

Druckluftspeicherkraftwerk mit Dampfkreislauf

**Stephan Herrmann, Steffen Kahlert, Manuel Würth
und Hartmut Spliethoff**

14. Symposium Energieinnovation, Graz, 12.02.2016

Agenda




- Motivation



- Druckluftspeicherung



- Systemkonzept

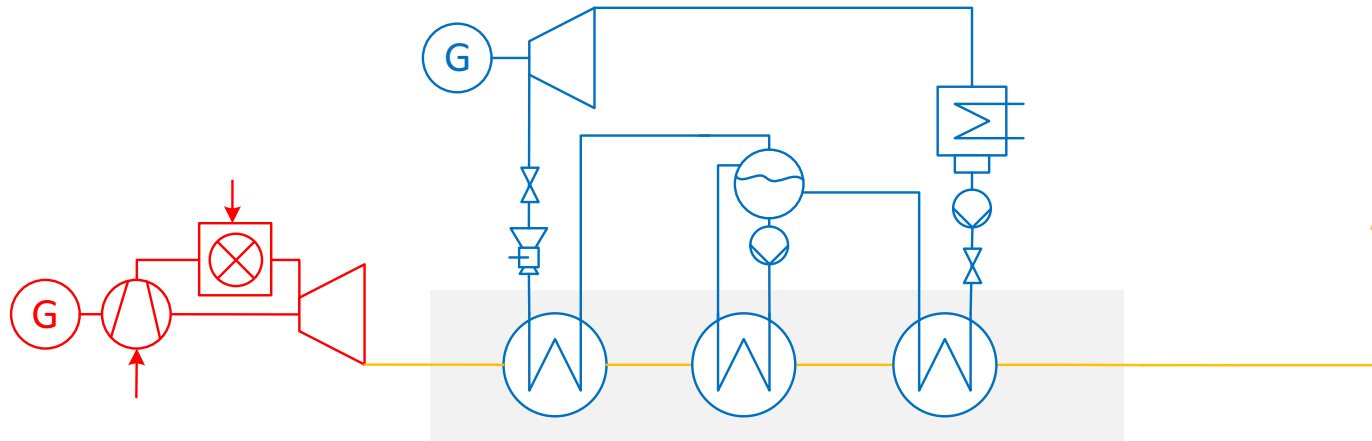


- Modellbeschreibung
- Simulationsergebnisse



- Zusammenfassung
- Ausblick

Aktuelles Energiesystem Deutschland

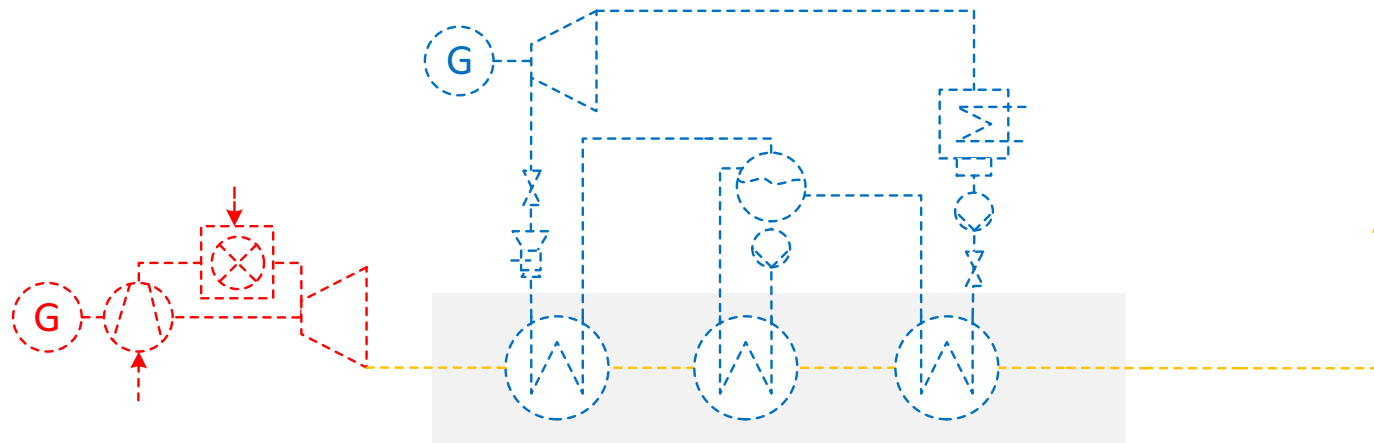


- Mäßiger Anteil EE <30%
- Therm. Kraftwerke >80GW
- Mittlere Lastgradienten
- Lastausgleich möglich
- ABER: Überkapazitäten
- GuD unwirtschaftlich!

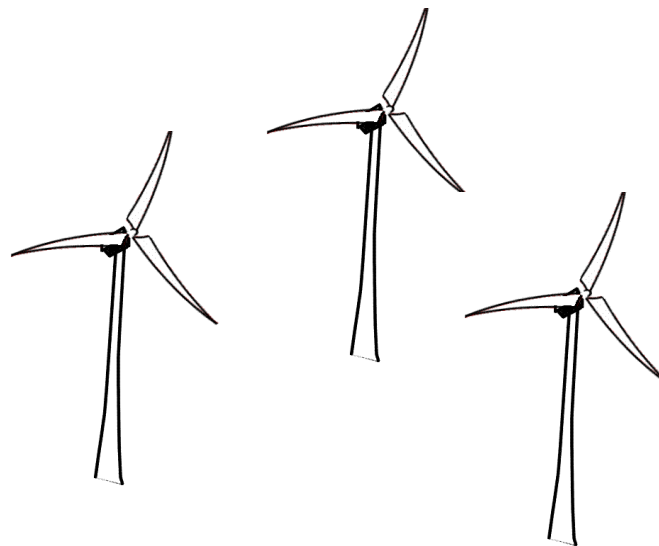


Motivation

Energiesystem 2030+



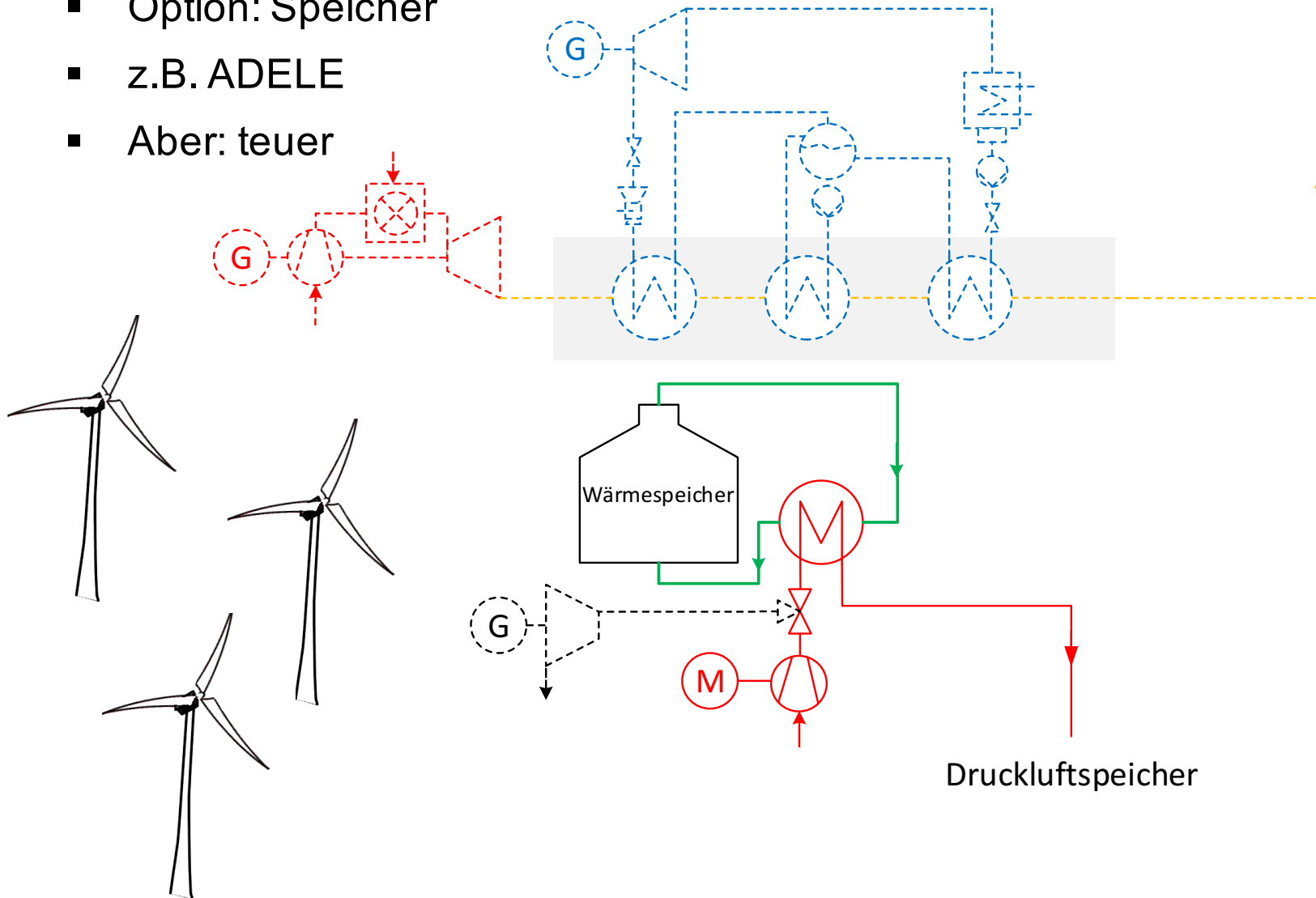
- Hoher Anteil EE >50%
- Therm. Kraftwerke <60GW
- Extreme Lastgradienten
- Wenig Betriebsstunden!
- Reservekapazität/Neubauten?
- Regelbarkeit KWK begrenzt
- Lastausgleich nicht möglich!



Druckluftspeicherung

Einspeicherung von Stromüberschüssen

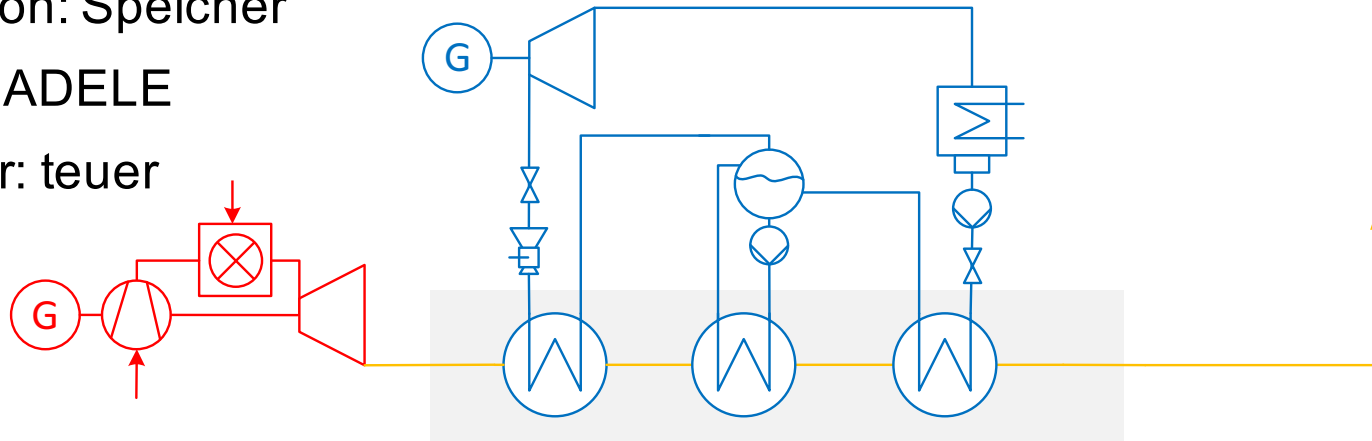
- Option: Speicher
- z.B. ADELE
- Aber: teuer



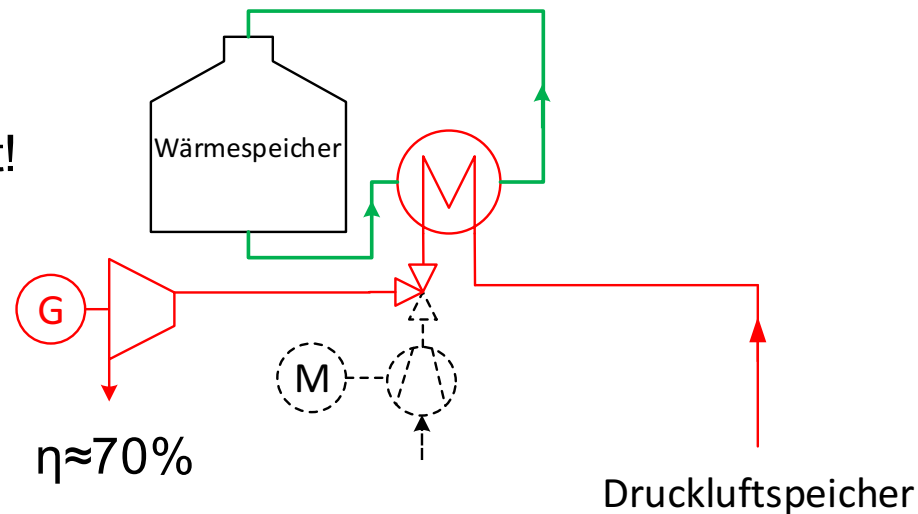
Druckluftspeicherung

Ausspeichern bei Strommangel

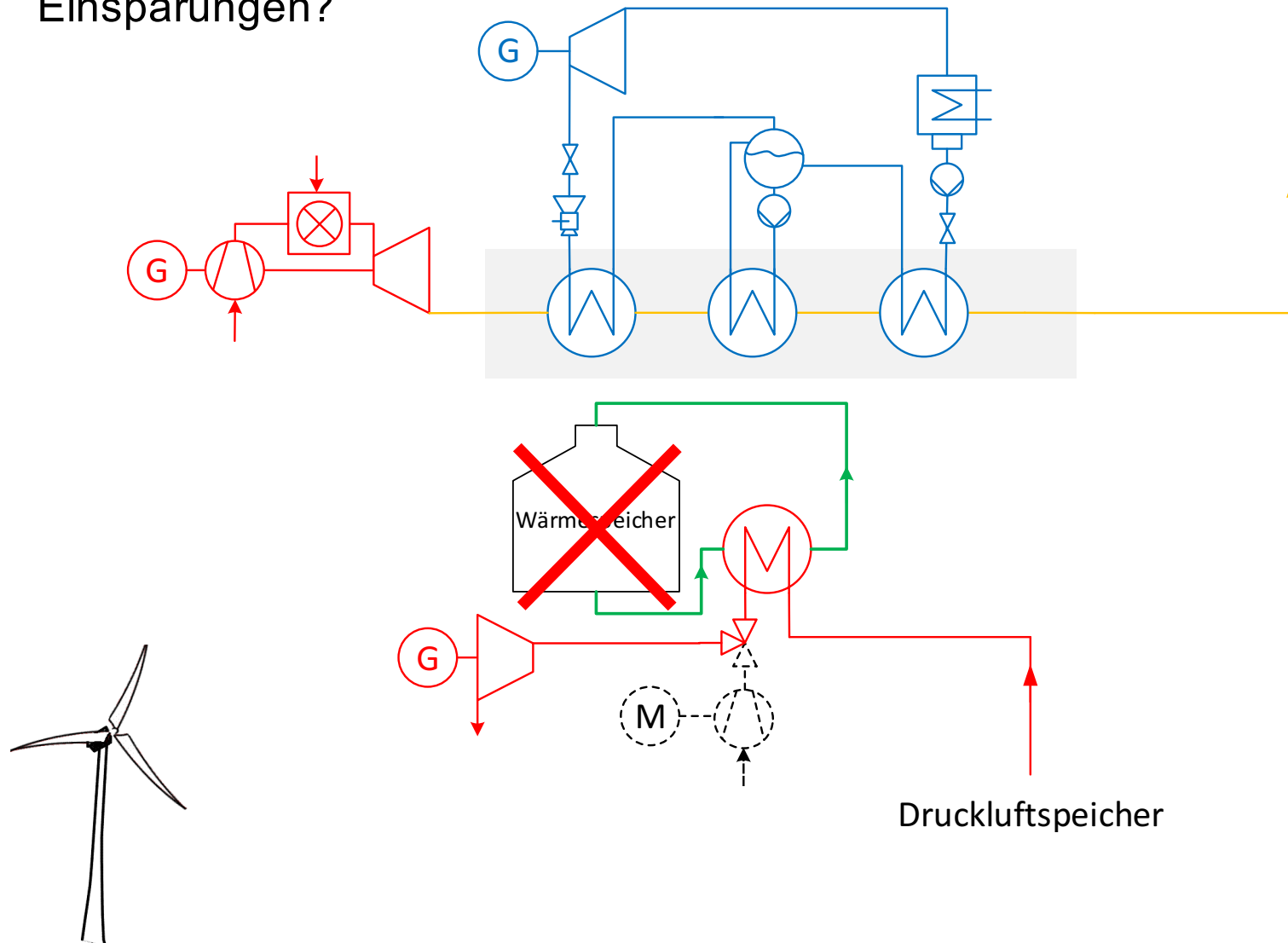
- Option: Speicher
- z.B. ADELE
- Aber: teuer



- Wärmespeicher skaliert mit Speicherkapazität!

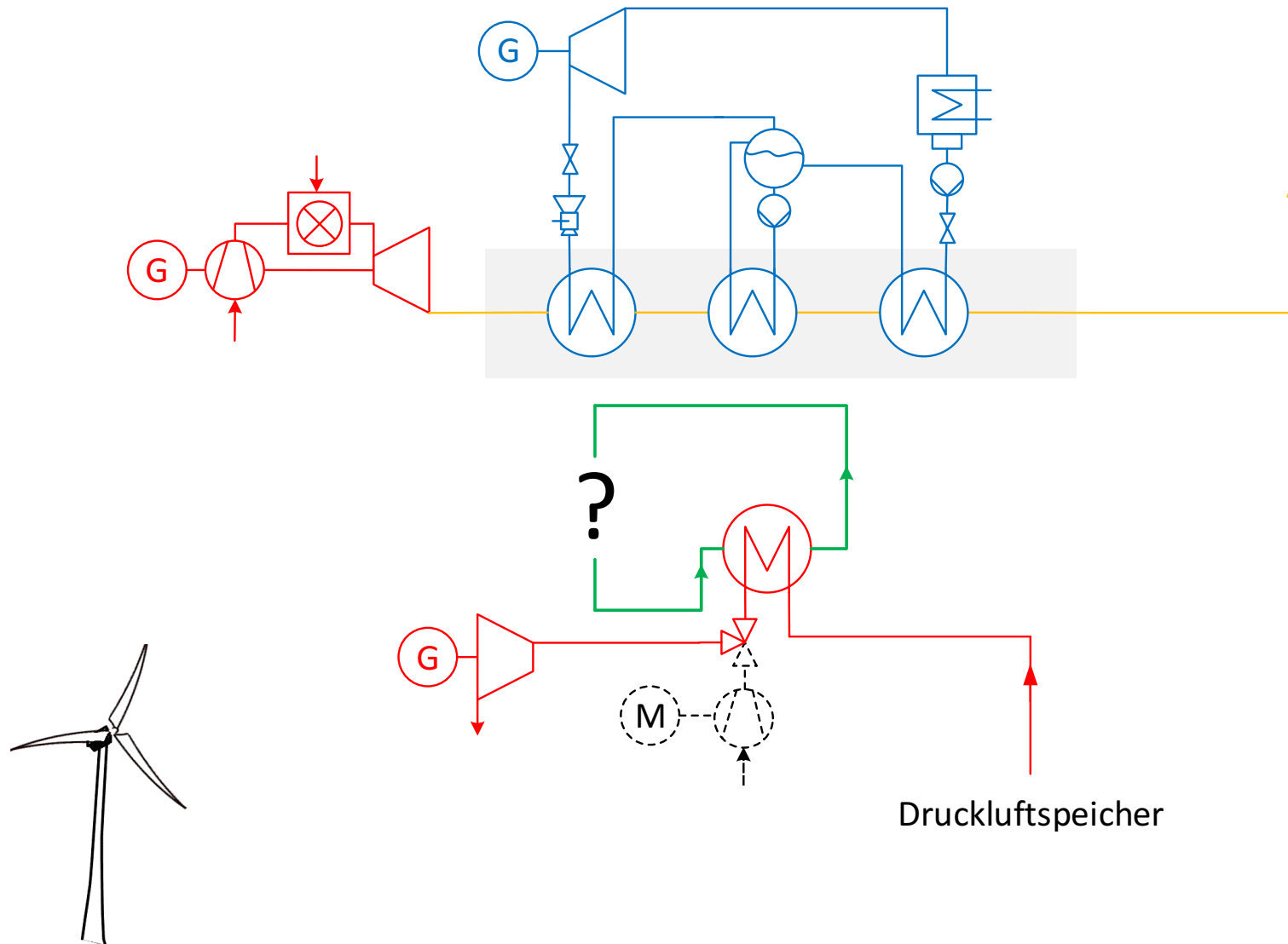


- Einsparungen?



Systemkonzept

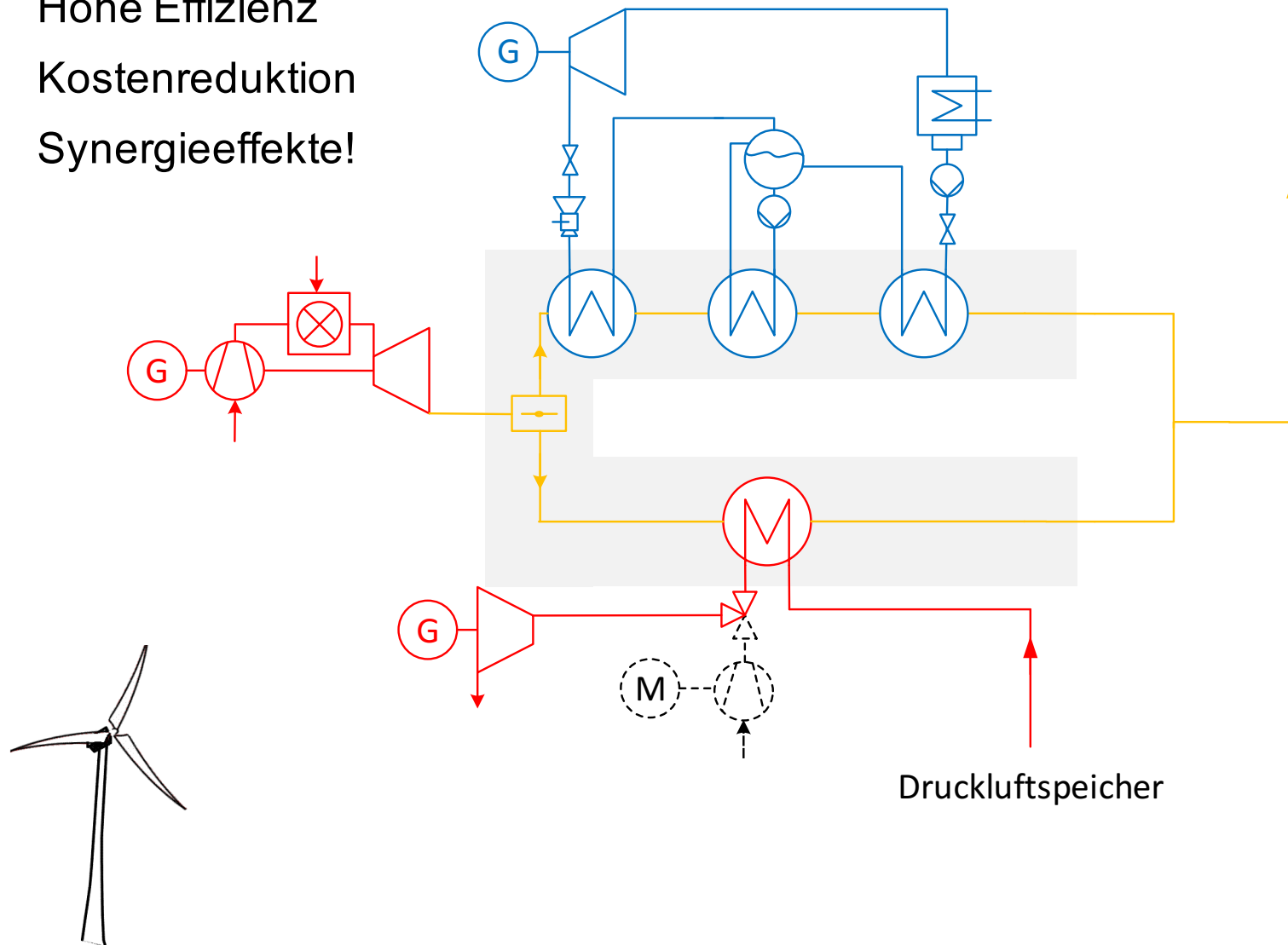
Alternative Verschaltungen



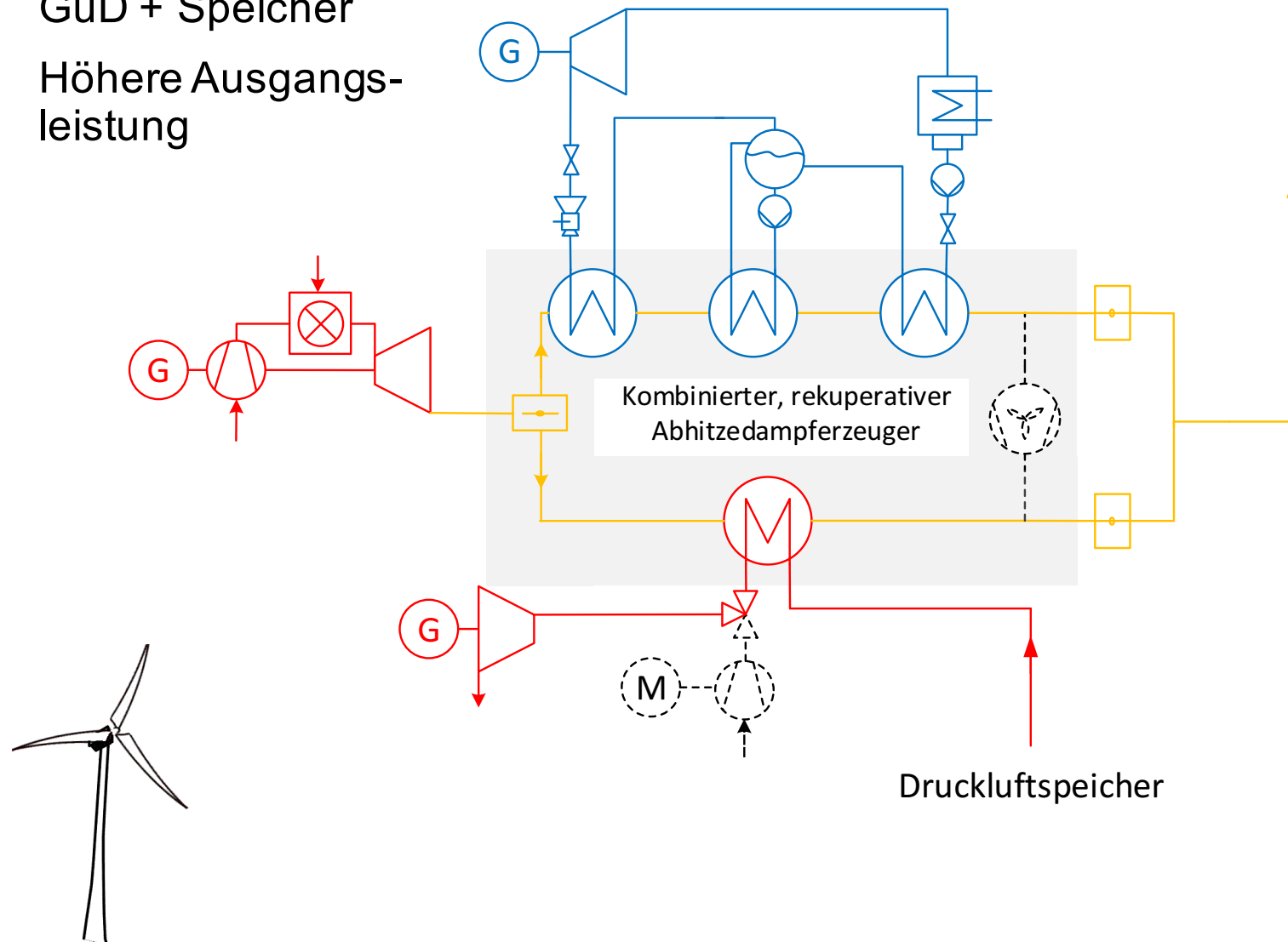
Systemkonzept

Kombination GuD-Kraftwerk mit Druckluftspeicherkraftwerk

- Hohe Effizienz
- Kostenreduktion
- Synergieeffekte!

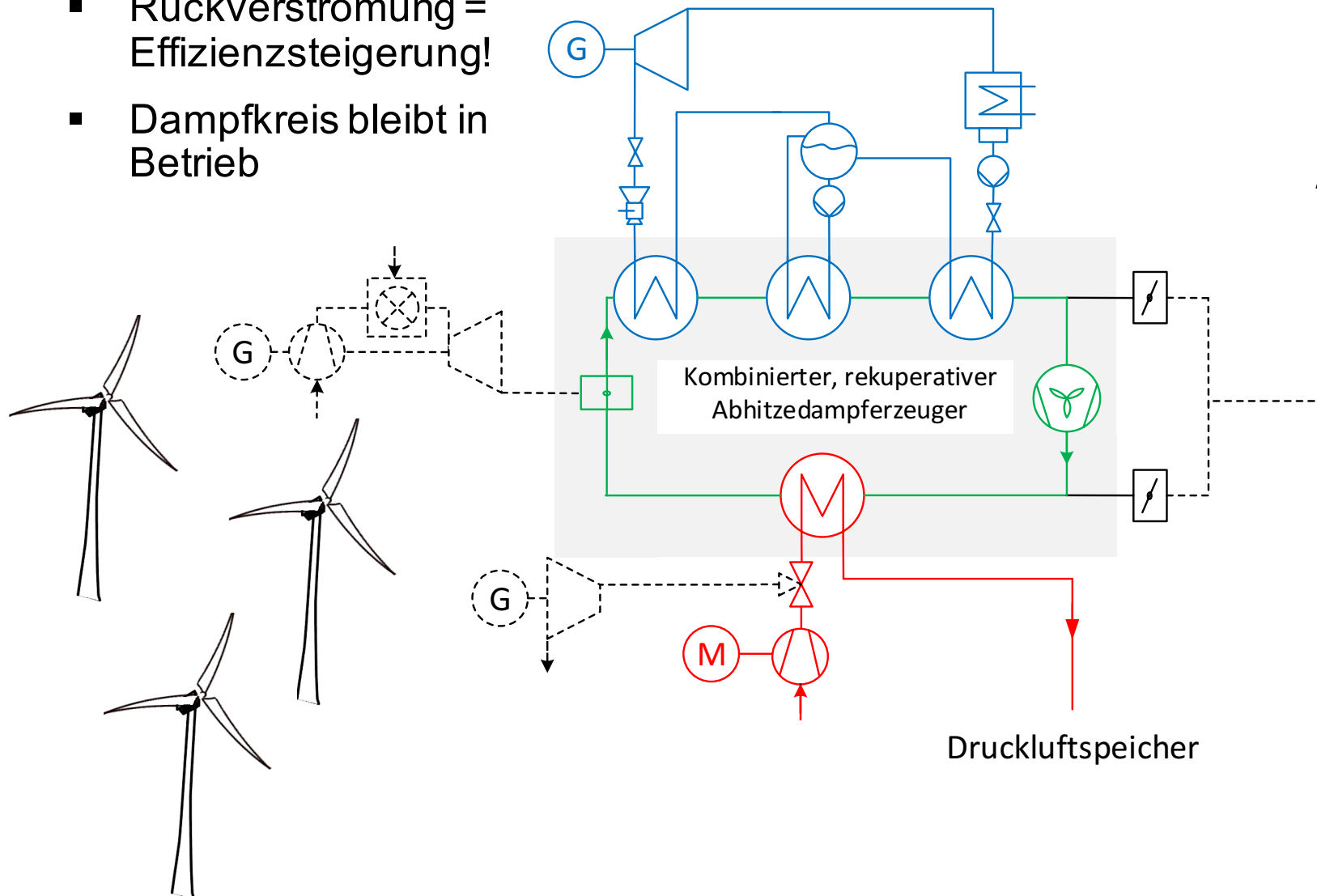


- GuD + Speicher
- Höhere Ausgangsleistung

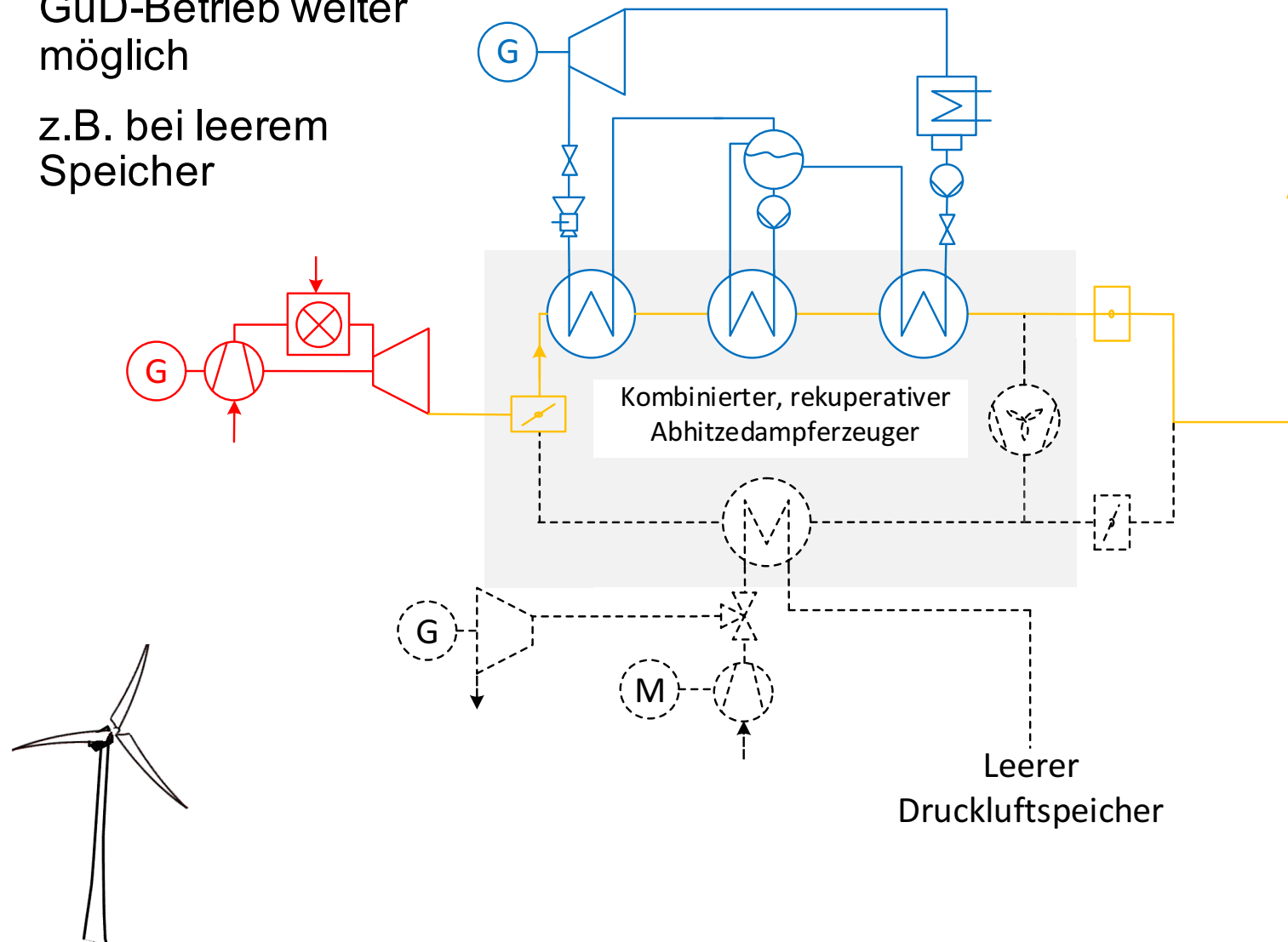


Einspeichern

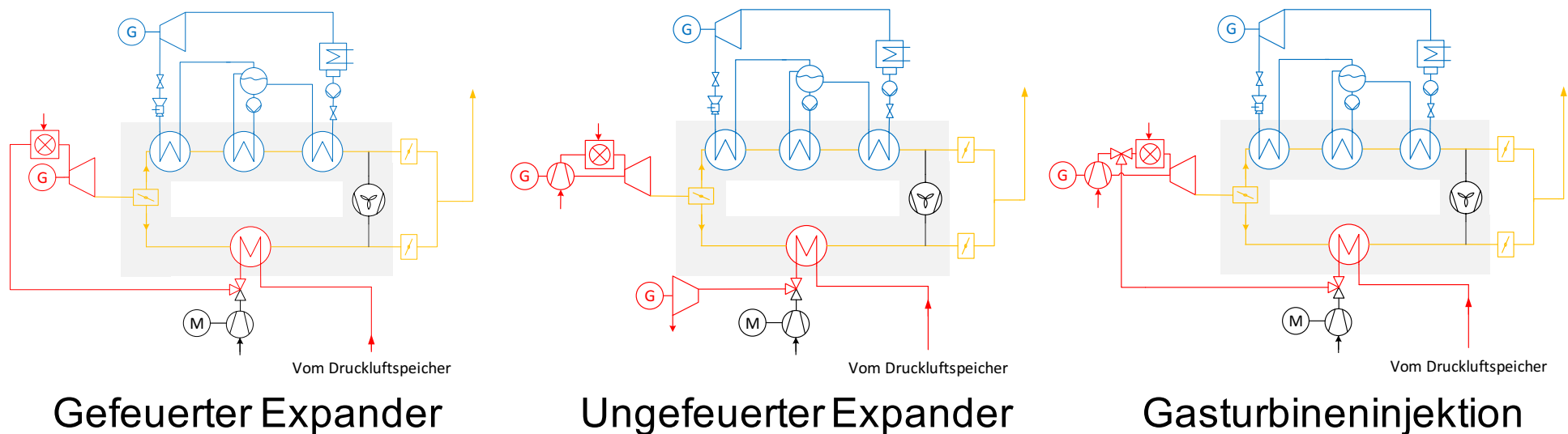
- Rückverstromung = Effizienzsteigerung!
- Dampfkreis bleibt in Betrieb



- GuD-Betrieb weiter möglich
- z.B. bei leerem Speicher



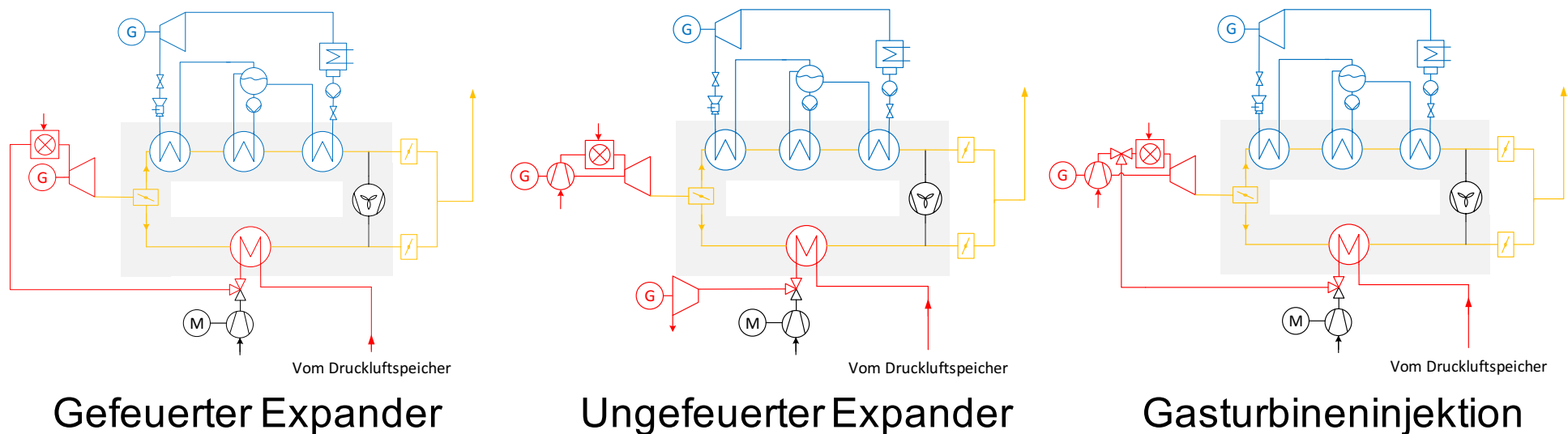
- Einspeichervorgang für alle Versionen identisch
- Gleiche Systembauteile: Alstom GT26 Gasturbine, GT26 Verdichter, 3-Druck Dampfkreislauf mit HD-Durchlaufdamperzeuger



- Modellierung in Ebsilon Professional®
- Modellparameter im Paper/Anhang

Vergleich von 3 Systemkonfigurationen (Ausspeichern)

- Einspeichervorgang für alle Versionen identisch
- Gleiche Systembauteile: Alstom GT26 Gasturbine, GT26 Verdichter, 3-Druck Dampfkreislauf mit HD-Durchlaufdamperzeuger



- Modellierung in Epsilon Professional
- Modellparameter im Paper/Anhang

- Nettoleistung 330MW
- 2-stufige Verbrennung
- Verdichtung 38:1

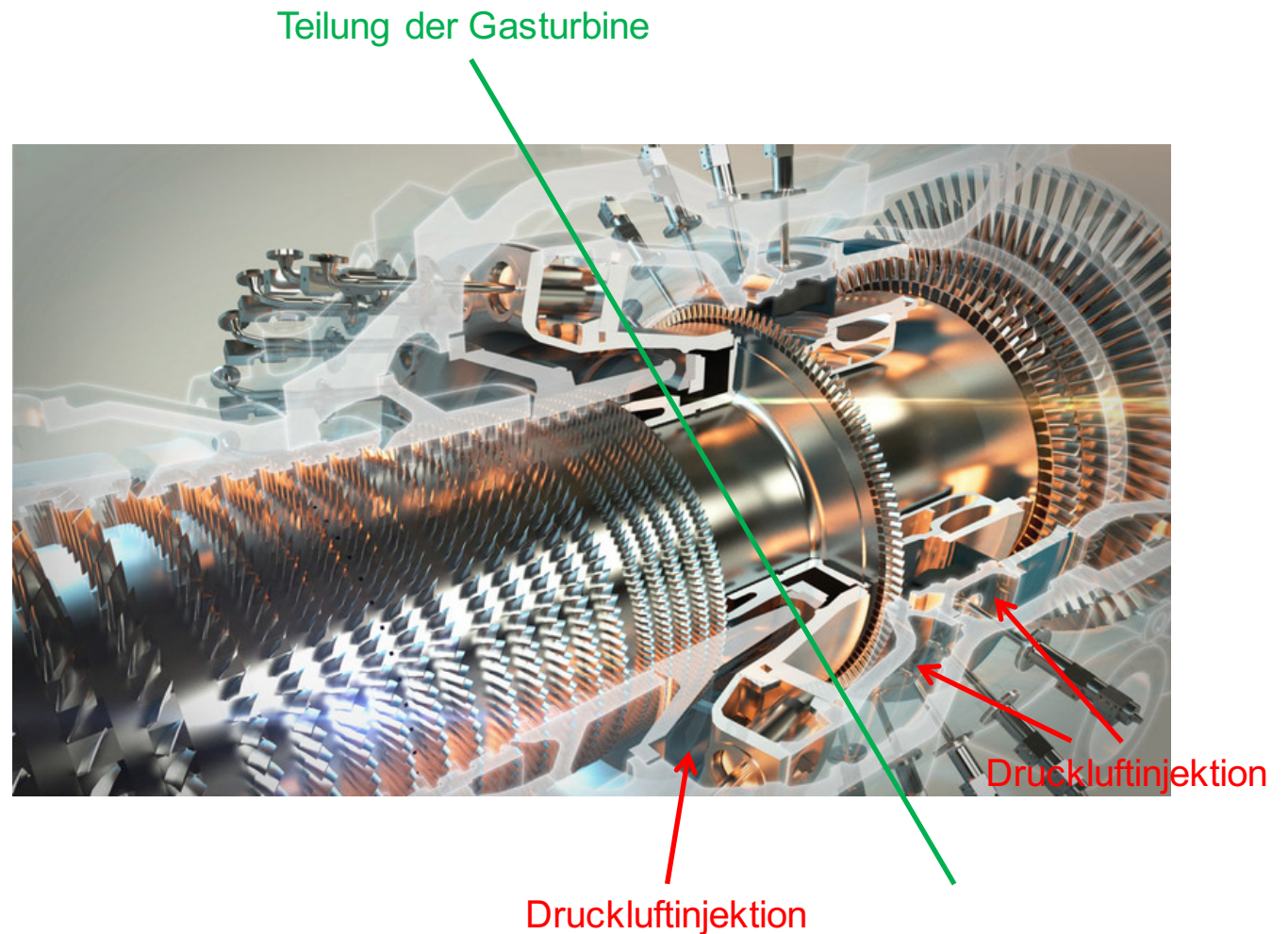


Bild: <http://www.erneuerbareenergien.de/files/smthumbnaildata/lightboxdetail/5/0/8/2/9/3/gasturbinegt24gt26evburner.jpg>

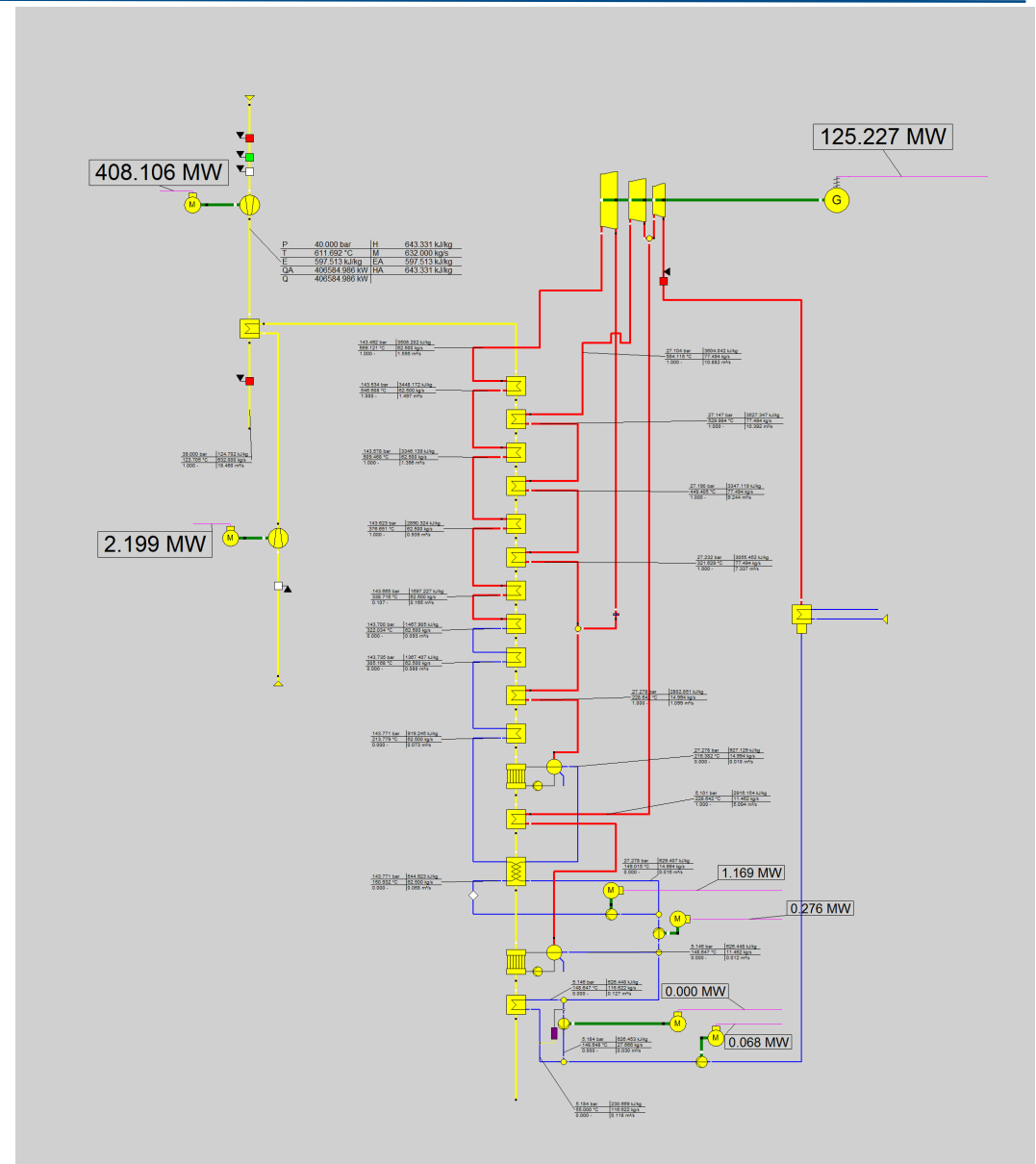
- Reduktion der aufgewandten Leistung

Verdichterleistung 408,1MW

Gebläse 2,2MW

Dampfkreislauf -123,7MW

Nettostrombezug 286,6MW

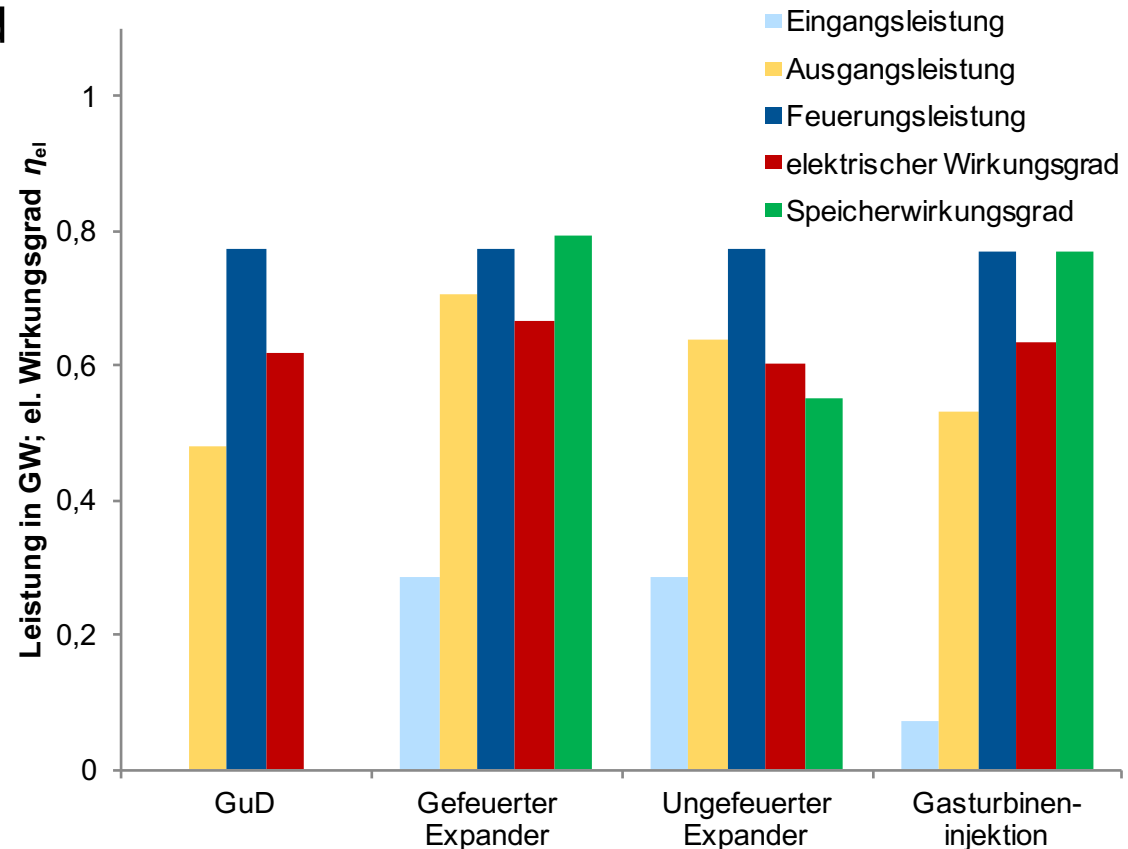


- Elektrischer Wirkungsgrad

$$\eta_{el} = \frac{P_{el,aus}}{P_{el,ein} + \dot{Q}_F}$$

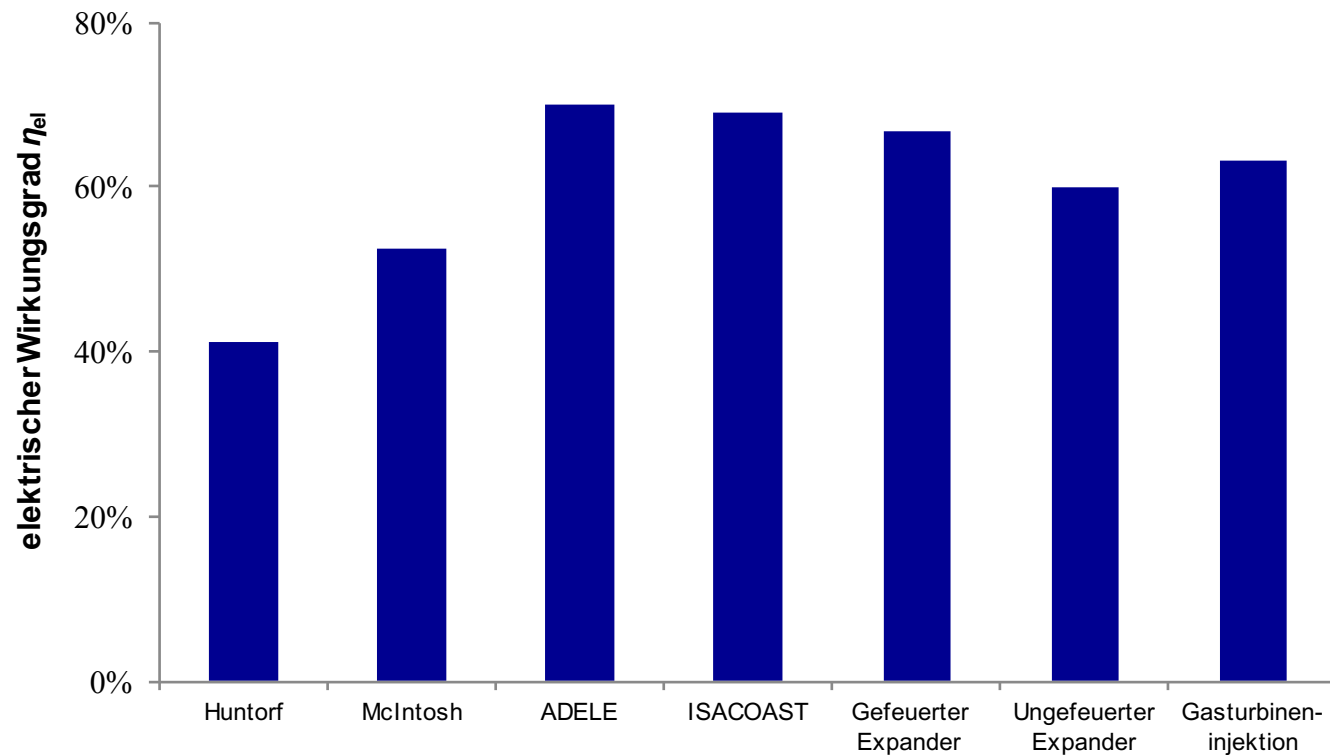
- Speicherwirkungsgrad

$$\eta_{sp} = \frac{P_{el,aus} - P_{el,GuD}}{P_{el,ein}}$$



- Gasturbineninjektion: Massenstrom Einspeichern/Ausspeichern = 4:1

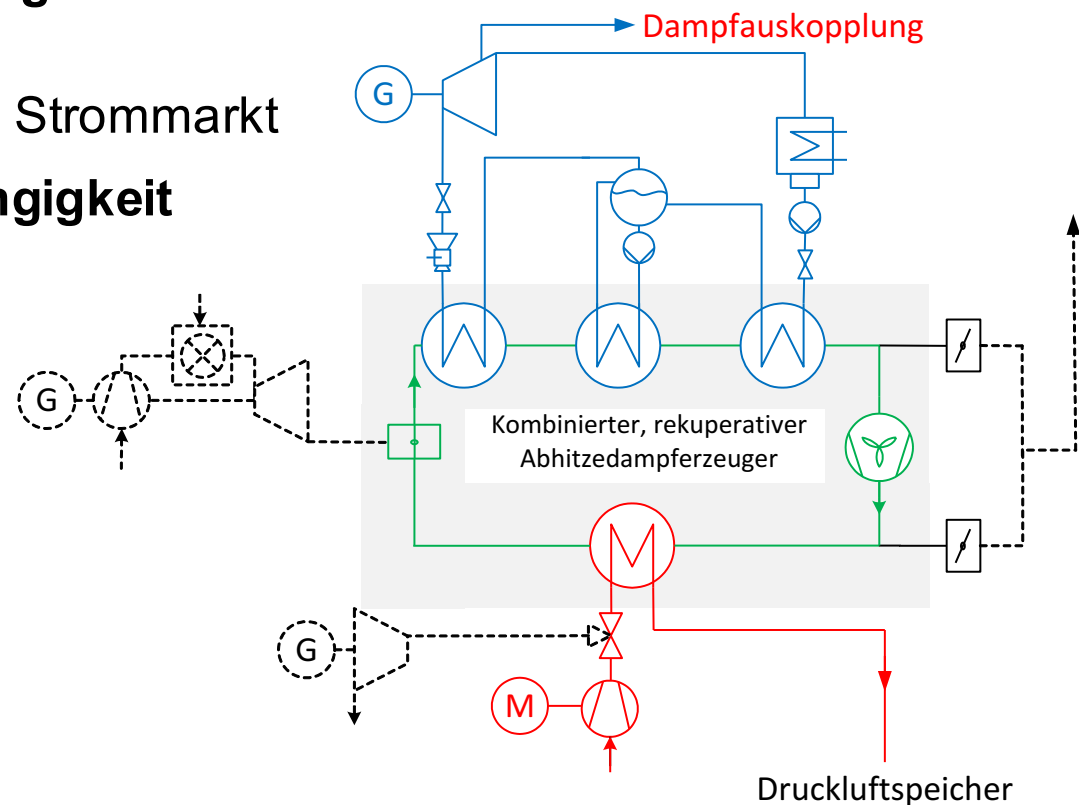
- Elektrischer Wirkungsgrad
$$\eta_{el} = \frac{P_{el,aus}}{P_{el,ein} + \dot{Q}_F}$$



- **Gefeuert Expander**
 - gefeuerte Expander technisch möglich
 - derzeit nicht kommerziell angeboten
 - erheblicher zeitlicher / finanzieller Entwicklungsaufwand
 - Nebenbedingung auch Umsetzbarkeit des ISACOAST-Konzepts.
- **Ungefeuert Expander**
 - auf dem Markt verfügbar z.B. Anwendungen in der Öl- und Gasindustrie
 - für größere Anlagen Dampfturbinenderivate
- **Gasturbineninjektion**
 - vergleichbar zu Dampf-injektion in Steam Injected Gasturbine (STIG)
 - maßgeblich durch Eigenschaften GT-Verdichters beschränkt (Pumpgrenze!)
 - Beschränkung auf 25% des nominellen Massenstroms der Gasturbine
 - kein Verdichterkennfeld verfügbar → keine Validierung möglich
- **Verdichter**
 - technisch möglich (vgl. ADELE, Gasturbinenverdichter), nicht kommerziell verfügbar

- **Situation des Energiesystems**
 - Hohe, aber fluktuierende Einspeisung erneuerbaren Stroms
 - Aktuell Überkapazitäten → keine Neubauten therm. Kraftwerke
 - Zukünftig Bedarf an Ausgleichsenergie – Speicher? Ja, aber teuer!
- **Neues Anlagenkonzept**
 - Kombination aus GuD-Kraftwerk und Druckluftspeicher
 - Synergieeffekte durch Mehrfachnutzung der Anlagenkomponenten
 - Kein skalierender Wärmespeicher
- **Modellierung**
 - Vergleich von 3 verschiedenen Ausspeicherkonzepten
- **Untersuchungsergebnisse**
 - Speicherwirkungsgrade bis 79,4%, Einspeicherung von 287MW_{el} in 473MW_{el} GuD
 - Erweiterung von Flexibilität und Lastbereich → Regelleistung
 - Technische Umsetzbarkeit muss beachtet werden
 - Dies gilt auch für alternative Konzepte (ADELE, ISACOAST)

- **Untersuchung von Systemen mit KWK**
 - Vollständig entkoppelte Bereitstellung von Strom und Wärme
 - Power-to-Heat im Einspeichern – nur effizienter!
 - Zusatzeinnahmen über Wärmeverkauf und KWK-Bonus
- **Wirtschaftlichkeitsbetrachtung**
 - Investitionskosten
 - Dynamisches Verhalten im Strommarkt
- **Lösungen zur Standortabhängigkeit**
 - Flüssigluftspeicher
 - Hochdruckrohrspeicher
 - ...

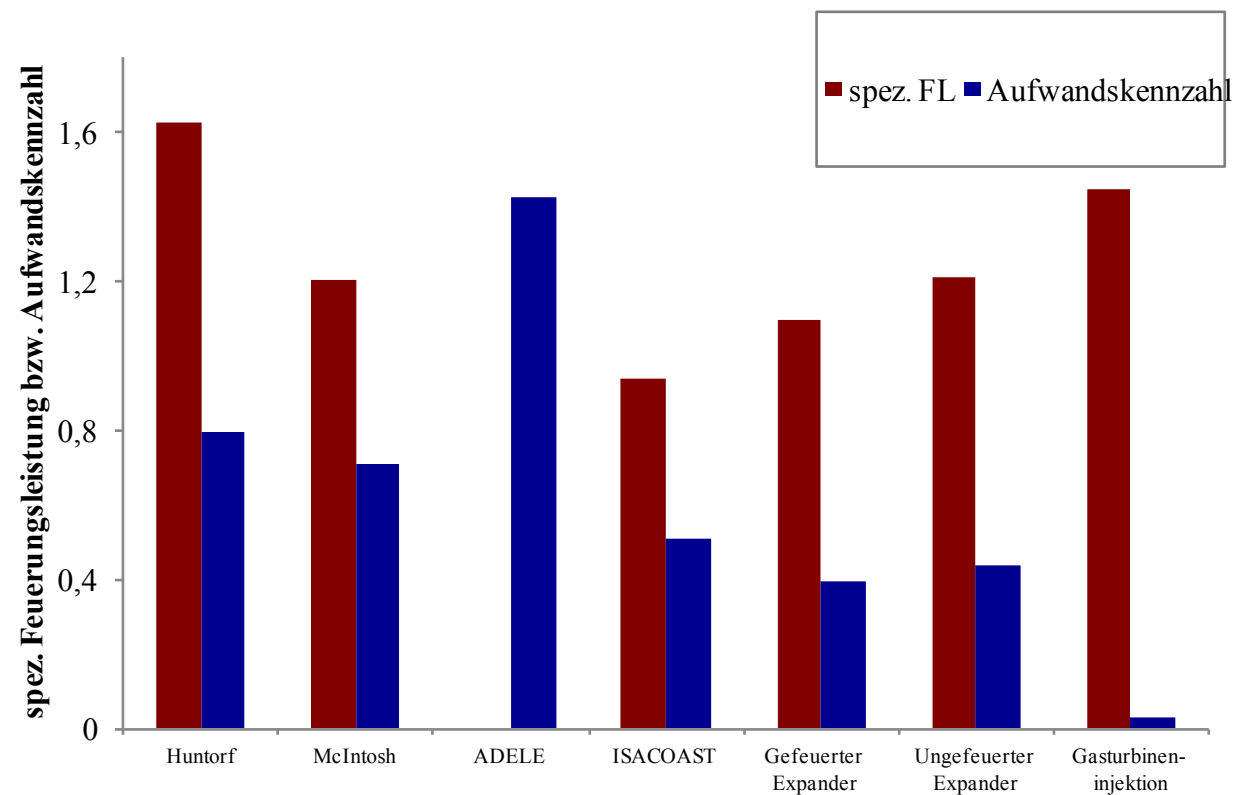


Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

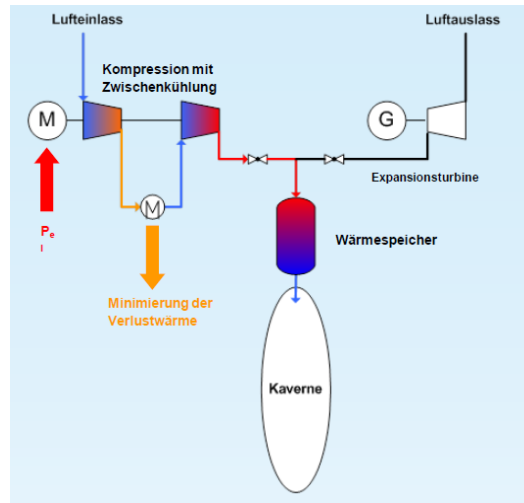
Technische Universität München
Lehrstuhl für Energiesysteme
Stephan Herrmann, M.Sc.
stephan.herrmann@tum.de

Komponente	Parameter	Wert
Gasturbine	Nettoleistung	330MW
	Ansaugmassenstrom	632kg/s
	Brennkammertemperaturen	1320/1295°C
	Turbinenaustrittstemperatur	615°C
	Isentroper Wirkungsgrad Verdichter	85,0%
	Verdichtungsverhältnis	38:1
	Isentroper Wirkungsgrad Turbine	89,2%
Druckluftexpander (nur in Version 2)	Isentroper Wirkungsgrad	89,0%
Abhitzedamperzeuger	Frischdampfdruck (HD/MD/ND)	164/30/6bar
	Frischdampftemperatur (HD/MD/ND)	603/596/341°C
	Pinchpoint (HD/MD/ND)	20/20/15K
	Druckverlust Rauchgasseite	24 mbar
Rekuperator	ΔT Druckluftseite/ Rauchgasseite	35K
	Druckverlust Druckluftseite	1bar
	Druckverlust Rauchgasseite	25mbar
Umlaufgebläse	Leistungsbedarf	2,2MW
Dampfturbine	Auslegungsleistung	145MW
	Isentroper Wirkungsgrad	89,0%
	Kondensatordruck (Vollast)	33mbar

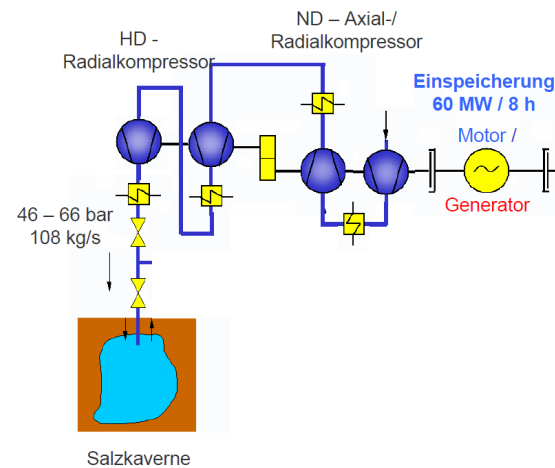
	Huntorf	McIntosh	ADELE	ISACOAST	Gefuearter Expander	Ungefearter Expander	Gasturbinen- injektion	GuD
Volumen in m ³	300000	560000		24480000	61000*X	61000*X	61000*X	
Kavernendruck in bar	50..70 bzw ≥43	45..74	100	43..47	38..40	38..40	38..40	
Einspeicherdauer in h	8 (≤12)	42	4..8	24	X	X	X	
Entnahmedauer in h	2 (≤3)	26	4..8	24	X	X	4*X	
Einspeicherstrom in kg/s	108	89	280	1268	632	632	632	
Druckluftverbrauch in kg /s	417	154	500	1268	617	617	154	
Eingangsleistung	60	45	200	827	287	287	287	
Ausgangsleistung	290	110	250	1622	707	637	532	479
Druckluftverbrauch (DLV) in Nm ³ /s	322,5	119,1	386,7	980,7	476,9	476,9	119,2	
spez. DLV in Nm ³ /MWs	1,11	1,08	1,55	0,60	0,67	0,75	0,22	
spez. Stromverbrauch in MWel/MWe	0,207	0,409	0,800	0,510	0,406	0,450	0,135	
Feuerungsleistung	473	132	0	1528	773	773	769	773
spez. FL in MWth/MWel	1,63	1,20	0	0,94	1,09	1,21	1,45	
spez. Speicherkapazität in kWh/Nm ³	0,25	0,26	0,18	0,46	0,41	0,37	1,24	
spez. Speicherkapazität in MJ/kg	0,695	0,714	0,500	1,28	1,15	1,03	3,45	
elektrischer Wirkungsgrad	41%	54%	70%	69%	66,7%	60,1%	63,3%	62,0%
Speicherwirkungsgrad	-1,2%	38,8%	70,0%	81,6%	79,4%	55,2%	77,0%	



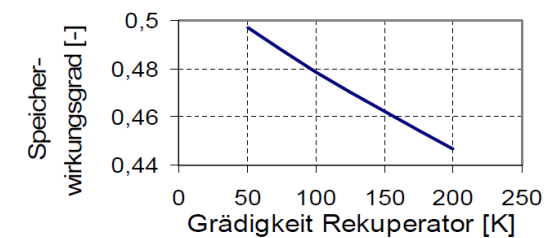
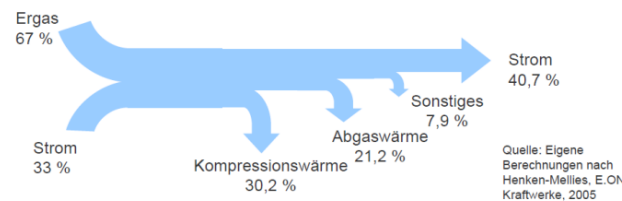
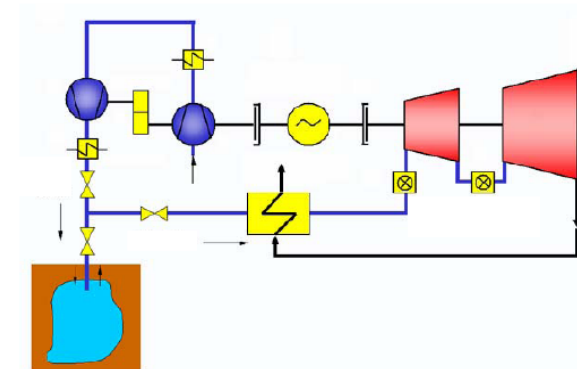
ADELE



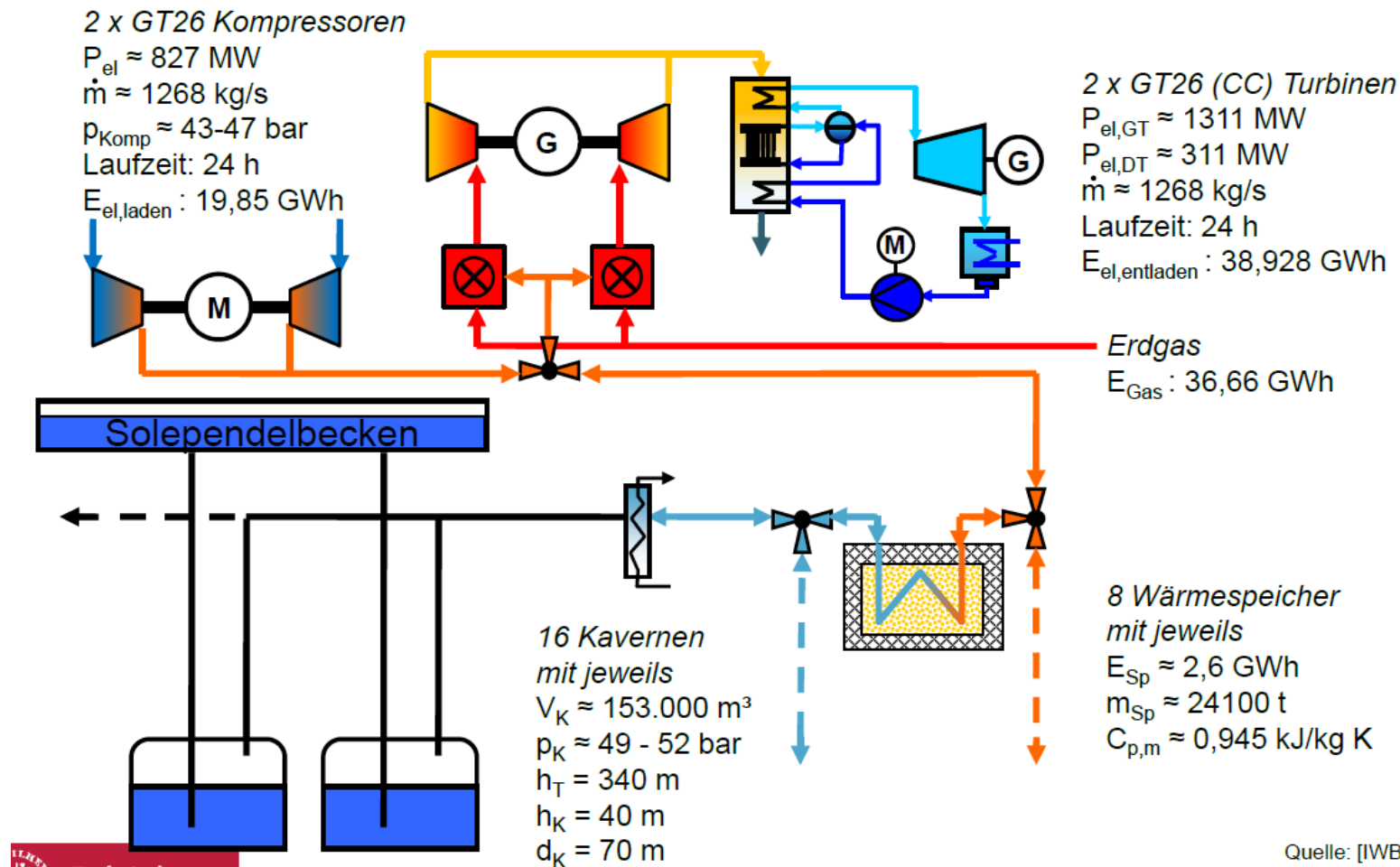
Huntorf



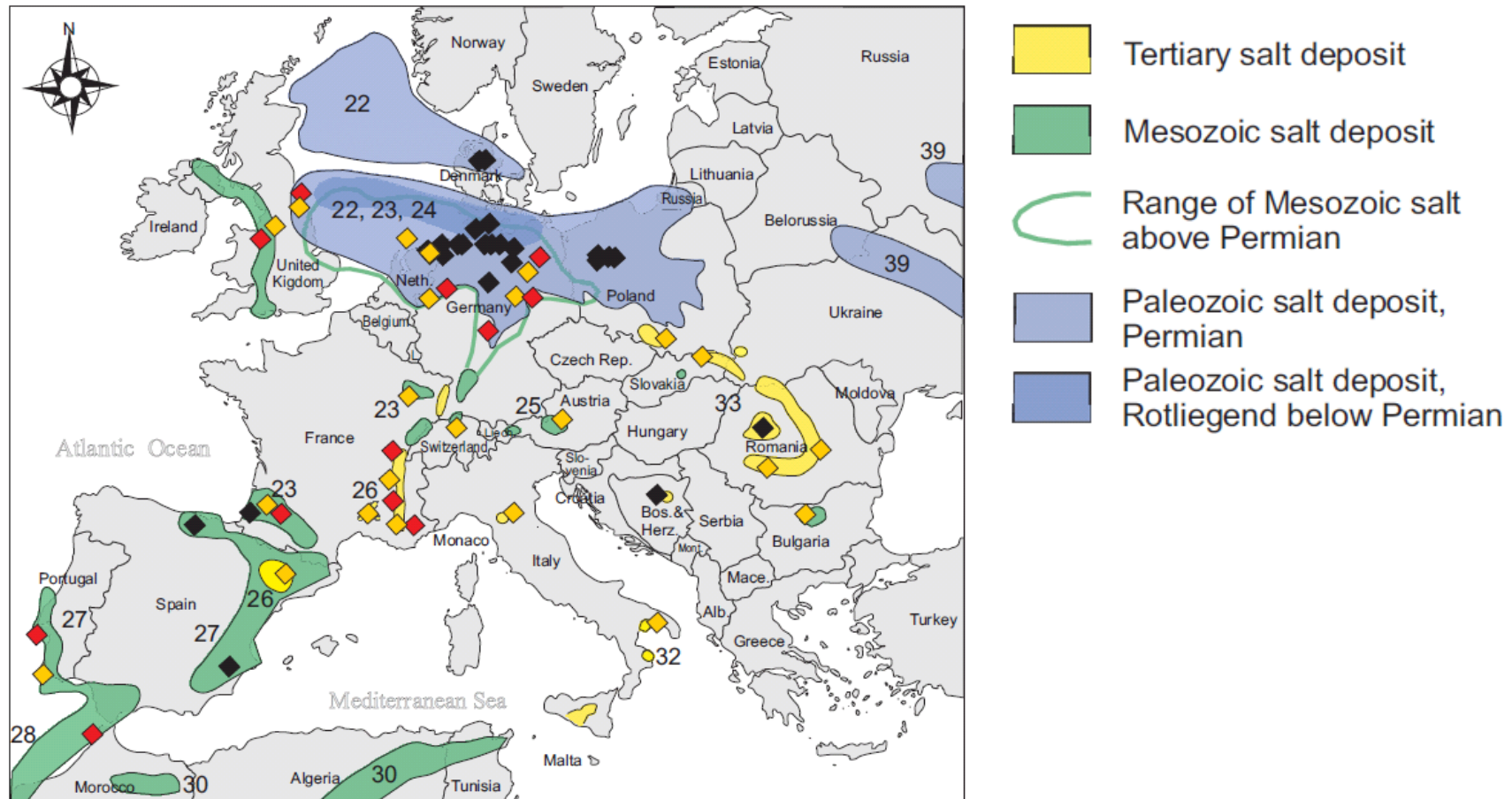
McIntosh



Marcus Nölke, CompressedAir Energy Storage(CAES) –eine sinnvolle Ergänzung zur Energieversorgung?, Promotionsvortrag, 2006



22.03.2012, 4. Göttinger Tagung EFZN/BNZa | Dipl.-Ing. L. Nielsen
 Druckluftspeicherkraftwerke zur Netzintegration erneuerbarer Energien – ISACOAST-CC | Folie 6



Reinhard Leithner, Energy-Mix and Power Plant Technology in Europe and Germany,
Power Plant Technology ForumHannover Messe 6.4.2011