

Energiespeicherung unter der Erde – Stillgelegtes Bergwerk als Pumpspeicherkraftwerk



Hermann-Josef Wagner

Energiesysteme und Energiewirtschaft
Ruhr-Universität Bochum

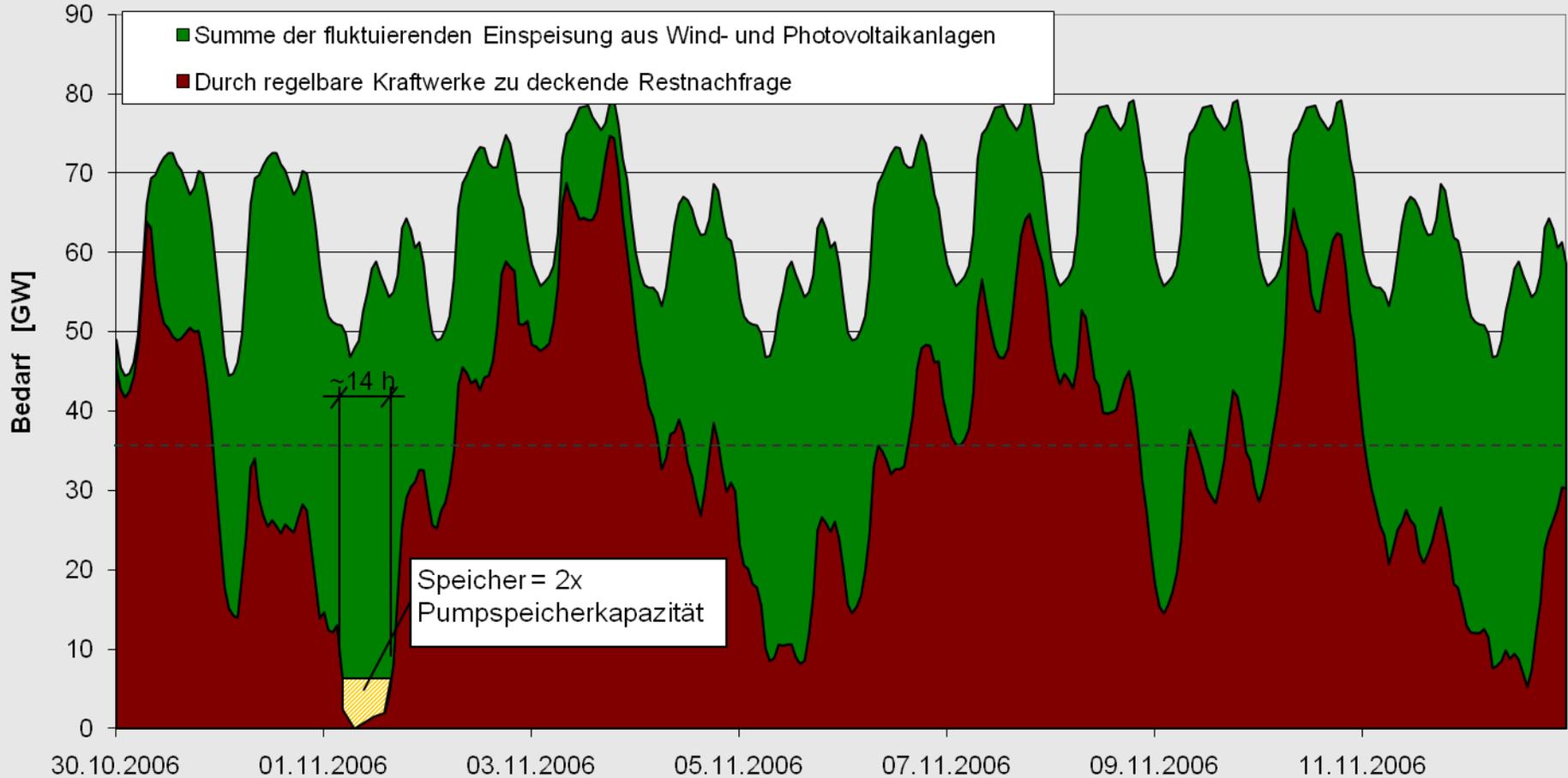
wagner@lee.rub.de

- **Notwendigkeit der Stromspeicherung – Pumpspeicher-Kraftwerke**
- **Ende der Steinkohleförderung – Folgeaktivitäten**
- **Unterflurpumpspeicherkraftwerk (UPSW) – Prosper-Haniel**
- **Weitere Nutzung der Wärme des Oberflächenspeicherbeckens**
- **Schlussfolgerung**

Worüber ich sprechen möchte

- **Notwendigkeit der Stromspeicherung – Pumpspeicher-Kraftwerke**
- Ende der Steinkohleförderung – Folgeaktivitäten
- Unterflurpumpspeicherkraftwerk (UPSW) – Prosper-Haniel
- Weitere Nutzung der Wärme des Oberflächenspeicherbeckens
- Schlussfolgerung

Worüber ich sprechen möchte



Wieviel Wind und Photovoltaik ohne Speicher?

- **Spot – Markt (Day Ahead Markt & Intraday Markt)**
Klassische „Stromveredelung“
- **Phasenschieberbetrieb**
Blindleistungskompensation
- **Regelenergiemarkt**
Stabilisierung der Stromnetze
- **Kaltstartfähigkeit**
Neuanfahren des Stromnetzes nach *Black Out*

Früher: Spitzenlastbereitstellung
Heute: Dienste im Bereich der Elektrizitätswirtschaft

Vergleich Batteriespeicher / Pumpspeicherwerke:

Pumpspeicherwerke	Großbatteriespeicher
Geringe Investitionskosten 500-850 €/kWh	Investitionskosten von 800-1200€/kWh
Lange Lebensdauer (80- 100 Jahre)	Geringe Lebensdauer (10-15 Jahre)
Guter Wirkungsgrad (~80%)	Wirkungsgrade bis zu 80 %
Lange Planungs- und Bauzeiten	Schnelle Errichtungszeiten
Veränderung des Landschaftsbildes	Auf „seltene Erden“ angewiesen
Massive Eingriffe in die Natur	Schlechte Ökobilanz

Pumpspeicherkraftwerke versus Großbatteriespeicher

Name	Vorhabenträger	Leistung [MW]	Fallhöhe [m]	Nutzvolumen [Mio. m ³]	Kapazität [GWh]	Inbetriebnahme	Investition [Mio. €]
Atdorf (BW)	Schluchseewerk AG	1400	600	9,0	13	2022	1.600
Blautal (BW)	StW Ulm & Fa. Eduard Merkle	60	162	1,0	0,37	k.A.	150
Einöden (BY)	PSW Einöden GmbH	100 – 200	370	1,0 – 1,8	0,9 – 1,6	2019	k.A.
Forbach plus (BW)	EnBW AG	225	Ca. 300	Ca. 2,0	k.A.	2019/20	300
Hainleite (TH)	PSW Hainleite GmbH/Hochtief	240 – 500	240	2,5 – 5,0	1,44 – 3,0	2021	290 – 650
Heimbach (RP)	Stadtwerke Mainz AG	400 – 600	550	k.A.	k.A.	2019	k.A.
Jochberg (BY)	Energieallianz Bayern GmbH	700	577	3,0	4,2	2023	600
Leinetal (NI)	PSW Leinetal GmbH/Hochtief	200	200	2,3	1,12	2020	k.A.
Lippe (NW)	PSW Lippe GmbH/Hochtief	320	300	2,5	1,8	2021	300
Markersbach+ (SN)	Vattenfall	k.A.	288	0,73	0,5	k.A.	k.A.
Nethe (NW)	Trianel GmbH	390	220	4,2	2,2	2020	500
Riedl (BY)	Donaukraftwerk Jochenstein AG	300	340	4,2	3,5	2018	350
Rur (NW)	Trianel GmbH	650	250	7,0	4,3	Eingestellt	700
Poschberg (BY)	Max Aicher	450	650	2,0	3,2	2023	k.A.
Schmalwasser (TH)	Trianel GmbH	1.070	285	Ca. 10	6,9	2019	1.300
Schweich (RP)	Stadtwerke Trier GmbH	300	200 – 280	6,0	3 – 4	2019/20	450
Waldeck 2+ (HE)	E.ON AG	300	329	0,44	k.A.	verschoben	250

Quelle: BWK – Das Energiefachmagazin, Nr.4, 2014, Springer-VDI-Verlag, ISSN: 1618-193X

Im Mai 2014 war noch keines dieser Projekte zur Genehmigung angemeldet.

Pumpspeicherprojekte in Deutschland (Stand 01/2014)

- Derzeitig finanzielle Situation am freien Energiemarkt schlecht:
 - Geringe Marge an den Strommärkten verhindert Wirtschaftlichkeit
 - Preise des Regenergiemarkts sehr niedrig
- Viele Stillstandszeiten und wenig Erlöse

- PSW werden auf „schwarze Null“ gefahren → Investitionsstau
- Stillstand bei fertiggestellten Planungen
- Häufige Lastwechsel auf Kosten der Lebensdauer

Derzeitige Situation von Pumpspeicherwerken

Beispiel: PSW Atdorf, Schwarzwald (1,4 GW)

- Hochkomplexer Planfeststellungsantrag:
 - 124 Ordner
 - 19.000 Seiten Beschreibungen / Gutachten
 - 1.100 Karten und Pläne
 - Hoher Anspruch an die Umweltplanung durch heute geltenden gesetzlichen Rahmen
 - Sehr komplexe Umweltplanung mit ökologischen Ausgleichsmaßnahmen mit enormen Umfang (insgesamt ca. 1.200 ha)
- **Projekt wurde Oktober 2017 von Schluchsewerk AG eingestellt (EnBW und RWE)**



Quelle: ILF 2017

Aufwand Genehmigungsplanung Pumpspeicherkraftwerk

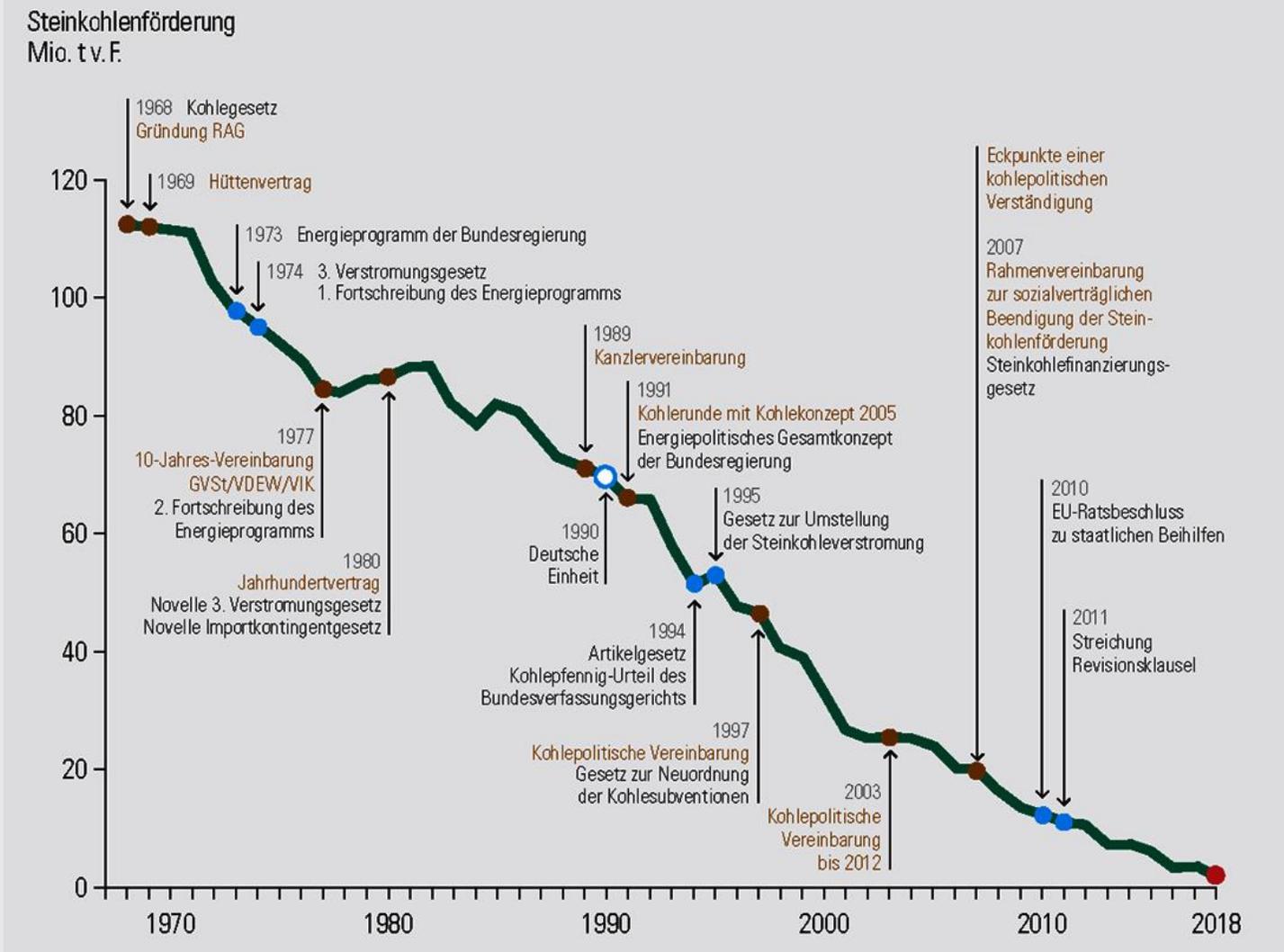
- Notwendigkeit der Stromspeicherung – Pumpspeicher-Kraftwerke
- **Ende der Steinkohleförderung – Folgeaktivitäten**
- Unterflurpumpspeicherkraftwerk (UPSW) – Prosper-Haniel
- Weitere Nutzung der Wärme des Oberflächenspeicherbeckens
- Schlussfolgerung

Worüber ich sprechen möchte



Quelle: RAG

Deutsche Steinkohleförderung endete 2018 - Schrämwalzenlader mit Schildausbau



Quelle: Steinkohle 2018 Gesamtverband Steinkohle e.V.

Kohlepolitische Beschlüsse im Kontext der energiepolitischen Programmatik



Hambacher Forst: Nicht immer verlaufen die Proteste friedlich. 760.000 Menschen haben eine Petition zum Erhalt des Waldes unterschrieben. Bild: David Young/Kea



Quelle: Wagner, 2015

Diskussion: Braunkohle? Braunkohletagebau Hambach

- Notwendigkeit der Stromspeicherung – Pumpspeicher-Kraftwerke
- Ende der Steinkohleförderung – Folgeaktivitäten
- **Unterflurpumpspeicherkraftwerk (UPSW) – Prosper-Haniel**
- Weitere Nutzung der Wärme des Oberflächenspeicherbeckens
- Schlussfolgerung

Worüber ich sprechen möchte



Oberbecken kann auf dem großen Betriebsgelände der RAG AG errichtet werden

Zeche Prosper-Haniel – Weiternutzung des Geländes

- **2011**

Vorstudie Unterflur-Pumpspeicherwerke – Nutzung von Anlagen des Bergbaus zur Speicherung regenerativer Energien gefördert durch die Mercator-Stiftung

- **11/2012 - 06/2015**

Entwicklung eines Realisierungskonzeptes für die Nutzung von Anlagen des Steinkohlebergbaus als unterirdische Pumpspeicherkraftwerke gefördert durch das MULNV NRW

- **08/2016 - 12/2018**

Ökonomische Einschätzung des Unterflurpumpspeichers am Bergwerk Prosper Haniel in Bottrop in einer kombinierten Bund-Land-Förderung

- Gesamtes Fördervolumen seit 2012: 3,1 Mio. Euro

Projektgeschichte UPSW

Energiewirtschaftlich/-technische Betrachtung

- Realisierung der Speicherlösung bedeutet einen wichtigen Beitrag zur Energiewende
- Nutzung der bestehenden / gut ausgebauten Netzinfrastruktur in NRW
- Energiespeicherung im Energieballungsraum (Ruhrgebiet: 5,2 Mio. Einwohner)
- Schwarzstartfähigkeit dank der Unabhängigkeit vom Stromnetz
- Technisches Highlight an einem innovativen Standort (Alleinstellungsmerkmal weltweit)

Gesellschaftlicher Nutzen

- Profilierung als Region der Energieeffizienz und der Energiespeicher
- Strukturpolitischer Beitrag zur Bergbaufolge
- Technologieführerschaft in internationaler Perspektive
- Geringe Einflüsse auf Umwelt und Landschaftsbild im Vergleich zu konventionellen PSW
- Akzeptanz der Bewohner vorhanden

Maßgebliche Erkenntnisse und Argumente der ersten Projektphase



Bundesministerium
 für Wirtschaft
 und Energie

Ministerium für Klimaschutz, Umwelt,
 Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz
 des Landes Nordrhein-Westfalen



RUHR
 UNIVERSITÄT
 BOCHUM

RUB →



CONSULTING
 ENGINEERS



Rhein-Ruhr-Institut
 für Sozialforschung und Politikberatung e.V.
 an der Universität Duisburg-Essen

Fördersumme: 746.185 Euro

Fördersumme: 315.707 Euro

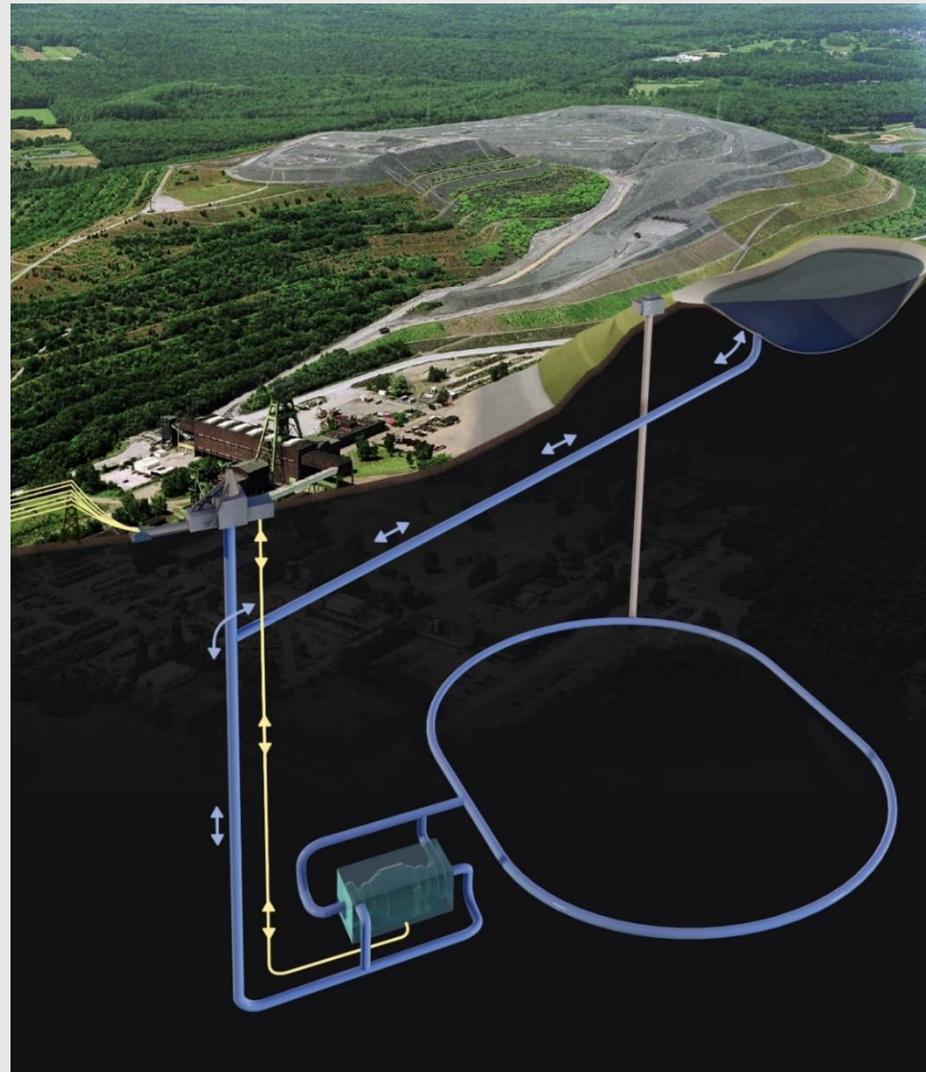
Förderstruktur der zweiten Machbarkeitsstudie



Überreichung des Förderbescheids durch Minister Remmel im August 2016

- 200 MW Nennleistung
- 750 MWh Speicherkapazität
- 750.000 m³ Speichervolumen

- Oberbecken bei 71 mNN
- Unterspeicher bei 471 - 450 mNN
- Maschinenkaverne auf 501 mNN



Konzeptskizze

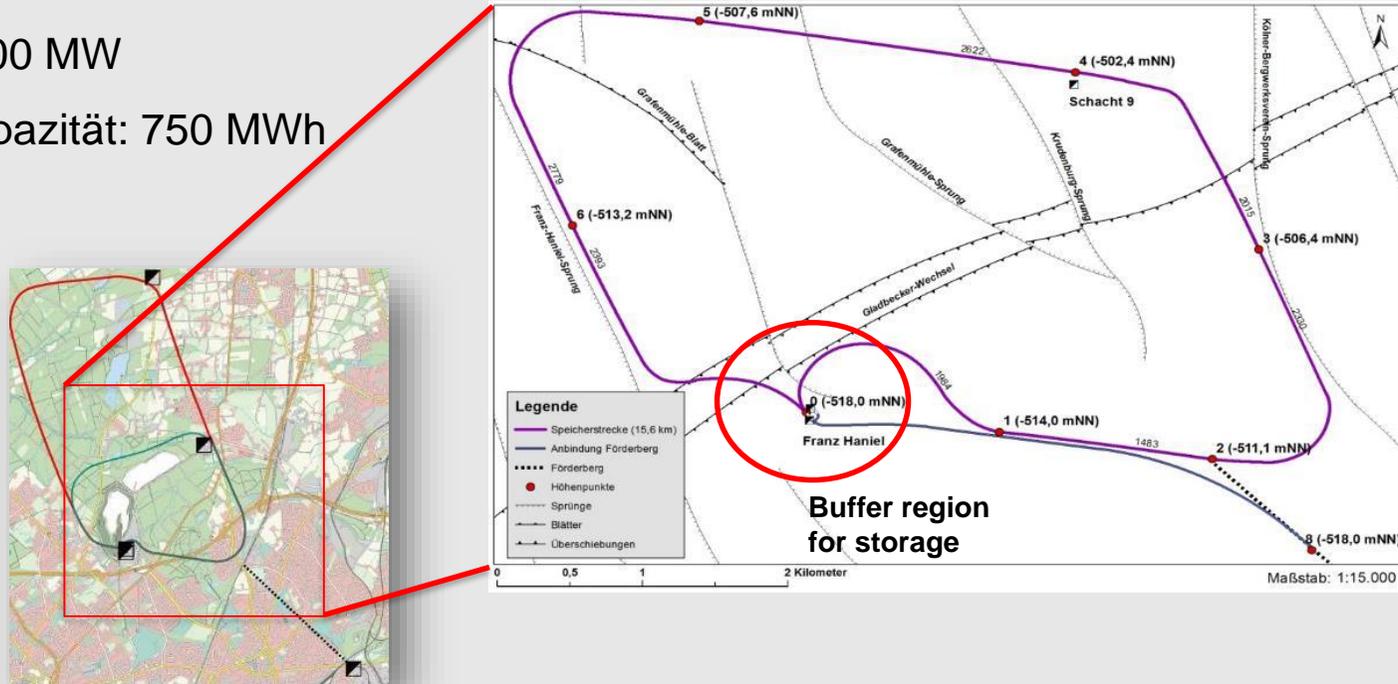
	Variante A	Variante B
Installierte Turbinenleistung	200 MW	
Bruttofallhöhe	530 m	
Speicherkapazität (Wasser)	600.000 m ³	
Speicherkapazität (elektrisch)	735 MWh 85.000 Haushalte für einen Tag	
Länge aufzufahrender Stollen	26,7 km	
Nutzung des Schrägschachtes	Nein	
Entladedauer	3 h, 40 min	
Maschinenkonfiguration	Ternärer Maschinensatz	Reversible Pumpturbine

Spezifikation der betrachteten Pumpspeichervarianten

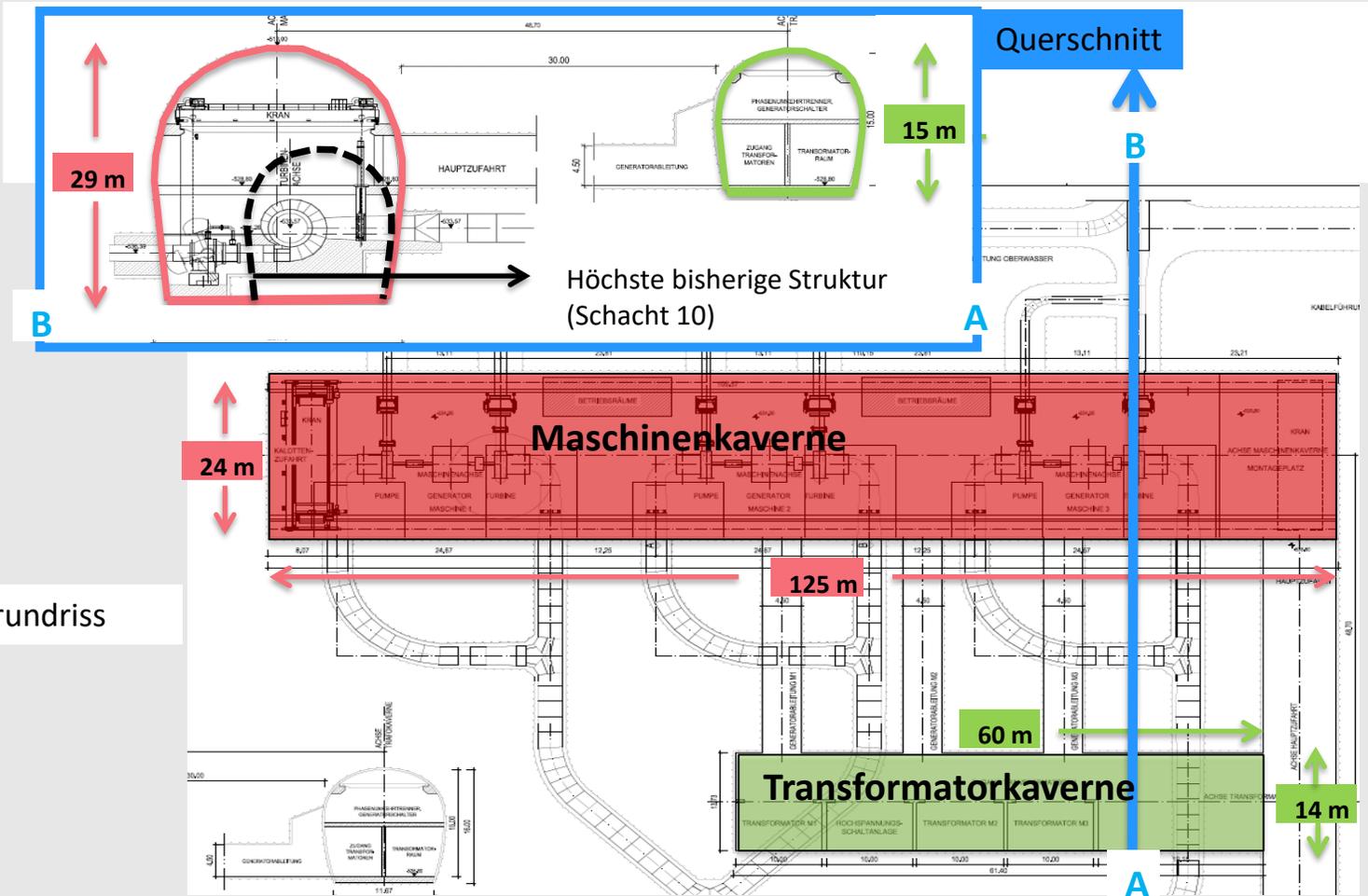


Geotechnische Entnahme von Bohrkernen an der Maschinenkaverne

- Länge: 15,5 km
 - Volumen: 575.000 m³
 - Durchfluss: 40 m³/s
 - Fallhöhe: 530 m
 - Leistung: 200 MW
 - Speicherkapazität: 750 MWh
- Schacht 1 und 2 werden als Druckrohrleitung, Kommunikationsleitungen und zur Energieableitung genutzt



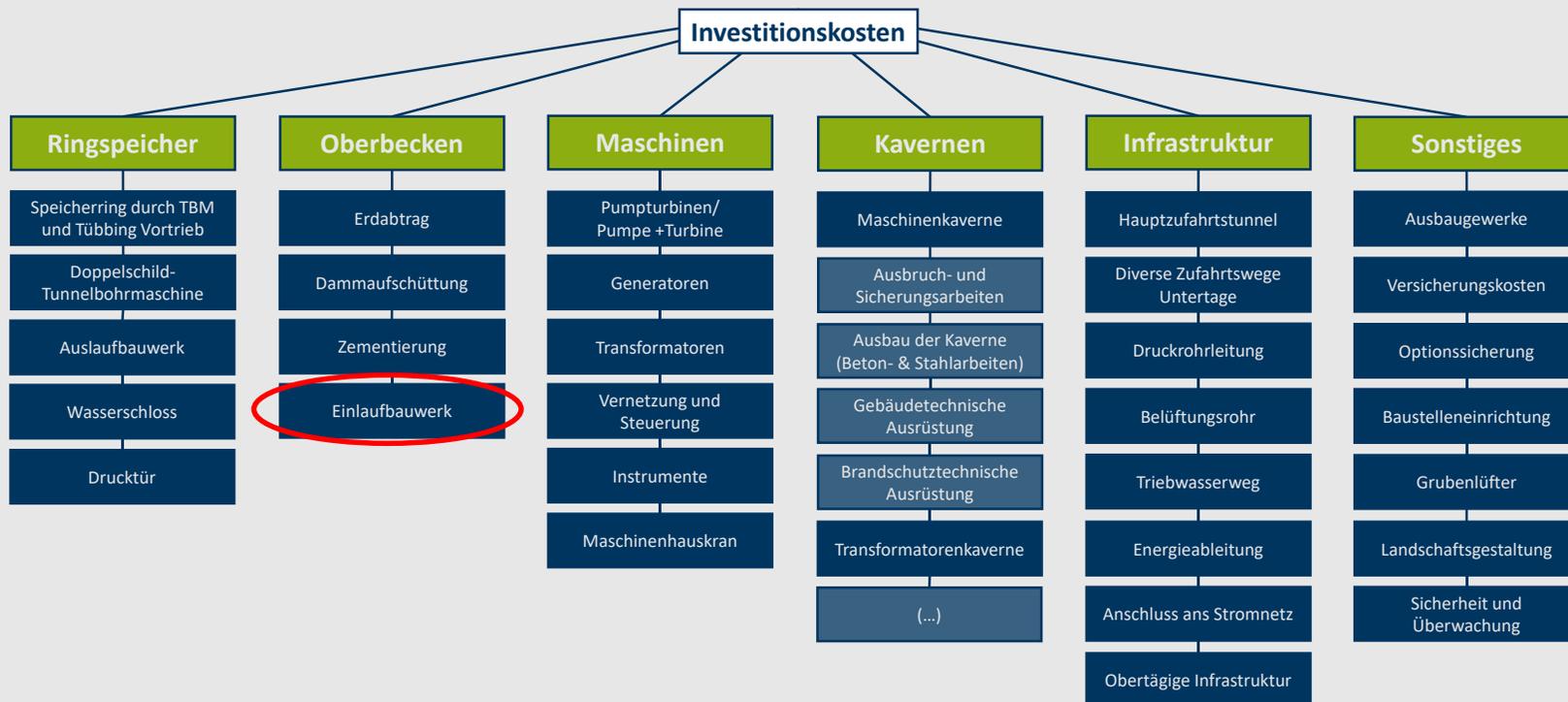
Neuartige Struktur: Ringspeicher



Größe, Lage und Orientierung der Kavernen basieren auf geologischen Restriktionen

Anordnung der Kavernen

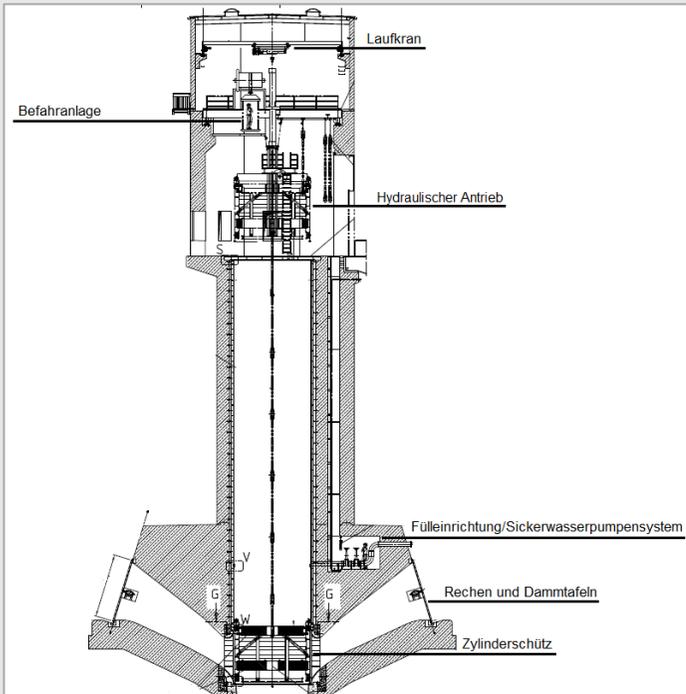
- Für Ermittlung der Investitionskosten wurden einzelne Komponenten identifiziert
- Die Kosten der einzelnen Komponenten wurden bestimmt und addiert
- Beispiel: Investitionskosten → Oberbecken → Einlaufbauwerk → Dammtafeln



Komponenten des UPSW

Index	Kostenposition	Mittlere Kosten
1	Oberbecken	19,3 Mio
1.1	Erdbewegungsarbeiten	7,4 Mio
1.2	Zementierung	10,4 Mio
1.3	Einlaufbauwerk	1,5 Mio

Index	Bezeichnung	Variable	Mittlere Kosten
K.1.3.1	Kosten Armierung Zylinderschütz	k_{Ar}	71.301 €
K.1.3.2	Kosten Zylinderschütz	k_{ZS}	102.709 €
K.1.3.3	Kosten Korrosionsschutz Zylinderschütz	$k_{KS,E}$	36.246 €
K.1.3.4	Kosten Einlaufrechen	K_{ER}	236.339 €
K.1.3.5	Kosten Dammtafeln	K_{DT}	318.346 €
K.1.3.6	Kosten des hydraulischen Antriebs	K_{Hy}	466.902 €
K.1.3.7	Kosten der Füllereinrichtung und Sickerpumpen	K_{F-S}	100.000 €
K.1.3.8	Kosten der Befahranlage	K_{Bef}	110.000 €
K.1.3.9	Kosten des Brückendrehlaufkran	K_{BK}	95.000 €



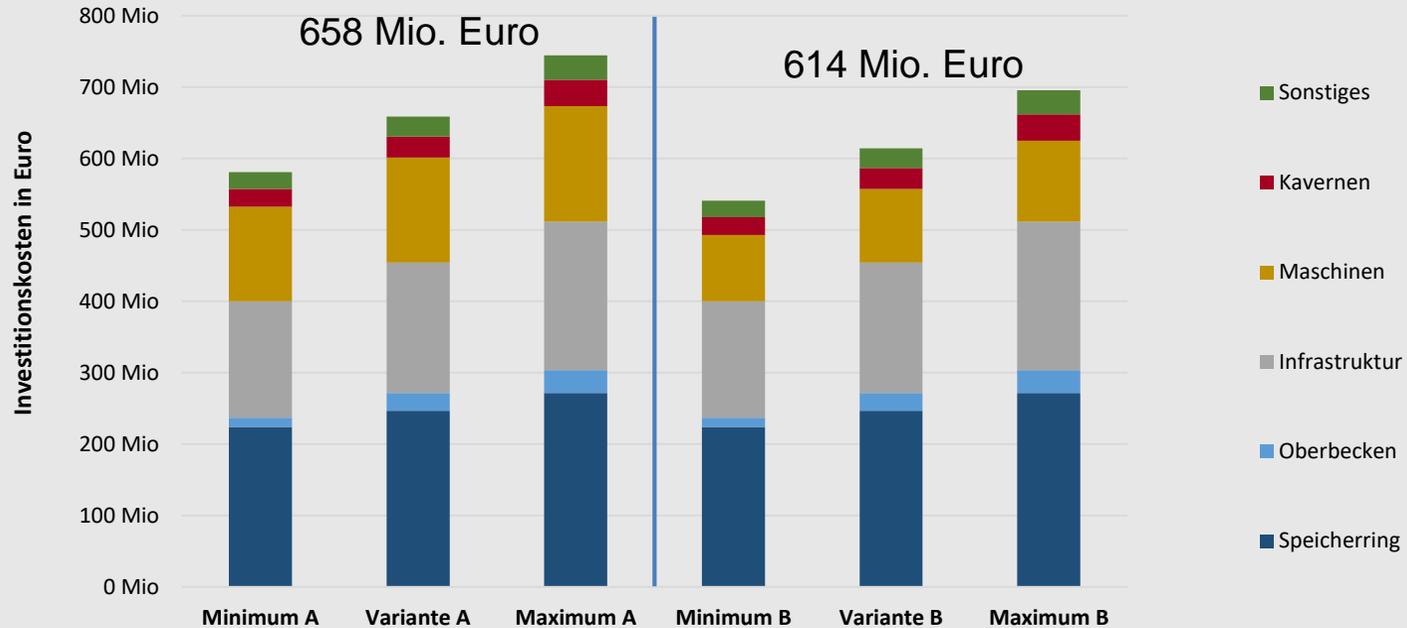
Quellen: DSD Noell GmbH

Komponenten des UPSW

- Ein Großteil der Kosten (2/3) sind Tunnelbaukosten, weswegen eine genauere Abschätzung dieser Position nötig wurde
- Mit der Bauunternehmung Baresel wurde eine Grobkostenschätzung für die Tunnelbaukosten vorgenommen.
- Kosten je Meter Tunnelbohrmaschine 13-15 Tausend Euro !
- Kosten wurden vorsichtig angesetzt, da unerwartete Verzögerungen während der Arbeiten auftreten können

Problematik Tunnelbaukosten

Investitionskosten zweier ausgesuchter UPSW-Varianten



3.290 Euro/kW

3.070 Euro/kW

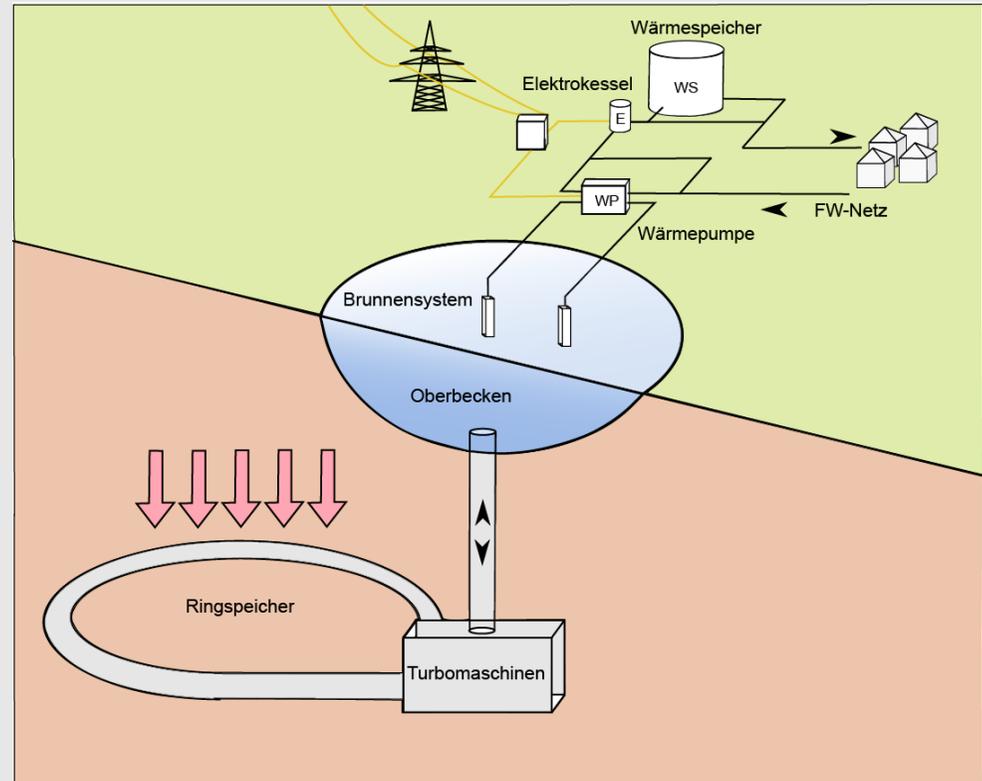
zum Vergleich PSW Atorf: 1.070 Euro/kW

Investitionskosten der betrachteten Varianten

- Notwendigkeit der Stromspeicherung – Pumpspeicher-Kraftwerke
- Ende der Steinkohleförderung – Folgeaktivitäten
- Unterflurpumpspeicherkraftwerk (UPSW) – Prosper-Haniel
- **Weitere Nutzung der Wärme des Oberflächenspeicherbeckens**
- Schlussfolgerung

Worüber ich sprechen möchte

- Durch Gesteinswärme bewegt sich Temperatur des Triebwassers zwischen 18 °C und 29 °C
- Temperaturband ausreichend hoch für Einsatz einer Wärmepumpe
- Große Wassermassen und große Kontaktfläche führen zu hohem technisches Potential
- Durch Nacherhitzung ist Einspeisung in vorhandenes Fernwärmenetz möglich



Nutzung des Wärmepotenzials mit Power to Heat

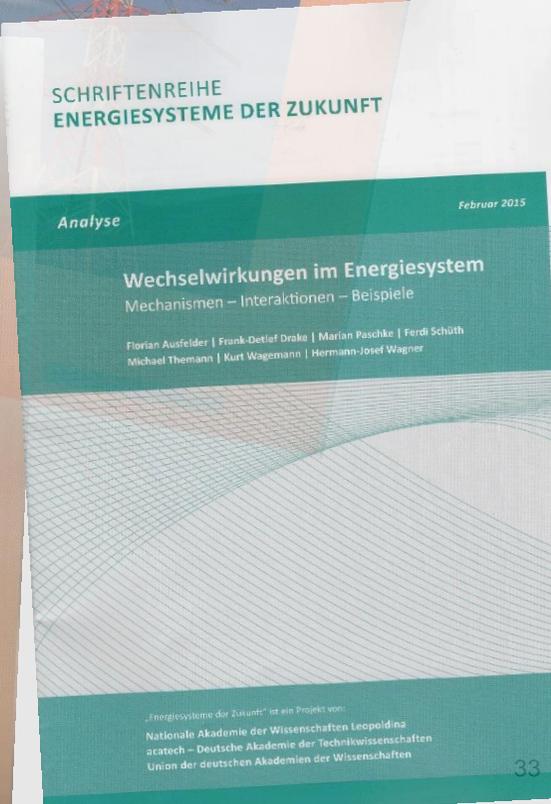
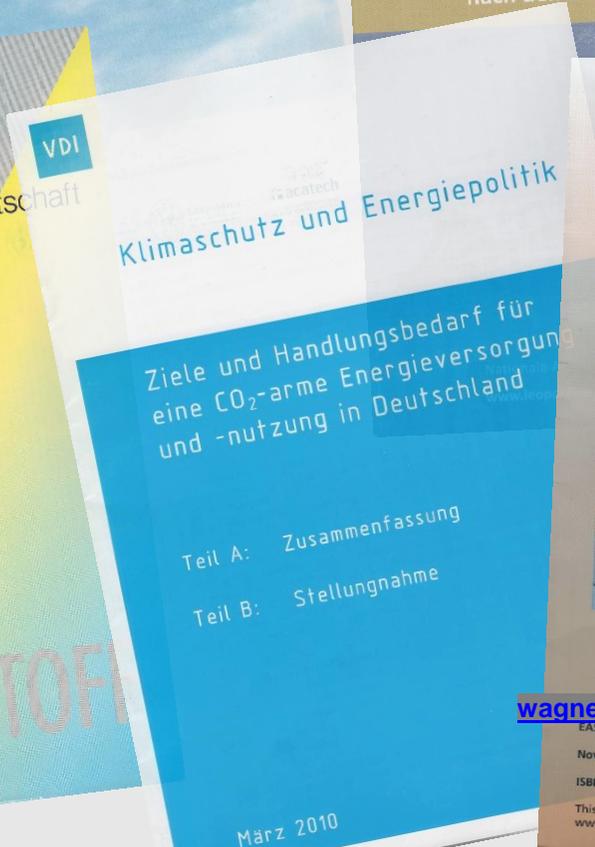
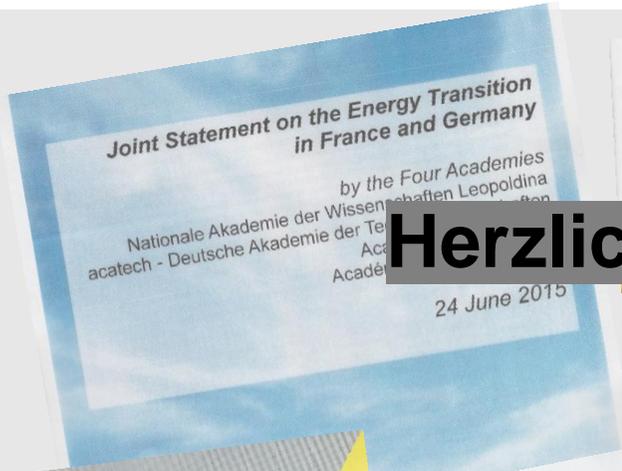
- Notwendigkeit der Stromspeicherung – Pumpspeicher-Kraftwerke
- Ende der Steinkohleförderung – Folgeaktivitäten
- Unterflurpumpspeicherkraftwerk (UPSW) – Prosper-Haniel
- Weitere Nutzung der Wärme des Oberflächenspeicherbeckens
- Nutzung der Wärme des Grubenwassers
- **Schlussfolgerung**

Worüber ich sprechen möchte

- Sonnen- und Windstromerzeugung benötigt erhebliche Speicherkapazitäten
- Pumpspeicherkraftwerke haben sich in der Vergangenheit bewährt
- Neue Anlagen haben Akzeptanzprobleme
- Der Bau eines Unterflurpumpspeicher-Kraftwerkes ist technisch möglich – Es wurde interdisziplinär umfangreich untersucht
- Es wäre weltweit das erste Projekt dieser Art und vor Ort akzeptiert
- Derzeit erfolgen aber keine nennenswerten Investitionen in Energiespeicher
- Es ist offen was Elektrizitätsspeicherung zukünftig kostet und welche Technik

Schlussfolgerung

Herzlichen Dank fürs Zuhören



wagner@lee.rub.de

EASAC policy report 16

November 2011

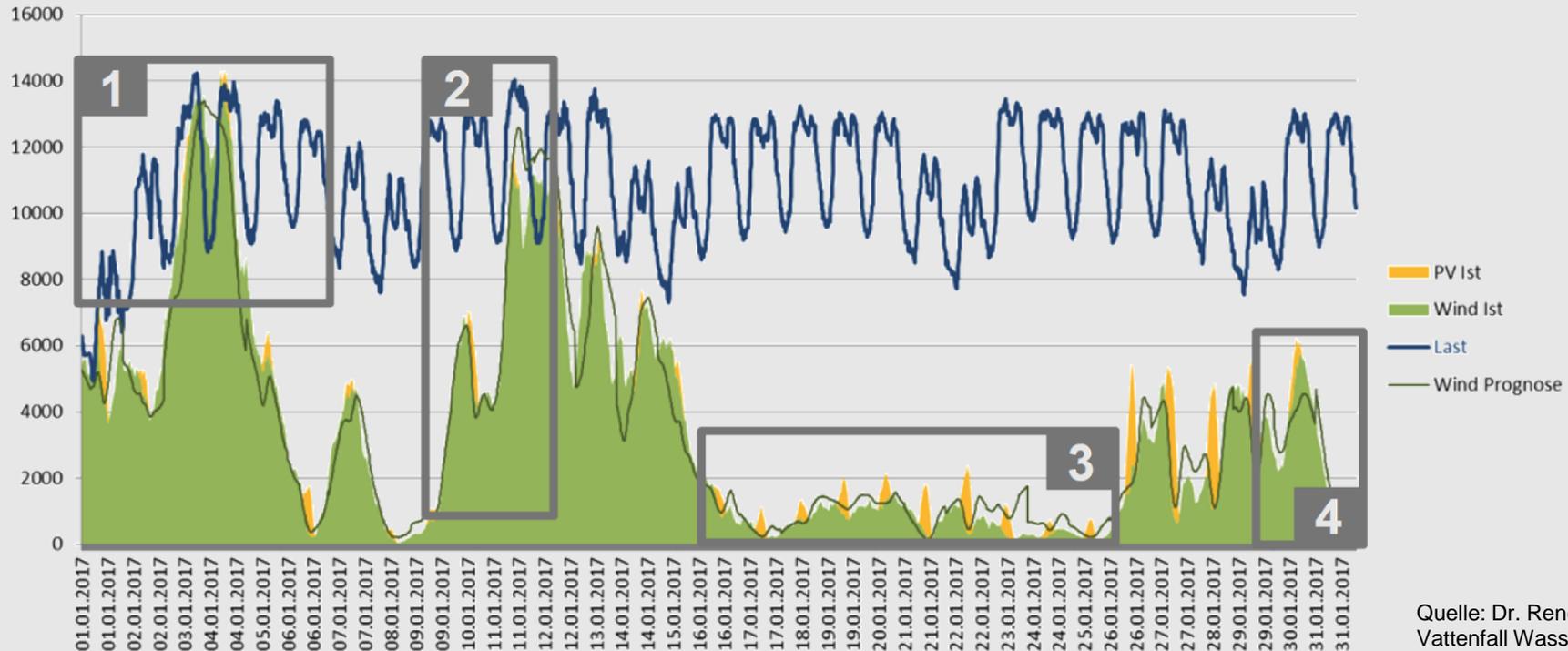
ISBN: 978-3-8047-2944-5

This report can be found at www.easac.eu

Building science into EU policy

„Energiesysteme der Zukunft“ ist ein Projekt von:
Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina
Acadétech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften
Union der deutschen Akademien der Wissenschaften

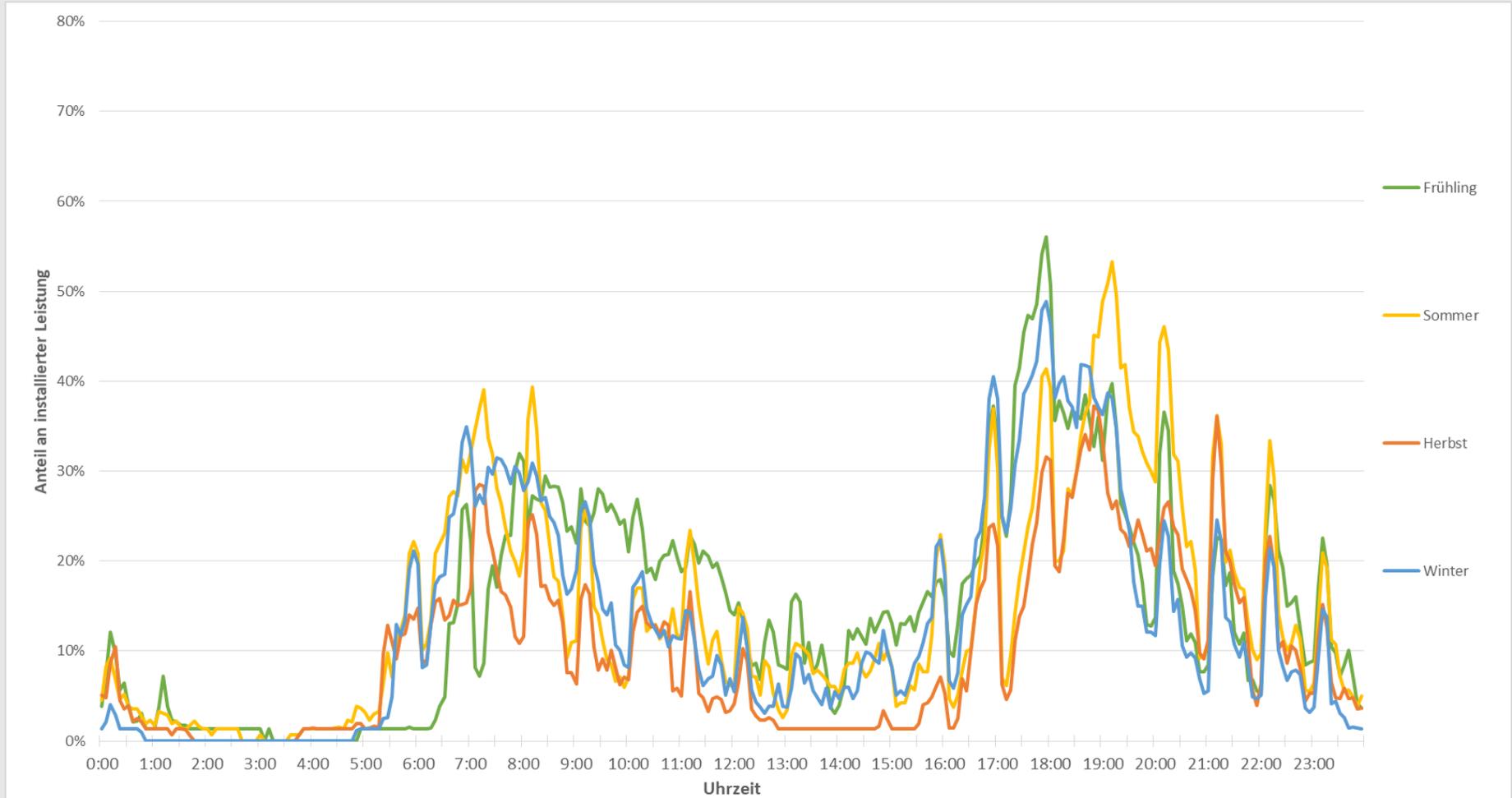
Für die Diskussion



Last, Windeinspeisung und Forecast in der 50Hertz-Regelzone zwischen dem 01.-31.01.2017 in MW

- 1) Einspeisung übersteigt Last
- 2) Hoher Gradient erfordert Flexibilität
- 3) Nahezu kein Wind und kein PV
- 4) Vorhersage Wind \neq Einspeisung Wind

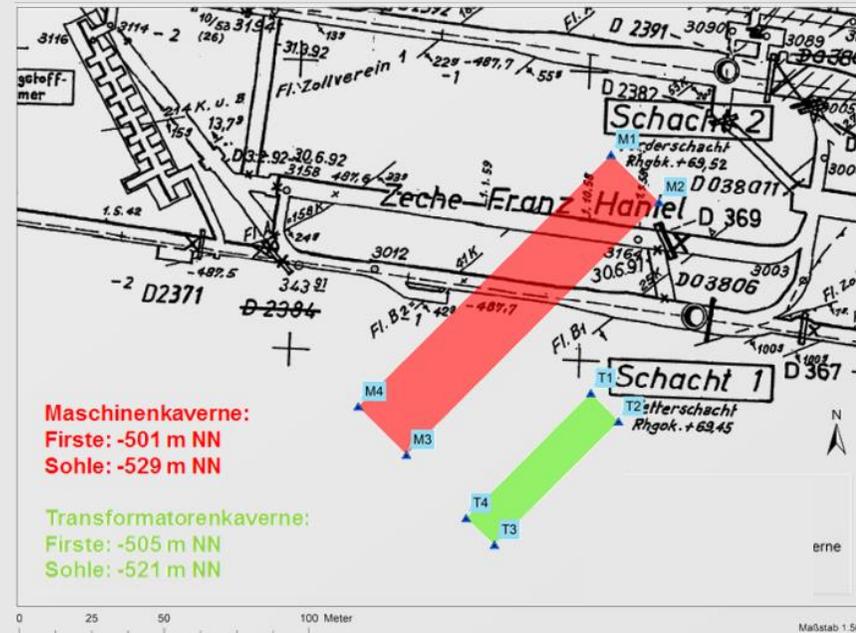
Flexibilitätsnotwendigkeit aufgrund der Volatilität der erneuerbaren Energien



Median-Ganglinie eines ausgewählten Pumpspeicherwerks im Jahr 2017

Beanspruchung eines PSW am heutigen Energiemarkt

- Aufspaltung in Maschinenkaverne und Transformatorenkaverne
- Größe, Lage und Orientierung der Kavernen basieren auf geologischen Restriktionen
- First der Kaverne liegt in einer stabilen Sandstein-Schicht



Geologische Herausforderung: Verortung der Kavernen