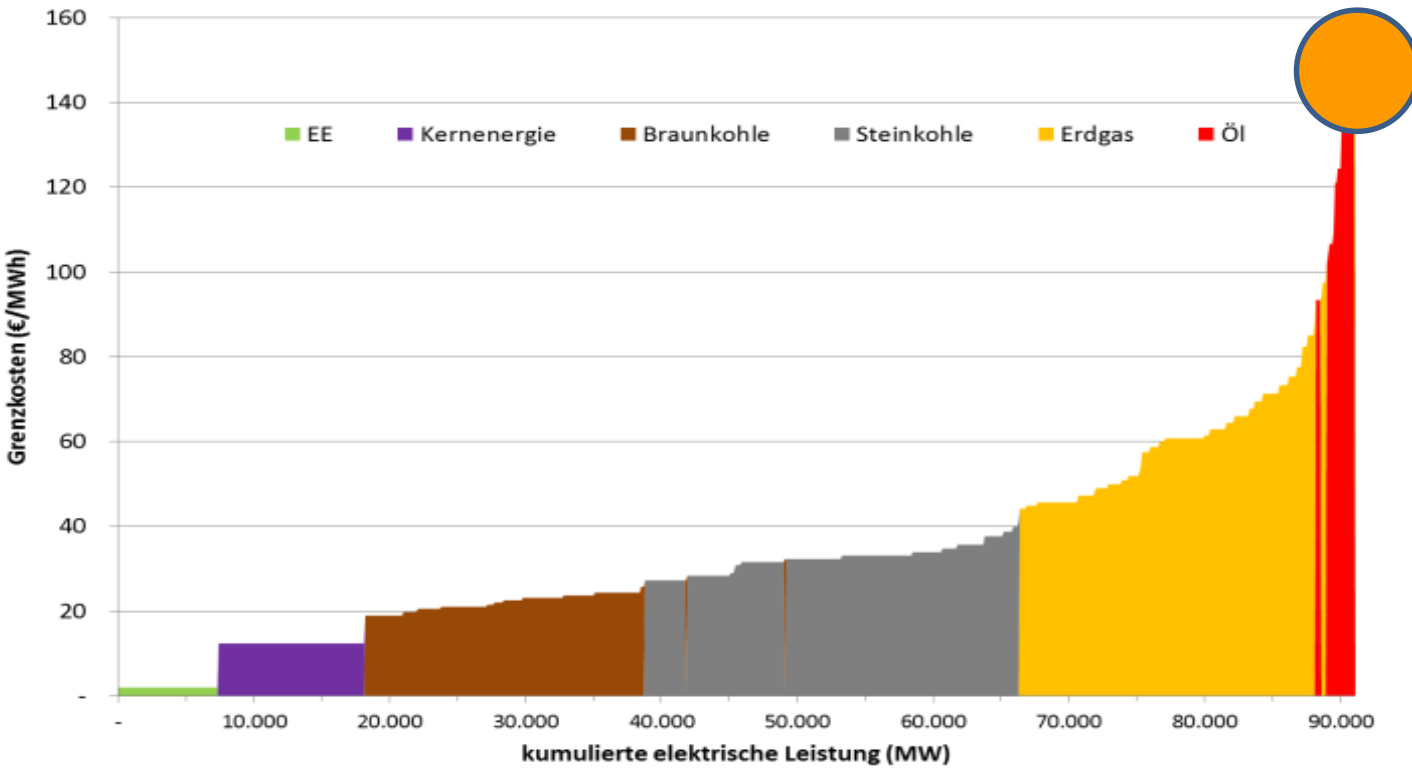
https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/OEkologische_Flexibilitaetsoptionen.pdf

Speicher: Ökol2016_MeritOrder_ÖkologBereitstellung-vonStrom.Flexibilität_90p.pdf

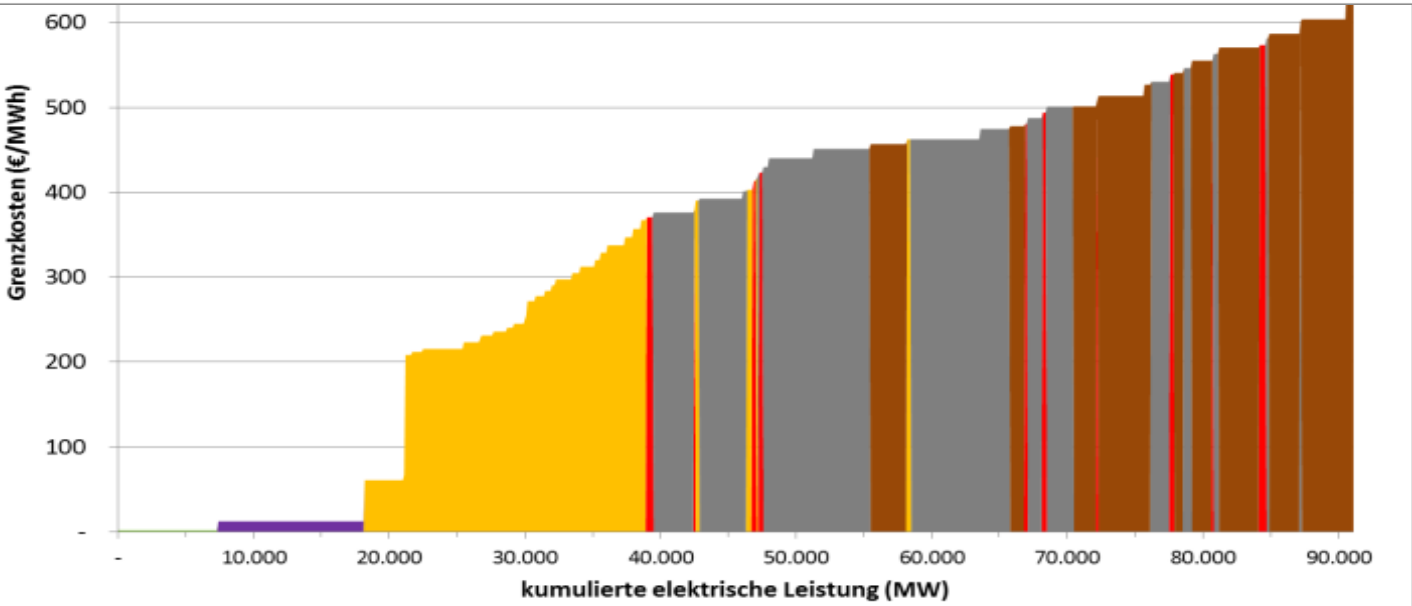
Merit order

der
deutschen KW in
AD 2015

reale,
„ökonomische“
merit order

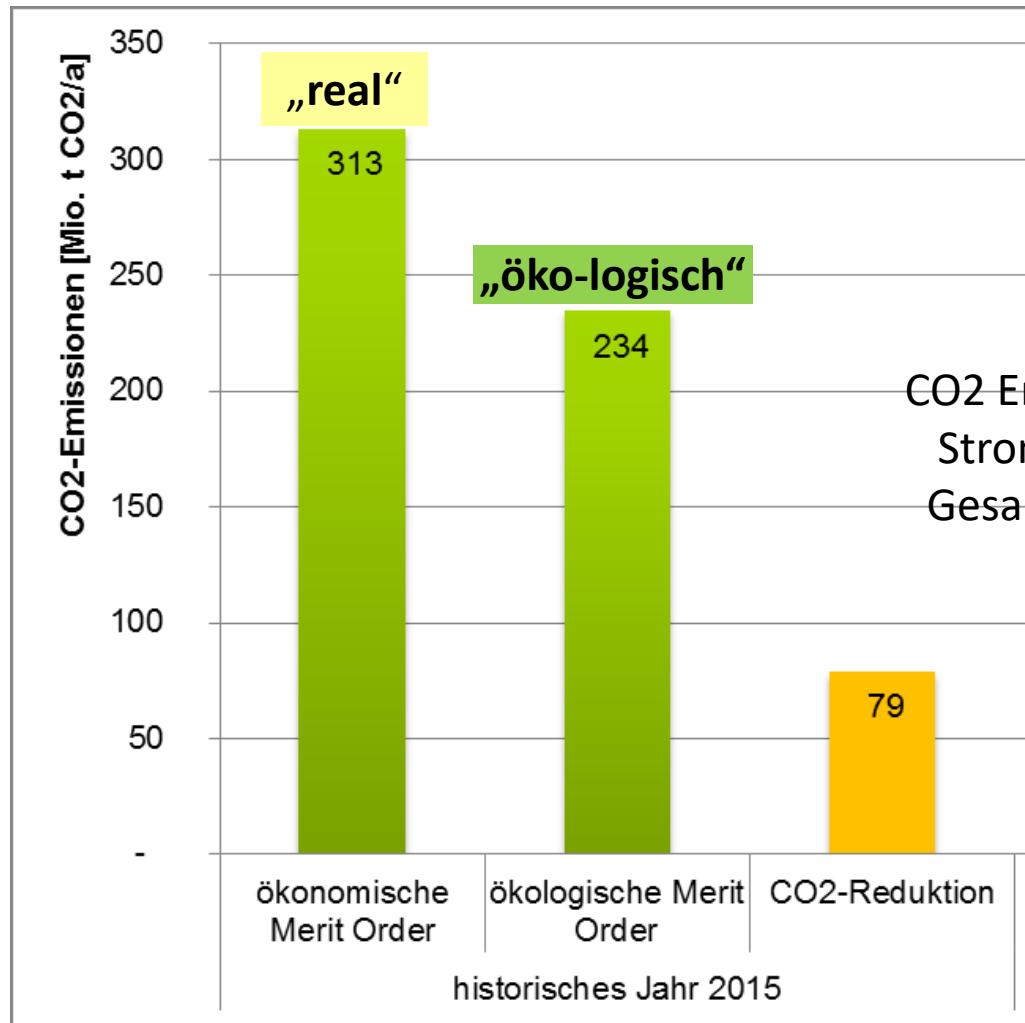
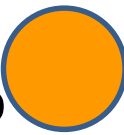


ideale,
„ökologische“
merit order
mit
maximaler
CO2-Gewichtung



„Die Erhöhung des CO2-Preises
an dieser Stelle zeigt lediglich
die Methodik zur
Darstellung der ökologischen
Merit Order.“

CO2-Effekt einer ökologischen Einsatzreihenfolge der Kraftwerke in 2015 AD



CO2 Emissionen zum Vergleich:
Stromsektor (DEU): ca.
Gesamt (DEU 2015):

UrQuelle: Öko-Institut (2016); Ökol.MeritOrder-Studie; Ausschnitt für 2015 AD aus Abb.3.1, verändert





Ein einfacher kostenneutraler Vorschlag

Es gibt einen naheliegenden, mehr als kostenneutralen Vorschlag, den aber bisher noch keiner der Interessen geleiteten Experten und auch weder das Öko Institut noch Greenpeace erhoben hat:

1. Abschaffung der Subventionierung der Kraftwärmekopplung

Einsparung ca. **1.5 G €/a** KWKG [+ versteckte Subventionen]

2. Administrative ökologische Änderung der „merit order“

Mehrkosten ca. **1.1 G €/a**

Bemerkung: Bei einer ökologischen Änderung der Reihenfolge (merit order) der Kraftwerke lässt sich mit der KWK sowieso kaum zusätzliches CO2 mehr einsparen, weil die bisher der KWK zugeordnete Einsparung im Kern nicht auf der Technologie sondern auf dem Ersatz von Kohle durch Erdgas bei der Stromerzeugung beruht.

siehe: http://www.fze.uni-saarland.de/AKE_Archiv/DPG2016-AKE_Regensburg/Links_DPG2016.htm Vortrag 2.1: Luther

Strategien zur Rohstoff Versorgung

Stoffliche Ressourcen

- **Recycling**
- Rohstoffgewinnung aus **größeren Teufen**

Erschöpfbare Energieträger

- **Regenerative Energien**

1.

Die Energiewende „en marche“

1.1 Bisheriger und geplanter Ausbau der RE

1.2 Beispiel: Photovoltaik (PV)

1.2.1 Dargebot/ Potential

1.2.2 Kosten/ Preise

1.3 Kosten für große RE Anlagen: Ausschreibungen 2017

Empfohlenene Literatur:

FhG-ISE = Fraunhofer-Institut für solare Energiesysteme , Freiburg



Philipps ea (2017): Fraunhofer ISE: **Photovoltaics Report**, updated: 12 July 2017, 44p.

Wirth e.a. (2017): **Aktuelle Fakten zur PV in Deutschland**

Aktuelle Fassung beider Reports abrufbar unter www.pv-fakten.de

bdew: Bundesverband der Energie und Wasserwirtschaft

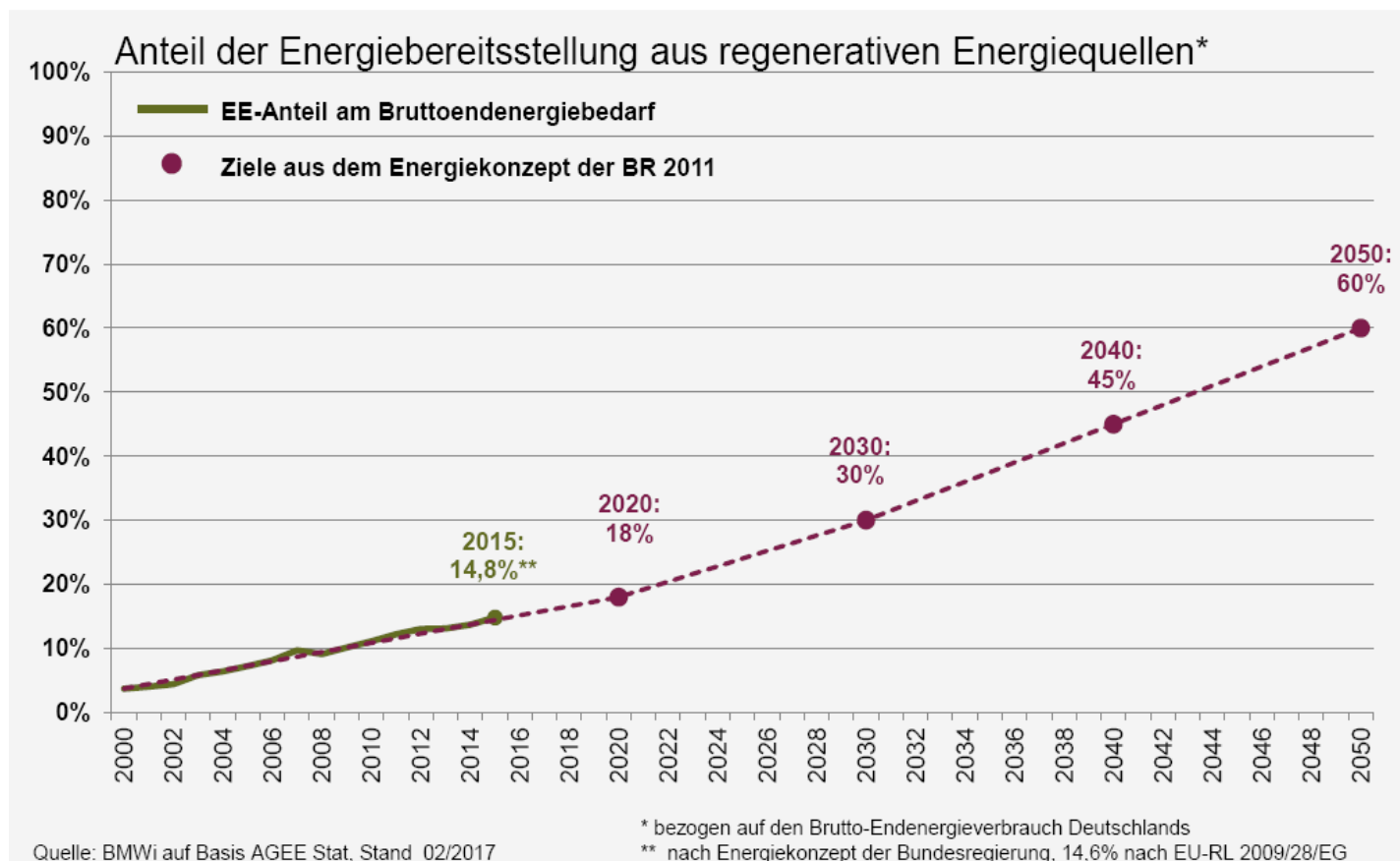


“Erneuerbare Energien und das EEG: Zahlen, Fakten, Grafiken (2017)“,

[https://www.bdew.de/internet.nsf/res/4A5D437AB754A529C125817C00323A64/\\$file/Awh_20170710_Erneuerbare-Energien-EEG_2017.pdf](https://www.bdew.de/internet.nsf/res/4A5D437AB754A529C125817C00323A64/$file/Awh_20170710_Erneuerbare-Energien-EEG_2017.pdf)

Der Umstieg auf die Regenerativen Energien (RE)

Beitrag und Ziele der Erneuerbaren Energien: Bruttoendenergiebedarf (Energie gesamt)

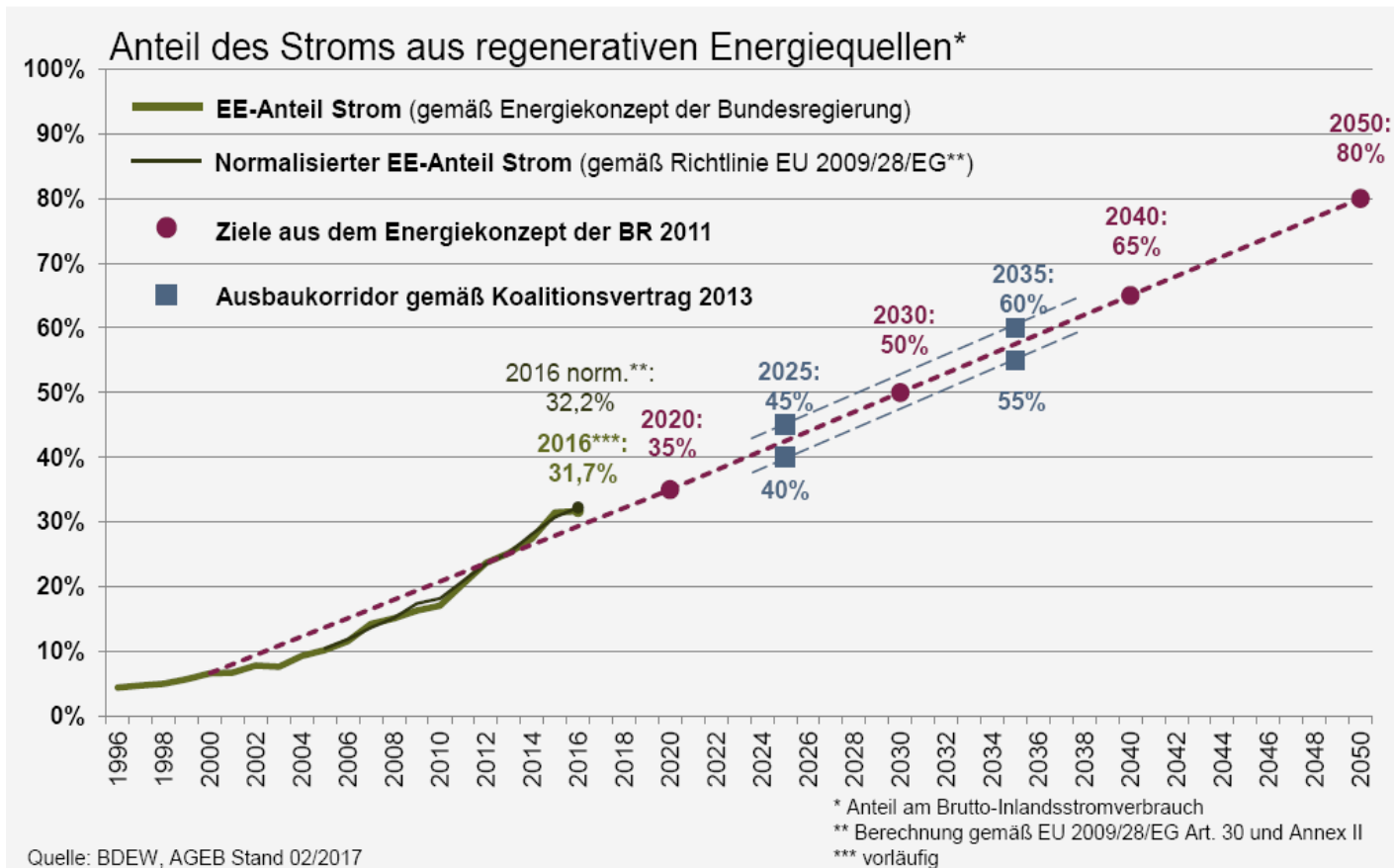


Quelle: /bdew2017/ = Bundesverband der Energie und Wasserwirtschaft: "Erneuerbare Energien und das EEG: Zahlen, Fakten, Grafiken (2017)", Abb.17

[https://www.bdeW.de/internet.nsf/res/4A5D437AB754A529C125817C00323A64/\\$file/Awh_20170710_Erneuerbare-Energien-EEG_2017.pdf](https://www.bdeW.de/internet.nsf/res/4A5D437AB754A529C125817C00323A64/$file/Awh_20170710_Erneuerbare-Energien-EEG_2017.pdf)

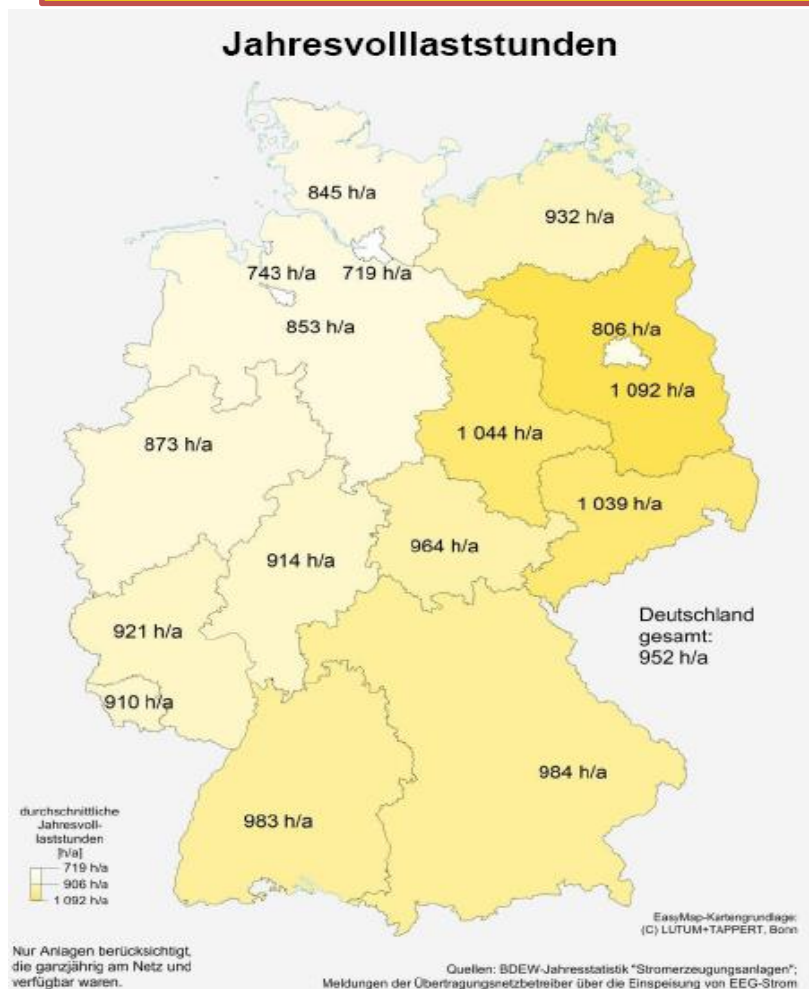
Nur Elektrizität:

Beitrag und Ziele der Erneuerbaren Energien: Strom



Weiterer Ausbau der RE Stromerzeugung: **PV** und **Wind** (Off- und Onshore)

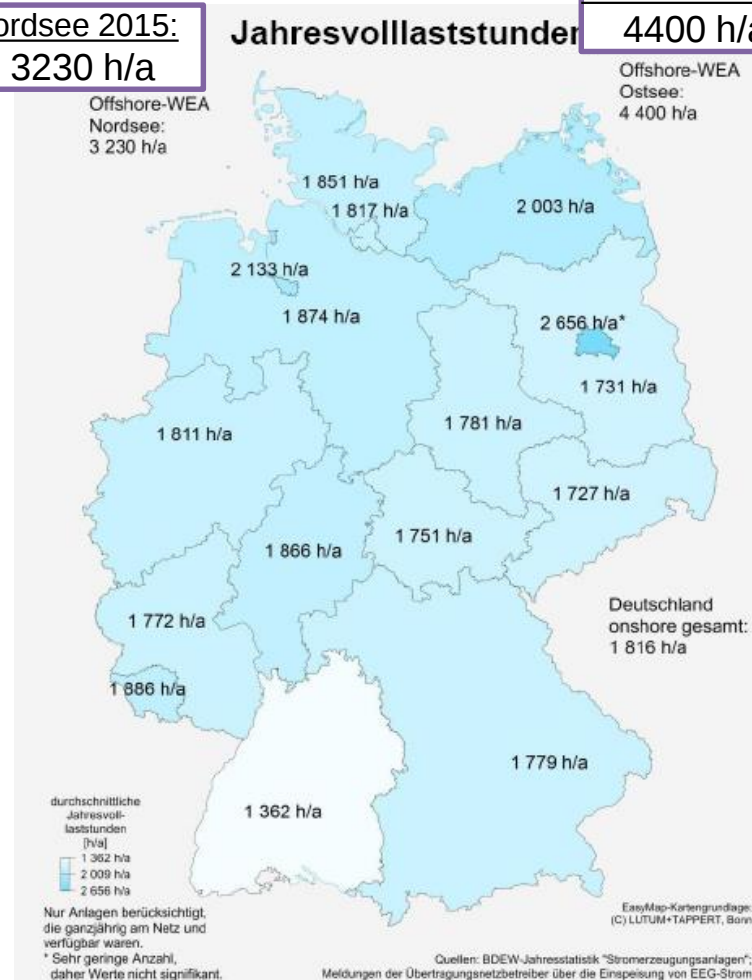
PV in 2015 AD: 952 h/a:
also ca: 1000 kWh/kW_{peak}



Onshore in 2015 AD: 1816 h/a

Nordsee 2015:
3230 h/a

Ostsee: 2015:
4400 h/a



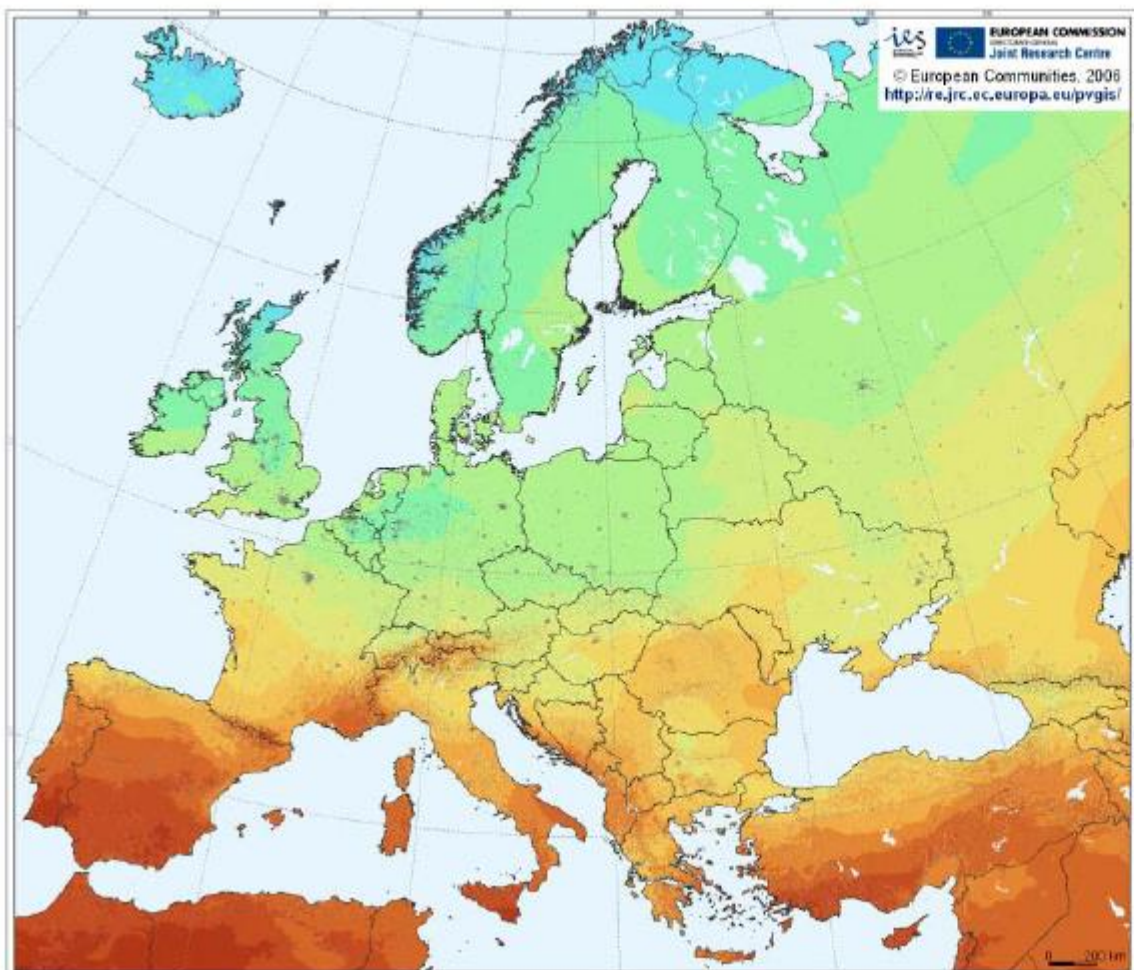
PV: was bringen Südeuropa und MENA ?

Geographical Comparison of

Irradiation

and

Energy Payback



Irradiation (kWh/m²/a)

EPBT

(Energy Pay-Back Time)

<600

800

1000

1200

1400

1600

1800

2000

>2200

2.1 years

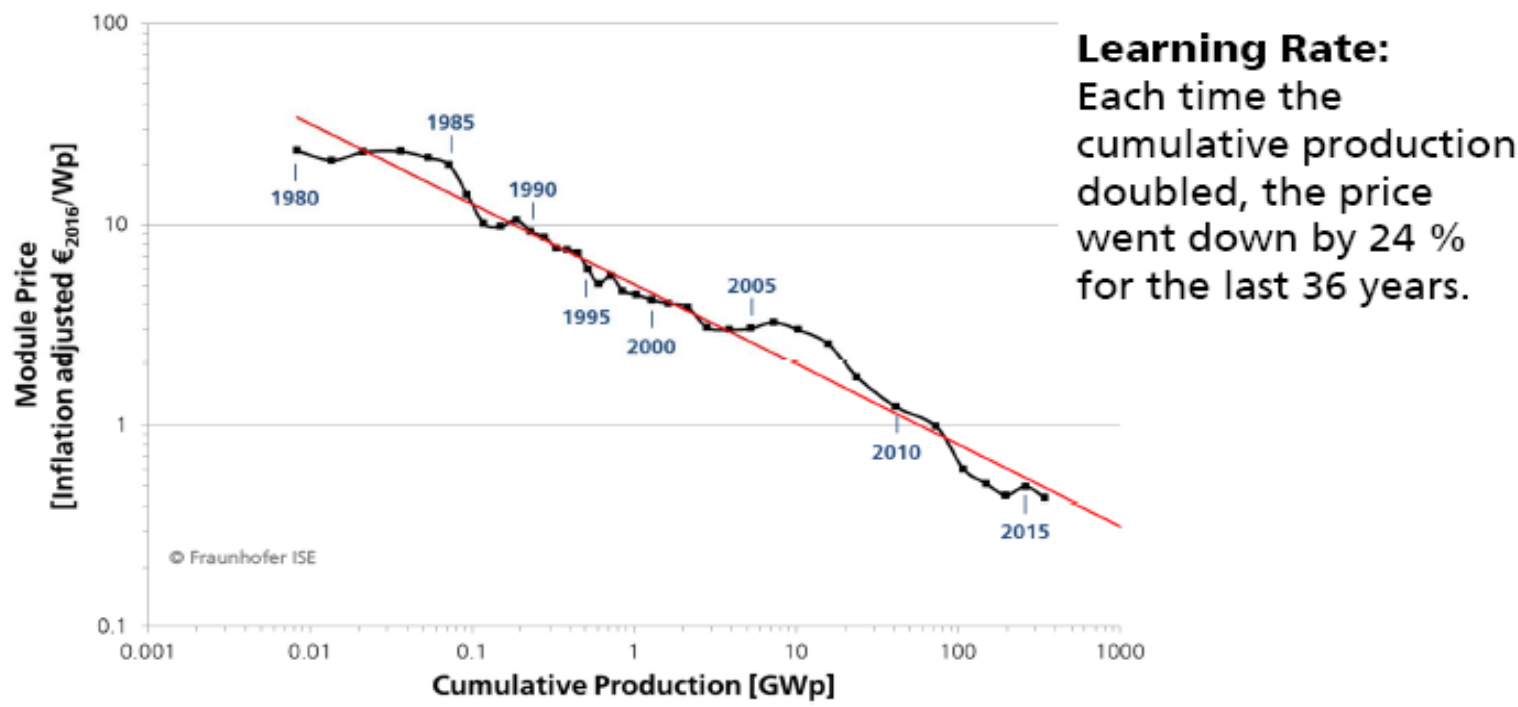
1.2 years

multi crystalline Si
(Rooftop Systems)

Data: M.J. de Wild-Scholten 2013. Image: JRC European Commission. Graph: PSE AG 2014 (Modified scale with updated data from PSE AG and Fraunhofer ISE)

Kosten: PV wird billiger, vor allem die Module

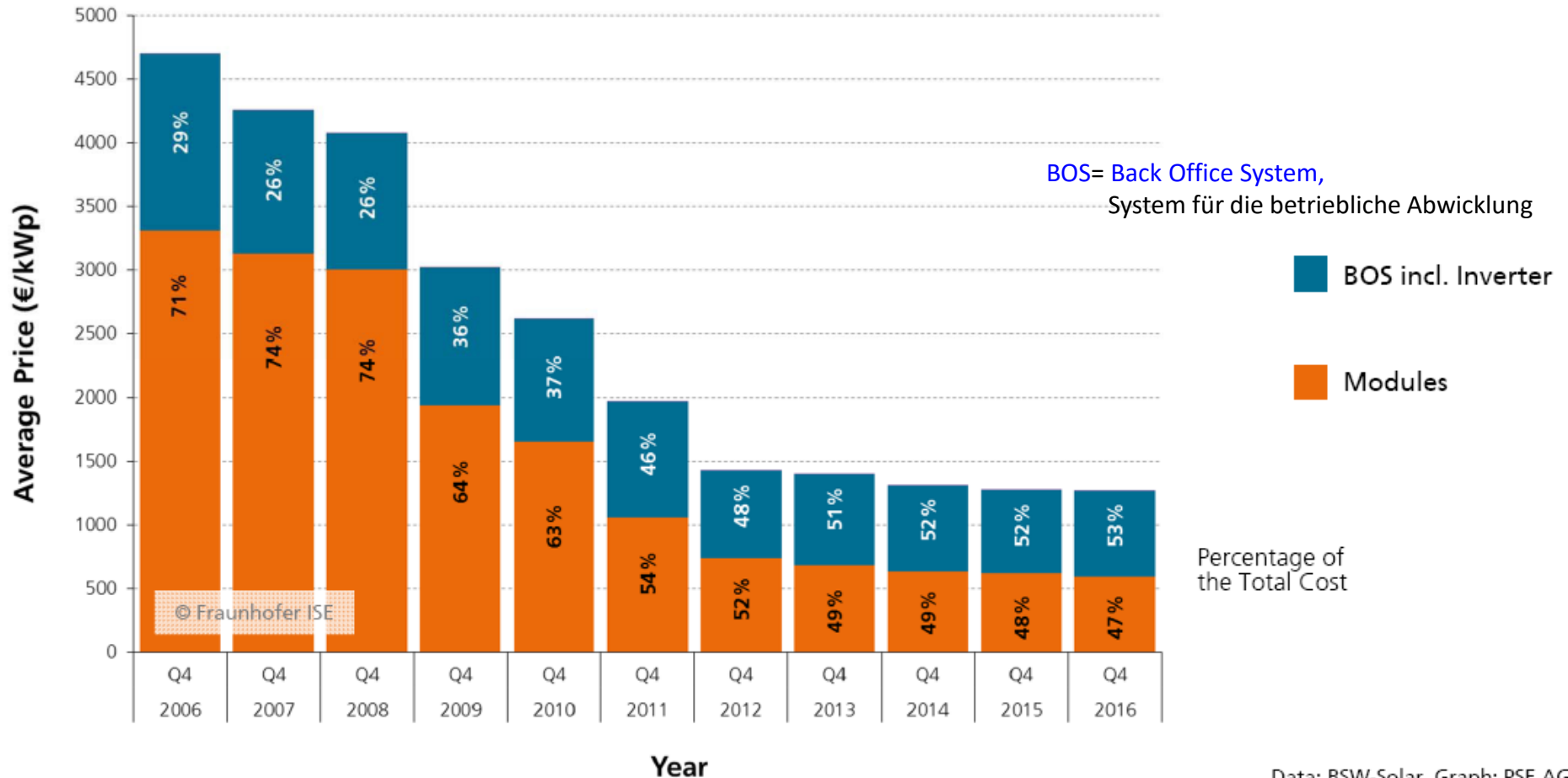
Price Learning Curve Includes all Commercially Available PV Technologies



Data: from 1980 to 2010 estimation from different sources : Strategies Unlimited, Navigant Consulting, EUPD, pvXchange; from 2011 to 2016: IHS. Graph: PSE AG 2017

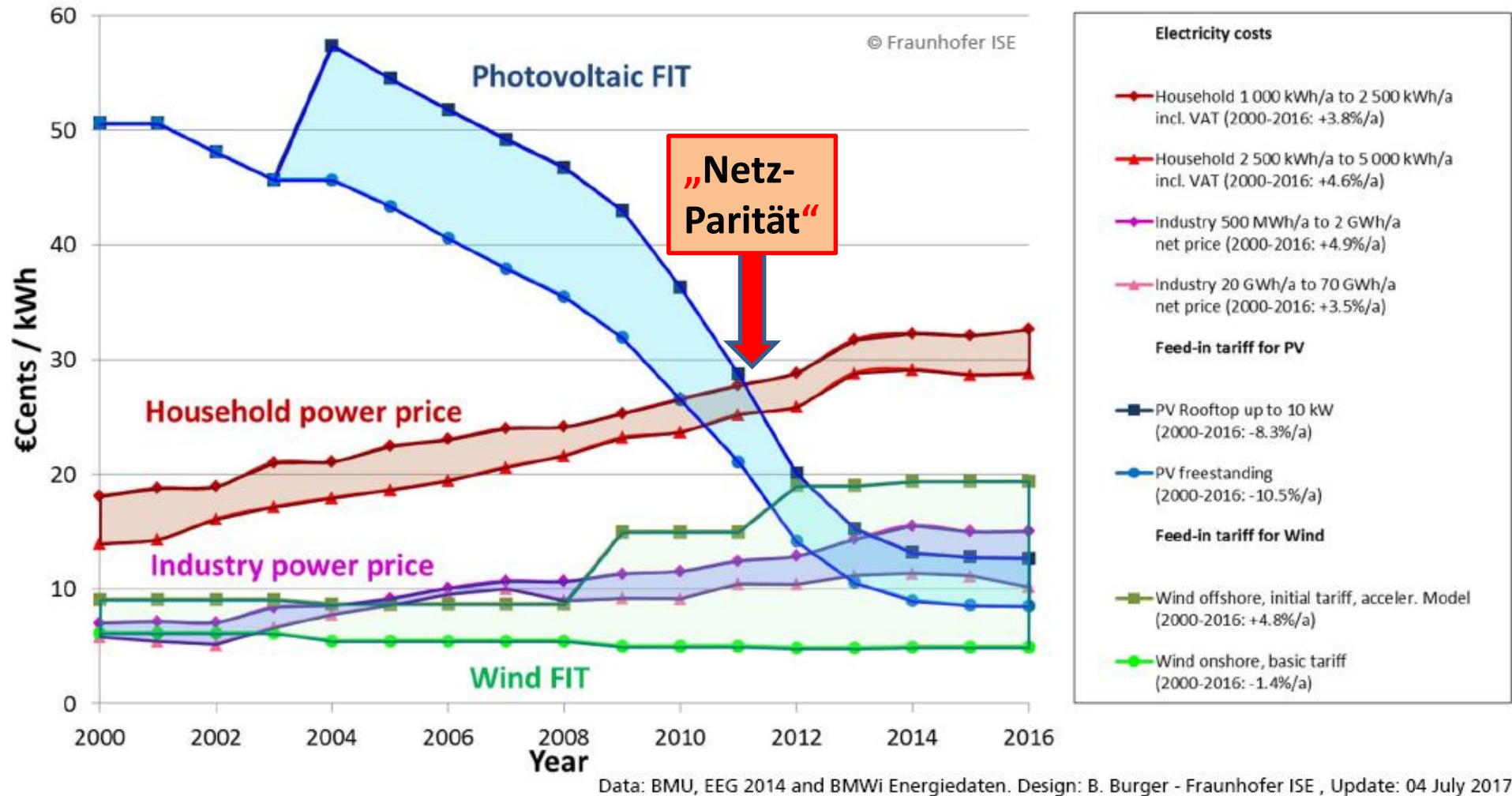
Mittlere Preise für größere PV-Dachanlagen (10 kWp bis 100kWp)

Historical Price Development Germany for 10 to 100 kWp roof-top PV-Systems



Data: BSW-Solar. Graph: PSE AG 2016

Deutschland: Strompreise und Einspeisetarife (EEG)



Große RE Anlagen: Ergebnisse der Ausschreibungen 2017

PV-Freiflächenanlagen

5,66 ct/kW = durchschnittliche **Förderhöhe** bei der Ausschreibung **Juni 2017**
(bei zulässigen Höchstwert **8,91 ct/kWh.**)

4,91 ct/kWh = mittlerer Zuschlagswert bei Ausschreibungsrunde **September 2017**
der BNA (Bundesnetzagentur)

Onshore-Wind

5,71 ct/kWh = durchschnittliche Förderhöhe der bezuschlagten Gebote
(bei zulässigen Höchstwert **7,00 ct/kWh.**)

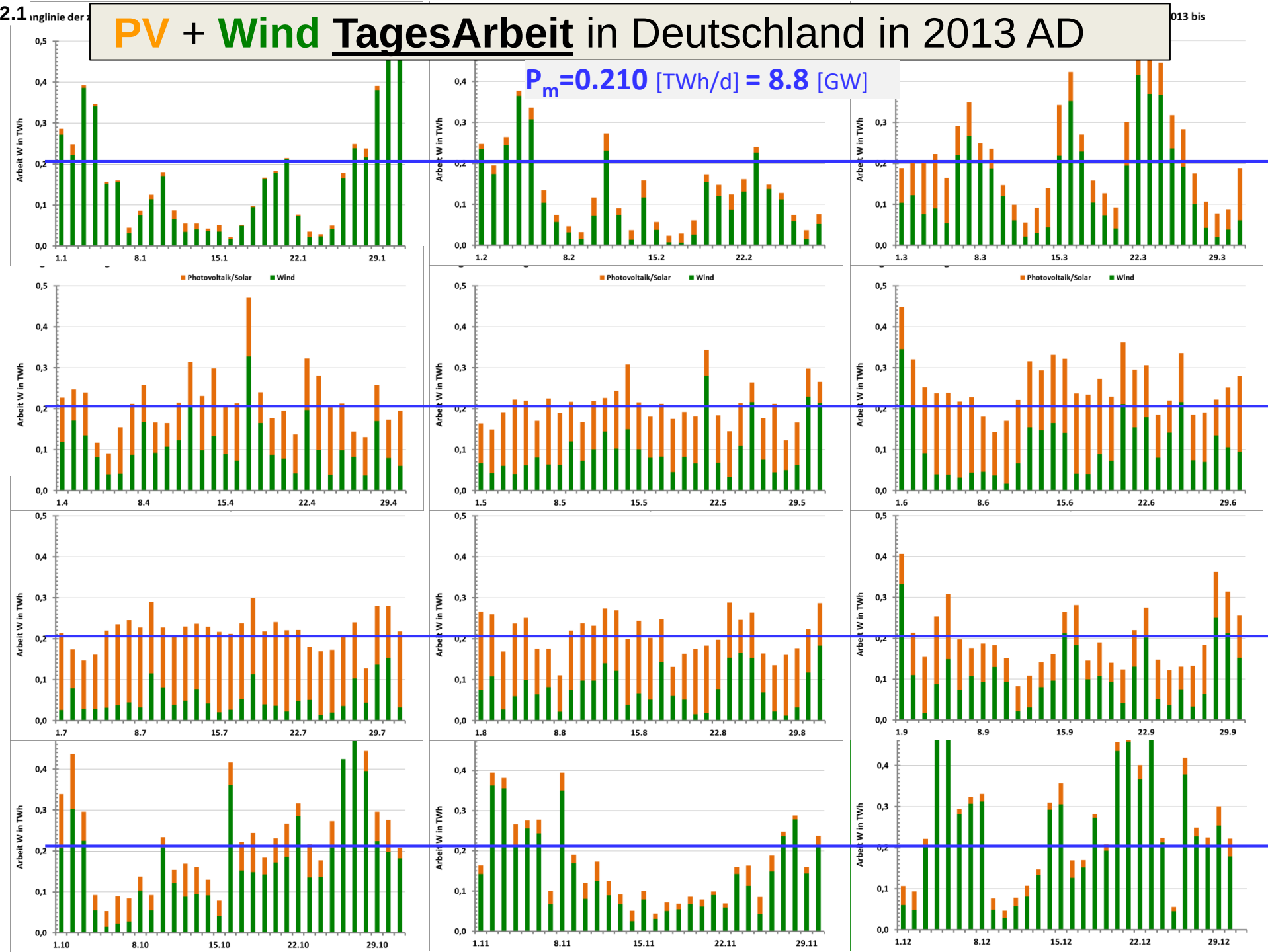
Offshore-Wind

Bei der ersten Ausschreibung für **Offshore-Wind**anlagen im April 2017:

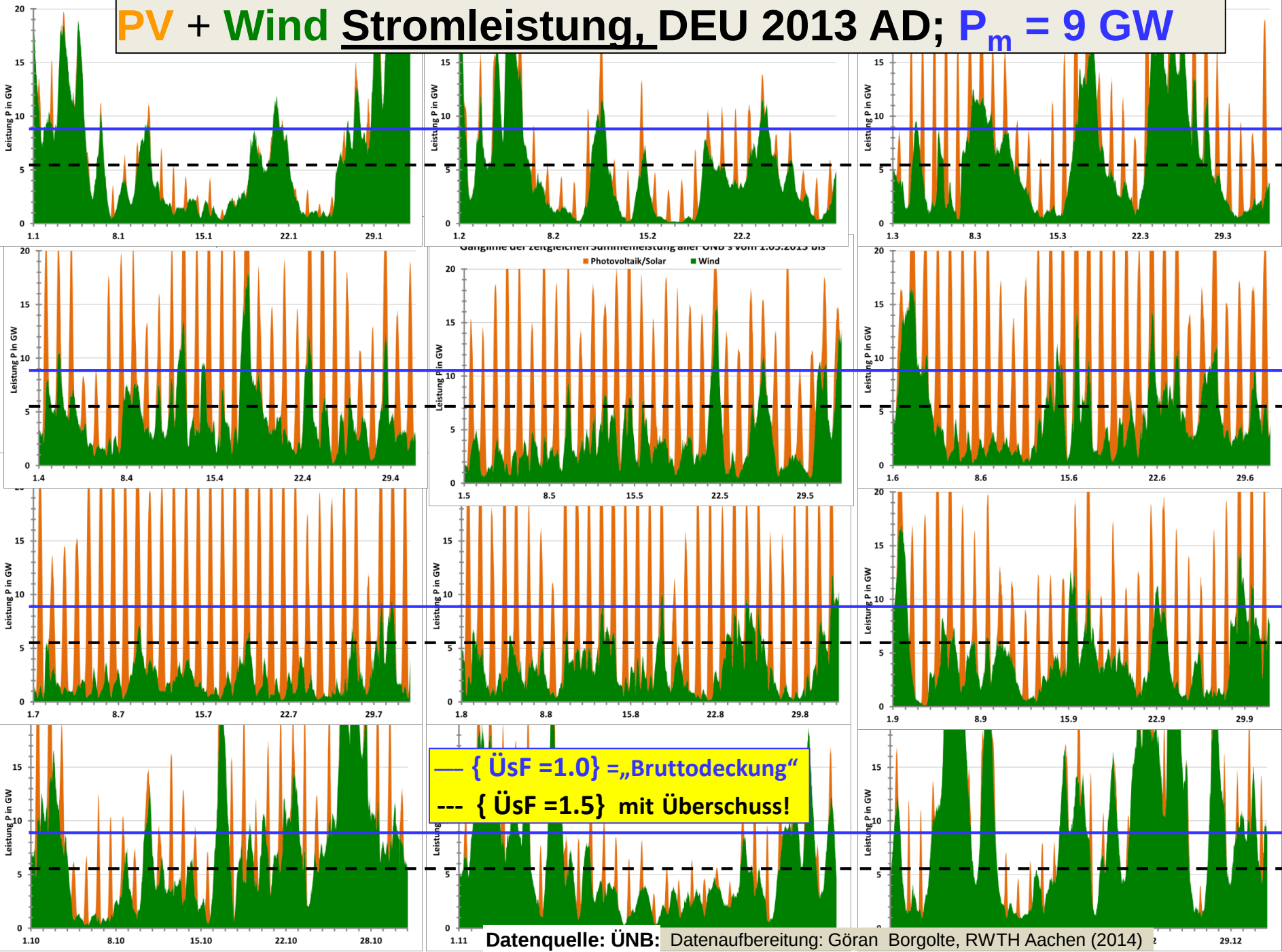
0 ct/kWh = Förderhöhe von bezuschlagten Geboten;
diese werden als bei ihrer **Inbetriebnahme bis spätestens 2025**
ohne zusätzliche Förderung aus-kommen werden.

2.

2. Das Speicherproblem von Sonne und Wind in Deutschland



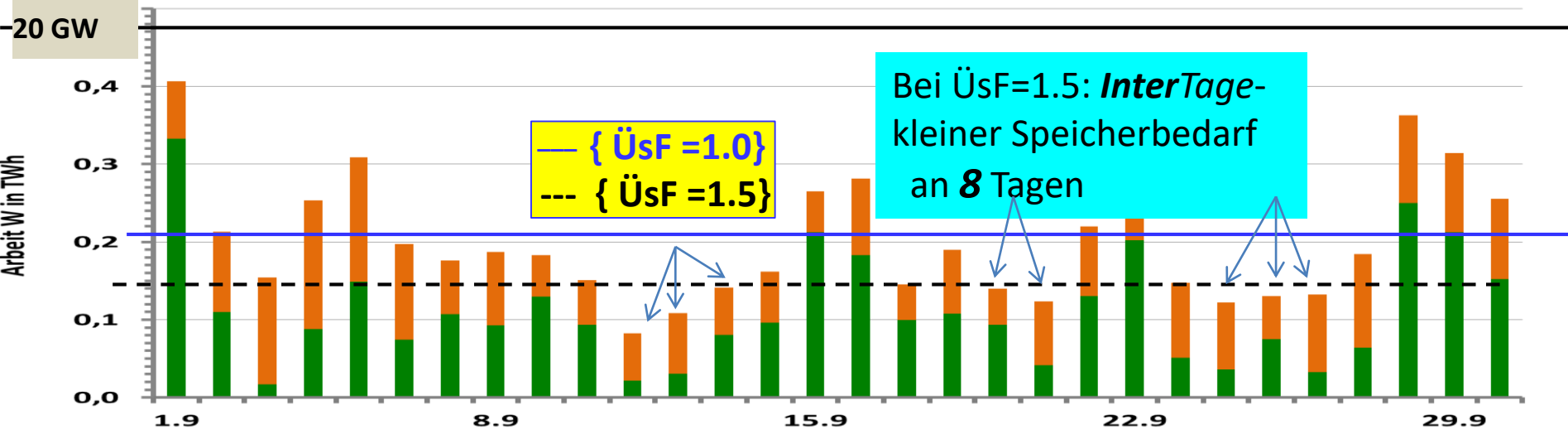
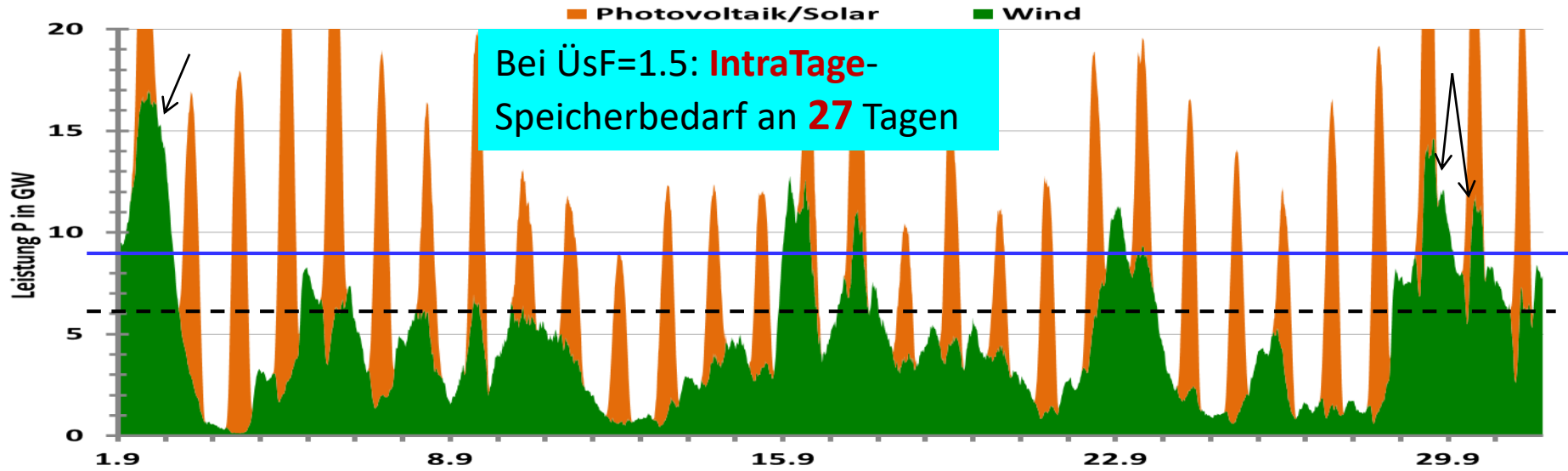
PV + Wind Stromleistung, DEU 2013 AD; $P_m = 9 \text{ GW}$



Datenquelle: ÜNB: Datenaufbereitung: Göran Borgolte, RWTH Aachen (2014) 29.12

Beispiel September 2013 : Tagesdateien unterschlagen täglichen Speicherbedarf

Ganglinie der zeitgleichen Summenleistung aller ÜNB's vom 1.09.2013 bis



$\ddot{U} s F = 1 \rightarrow 8,758 \text{ GW} = 0,210 \text{ [TWh/d]}$

Aufbereitete numerische Daten der Netzbetreiber:

Stromproduktion aus Solar- und Windenergie

*Daten bis zur Auflösung $\frac{1}{4}$ Stunden als Excel Datei
erhielt ich von Dipl. Ing. Göran Borgolte, RWTH –Aachen*

Letztes Update: Folien für 2013:

Dank an Göran Borgolte
und Prof. Alt für seine Vermittlung

<http://www.>

mail: *@rwth-aachen.de

3.

3. Ein LösungSzenario

für Strom zu 100% aus RE in Deutschland

Allgemeines Lösungsszenario:

(.0) Stromversorgung zu **100 % aus RE** (der deutsche Plan A)

(.1) **Vollständiges Back Up durch Gaskraftwerke**
(= 100 % der nachgefragten Leistung)

Bem.: Das kostet nur **0,7 ct/kWh** bei Umlegung auf den gesamten(!) Stromverbrauch.

(.2) **Zwei Speichertypen:**

$$\eta_G = 0.25;$$

$$\eta_P = 0.80;$$

Gasspeicher (aus P2G oder H₂; vorläufig Erdgas) :

PSKW- artige Speicher (PSKW, **Bergspeicher**; Batterien)

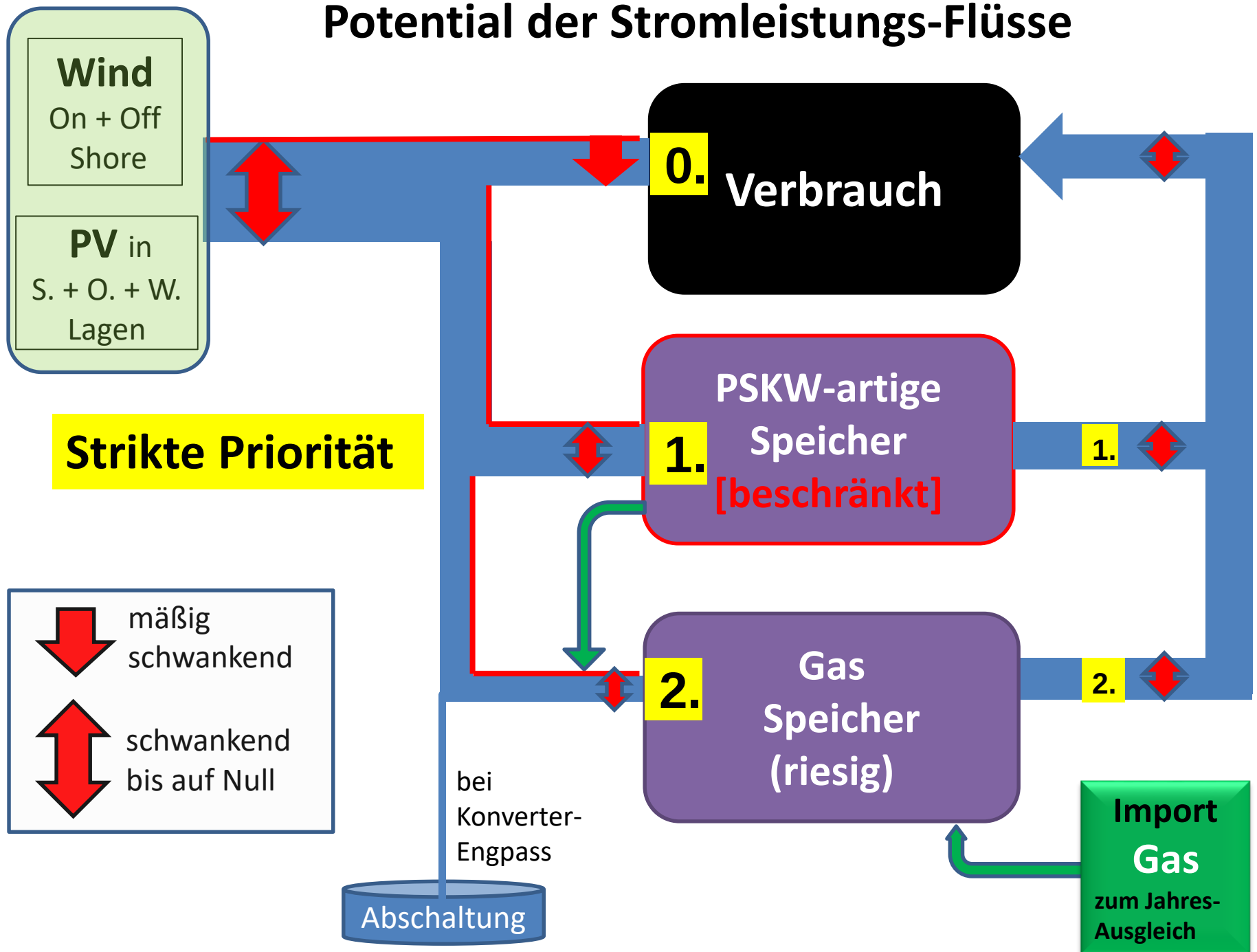
(.3) Speicherverluste gedeckt durch **Überkapazitäten der RE-Installation**

Es folgen **noch einige Anmerkungen** zum Lösungsszenario:

In der Kurzfassung nur eine besonders wichtige Anmerkung

[Überspringe](#) 

Potential der Stromleistungs-Flüsse



Die Optimierungsaufgabe

Ziel: Gewährleiste **sicherer und **nachhaltiger** Versorgung bei minimalem Aufwand**

Zu optimierende EinstellParameter:

1. **ÜberschussFaktor (ÜsF) der RE**

„ÜsF“

Struktur des RE-Ausbaues (Gewichtung)

2. PSKW

Speicherkapazität PSKW

„Sp80“

max. Einspeicherleistung (Pumpen) der PSKW

„P80“

praktisch schon festgelegt:

Ausspeicherleistung = ca. Höchstlast des Verbrauches

3. Gasspeicher

Einspeicherleistung (Elektrolyse, Methanerzeuger)

„P25“

praktisch schon festgelegt:

Speicherkapazität : riesig, da Speicherraum preiswert

Ausspeicherleistung = Höchstlast des Verbrauches („Versicherung“)



Erste Ergebnisse zur Kapazität der PSKW-artige Speicher



Begriffe und Bezeichnungen für den Ausbau der RE- Stromerzeuger.

Q_a = Jährlicher Stromverbrauch.

Er wird zunächst als zeitlich konstant angenommen.

RE_a = die im Jahr zur Verfügung stehende RE-Strommenge („brutto“)

$$\text{ÜsF} = \text{Überschussfaktor} = RE_a / Q_a$$

Bezeichnungen für PSKW -artige Speicher

Sp_{80} = Speicher mit rund 80% Wirkungsgrad (=Produkt aus Ein- und Ausspeichern)

$Sp_{80_mx_Nd}$ = Speicherkapazität des Sp_{80} , angegeben in "Verbrauchstagen" [d]

P_{80_mx} = maximale Einspeicherleistung [GW]

analoge Bezeichnungen für P2G-artigen Speicher

Sp_{25} = Speicher mit rund 25% Wirkungsgrad (Produkt aus Ein- und Ausspeichern)

$Sp_{25_mx_Nd}$ = Speicherkapazität des Sp_{25} , angegeben in "Verbrauchstagen" [d]

Hier jedoch nicht entscheidend, da "beliebig" groß und niemals leer oder überfüllt.

P_{25_mx} = maximale Einspeicherleistung [GW]

3.3.1 Der netto genutzte RE – Strom

3.3.2 Der Jahresumschlag des Kurzzeitspeichers Sp80

3.3.3 Einsatz der Sp25 –Gaskraftwerke: Jahresdauerlinie

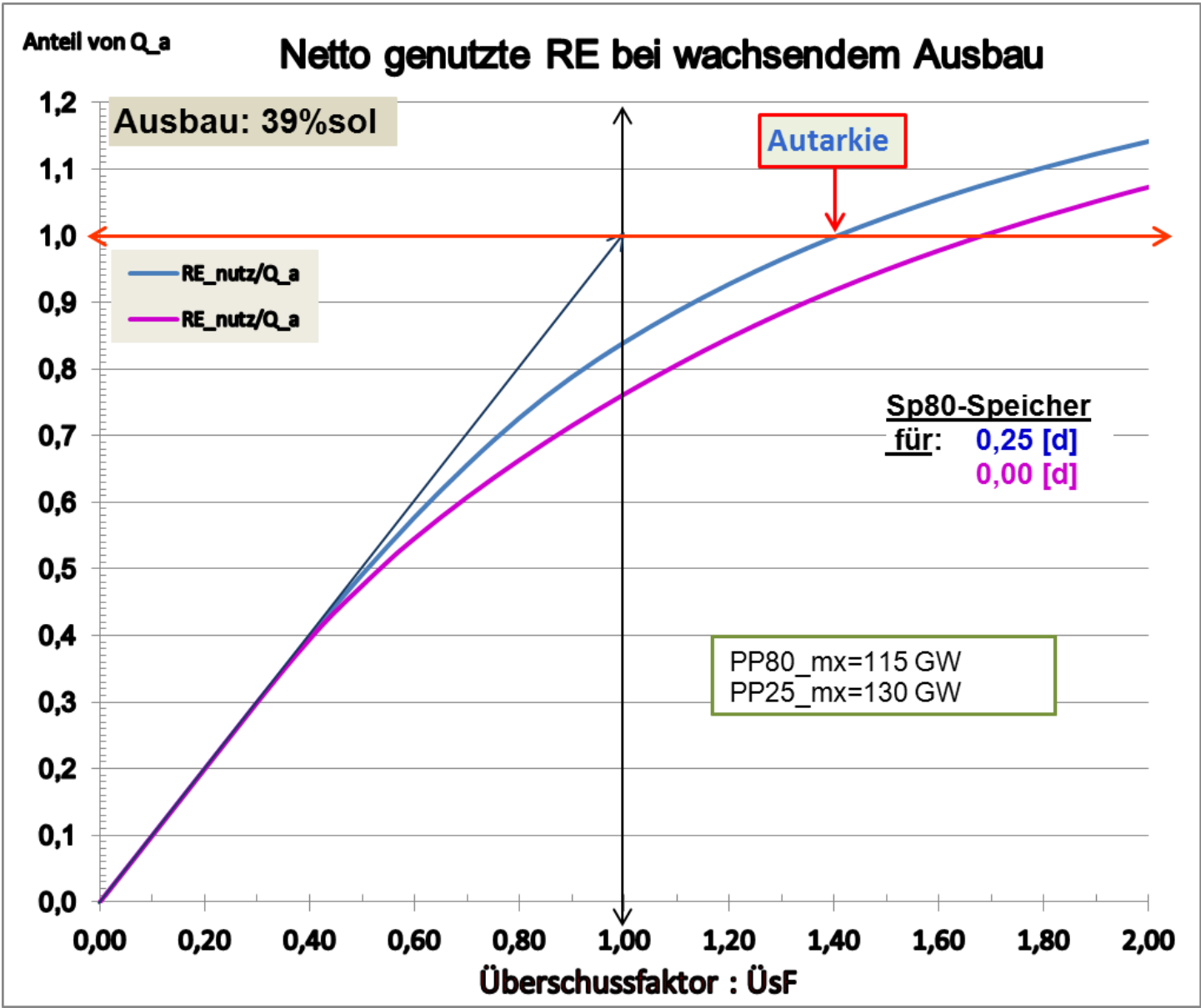
3.3.4 Strom-Bereitstellung aus direktem RE-Strom, Speicher und Import

3.3.5 Einsatz von Kurzzeitspeichern im LeistungsEngpass

Netto genutzte RE bei wachsendem RE-Ausbau

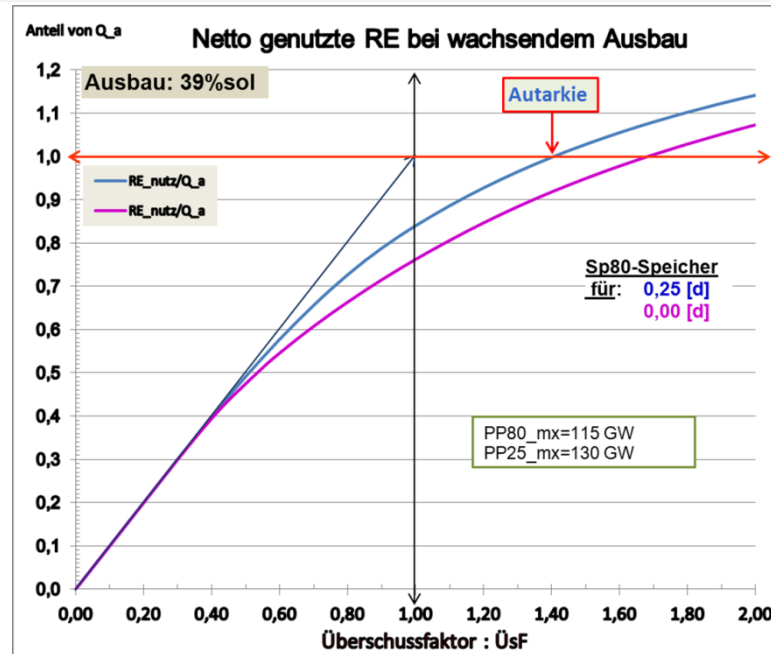
gerechnet mit:
 $Q_a \approx 1000 \text{ TWh}$

Re_{nutz} =
Strom aus RE-Quelle,
(direkt oder aus Speicher)
„aus der Steckdose“



Daten 2013 AD

Wieviel vom RE-Aufkommen, RE_{brutto} , kann genutzt werden: RE_{nutz}



1. Bei geringem Ausbau: Volle Aufnahme im Netz, Speicher überflüssig
2. Bei wachsendem Ausbau bis etwa $\ddot{U}SF=1$: zunehmende Inanspruchnahme der Speicher
3. **Autarkie** ist erreicht bei $\ddot{U}SF = \text{ca. } 1.40$: bei der Speichergröße $Sp80_mx = 0,25 [d]$.
und bei $\ddot{U}SF = \text{ca. } 1.68$: bei $Sp80_mx = 0$, also ohne Kurzzeitspeicher
4. Darüber hinaus: Strom kann (bilanziert) **exportiert** werden, aber
mit asymptotischen Wirkungsgrad von 0,25 (sofern Einspeicherer= „Allzeit Bereit“ und $Sp25=$ „riesig“)



3-3.1 Der netto genutzte RE – Strom

2.3.2 Der Jahresumschlag des Kurzzeitspeichers Sp80

3.3.3 Einsatz der Sp25 –Gaskraftwerke: Jahresdauerlinie

3.3.4 Strom-Bereitstellung aus direktem RE-Strom, Speicher und Import

3.3.5 Einsatz von Kurzzeitspeichern im LeistungsEngpass

Das 2. wichtige Bild

Fazit:

0,25 Tage Sp80 -Kapazität
und

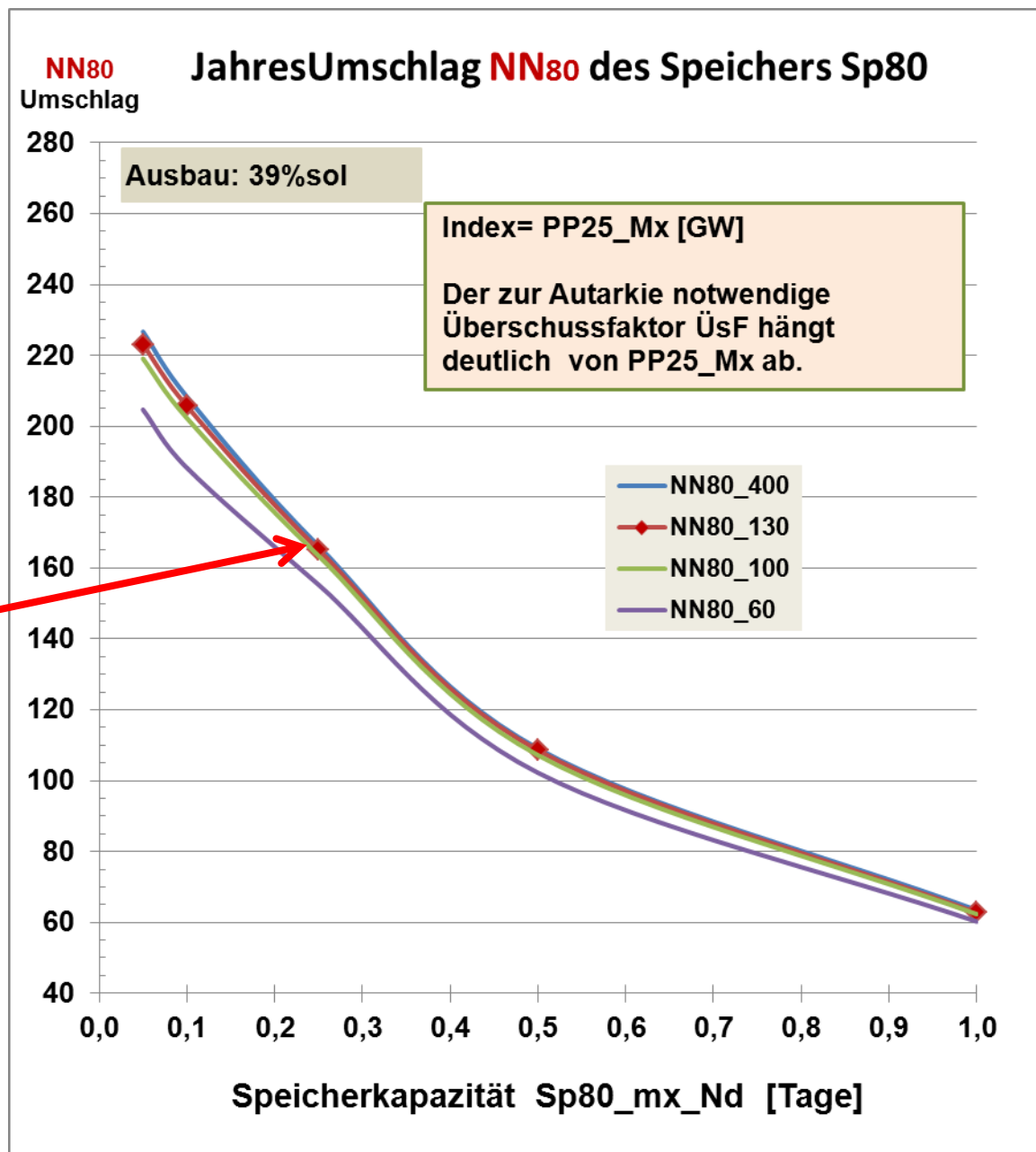
100 -130 GW

Elektrolysekapazität

bringen
ein Speicherumschlag von
immerhin noch

ca. **165** mal im Jahr

P80_mx ist mit Augenmaß
ausgewählt, so dass
NN80 nicht weniger als 1%
unter seinem Maximum liegt.
xx [GW]



Modifikation des Jahresumschlages durch unterschiedlichen RE-Ausbau:

Szenarien für solarer Anteil am RE-JahresAufkommen

39% solar : tatsächlich in 2013 AD

60% solar = "Solar-Szenario"

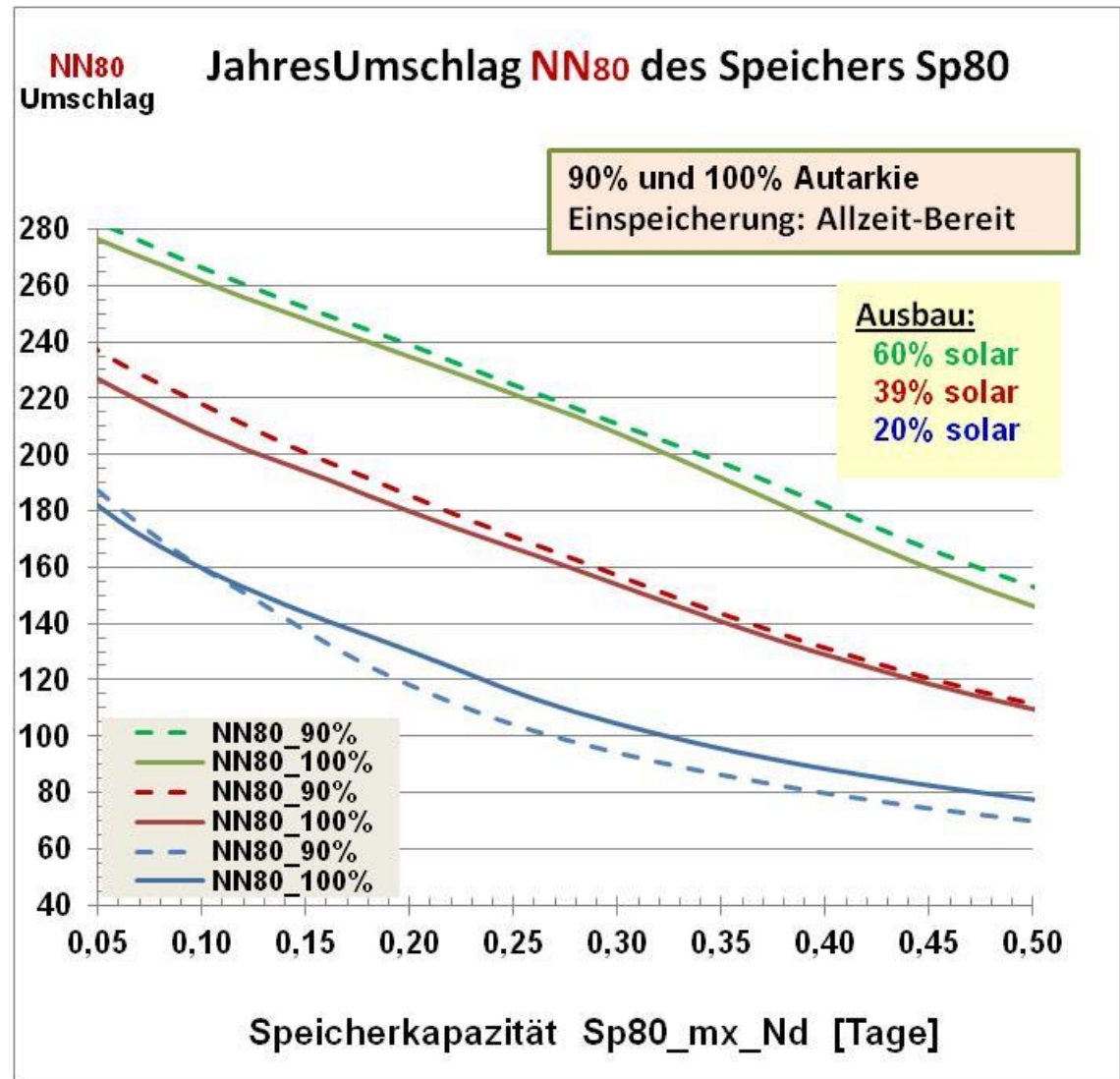
20% solar = "Wind- Szenario"

Ausmaß der RE-Produktion

[100%]Autarkie .= 0% Import

90% Autarkie .= 10% Import

Allzeit Bereit .= Unbegrenzte Einspeicherer;
Begrenzung nur durch Speicherzustand





3.3.1 Der netto genutzte RE – Strom

3.3.2 Der Jahresumschlag des Kurzzeitspeichers Sp80

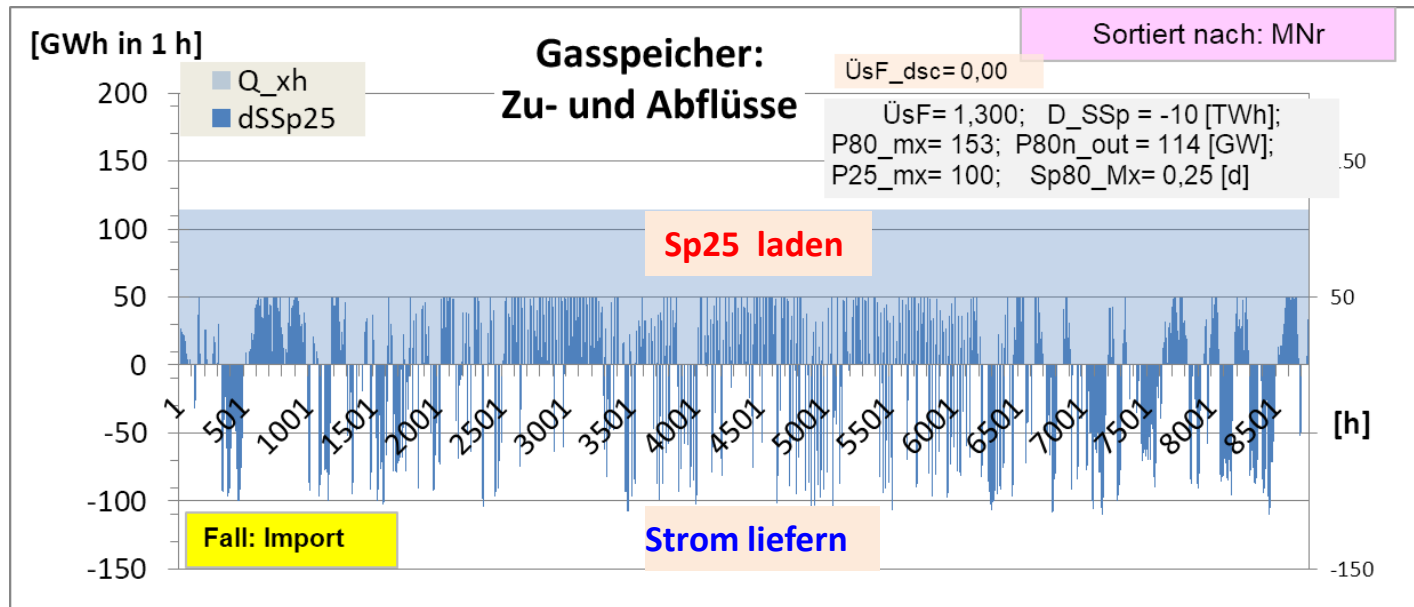
3.3.3 Einsatz der Sp25 –Gaskraftwerke: Jahresdauerlinie

3.3.4 Strom-Bereitstellung aus direktem RE-Strom, Speicher und Import

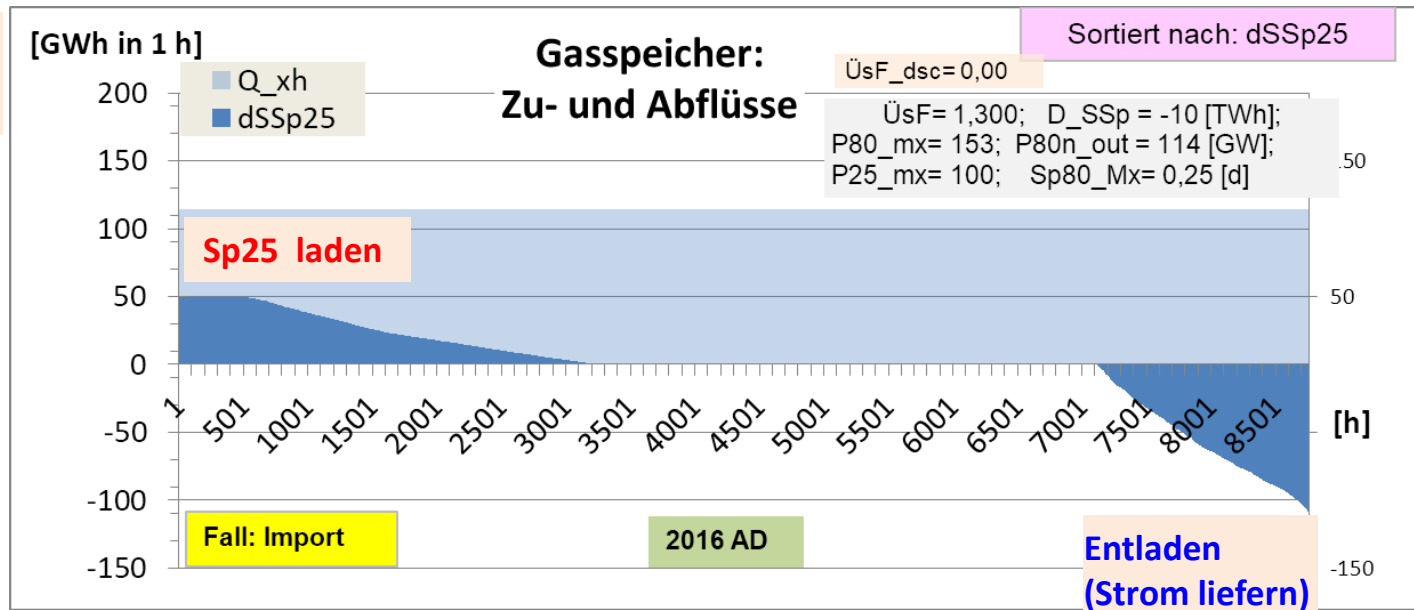
3.3.5 Einsatz von Kurzzeitspeichern im LeistungsEngpass

Langzeitspeicher Sp25: Ein- und Ausspeichern, Jahresdauerlinie

natürliche
Zeitfolge der 8760 [h]



Geordnete
Jahresdauerlinie



Daten 2016 AD

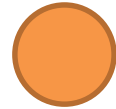


3.3.1 Der netto genutzte RE – Strom

3.3.2 Der Jahresumschlag des Kurzzeitspeichers Sp80

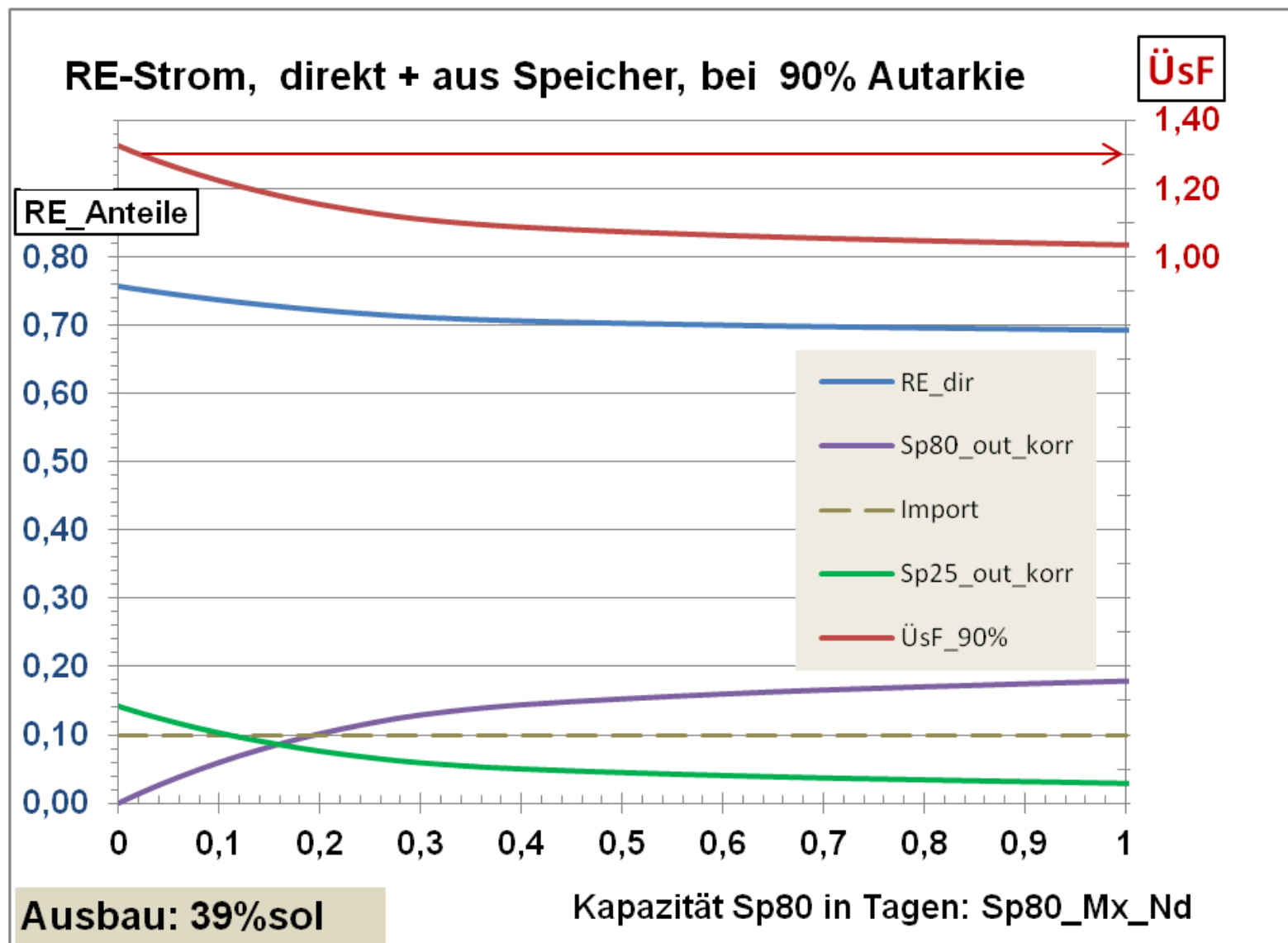
3.3.3 Einsatz der Sp25 –Gaskraftwerke: Jahresdauerlinie

3.3.4 Strom-Bereitstellung aus direktem RE-Strom, Speicher und Import



3.3.5 Einsatz von Kurzzeitspeichern im LeistungsEngpass

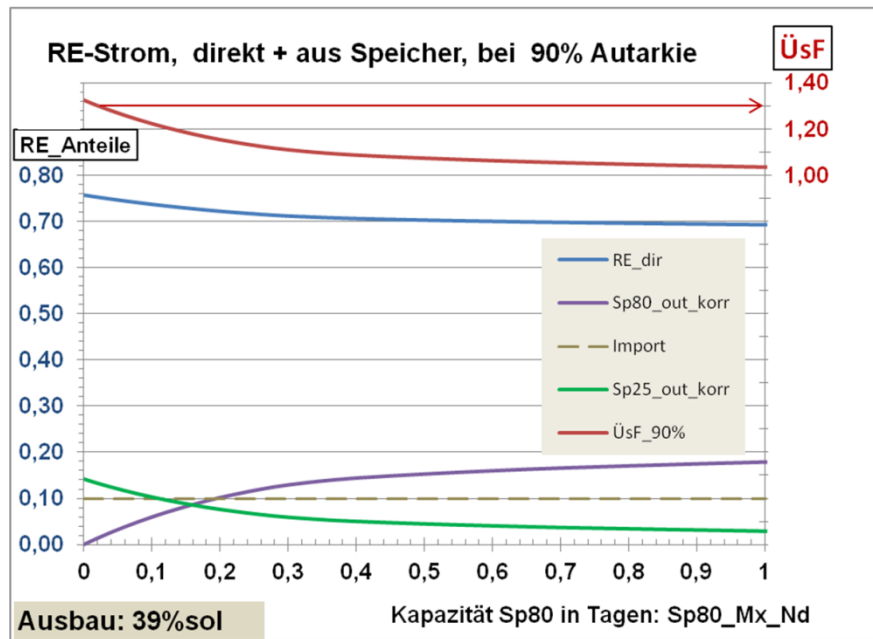
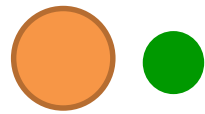
Import und RE -Strom aufgeteilt in „direkt“ , aus Sp80, aus Sp25



1.00 = Import + RE-Strom (direkt und aus Speichern)

ÜsF = Überschussfaktor

Was passiert bei größer werdender Kapazität des Sp80-Speicher:



1. Der zur Deckung der 90% Autarkie notwendige Überschussfaktor **ÜsF** geht zurück.
Es wird also weniger **RE_brutto** erzeugt.

2. Dadurch sinkt die **direkt zum Verbraucher lieferbare** Strommenge **RE_dir**,
und mehr Strom muss aus den Speichern kommen.

3. Trotzdem geht die **Stromaufnahme aus dem Langzeitspeicher Sp25** zurück.
Zunächst kräftig und dann immer weniger.

4. Dafür nimmt aber die **Stromaufnahme aus dem Sp80** umso stärker zu.

Sp80_out muss nämlich

sowohl die geringere **direkte Stromversorgung, RE_dir**,

als auch **die abfallende Entnahme aus dem Langzeitspeicher, Sp25_out**,

ausgleichen.





3.3.1 Der netto genutzte RE – Strom

3.3.2 Der Jahresumschlag des Kurzzeitspeichers Sp80

3.3.3 Einsatz der Sp25 –Gaskraftwerke: Jahresdauerlinie

3.3.4 Strom-Bereitstellung aus direktem RE-Strom, Speicher und Import

3.3.5 Einsatz von Kurzzeitspeichern im LeistungsEngpass

Kann man nicht doch noch etwas Backup Kapazität einsparen?

Idee: Kurzzeitspeicher (Sp80) in Engpass-Episode zunächst gar nicht einsetzen, sondern **nur als Leistungsreserve** für die knappen Gaskraftwerke benutzen.
u.U. sogar:
Sp80 **vor dem eigentlichen Engpass** durch Einsatz der Gaskraftwerke **noch auffüllen**

Beispiel:

Installation: **Sp80** für 0,25 [d] = **6[h]** VollLast

Backup Leistung der GKW nur **$P_{25} = 80\% * Q_P$** ($Q_P = 100\%$ EngpassLeistung)

Lage: RE-Mangel Episode über 120 [h] mit hartem Engpass (100 % Backup) über **30 h**

Betrieb im harten Engpass:

- GKW voll im Einsatz (aber beachte: nur 80% Q_P)
- Speicher Sp80 deckt den Rest für mindestens **6/0,20 = 30 h**
- Sobald die Anforderung unter 80% fällt, füllen die GKW den **Sp80** wieder auf.

Fazit für Engpassbetrieb:

Der Einsatz des Kurzzeitspeicher als Reserve nur für eine TeilLast und die harte Engpasszeit erlaubt
eine etwas reduzierte Installation der Gaskraftwerke.

4. Spezial: Unkonventioneller Energiespeicher

Dr. Gerhard Luther

Universität des Saarlandes
Experimentalphysik , Bau E26
66123 Saarbrücken
luther.gerhard@ingenieur.de
0681-302-2737(d) und 0681-56310(p)

Prof. Dr. Horst Schmidt-Böcking

Universität Frankfurt
Institut für Kernphysik
60438 Frankfurt, Max-von-Laue-Str. 1
schmidtb@atom.uni-frankfurt.de
069-798 47002 und 06174-934099(p)

Die einfache Idee des Meerei

Ein Pumpspeicherwerk, bestehend aus

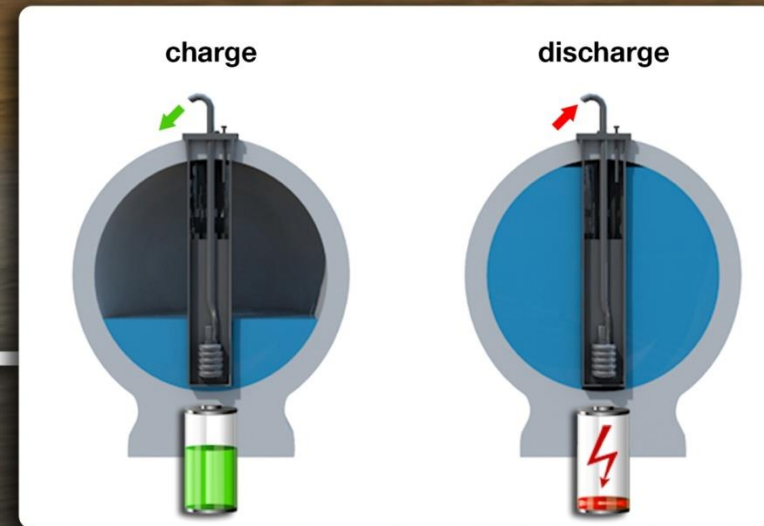
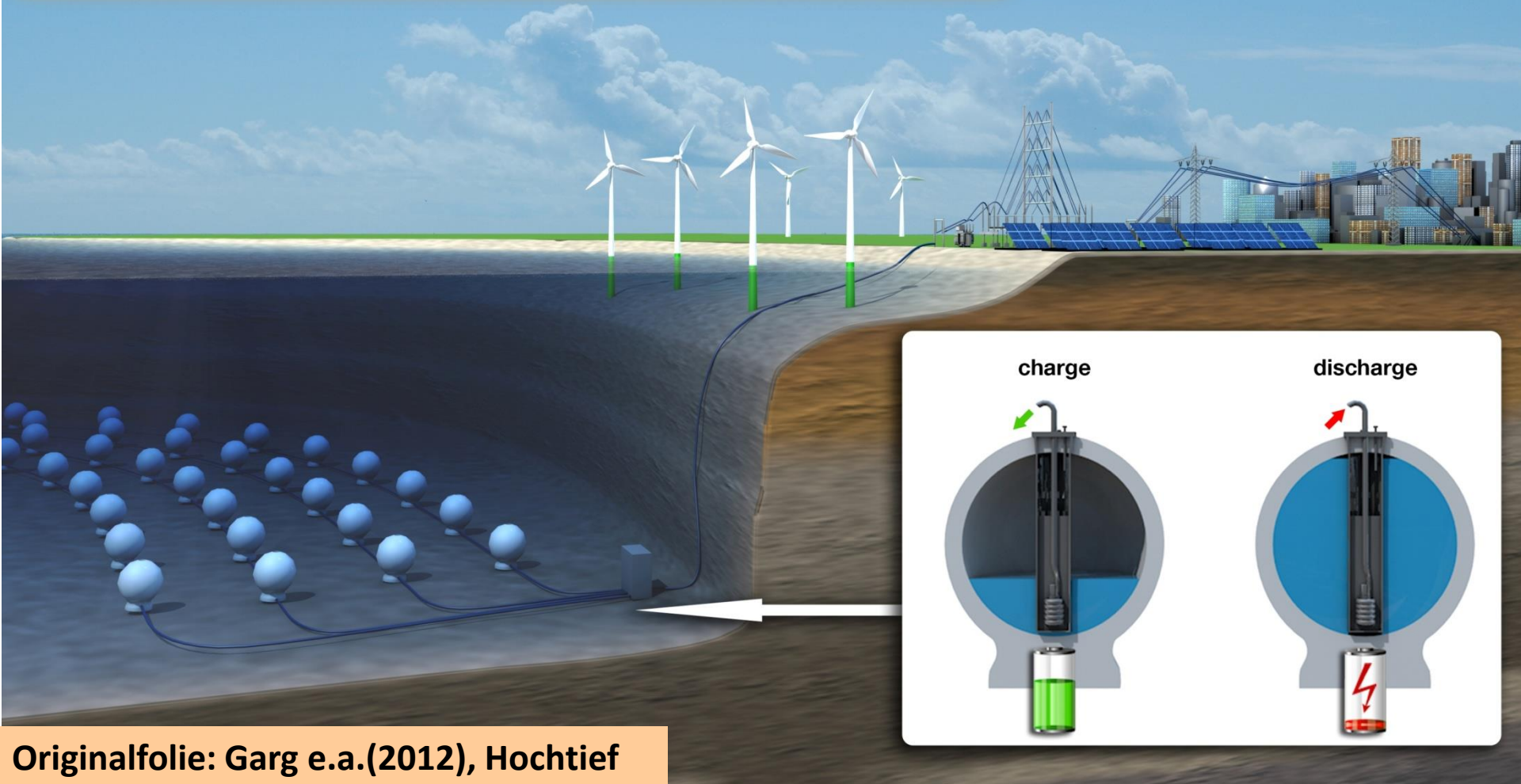
1. dem Meer als oberem Speicher
2. einem technischen Hohlkörper auf dem Meeresboden als unterem Speicher.
3. Eine lokale PumpTurbine entleert den Hohlkörper und gewinnt die Energie beim Befüllen zurück.

Außer kurzen Verbindungsstücken sind keine Leitungen nötig.

Projekt STENSEA 2012: Artist View

178 €/kWh Partialkosten „in situ“ Speicherkapazität“

525 €/kW Pump-turbine with electro-mechanical equipment



Einige Elementare Zahlen zum Meerei

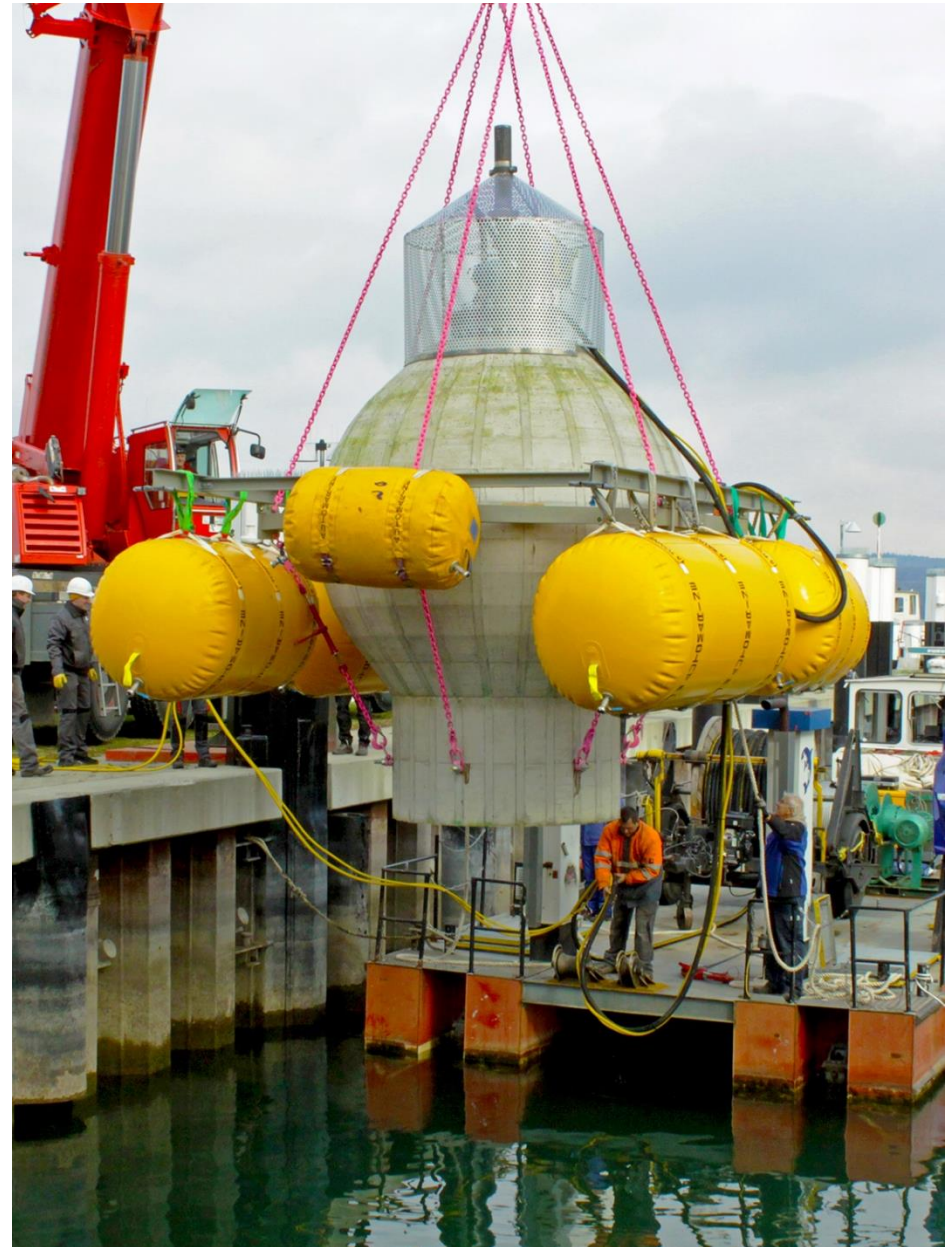
Meerestiefe/m	250	500	1000	2000	4000	10000
Druck/bar	25	50	100	200	400	1000
Speicherdichte/kWh/m ³	0,7	1,4	2,8	5,6	11,1	27,8

TAB. 2 | SPEICHERINHALT VON BETONKUGELN IN 4000 M MEERESTIEFE

Innendurchmesser/m	1	2	5	10	20	50	100
Volumen/m ³	0,524	4,189	65,450	524	4.189	65.450	523.599
Kugelschalendicke ¹ /m	0,098	0,197	0,492	0,984	1,968	4,920	9,841
Speicherenergie/MWh	0,006	0,047	0,727	5,82	46,54	727	5818

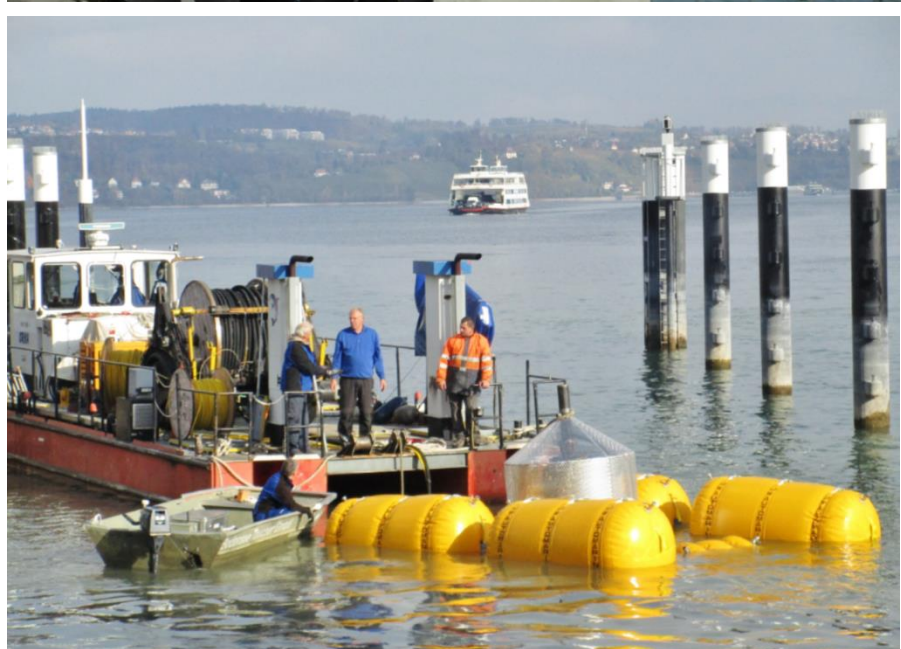
¹ Die angegebene Dicke der Kugelschale ist zur Kompensation des Auftriebs erforderlich (Betondichte: $\rho_{\text{Beton}} = 2400 \text{ kg/m}^3$).

2016 AD: Versuch mit Meerei -Modell (3 m) im Bodensee



FhG-IWES Projekt StEnSea (2016.1102):
Abladen im Fährhafen Konstanz

2016 AD: Meerei -Modell (3 m) im Bodensee



Der Presse gefällt diese Idee

SAARBRÜCKER ZTG

FAZ 2016.1115,
Seite T2

MITTWOCH, 4. JANUAR 2017

WISSEN

NR. 3

Beton-Batterie im Bodensee

Physiker aus Saarbrücken und Frankfurt entwickeln ein neues Konzept zur Speicherung elektrischer Energie

Wind- und Sonnenenergie sind eine feine Sache. Doch was tun, wenn's dunkel ist und Flaute herrscht? Zwei Physiker haben nun eine verblöfend einfache Idee für einen Energiespeicher vorgestellt, der in diesem Fall einspringen soll. Er wird bereits am Bodensee getestet.

Von SZ-Redakteur
Peter Byla

Saarbrücken. Alle reden von der Energiewende. Doch damit die erneuerbaren Energien die Kurve kriegen, fehlt noch ein wesentlicher Baustein im Konzept der Öko-Stromversorgung. Ein Akku ist notwendig, der überschüssige Energie speichert, wenn die Sonne scheint und der Wind aus vollen Backen bläst – und der angezapft werden kann, sobald Wind- oder Solarenergie schwächeln. Dies muss ein wirklich großer Energiespeicher sein, angesichts von rund 600 Terawattstunden (600 Milliarden kWh) elektrischer Energie, die jährlich allein in Deutschland verbraucht werden.

Genau besetzen, so erklärt Gerhard Luther von der Forschungsstelle Zukunftsenergie der Universität des Saarlands, werden sogar zwei Typen dieser Energiespeicher benötigt. Langfristpuffer sollen einen Dunkelflaute genannten längeren Düngehang der Wind- und Solarleistung kompensieren. Kurzfristpuffer haben die Aufgabe, Lücken im Bereich von höchstens wenigen Tagen zu überbrücken.

Als Langfristpuffer werden Gasppeicher genutzt, erklärt der promovierende Physiker, für den Kurzfristpuffer haben Gerhard Luther und der Frankfurter Professor, Dr. Frank Schmidt-Böcking, jetzt eine neue Idee ins Spiel gebracht: das Meer-Ei. Riesige Hohlkugeln aus Beton, in mehreren Hundert Metern Tiefe am Meeresgrund aufgestellt, sollen überschüssige elektrische Energie speichern, die nicht in das Stromnetz eingespieist werden kann. Wenn die Spannungs- und Stromlast nachts auf Null fällt oder die Wind die Puste ausgeht, soll die am Meeresgrund gespeicherte



Mit diesem drei Meter messenden Prototyp wird die Technik der Unterwasser-Batterie im Bodensee getestet.

FOTO: FRAUNHOFER/INES

Energie wieder abgerufen werden.

Die Idee der beiden Erfinder ist schnell erklärt. Der Akku am Meeresgrund speichert Energie durch den Aufbau einer Druckdifferenz. Wenn Windräder und Solarmodule mehr Strom produzieren als abgenommen werden kann, wird aus der Betonkugel am Meeresgrund das Wasser herausgepumpt.

In der Kugel entsteht so fast ein Vakuum – und damit ein enormer Druckunterschied zum umgebenden Meerwasser. In 700 Metern Tiefe beträgt diese Differenz 70 bar. Soll Strom produziert werden, wird ein Ventil geöffnet und das Wasser schießt zurück in den Hohlraum. Es wird dabei durch eine Turbine geleitet und erzeugt so

elektrische Energie. Die beiden Erfinder, die zu ihrer Idee Patente besitzen, denken in gewaltigen Dimensionen. 30 Meter Durchmesser soll ein Beton-Ei am Meeresgrund messen. In 700 Metern Wassertiefe könnte es rund 20 Megawattstunden Energie speichern. Das entspricht dem Fünftel des jährlichen Stromverbrauchs eines Durchschnittshaushalts. Und von diesen Meer-Eiern legen sich Hunderte legen.

In größeren Tiefen vorzudringen, wäre zwar vielversprechend, weil die Energieausbeute proportional zum Wasserdruk steigt, so Gerhard Luther. Trotzdem mache das wenig Sinn, weil es geeignete Pump- turbinen derzeit nur für Tiefen bis 1000 Meter gibt.

Die Nordsee, deren mittlere Tiefe weniger als 100 Meter beträgt, scheint auf den ersten Blick wenig attraktiv für derartige Energie-Eier, aber auch hier gibt es eine Möglichkeit.

„Geeignet dafür wäre die norwegische Rinne“, erklärt Luther. Sie verläuft vor der Westküste Norwegens bis in den Skagerrak und ist an ihrer tiefsten Stelle rund 700 Meter tief.

Ist das Ganze mehr als nur ein interessantes physikalisches Gedankenexperiment? Der Test der Praktikabilität des Konzepts ist am Bodensee bereits im Gang. Mit im Boot sind hier unter anderem der Baukonzern Hochtief und das Fraunhofer-Institut für Windenergiesysteme in Kassel.

Die Ingenieure testen bei Überlingen eine stark verkleinerte Version des Energiespeichers. Das Bodensee-Ei hat nur drei Meter Durchmesser. Die 20 Tonnen schwere Betonkugel wurde 100 Meter tief auf den

Grund des größten deutschen Binnengewässers heruntengelassen. In den nächsten Wochen sollen die Konstruktion des Druckbehälters, der Pump- turbinen und die Einbindung ins Stromnetz untersucht werden.

Geht bei dem vom Bundeswirtschaftsministerium geförderten Projekt Stensee (Stored Energy in the Sea) alles glatt, erhofft sich Gerhard Luther den nächsten großen Schritt. „Dann muss über die finanzielle Beteiligung der Industrie gesprochen werden.“ In diesem Fall steht der Bau des 30 Meter großen Prototyps zur Debatte, der dann in der Norwegischen Rinne 700 Meter tief versenkt werden soll. Mit einem Gewicht von 20 000 Tonnen wird das ein Projekt einer völlig anderen Größenordnung. „Doch wir müssen hier in großen Dimensionen denken“, erklärt der Saarbrücker Physiker. „Wir reden schließlich über die zukünftige Energieversorgung Europas.“



H. Schmidt-Böcking



Gerhard Luther

FRANKFURTER ALLGEMEINE ZEITUNG

Forscher geben dem Bodensee die Kugel

In hundert Meter Tiefe wird die Versuchsanlage eines Speichers für überschüssigen Ökostrom installiert

Das klingt attraktiv: Offshore-Windstrom, der gerade keinen Abnehmer findet, gleich dort zwischenzulagern, wo er entsteht. Kein Wunder, dass längst darüber nachgedacht wird, leistungsfähige Batteriepuffer oder etwa Elektrolyseanlagen für die Wasserstoffproduktion in unmittelbarer Nähe zu den Windrädern auf tennisplatzgroßen, auf dem Meeresboden abgestellten Plattformen zu installieren (Technik und Motor vom 5. April 2016). Oder direkt am Ufer, an den Stellen, an denen der Seestrom angelandet wird.

Doch es geht auch anders: Und zwar mit auf den Grund der Meere abgesenkten Pumpspeicherkraftwerken, bei denen das Meer selbst als oberes Speicherreservoir dient, während ein abgetauchter Hohlkörper die Rolle des Unterbeckens übernimmt. Soll elektrische Energie eingelagert werden, wird mit Hilfe einer Pump- turbinen (sie ähneln prinzipiell den Maschinen, wie sie in Pumpspeicherkraftwerken an Land eingesetzt werden) gegen den Druck der über dem Unterwasser- kraftwerk stehenden Wassersäule das Wasser abgepumpt. Öffnet man zu einem späteren Zeitpunkt ein Ventil an der Oberseite des Hohlkörpers, strömt Wasser ein und treibt die Turbinen an – Strom wird erzeugt. Je tiefer der Hohlkörper auf dem Meeresboden installiert ist, desto größer ist das Speichervermögen, steigt es doch bei gleichem Volumen linear mit der Wassertiefe an. Es beträgt etwa bei einer Hohlkugel mit einem Innendurchmesser von 30 Metern und einer Wassertiefe von 700 Metern rund 20 Megawattstunden (MWh).

Ob und wann solch große (Beton-) Kugeln in so großer Wassertiefe installiert werden, ist völlig offen. Doch ein erster Schritt in diese Richtung ist getan: Am vergangenen Mittwoch wurde rund 200 Meter vor dem Ufer von Überlingen eine Drei-Meter-Testkugel (im Maßstab also von eins zu zehn) 100 Meter tief auf den Grund des Bodensees abgelassen. In den kommenden vier Wochen soll nun das Zusammenspiel aller Einbauten ausführlich getestet und die Simulation des Gesamtsystems überprüft werden.

Doch so ganz ohne Vorgaben wurde dieser Test nicht gestartet. Vielmehr hat

Größe sei mit verfügbarer Technik mit überschaubarem Aufwand zu produzieren, in 600 bis 800 Meter Tiefe zu installieren. Unter diesen Randbedingungen, meint Jochen Bard vom IWES, sei das Konzept wirtschaftlich anwendbar. Mögliche Standorte für einen aus mehreren Betonkörpern zusammengesetzten Kugelspeicher gäbe es – auch küstennah – reichlich. Etwa vor Norwegen (Norwegische Rinne), in Spanien, Japan und Nordamerika. Hochgerechnet über alle möglichen Standorte und bei Kugeln mit einer Speicherkapazität von jeweils 20 MWh kommen die Kasseler Ingenieure auf ein Gesamtspeicherkapazitätspotential von rund 900 000 MWh.

Während man beim IWES-Konzept auf starre Betonkörper setzt, arbeitet das kanadische Unternehmen Hydrostor mit Ballons aus einem stabilen Nylongewebe, wie es etwa auch zum Heben schwerer Lasten eingesetzt wird. Sechs solcher Unterwasserballons hat Hydrostor im Rah-



Kügelchen: Aus drei Meter Durchmesser sollen künftig dreißig werden.

FOTO: IWES

Ausführliche Beschreibung auch des Meereies bereits in der neuen **Monographie von Prof. Sterner über Energiespeicher**, Kapitel 9, Mechanische Speicher

M. Sterner, I. Stadler

Energiespeicher - Bedarf, Technologien, Integration

- ▶ Mit neuem Speicherkonzept
 - ▶ Kompakte Übersicht über alle Speichertechnologien
 - ▶ Speicherbedarf und Speicherintegration werden behandelt
 - ▶ Ein wichtiges Buch zur Energiewende
- Im Kontext der Energiewende sind Energiespeicher ein zentrales technisches, wirtschaftliches und energiepolitisches Thema.

Springer Verlag 2014, XXII, 748 S. 513 Abb.

Mit Online-Extras

ISBN = 978-3-642-37380-0

Hardcover Ladenpreis ▶ 70 € (D)

e-book : 55 €



Geplantes Demonstrationsprojekt

30 m-Kugel

in 700 Metern Teufe (vermutlich Norwegische Rinne)

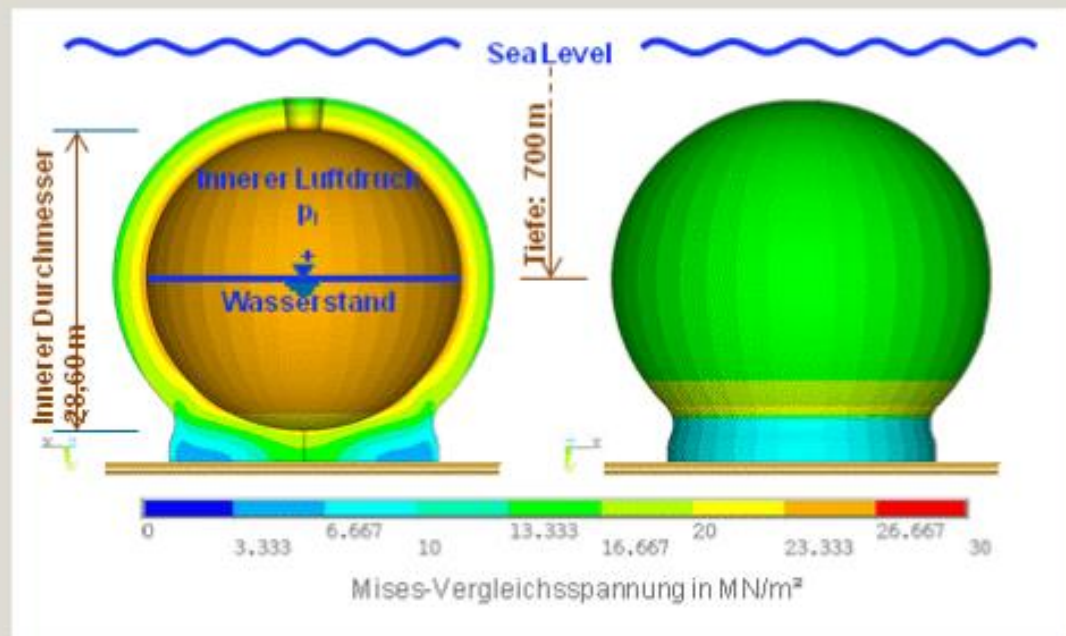
Speicherkapazität : ca. 20 MWh

Ladung/Entladung : ca. 4 h bei 5 MW

STENSEA | TECHNISCHE DATEN

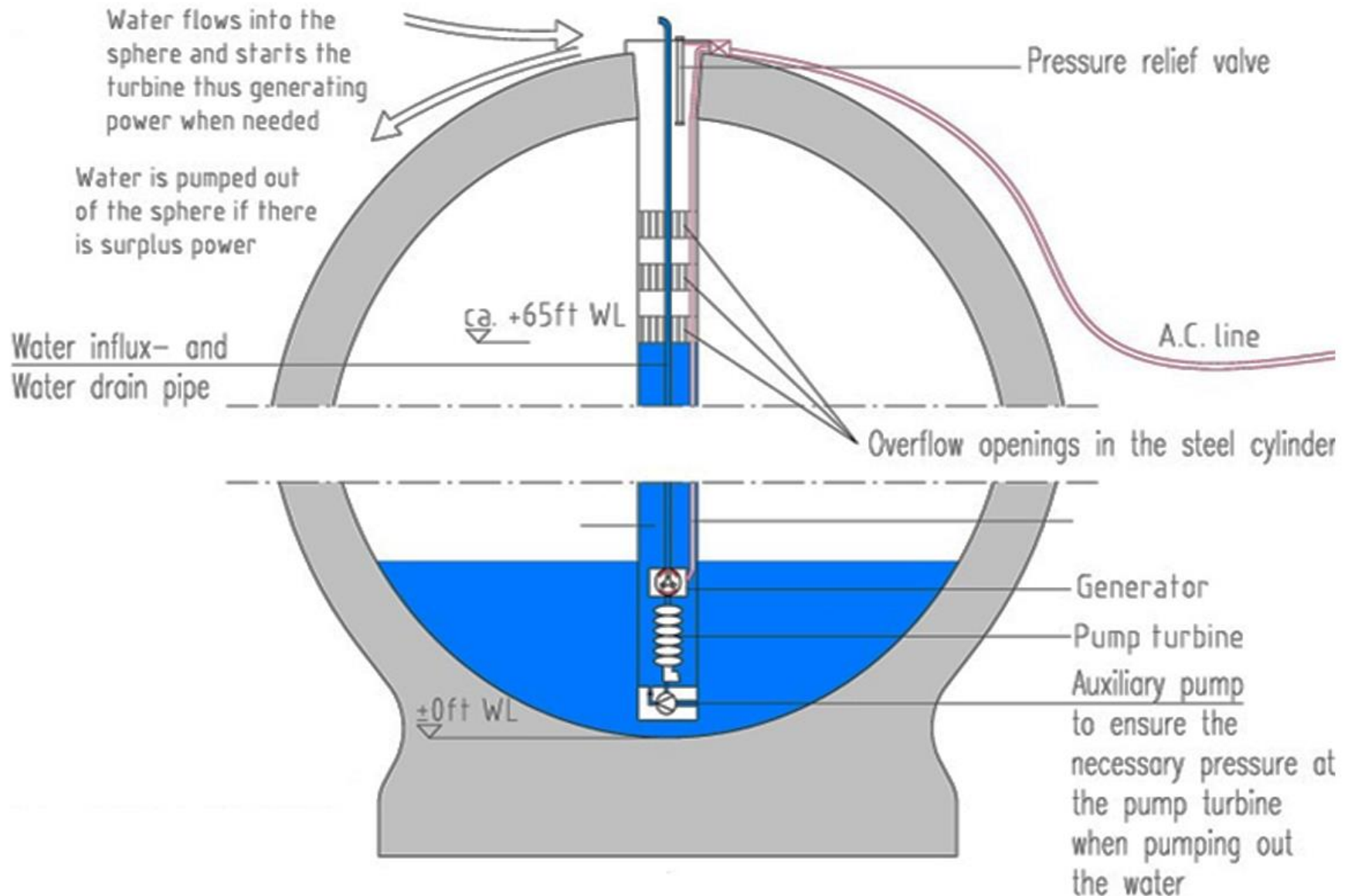
5MW | 20MWH

- Material: Beton
- Turbine: 5 MW
- Entladezeit: 4 h
- Kapazität: 20 MWh
- Wirkungsgrad: 80-85 %
- Durchmesser: 30 m
- Wandstärke: 2.70 m
- Speichervolumen: 12,000 m³
- Min. Wassertiefe: 700 m
- Druck: 70 bar



Quellen: Hochtief, IWES, 2012

1. Details zur geplanten Speicherkugel





*Bei diesem Beitrag handelt es sich um einen wissenschaftlich
begutachteten und freigegebenen Fachaufsatz („reviewed paper“).*

STENSEA – Die bauliche Konzeption eines Tiefsee-Energiespeichers

A. Garg, S. Glowienka, J. Meyer HochTief/Frankfurt und C.Lay HochTief/Essen

*Zeitschrift, :Bauingenieur, Organ des VDI für Bautechnik, Springer Verlag, Bd 88,
Juli/August 2013*

**J.Bard IWES Fraunhofer Institut Kassel
plus Uni-Stuttgart-Voith / Turbinen**

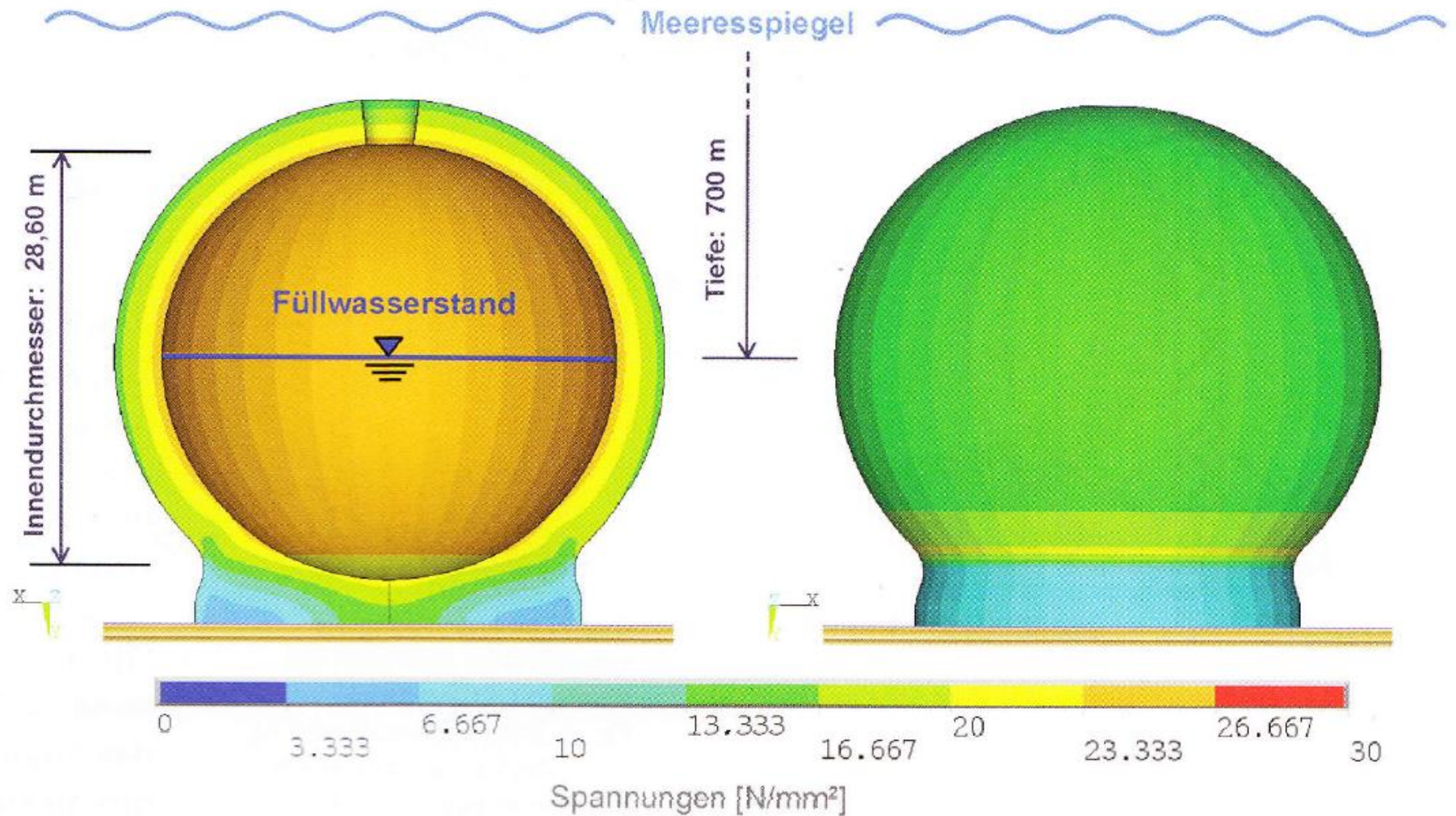


Bild 5. Spannungen in der Betonstruktur des Speicherkörpers

Fig. 5. Stresses in the concrete structure of the storage device

Große Kugeln baut man schon, aber „dünnwandig“!



Bild 13. Schalungsarbeiten zur Herstellung einer dünnwandigen Betonhohlkugel

Fig. 13. Formwork erection for the construction of a thin-walled hollow concrete sphere

Quelle: Garg e.a. 2013 : „Stensea – die bauliche Konzeption eines Tiefsee- Energiespeichers

KugelHerstellung vermutlich mit **LuftschlauchSchalung**

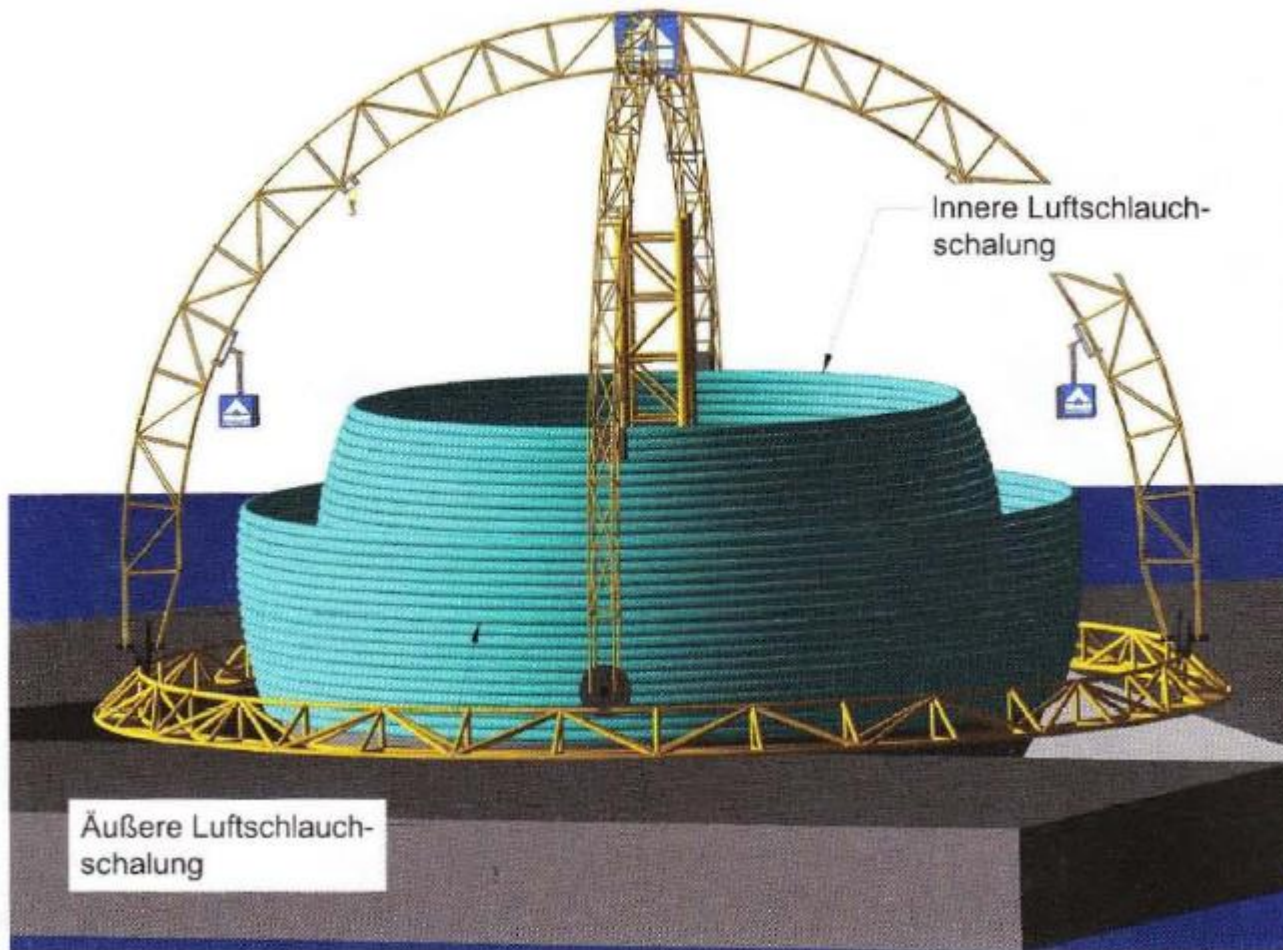


Bild 10: Aufbau der Schalung aus Luftschlauch Tori

[HochTief-Solutions]

Garg e.a. 2013 : „Stensea – die bauliche Konzeption eines Tiefsee- Energiespeichers

Vorkalkulation: StenSea könnte wettbewerbsfähig sein

STENSEA | ZIELKOSTEN

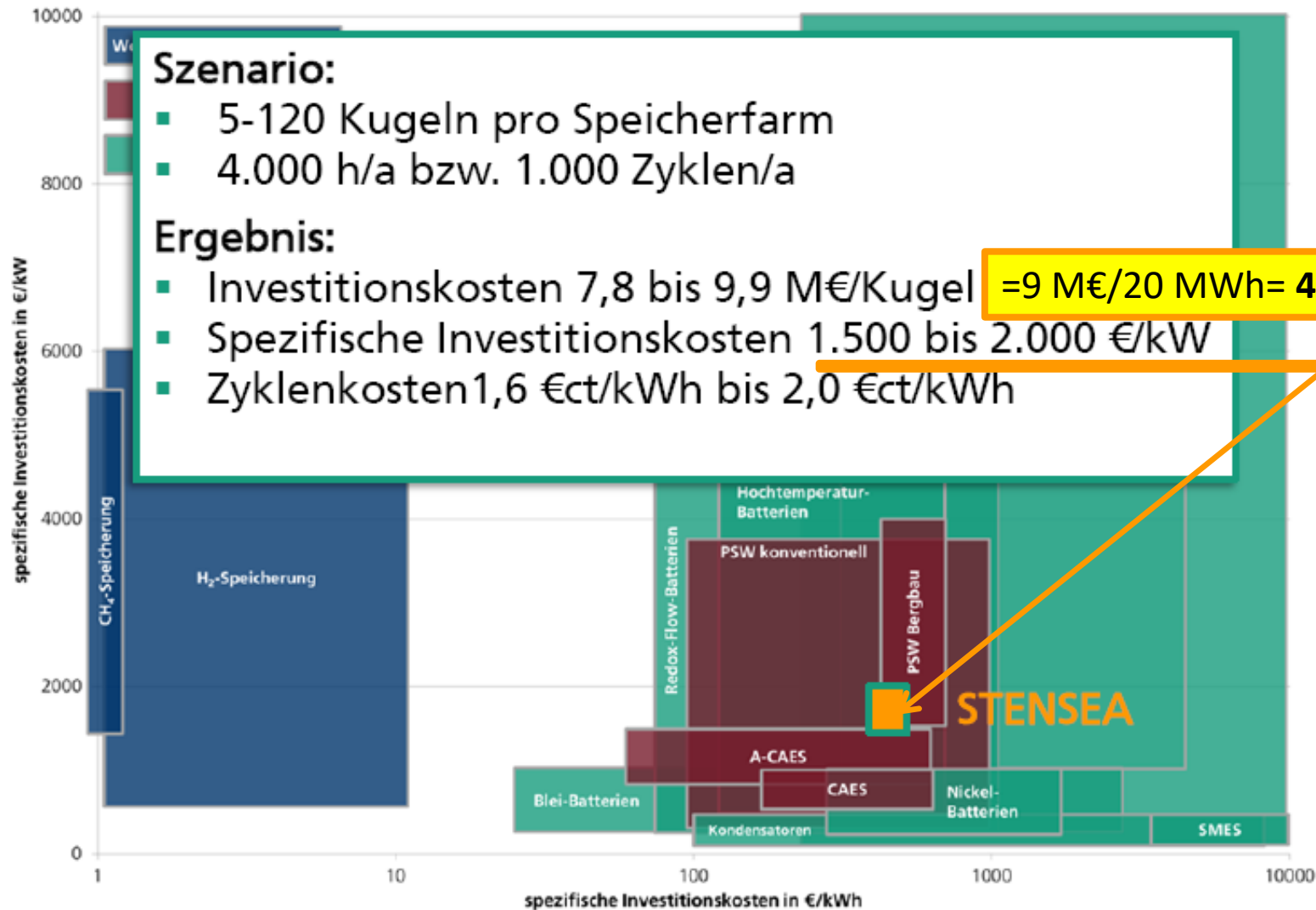
Zielkosten Konstruktion

Betonkosten inkl. Formen und Verstärkung	225 €/m ³	2,065 T€/Stück	413 €/kW
Installation		1,500 T€/Stück	300 €/kW
Pumpturbine mit Elektromechanik		2,625 T€/Stück	525 €/kW
STENSEA Zielkosten pro kW installierte Leistung			1,238 €/kW

→ Kosten für herkömmliche Pumpspeicherkraftwerke liegen bei 1,300 and 1,600 €/kW (standortabhängig)

STENSEA ist wettbewerbsfähig zu konventionellen Pumpspeicherkraftwerken!

Spezifische Investitionskosten Speichertechnologien



Quellen: UMSICHT, IWES; Metastudie Energiespeicher für BMWi

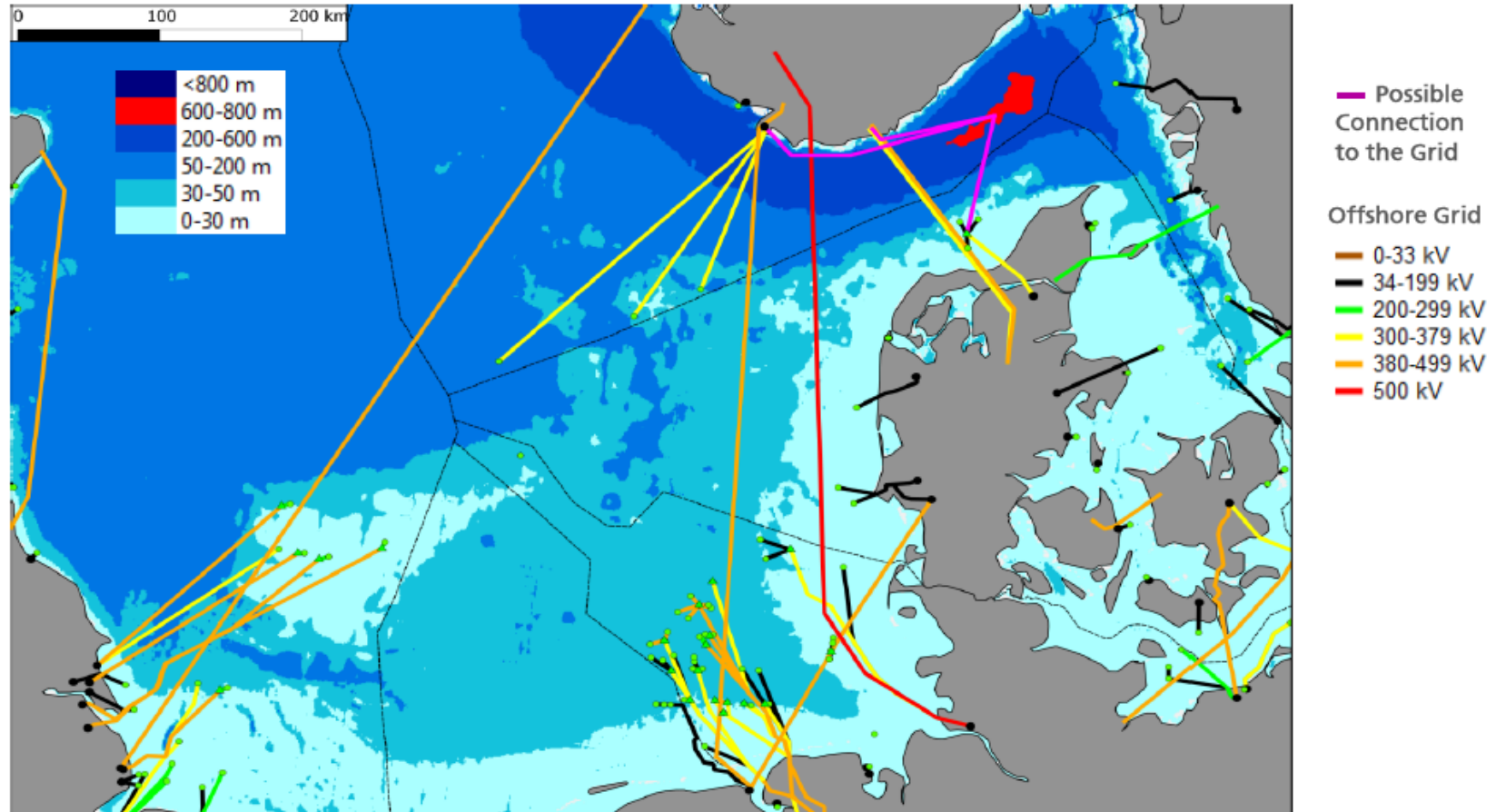
Urquelle des Bildes https://www.hnee.de/obj/A4440F9B-5E16.../Puchta_Beuth_Hochschule_2016.pdf

Speicher: Puchta2016_Beuth.Hochschule_23ppt.pdf Folie12

GIS-basierte Potentialanalyse

Rund **1000 km² Potential** in **Norwegischer Rinne**

8 GWh /1 km² , also ca.: **~8 TWh theoretische Speicherkapazität**

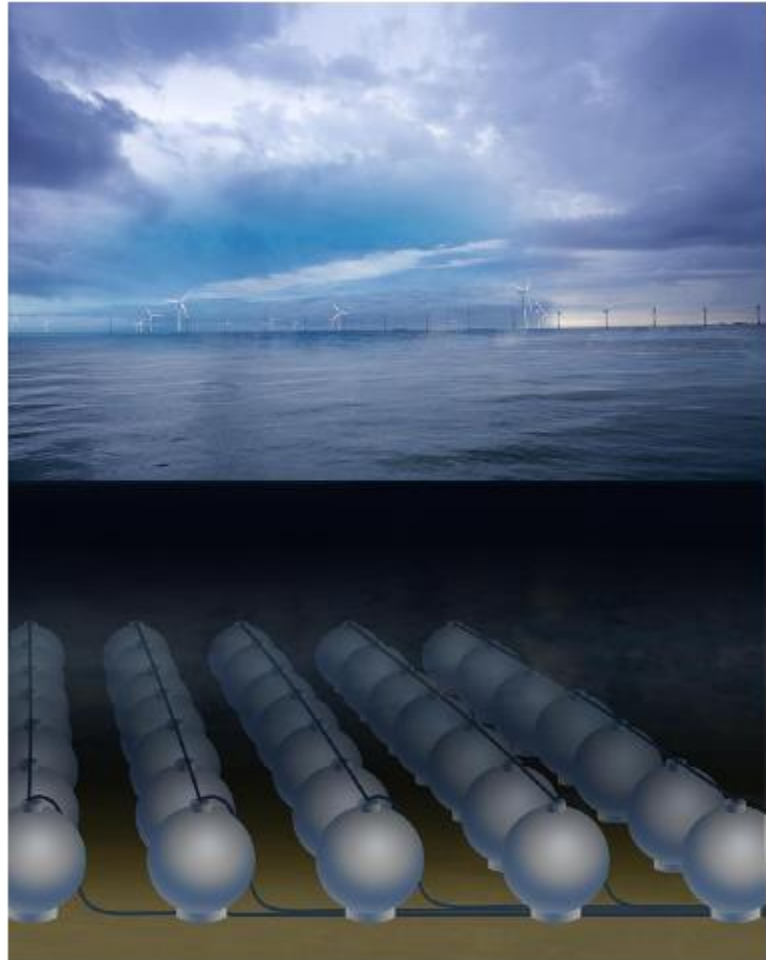


In der Biskaya und an einigen Stellen im Mittelmeer ist es sehr tief



GIS-basierte Potentialanalyse (600-800m Wassertiefe)

Land	Potential [TWh]
Weltweit	~817
Top 10 Welt	~628
Top 10 EU	~166
USA	~75
Japan	~70



Weitere Infos im Web unter:

<http://s.fhg.de/stensea>

<http://www.hochtief.de/hochtief/320.jhtml?id=17>

<http://www.fze.uni-saarland.de/Speicher.htm>

[http://forschung-energiespeicher.info/projektschau/gesamtliste/projekt-einzelansicht/95/Kugelpumpspeicher unter Wasser/](http://forschung-energiespeicher.info/projektschau/gesamtliste/projekt-einzelansicht/95/Kugelpumpspeicher_unter_Wasser/)

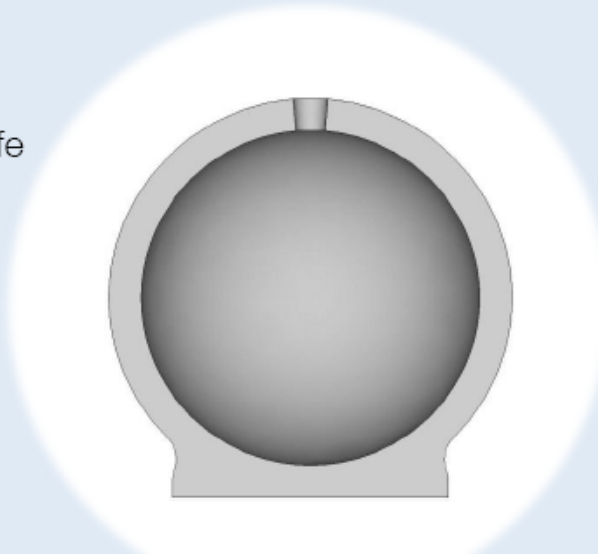
<https://www.bundesregierung.de/Content/DE/Artikel/2015/12/2015-12-08-hts-stansea.html>

allgemein: google „StenSea“

Die nächsten Schritte aus technischer Sicht:

Demonstrator 1:3

- **Abmessungen:**
 - $\varnothing \sim 10 \text{ m}$
 - Wandstärke $\sim 100 \text{ cm}$
- **Wassertiefe** bis zu 700 m
- **Speicherkapazität:**
 $\sim 1 \text{ MWh}$ bei 700 m Wassertiefe
- Mögliche **Standorte:**
 - Norwegische Rinne
 - Spanische Küste
 - Testfelder nahe Malta oder Kanarische Inseln



Demonstrator 1:1

- **Abmessungen:**
 - $\varnothing \sim 30 \text{ m}$
 - Wandstärke $\sim 300 \text{ cm}$
- **Wassertiefe** $\geq 700 \text{ m}$
- Pumpturbine mit 5-6 MW Leistung
- **Speicherkapazität:**
 $\sim 20 \text{ MWh}$ bei 700 m Wassertiefe
- Passende **küstennahe Gebiete** **weltweit** vorhanden

Derartige langfristige und weit gespannte Forschung und Entwicklung muss staatlich finanziert werden.

Etwas **Optimismus**

Große Kugel baut man schon, aber „dünnwandig“!

„Für die favorisierten Schalungsvarianten besteht

noch **Forschungs- und Entwicklungsbedarf,**

da keine dieser Methoden bislang für die Herstellung

einer **dickwandigen Betonhohlkugel**

eingesetzt wurde“.

Zitat aus: /Garg e.a. 2013 : „Stensea ..“/

Ziel: Standardmäßige „**Massenherstellung**“ von Meereiern , da
„ein Meer **Ei gleicht dem anderen**“

Interessant wären Meereier auch zum TagNacht-Ausgleich bei
„**Schwimmenden PV Anlagen auf dem Meer**“ in niederen geograph. Breiten.

Vision:

Schwimmende PV mit **Meerei**Speichern und direkter **H2**-Erzeugung . **Tanker** holen das Hochdruck-Gas direkt an der **Insel** (oder an einem **stationären Schiff**) .
(fehlt noch „Artist View“!!!!)

- Im Meer gibt es riesige Flächen (an mehreren Stellen auch küstennah), auf denen man **MeerEier in gewaltiger Zahl** ablegen könnte.
- Ebenso wie man bei herkömmlichen PSKW eine **randständige Aufstellung** (z.B. in den Alpen oder gar „in Norwegen“) für die allgemeine Stromversorgung „Natur gegeben“ praktiziert oder erwägt, könnte man auch **Meeresstandorte** für die PSKW der **allgemeinen Stromversorgung** heranziehen.
- Beispielsweise könnte man **pro km²** bei einem **Flächenbedarf pro Meerei** (20 MWh, 5 MW) von ca. 50m*50m = **0,0025 km²**
ca. 400 * 20 = 8 GWh /km² Speicher mit **400 * 5 MW = 2 GW /km² Leistung**

Vision:

Die (geeignete) Norwegischen Rinne umfasst ca. 1000 km²

Von dem Potential von 1000 * **0,008** = **8 TWh** bei 2 TW Leistung

könnte man auf einer Teilfläche von 200 km² den TagesStrombedarf von DEU vorhalten.

Energiewende- Wir schaffen das

1. Wir sind auf einem zielführenden Weg: PV , Wind (On- und Offshore), Speicher
2. Es mag im Einzelnen noch bessere Wege geben
3. Energiewende ist nur noch eine Frage des **Wollens** nicht mehr des Könnens
4. Wenn wir zu zaghaft sind, wird sie eine Frage des **Müssens** sein

nach Weihnachten geht's weiter

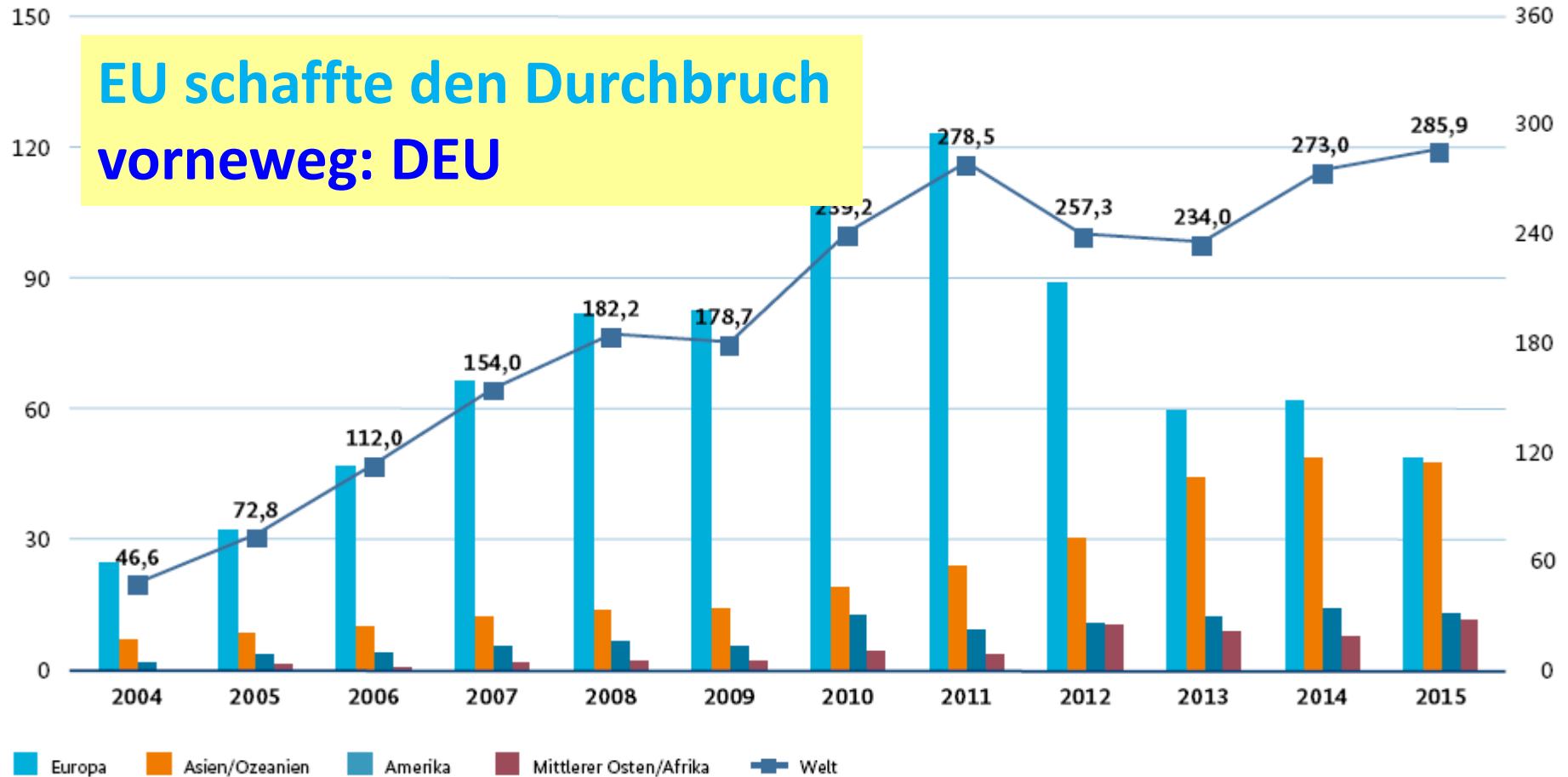
Anhang

Der Durchbruch der PV

Abbildung 61: Investitionen in erneuerbare Energien nach Regionen

EE-Investitionen nach Regionen (Mrd. USD)

EE-Investitionen global (Mrd. USD)



Quelle: Frankfurt School-UNEP Centre/BNEF [49]

Optimierter Ausbau der Erneuerbaren Energien (RE)

Erweiterung der RE-Quellen:

OffshoreWind

PV in West und Ostlagen

Optimierungspotential:

weitere Ausbau der RE mit

unterschiedlicher Gewichtung

der einzelnen RE-Quellen

Umgelegte Kosten der Backup –Gasturbinen

(nur Investitions-Kosten)

Eine schlichte aber fundamentale Rechnung :

Was eine Umlegung der Investitionskosten 100 % ige Back Up Kapazität auf den allgemeinen Strompreis wirklich kosten würde:

Investition **Gasturbine**: ca. **500 €/kW** = 0,5 €/W

80 GW kosten dann: 40 G€.

Jahreskosten bei **10 a** Abschreibung: **4 G€/a**

4 G€/a werden auf **600 TWh/a** = 600 **M*MWh/a** umgelegt:

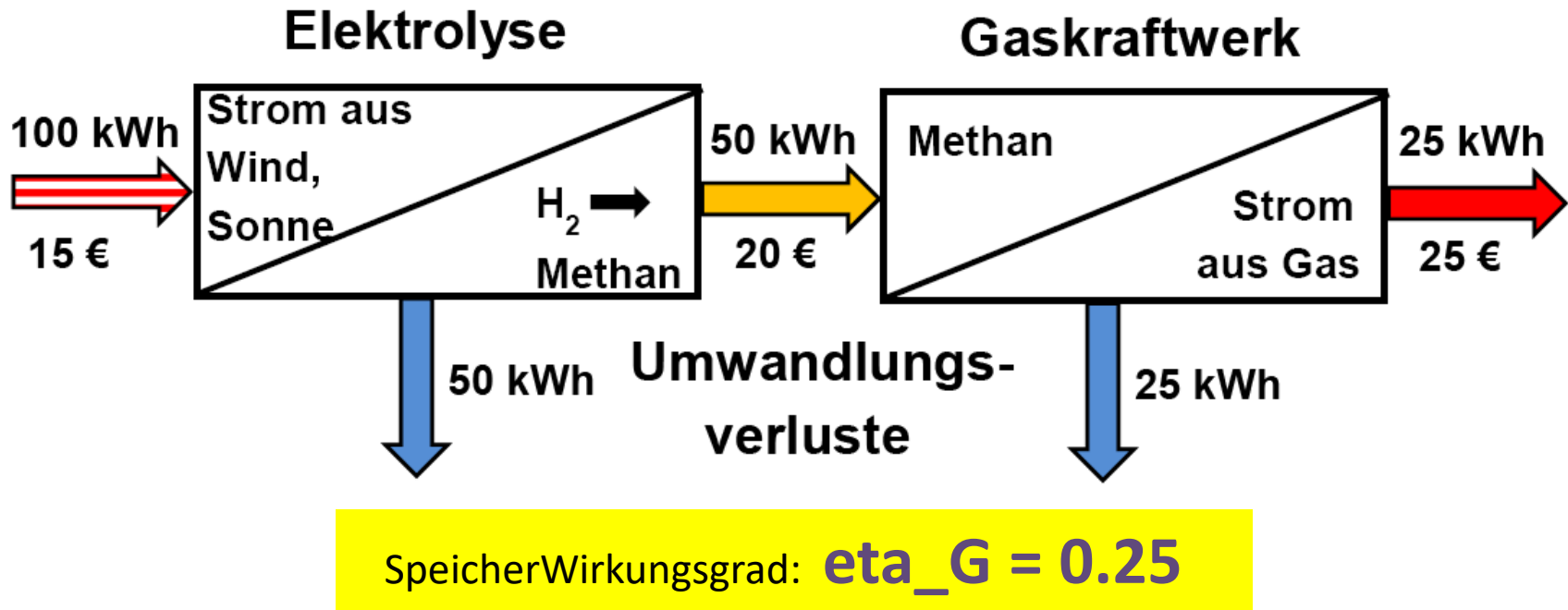
$4/600 = 0,007 \text{ G/M €/MWh} = 7 \text{ €/MWh} = \mathbf{0,7 \text{ ct/kWh}}$

also:

die vollständige **Back Up Kapazität** kostet **weniger als 1 ct/kWh !!**

Ich meine: 1 ct/kWh ist als „Flauten -Versicherung“ nicht zu teuer

Power to Gas (P2G) für Methanspeicher



Weitere Bemerkungen:

1. Gaskraftwerk (Gasturbine oder GuD) als BackUp ohnehin vorhanden
2. **Kleinere Produktionskapazität** möglich, denn **Elektrolyse und Methanproduktion** können über **längere Zeit** laufen als Stromerzeugung.
3. „Strom-Gaswirtschaft“ erlaubt indirekten Einsatz des Ferngasnetzes zur Stromverschiebung.

3. Dezentrale Speicher.KWK mit WP

CO₂ als Arbeitsstoff

3.0 Ein Konzept für dezentrale Stromspeicher und Warmwasser

3.1 Die **WPT** (WärmepumpTurbine)

3.2 Zur Thermodynamik des **WPT** –Betriebes, incl. Zwischenüberhitzung

3.3 Was kann man erhoffen: **Sp35**

Das **TiefSchacht.PumpSpeicherKraftwerk** (**TS.PSKW**)

Unser Ansatz:

Speicherung in **neuen sehr tief liegenden Blindschächten**
Gemeinsamer Hydraulischacht mit mehreren **Stockwerken**
Gleichartige PumpTurbinen transportieren seriell
von **Stockwerk zu Stockwerk**

Eventuell

vorhandene Bergwerks-Infrastruktur liefert:

Versorgungschacht, Zuwegung,
Förderung des Abraumes beim Bau

Neubau von **Schacht**-Speicherkraftwerken

Getrennte Optimierung der Funktionen:

Speicher-Blindschacht,
Hydraulischschacht mit Stockwerken
für Standard Pumpturbinen
Versorgungsschacht
Außenbecken (bzw. Oberflächengewässer)

Speicherschächte müssen

viele Jahrzehnte (100 Jahre ?) funktionstüchtig bleiben
keine Bergschäden verursachen,
kaum Unterhaltskosten benötigen

TS.PSKW sind neu konzipierte Untertage-SpeicherKraftwerke,
die eigenständig optimiert werden ,
die sich aber an vorhandene Bergbaustrukturen anlehnen können .

Meerei mit Luftpolster Speicher

2.2. Das Meerei als Tagespeicher und als fast isothermer Luftkompressor

2.2.0 Der Referenzbetrieb des eigenständigen Meereies

2.2.1 Das Luftpolster als eigenständiges geschlossenes System

2.2.1.1 Die Ausgangslage

**** Exkurse: Stoffwerte anderer Gase als Luft, Stoffliche Entkopplung durch Membran:

2.2.1.2 Das Luftpolster im Kreisprozess des Speicherbetriebes

2.2.1.3 Grenzfall: Adiabatische – isochore Prozessführung

2.2.1.4 Grenzfall: Isotherme Prozessführung

2.2.2 Schlussfolgerung: Der isolierte Betrieb des Meerei mit Luftpolster

2.2.3 Das **Meerei als fast isothermer Luftkompressor**

2.2.3.1 Zwischen Isothermie und Adiabatie

2.2.3.2 Isothermie in Zylindern

2.2.2 Schlussfolgerungen: Der isolierte Betrieb des Meerei mit Luftpolster

Die **Einbuße der Speicherkapazität** des Meereies durch eine **Luftfüllung** beruht auf zwei Effekten:

Verringerung des Arbeitsvolumens:

Das Luftpolster nimmt nach der Kompression ein **Restvolumen** V_1 bzw. V_{1a} ein, **das** beim Ausspeichern der Energie, also bei der Füllung des Meerei mit Meerwasser, **nicht mehr zur Aufnahme von Turbinenwasser zur Verfügung** steht

Gegenkopplung

Das **Luftpolster arbeitet als eigenständiger interner „Druckluft-Speicher“** um **180° phasenverschoben** gegen den gesamten, von außen zugänglichen Meerei- Speicher “.

Sowohl die „geometrische“ Verkleinerung des Arbeitsvolumen für den Turbinenbetrieb als auch die Gegenkopplung durch das Luftpolster bewirken eine Verringerung der Speicherkapazität des Meereies gegenüber seinem „Vakuum“-Referenzbetrieb nach Abschnitt 2.2.0.

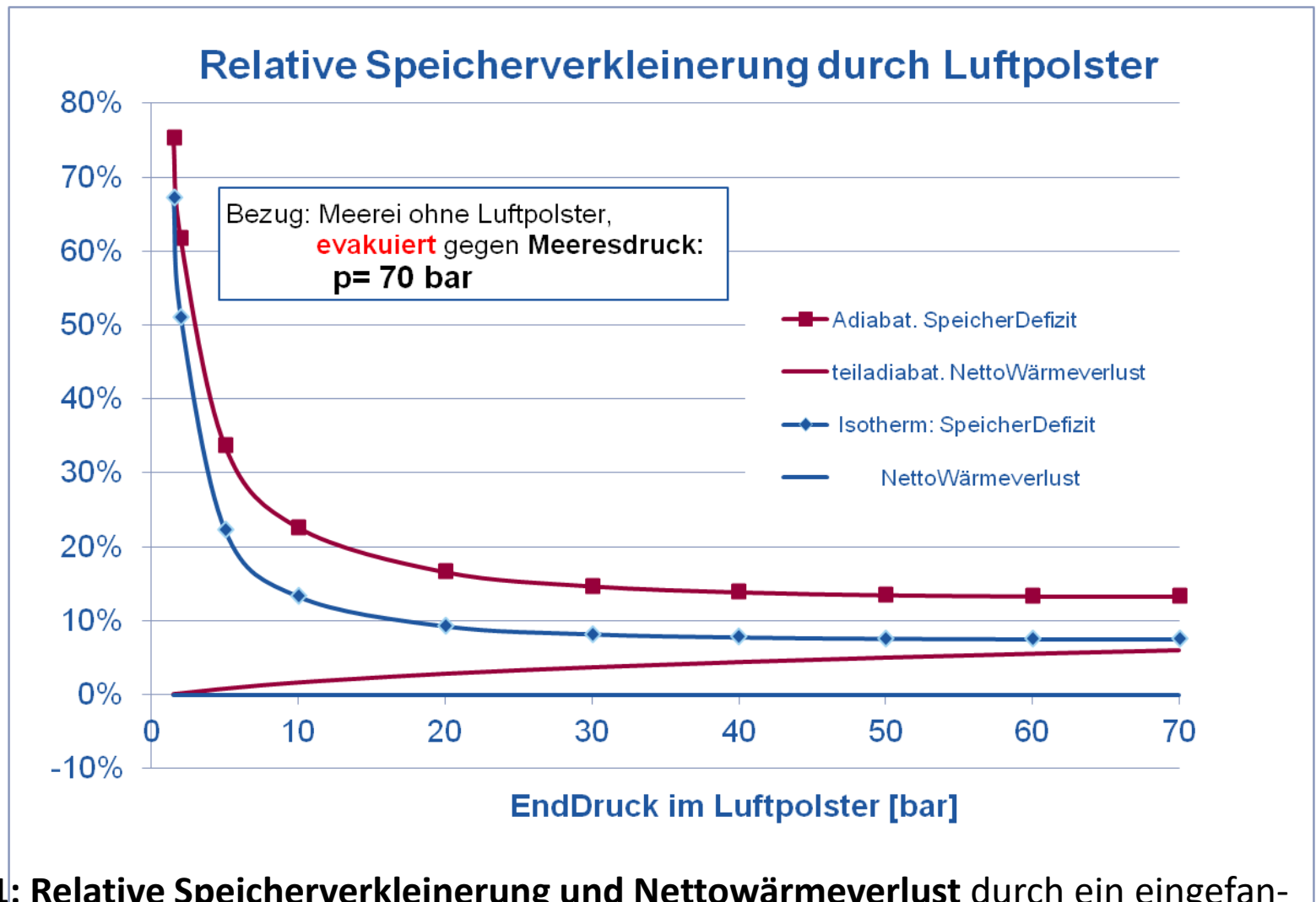


Bild: 2.21: Relative Speicherverkleinerung und Nettowärmeverlust durch ein eingefangenes Luftpolster, das sich im Speicherbetrieb des Meereis wie ein gegengekoppelter Speicher auswirkt. Meeresdruck und maximaler Enddruck im Luftpolster: **70 bar**.
 SpQuelle: GasPolster-Prozess.xlsm !Polster!Z69S37.

Relative Speicherverkleinerung durch Luftpolster

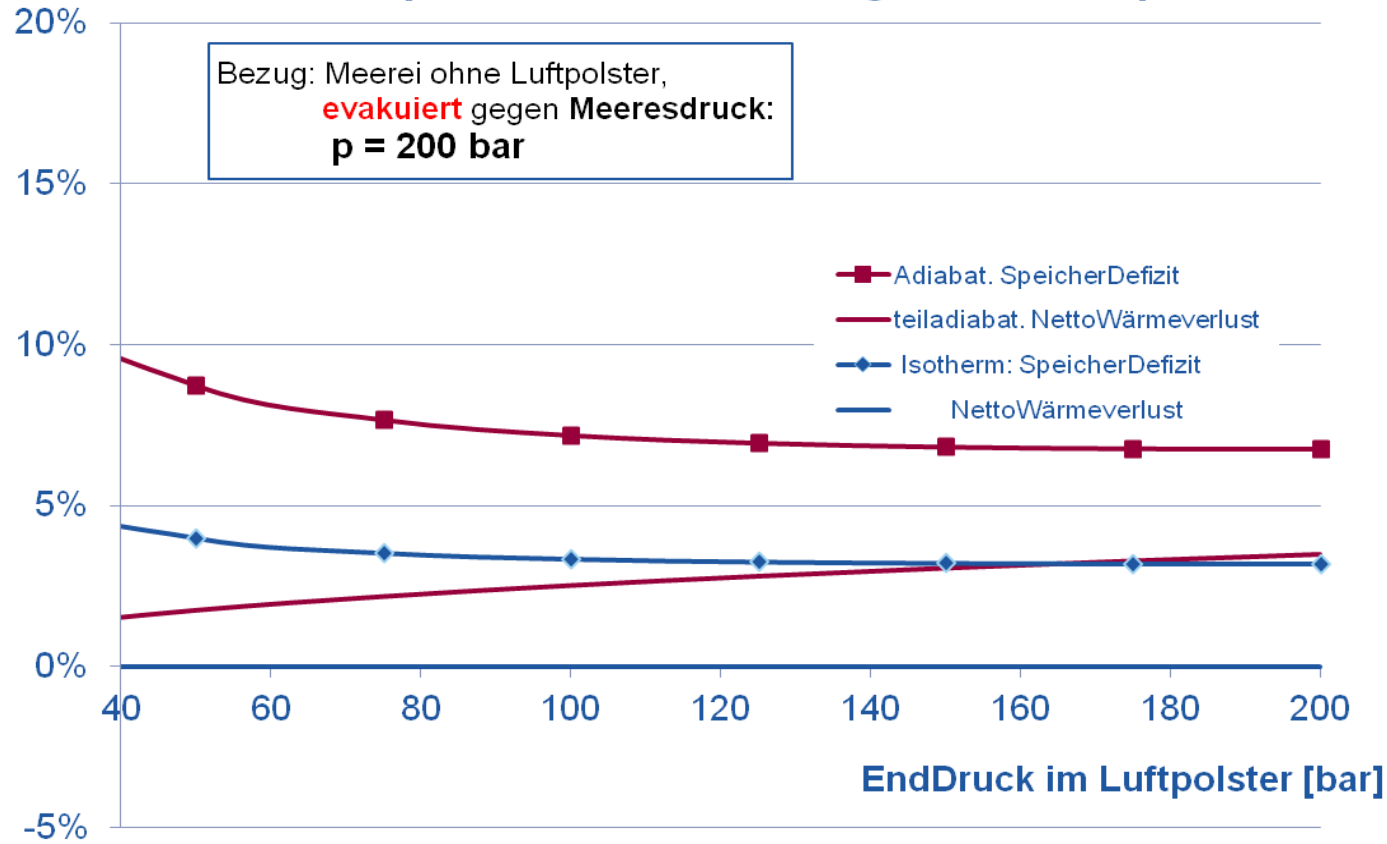


Bild: 2.24: Relative Speicherverkleinerung durch ein eingefangenes Luftpolster wie Bild 2.23, jedoch mit höherer Auflösung.

SpQuelle: GasPolster-Prozess.xlsm !Polster!Z114S55.

Um jedoch jetzt schon zu einer praktischen Faustformel zu gelangen setzen wir ad hoc an, dass die tatsächlichen Werte in der Spanne zwischen den beiden betrachteten Grenzfällen **zu $\frac{3}{4}$** auf der Seite des isothermen Grenzfalles liegen. Dann können wir als **Faustformel** das folgende Fazit ziehen:

Ist das leere Meerei mit Luft von 1 bar gefüllt, so wird seine Speicherkapazität bei einem Enddruck des Luftpolsters, der etwa dem halben Meeresdruck von **70 bar** entspricht, um **etwa 10%** gegenüber dem Vakuum –Referenzfall **verringert**. Als Prozessbedingten thermischen Verlust muss man mit etwa 1% der Einspeicherungsenergie rechnen. (Bild 2.21 oder 2.22)

Bei dem untersuchten Meeresdruck von **200 bar** reduzieren sich demgegenüber sowohl die relative Speicherverkleinerung als auch der Netto-Wärmeverlust auf **etwas weniger als die Hälfte**. (Bild 2.24).