

# Einlagerung von regenerativ erzeugter elektrischer Energie in Form von Druckluft in still- gelegten Salzbergwerken – Symbiose von Energiespeicherung und Langzeitsicherung

11. Symposium Energieinnovation vom 10. bis 12. Februar 2010 in Graz

**Dr. Andreas Dengel**

11.2.2010



**EVONIK**  
INDUSTRIES

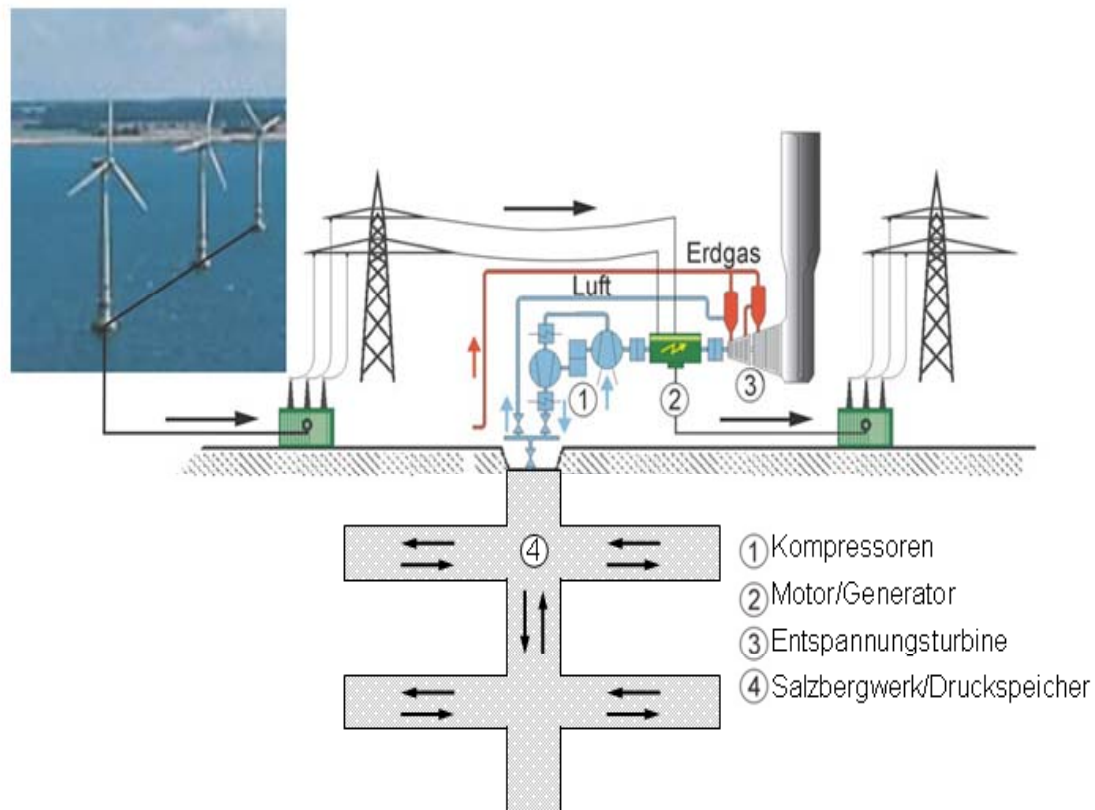
- 1. Stillgelegtes Salzbergwerk als Speicher**
- 2. Wirtschaftliche Optimierung der Entspannungstechnologie**
- 3. Preisermittlung**
- 4. Standortbezogene Wirtschaftlichkeitsrechnung**
- 5. Exkurs: Pilotanlage**

Die Ergebnisse stammen aus dem vom BMU geförderten Vorhaben mit dem Förderkennzeichen: 0327637A

Verbundpartner:

K-UTEC AG Salt Technologies und im Unterauftrag TU BA Freiberg

# 1. Stillgelegtes Salzbergwerk als Speicher – die Vision

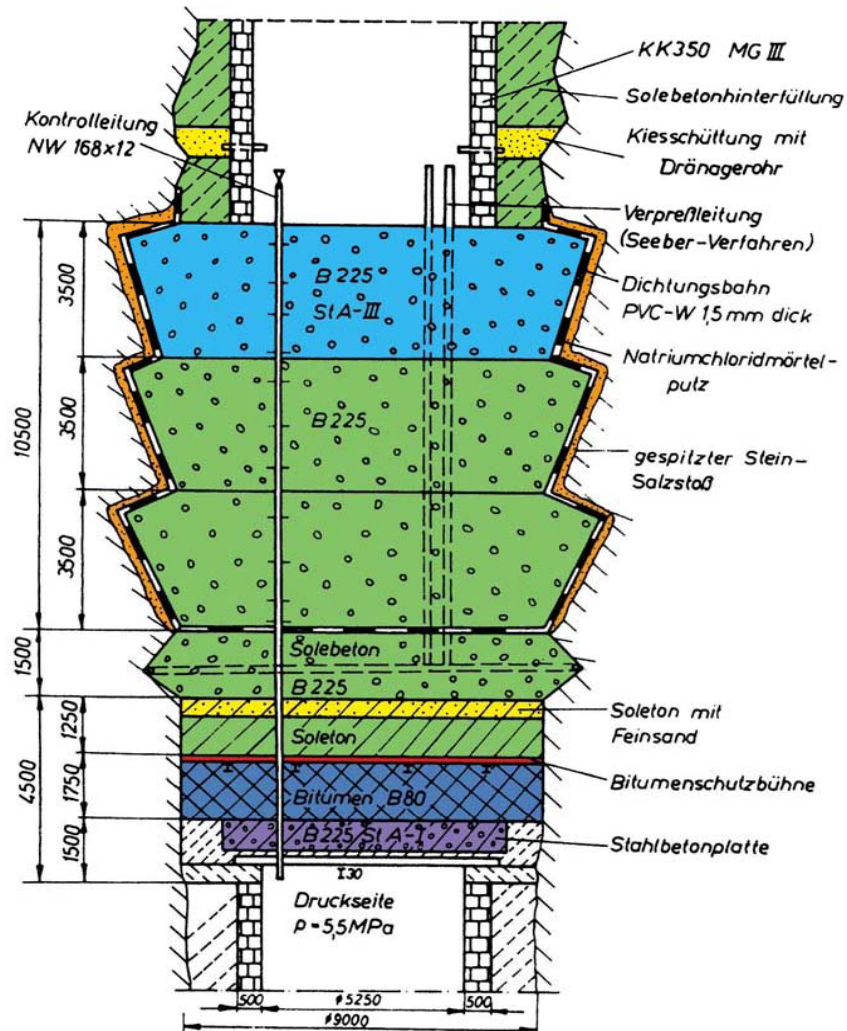


Nach Crotogino

# Einbau von Trockenversatz mittels Fahrerlader in einer abgeworfenen Kaligrube



# Schachtverschlusskonzept für den Schacht Bernterode I



Quelle: T. Oellers und P. Sitz 1985

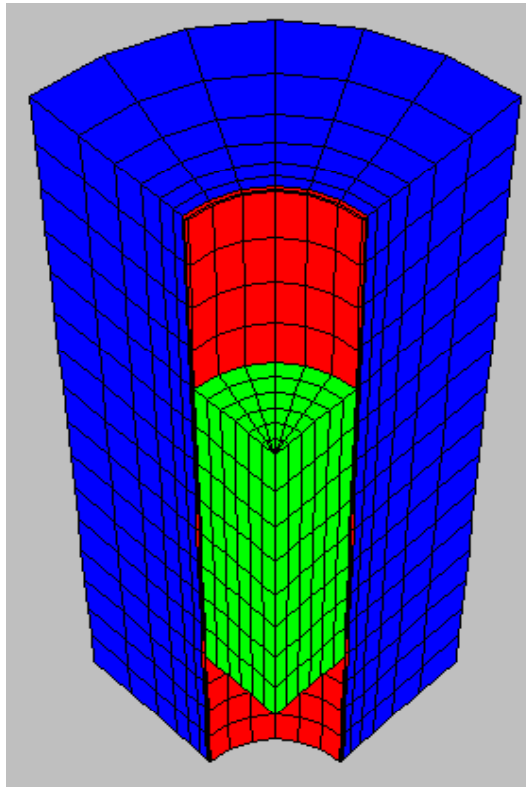


# Einbau einer Dichtungskonstruktion in den Schacht Bernterode



Anwendung einer speziellen Widerlagergeometrie sowie einer PVC-Folie zur Schonung der Gebirgskonturen

# Modell vertikale Schachtabdichtung



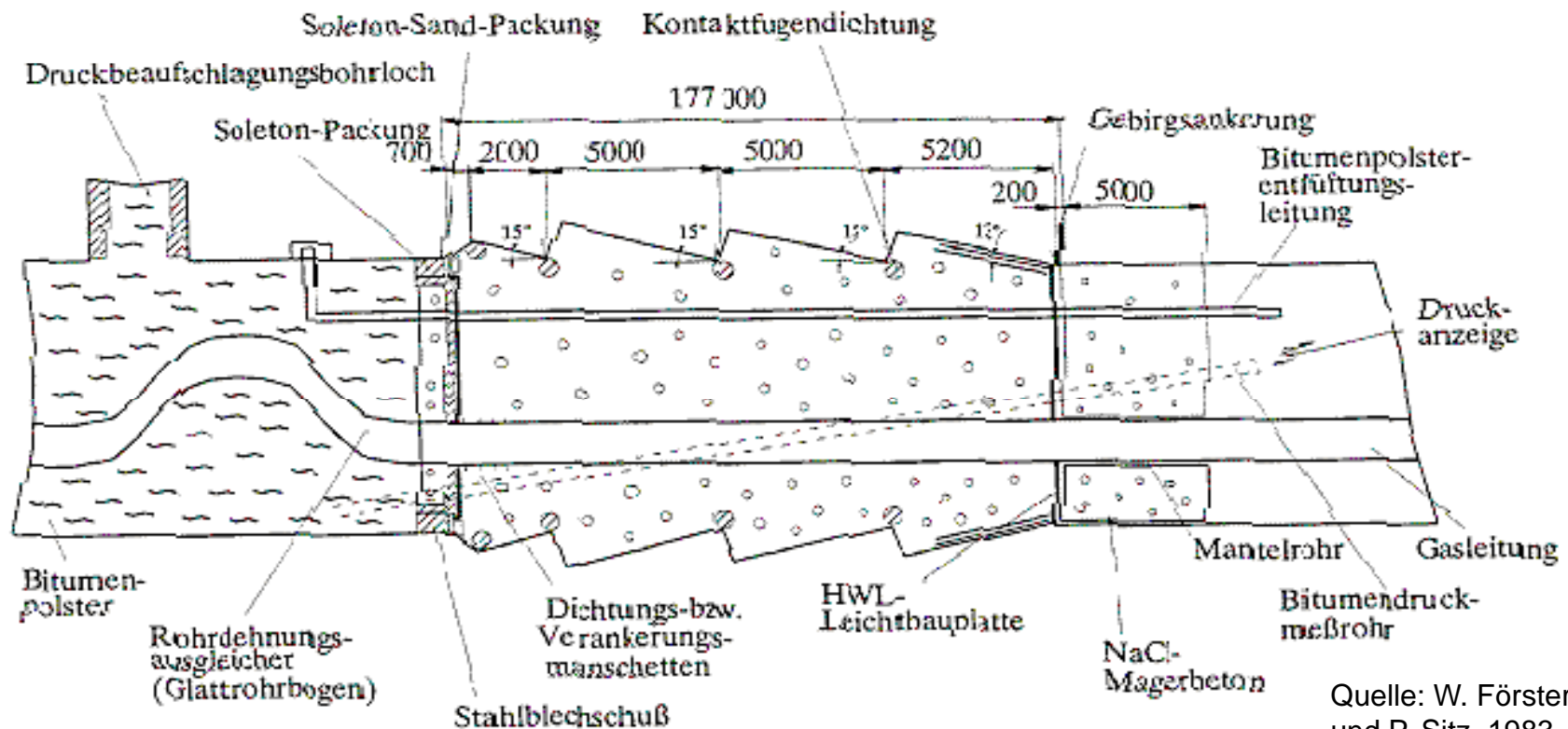
*Modellabmessungen:  
Modellhöhe: 40,0 m  
Länge Dichtelement (Pfropfen): 21,0 m  
Horizontale (radiale) Modellerstreckung:  
10,0 m  
Pfropfenradius: 3,5 m*



Berechnungen der  
TU BA Freiberg

3D – Berechnungsmodell einer vertikalen Schachtabdichtung mit den Bereichen Gebirge, Auflockerungszone (EDZ) und Schachtpfropfen (idealisiert als Zylinder)

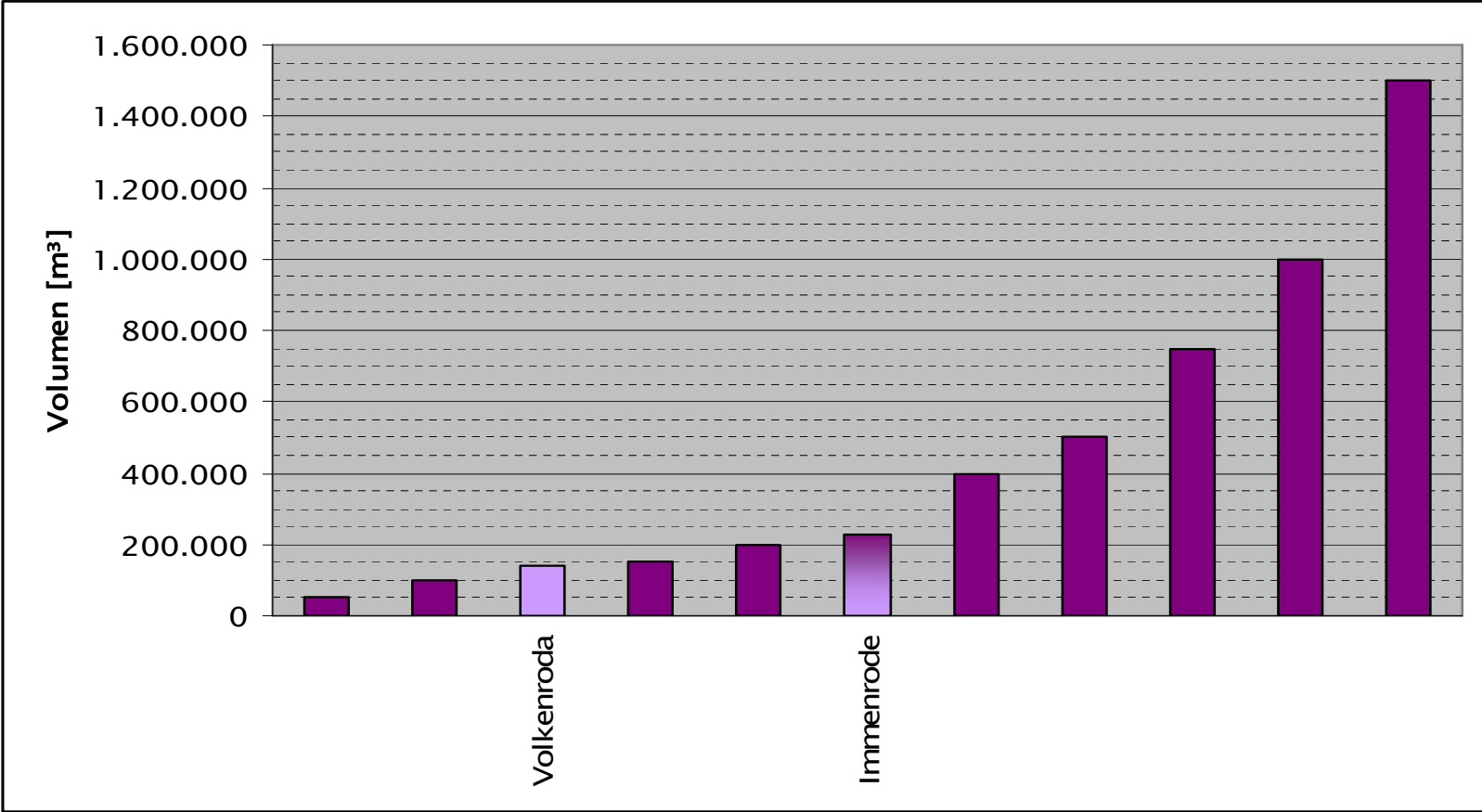
# Gasdichter Streckenverschluss



Gasdichter Streckenverschluss mit druckseitiger Bitumenkammer und mehrfach gleitfähig verzahntem Widerlager (das Druckbeaufschlagungsbohrloch dient zur Generierung eines Überdruckes im Dichtelement)



# Definition unterschiedlicher Hohlräume

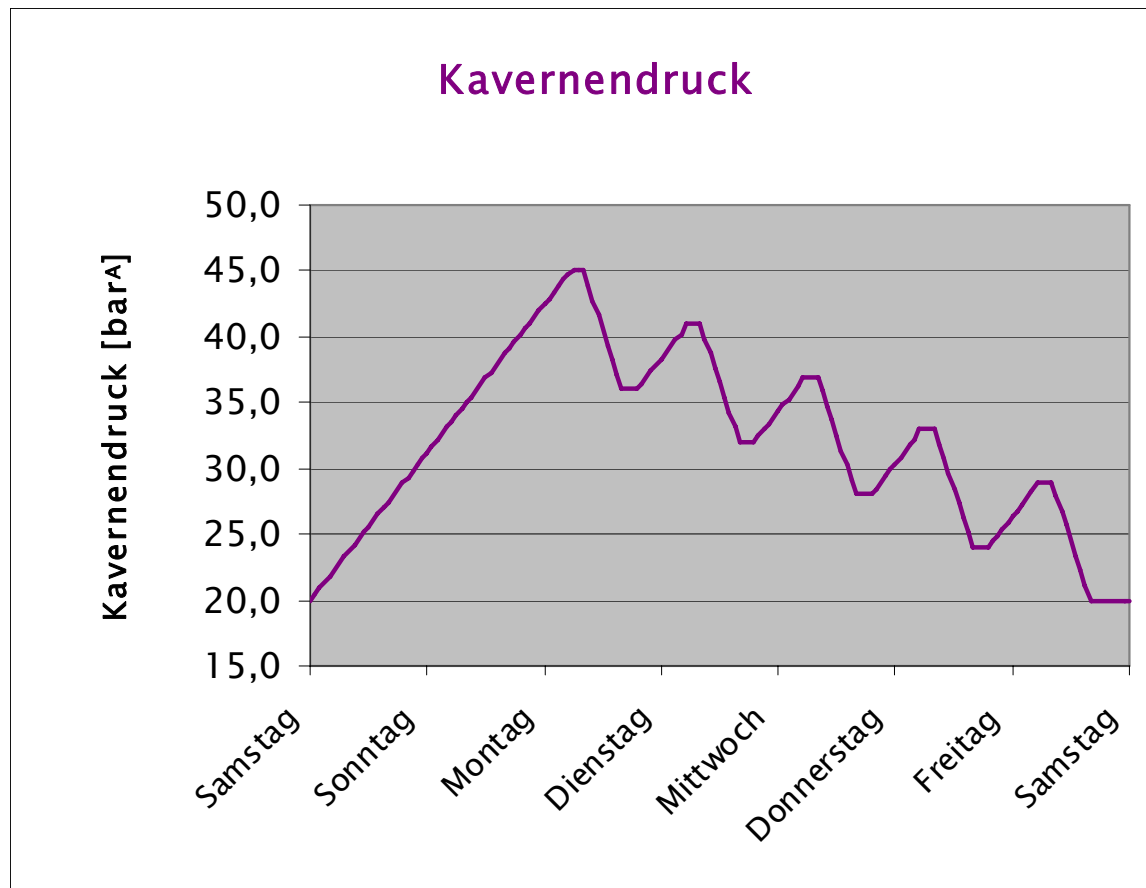


- untersuchte Volumina
- standortbezogene Volumina

# Betriebsweise – Kavernendruck



## Be- und Entladezyklen über eine Betriebswoche



- Beladen übers Wochenende mit einem Verdichter, ca. 54 Stunden (Leistung: 35 kg/s)
- Entladen während der Woche von 08:00-16:00 Uhr (Leistung: ~ 69 MW)
- Zwischenbeladung von Montag bis Donnerstag, ca. 10 Stunden/Tag (Leistung: 35 kg/s)

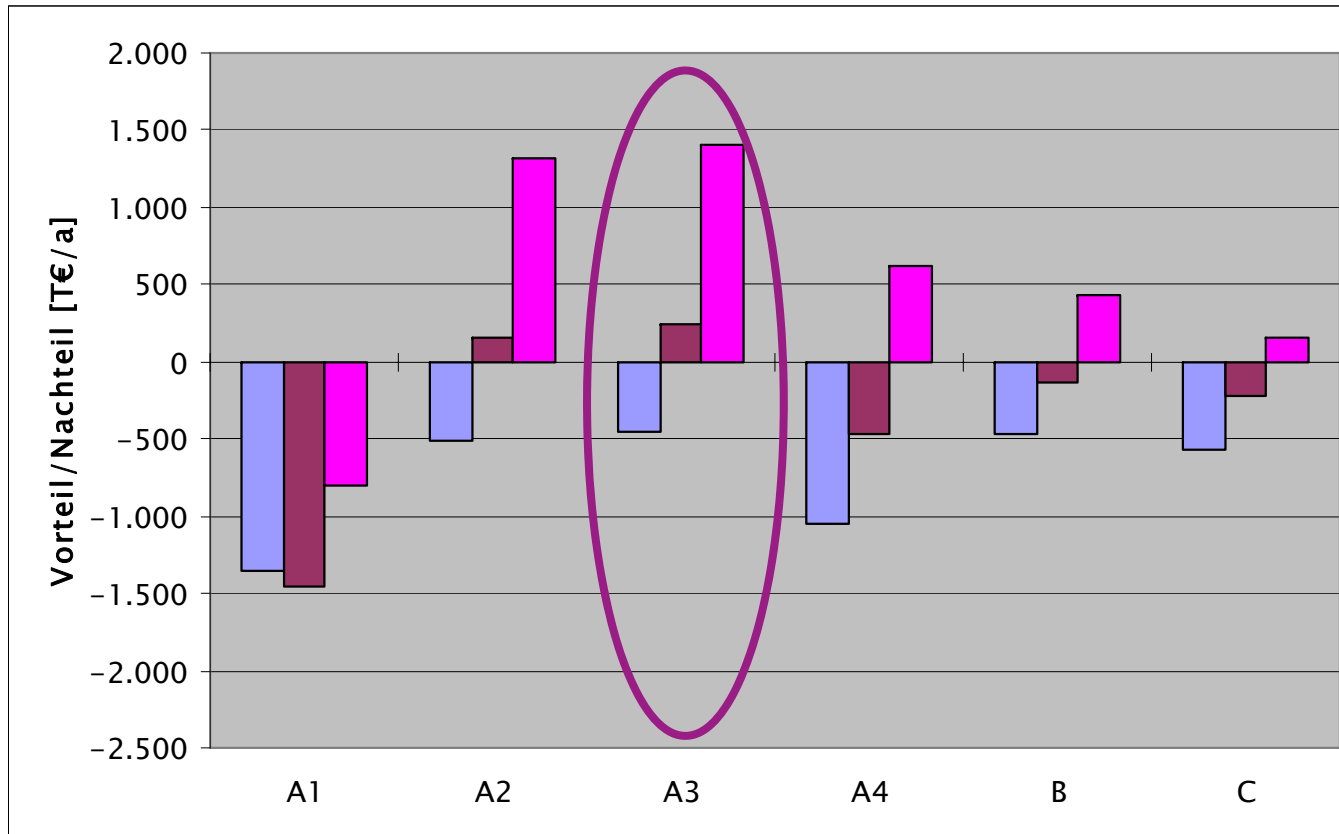
## 2. Wirtschaftliche Optimierung der Entspannungstechnologie



- Entspannungstechnologien
- technische Konzeption der einzelnen Varianten
- Leistungskennzahlen der einzelnen Varianten
- Investitionen für die Entspannungstechnologien
- Entspannung - Energiebilanz
- Variantenentscheidung

- A) Gasturbine
  - A.1) modifizierte Gasturbine
  - A.2) modifizierte Gasturbine mit Rekuperator
  - A.3) modifizierte Gasturbine mit Rekuperator und Wärmespeicher
  - A.4) modifizierte Gasturbine mit ORC-Prozess
  
- B) Expansionsturbine
  
- C) Druckluftmotor

# Variantenentscheidung



Strompreis- (Verkauf) / Gaspreis inkl. NNE, Steuern und Abgaben:

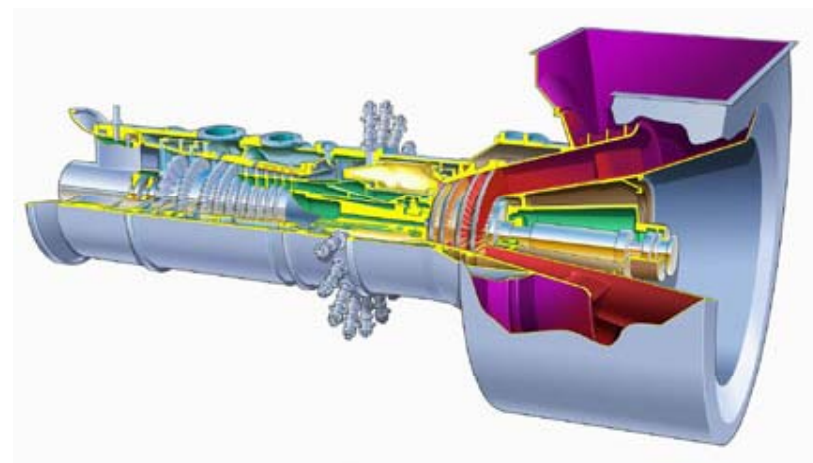
Strom:      ■ 66 €/MWh      ■ 82 €/MWh      ■ 96 €/MWh  
 Gas:        ■ 27 €/MWh<sub>HS</sub>      ■ 35 €/MWh<sub>HS</sub>      ■ 40 €/MWh<sub>HS</sub>



# Eingesetzte Arbeitsmaschine - Gasturbine



- Siemens-Gasturbine (SGT600)
- zweiwellige Ausführung von Verdichter und Gasturbine (über eine Kupplung verbunden → Grundvoraussetzung für Aufteilung der Gasturbine)
- elektrische Leistung im Verbund Verdichter/Turbine: ~ 24 MW
- berechnete elektrische Leistung der Turbine: ~ 69 MW
- Investitionen für komplette Gasturbine: ~ 9 Mio. €
- Investitionen für Turbine ohne Verdichter sind vergleichbar mit den Kosten für komplette Gasturbine, da die Umbaumaßnahmen zusätzliche Kosten verursachen



# Abwärmekonzept



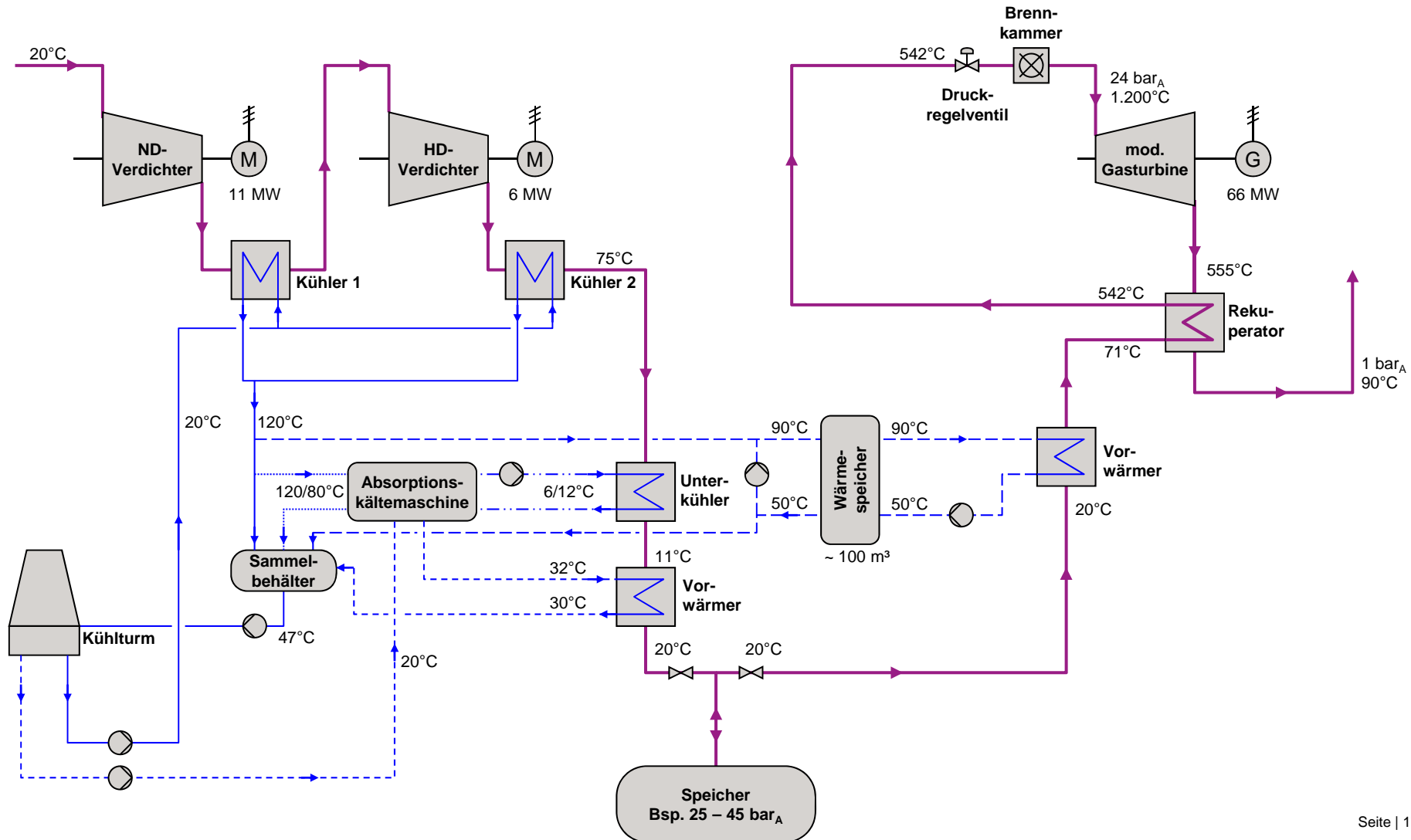
- Abwärme Turbine: ~ 50 MW
  - Abwärme wird im jetzigen Konzept vollständig für die Vorwärmung der Luft für den Gasturbinenprozess eingesetzt (20 → 540 °C)
    - Einsatz eines Rekuperators bewirkt eine Minderung des Erdgasbedarfs um ca. 70 %
  - Rauchgastemperatur von 90 °C sollte nicht unterschritten werden
    - Taupunktunterschreitung → Kondensation von Wasser im Rauchgasweg
- Abwärme Verdichter: ~ 15 MW
- Abwärme kann nicht vollständig für Heizzwecke eingesetzt werden (Temperaturspanne zu groß) → Apparate zur Kühlung auf 20 °C werden benötigt

# Abwärmennutzung - Wärmespeicher



- **Idee:**  
Speichern der Abwärme aus Verdichtungsprozess in einem Wärmespeicher. Die gespeicherte Wärme kann zur Luftvorwärmung für den Entspannungsprozess genutzt werden.
- Wärmespeicher muss sich gegen vermiedenen Brennstoffkosten rechnen!!!
- **Problem:**  
Luft wird durch Rekuperator auf höchst mögliche Temperatur vorgewärmt.  
→ es kann nicht mehr Brennstoff eingespart werden  
→ separate Wirtschaftlichkeit des Speichers ist nicht darstellbar!!!!

# A.3) modifizierte Gasturbine mit Rekuperator u. Wärmespeicher



# 3. Preisermittlung



- Basis standortbezogene Wirtschaftlichkeitsrechnung
- Strompreishistorie EEX-Spot
- EEX - Terminmarkt Strom
- Strompreisprognose
- EEX – Terminmarkt Gas
- Gaspreisentwicklung
- Ölpreisentwicklung
- Standorte von Salzbergwerken
- Netzentgelte der einzelnen Standorte



## 4. Standortbezogene Wirtschaftlichkeitsrechnung



Annahmen:

- Strompreis EEX Entladung: 50 [€/MWh] (Verkaufspreis)
- Strompreis EEX Beladung: 28 [€/MWh] (Einkaufspreis)
- Netznutzung: 9 [€/MWh] (Einkaufspreis)
- Verm. Netznutzung: 16 [€/MWh] (Verkaufspreis)
- Steuern und Abgaben: 11 [€/MWh] (Einkaufspreis)
- Gaspreis: 27 [€/MWh] (Einkaufspreis)
- Minutenreserve: 700 [T€/a] (Verkaufspreis)

*(Datenbasis: 2007)*

# Gesamtinvestitionen für einen Standort mit 230.000 m<sup>3</sup>



		A1	A2	A3	A4	B	C
Verdichter	T€	9.200	9.200	9.200	9.200	9.200	9.200
Turbine	T€	10.000	10.000	10.000	10.000	7.000	-
Druckluftmotor	T€	-	-	-	-	-	6.000
ORC-Prozess	T€	-	-	-	1.000	-	-
Rekuperator	T€	-	10.000	10.000	10.000	1.200	-
Wärmespeicher	T€	-	-	200	-	-	-
sonst. M-Teil	T€	1.600	1.600	1.600	1.600	1.600	1.600
<b>E-Teil</b>	<b>T€</b>	<b>2.900</b>	<b>2.900</b>	<b>2.900</b>	<b>2.900</b>	<b>2.200</b>	<b>1.900</b>
<b>B-Teil</b>	<b>T€</b>	<b>2.000</b>	<b>2.500</b>	<b>2.500</b>	<b>2.800</b>	<b>2.000</b>	<b>2.200</b>
sonst. Kosten <sup>1)</sup>	T€	3.400	4.900	4.900	5.000	3.000	2.800
<b>Investitionen</b>	<b>T€</b>	<b>29.100</b>	<b>41.100</b>	<b>41.300</b>	<b>42.500</b>	<b>26.200</b>	<b>23.700</b>

1) Genehmigungen, Ingenieurhonorar, Unvorhergesehenes,...

# Wirtschaftlichkeitsrechnung



Erlöse			Kosten		
<b>Stromverkauf</b>	130.540 MWh/a x 66,0 €/MWh	8.620 T€/a	<b>Kapitaldienst &amp; Gewinn</b>		5.600 T€/a
<b>Minutenreserve</b>		700 T€/a	<b>Betriebskosten</b>		
			Personal		540 T€/a
			R&W		1.350 T€/a
			Sonstiges <sup>1)</sup>		300 T€/a
			<b>var. Kosten</b>		
			Brennstoff	161.010 MWh/a x 27,0 €/MWh	4.260 T€/a
			Strombezug	78.280 MWh/a x 48,0 €/MWh	3.760 T€/a
			sonst. var. Kosten		50 T€/a
<b>Summe:</b>		<b>9.320 T€/a</b>	<b>Summe:</b>		<b>15.860 T€/a</b>

1) Versicherung, Verwaltung, ....

→ Unterdeckung in Höhe von: 6.540 T€/a für diesen Standort!

# 5. Exkurs: Pilotanlage



## Aufgaben der EVONIK:

- Anschaffung eines Verdichters angepasst auf den Hohlraum
- Anschaffung einer Absorptionskältemaschine zur Druckluftunterkühlung
- Betrieb der oberirdischen Aggregate

## Ziele der Pilotanlage für die EVONIK:

- Überprüfung der Dichtigkeit des Druckluftspeichers
- Überprüfung der Technologie „Druckluftunterkühlung“ zur Realisierung der maximalen relativen Luftfeuchtigkeit
- Stoffanalyse der entnommenen Druckluft

# Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit



**EVONIK**  
INDUSTRIES

**Dr. Ing. Andreas J. Dengel**  
Leiter Technische Innovation  
Telefon +49 681 9494-1600  
Telefax +49 681 9494-064 1600  
[andreas.dengel@evonik.com](mailto:andreas.dengel@evonik.com)

**Evonik New Energies GmbH**  
St. Johanner Straße 101-105  
66115 Saarbrücken  
<http://www.evonik.de/new-energies>

**Dr.-Ing Thomas Fliß**  
Abteilung Geomechanik und Bergbau  
Telefon: +49 3632 610-186  
Telefax: +49 3632 610-105  
[thomas.fliss@kutec.de](mailto:thomas.fliss@kutec.de)

**K-UTEC AG Salt Technologies**  
Am Petersenschacht 7  
99706 Sondershausen  
<http://www.kutec.de>