

# Druckluftspeicherkraftwerk mit Dampfkreislauf

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

Lehrstuhl für Energiesysteme, Technische Universität München, Boltzmannstr. 15, 85748 Garching, 0049-89-289-16279, stephan.herrmann@tum.de, www.es.mw.tum.de

**Kurzfassung:** In der vorliegenden Studie wurde ein neuartiges Druckluftspeicherkraftwerk in einer Kreislaufsimulation mit dem Programm Epsilon Professional® untersucht. Das Konzept beruht auf einer Rückverstromung der bei der Verdichtung anfallenden Wärme, so dass keine Wärmespeicher benötigt werden. Drei verschiedene Konfigurationen wurden analysiert. Dabei zeigt sich, dass die erste Konfiguration mit gefeuerter Expansionsturbine eine Leistung von 707 MW und einen Speicherwirkungsgrad von 79,4 % aufweist. Diese Lösung ist jedoch nicht mit aktuell verfügbaren Komponenten realisierbar. Die zweite Alternative einer separaten ungefeuerten Luftturbine erzielt einen Speicherwirkungsgrad von 55,2 % und lässt sich mit einem geringeren Entwicklungsbedarf umsetzen. Als dritte Variante wurde die Injektion von Druckluft in eine Gasturbine betrachtet, deren Werte zwischen den beiden ersten Varianten liegen. Die Druckluftinjektion ist technisch möglich, jedoch wird die injizierbare Druckluftmenge durch das eingeschränkte Kennfeld des Gasturbinenkompressors begrenzt. Mit der dritten Konfiguration ist ein Speicherwirkungsgrad von 77,0 % möglich. Der größte Vorteil des neuen Anlagenkonzepts liegt in der Kraft-Wärme-Kopplung, welche in nachfolgenden Arbeiten im Detail untersucht wird.

**Keywords:** Druckluftspeicher, Dampfkreislauf, adiabate Verdichtung

## 1 Einleitung

Der Wandel im Stromsektor setzt die deutschen Gas- und Dampfkraftwerke (GuD) wirtschaftlich unter Druck. Die niedrigen Preise an der Strombörse führen dazu, dass GuD-Kraftwerke mit reiner Stromerzeugung komplett aus dem Markt gedrängt werden. Thermische Kraftwerke werden aber auch in Zukunft für die Bereitstellung regelbarer Leistung benötigt, um die fluktuierende Produktion der Erneuerbaren Energien zu kompensieren. Für den Ausgleich kurzzeitiger Schwankungen sind die auf dem Markt verfügbaren Batterieanlagen bereits gut geeignet. Im Hinblick auf großskalige Speicheranlagen für Stunden oder gar Tage hingegen sind neben Pumpspeicherkraftwerken nahezu ausschließlich Druckluftspeicherkraftwerke geeignet, einen signifikanten Beitrag zur Bereitstellung von Speicherkapazität und Regelenergie zu liefern. Da das Ausbaupotential von Pumpspeicherkraftwerken aufgrund von Standortlimitierungen begrenzt ist, kommt der Energiespeicherung in Form von Druckluft eine besondere Bedeutung zu.

Batterie- wie Pumpspeicher und viele bisher bestehende Druckluftspeicherkonzepte haben zusätzlich den Nachteil, dass ein sogenanntes Schattenkraftwerk vorgehalten werden muss, welches bei Strommangel für den Fall eines leeren Speichers einspringen kann, den überwiegenden Teil des Jahres allerdings stillsteht. Dies führt zu den aktuellen Diskussionen um Kapazitätsreserven und Kapazitätsmarkt.

In diesem Zusammenhang wurde am Lehrstuhl für Energiesysteme ein neuartiges Anlagenkonzept entwickelt, bei welchem ein Druckluftspeicherkraftwerk mit einem GuD-Kraftwerk kombiniert wird, sodass eine Nutzung der Kompressionsabwärme ohne große thermische Speicher möglich ist. Das integrierte GuD-Kraftwerk ermöglicht dabei auch einen Betrieb bei leerem Speicher. Zudem ist das kombinierte Kraftwerk besonders für den KWK-Betrieb geeignet.

## 2 Stand der Technik

Derzeit existieren weltweit nur zwei ausgeführte Druckluftspeicherkraftwerke. Die erste Anlage wurde 1978 in Huntorf, Deutschland, in Betrieb genommen und befindet sich heute noch im Betrieb. Das zweite Kraftwerk befindet sich seit 1991 in McIntosh, USA [1]. Beide basieren auf dem Konzept einer Gasturbine, deren Teile Turboverdichter, sowie Brennkammer(n) und Expansionsturbine(n) zeitlich getrennt voneinander betrieben werden. Im Einspeicherbetrieb wird mittels der Verdichter aus elektrischer Energie Druckluft erzeugt, welche in einer Kaverne bei bis zu etwa 70 bar eingespeichert wird. Die bei der nahezu adiabaten Verdichtung in den Turboverdichtern anfallende Kompressionswärme wird in mehreren Schritten mittels Zwischen- und Nachkühlung an die Umgebung abgegeben. Während des Ausspeicherns wird die Druckluft zunächst erhitzt und dann in den Expansionsturbinen zur Elektrizitätserzeugung entspannt. Die Erhitzung erfolgt dabei in Huntorf ausschließlich mittels der Brennkammern, in McIntosh zusätzlich mittels eines Rekuperators, welcher die Abwärme der Turbinenabgase zur Vorwärmung der Druckluft nutzt, was durch Anhebung der mittleren Temperatur der Wärmezufuhr zu einer Effizienzsteigerung führt [2], [3].

Durch die rekuperative Vorwärmung ist der Ausspeichervorgang im Fall von McIntosh im Vergleich zu anderen Gaskraftwerken sehr effizient, es müssen lediglich 1,17 kWh Erdgasleistung pro 1 kWh elektrischer Leistung aufgewandt werden [2]. Zusätzlich zur Feuerungswärmeleistung muss aber noch die elektrische Leistungsaufnahme der Verdichter im Einspeicherbetrieb von etwa 0,69 kWh berücksichtigt werden, sodass sich ein Gesamtwirkungsgrad von lediglich 54 % ergibt. Die wesentliche Verlustquelle des Systems, ist die auf relativ niedrigem Temperaturniveau abgeführte Wärme aus Zwischen- und Nachkühlung der Druckluft. Als vorteilhaft kann in den Anlagen Huntorf und McIntosh gelten, dass diese prinzipiell auch bei leerem Speicher eingesetzt werden können, wenn auch mit der vergleichsweise geringen Effizienz des einfachen Gasturbinenprozesses mit Zwischenkühlung (und Rekuperation).

Neuere Druckluftspeicherkonzepte begegnen dieser Verlustquelle mittels Wärmespeicherung. Hierbei handelt es sich um sogenannte adiabate Druckluftspeicher. Das prominenteste Beispiel hierfür ist das Projekt ADELE [4]. In ADELE wird, im Gegensatz zu den vorgenannten Anlagen, für eine effiziente Speicherung der Kompressionswärme eine möglichst hohe Verdichteraustrittstemperatur angestrebt. Mit ähnlichen Speicherdrücken wie Huntorf und McIntosh bei etwa 70 bar sollten ursprünglich bis zu 650°C erreicht werden [4]. Die dadurch erzielte hochwertige Wärme wird unter Abkühlung der Druckluft im Wärmespeicher gespeichert, die dann kalte Druckluft einer Kaverne zugeführt. Für die Ausspeicherung wird die Druckluft im Wärmespeicher wieder erhitzt und anschließend in einer Turbine auf Umgebungsdruck entspannt. Die angestrebte Strom-zu-Strom

Speichereffizienz bei ADELE beträgt 70%. Als öffentlich gewordenes Zwischenergebnis des auf ADELE folgenden ADELE ING Projekts kann gelten, dass diese Betriebsparameter wohl technisch erreichbar sind, allerdings wegen der hohen Materialbelastungen insbesondere im Wärmespeicher aufgrund der Kombination hoher Drücke und Temperaturen zu teuren und somit unwirtschaftlichen Baukosten führen [5]. Es werden daher Alternativkonzepte, beispielsweise mehrstufig mit reduzierten Betriebsparametern, angestrebt.

Eine Kombination aus den beiden Ansätzen der geteilten Gasturbine mit adiabater Wärmespeicherung und einem zusätzlichen Dampfkraftprozess wurde im Projekt ISACOAST der TU Braunschweig in Zusammenarbeit mit E.ON untersucht [6]. In diesem System wird für die Einspeicherung analog zu ADELE eine adiabate Kompression ohne Zwischenkühlung durchgeführt und die anfallende Kompressionswärme gespeichert. Während des Ausspeichervorgangs wird die Druckluft zunächst im Wärmespeicher wieder vorgewärmt, bevor sie anschließend analog zu der Anlage in McIntosh in einer Brennkammer auf für Gasturbinen übliche Turbineneintrittstemperaturen erhitzt wird. Anschließend wird die heiße Druckluft zunächst in Expansionsturbinen analog zu einer Gasturbine entspannt und die Resthitze der immer noch heißen Abgase der Expansionsturbine über einen Abhitzedampferzeuger (AHDE) dem Dampfkraftprozess zugeführt. Für die Gasturbinenteile (Alstom GT26), sowie den Dampfkraftprozess werden prinzipiell Standardkomponenten eingesetzt, wobei die Teilung der Gasturbine als problematisch – weil zumindest unerprobt – gilt. Der Wärmespeicher ist eine Eigenentwicklung. Vorteilhaft an dieser Konzeption sind die hohe Effizienz, sowie die Eignung als Schattenkraftwerk. Nachteilig hingegen sind die hohen Investitionskosten, ähnliche Probleme mit dem Wärmespeicher wie bei ADELE, sowie der zyklische Betrieb des Dampferzeugers. Typische Anfahrzeiten von GuD-Kraftwerken liegen bei ca. 30 – 60 Minuten.

### **3 Systemkonzept**

#### **3.1 Problemstellung**

Grundgedanke bei der Entwicklung des neuen Systemkonzepts ist eine Vereinfachung des Systemaufbaus und gleichzeitig Steigerung der Flexibilität des ISACOAST Ansatzes ohne die vorgenannten Vorteile des Konzepts (hohe Effizienz, GuD-Betrieb) einzubüßen. Im Kern sollte auf den insbesondere als problematisch anzusehenden Hochdruck-Hochtemperatur-Wärmespeicher verzichtet werden.

Ein weiteres Problem des ISACOAST Konzepts ist die Trägheit des Systems durch den Abhitzedampferzeuger. Dieser ist nach einigen Stunden Stillstand weitgehend ausgekühlt und kann daher nur vergleichsweise langsam innerhalb von mindestens 30-60 Minuten angefahren werden, da sonst starke thermische Spannungen dickwandiger Bauteile zu Schädigung und somit erhöhtem Lebensdauerverbrauch führen [7].

#### **3.2 Lösungsansatz**

Alle vorgenannten Probleme werden im neu entwickelten System durch einen möglichst durchgehenden Betrieb des Abhitzedampferzeugers gelöst. Hierfür wurde ein neuartiges Design mit einem dem Abhitzedampferzeuger parallel geschalteten Rekuperator entwickelt,

welcher, wie nachfolgend beschrieben, verschiedene Funktionen erfüllt. Während des Ausspeicherns erfolgt im Rekuperator gemäß seiner ursprünglichen Funktion die Wiedererhitzung der Druckluft, wohingegen während des Einspeichervorgangs im Rekuperator die Abkühlung der zuvor adiabat auf hohe Temperaturen verdichteten Druckluft erfolgt. Der durchgehende Betrieb des Abhitzedampferzeugers sorgt für eine erhebliche Verkürzung der Umschaltzeit, da eine grundlegende Beschränkung nur noch durch die Turbomaschinen (Gasturbine, Verdichter) gegeben ist.

### 3.3 Einspeicherbetrieb

Für den Einspeicherbetrieb wird, wie in Abb. 1 gezeigt, die Abwärme über den Rekuperator im Gegenstrom an ein druckloses Umlaufmedium (Luft bzw. Rauchgase) übertragen. Das dadurch erhitzte Umlaufmedium durchströmt anschließend den Abhitzedampferzeuger, wodurch die Abhitze der Kompression an den Dampfkreislauf übertragen wird. Das danach wieder abgekühlte Umlaufmedium wird dann erneut dem Rekuperator zugeführt. Der Dampfkreislauf erfüllt so die Funktion der Rückverstromung der bei der Kompression entstandenen Abhitze und mindert damit die effektiv aufgewandte elektrische Leistung während des Einspeicherns.

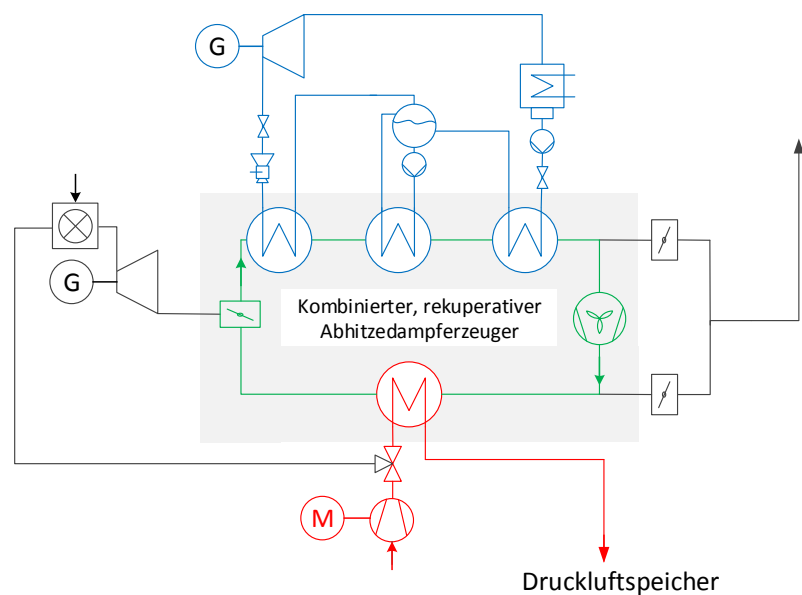


Abb. 1: Neues Anlagenkonzept im Einspeicherbetrieb

### 3.4 Ausspeicherbetrieb

Im Ausspeichervorgang wird die Druckluft über den Rekuperator in umgekehrter Richtung wieder aufgeheizt. Der Rekuperator und der Abhitzedampferzeuger werden dabei gleichzeitig durch Abgase beheizt. Um die maximale Effizienz zu erzielen sollte der Abgasmassenstrom durch den Rekuperator genauso hoch gewählt werden, dass die Temperaturdifferenz über den gesamten Rekuperator konstant ist, also etwa gleich dem ausgespeicherten Druckluftmassenstrom. Das restliche Abgas wird dann dem Abhitzedampferzeuger zugeführt. Der Dampfkreislauf läuft dann je nach Konfiguration des Systems in Teillast z.B. bei etwa 55%. Für den Ausspeicherbetrieb wurden 3 verschiedene Optionen betrachtet.

### 3.4.1 Version 1: Gefuehrter Expander

Die erste Ausspeicheroption ist die Verwendung eines gefuehrten Gasturbinenexpanders, also einer Gasturbine ohne Verdichter. Dieser kann durch eine weitere Gasturbine unterstuetzt werden, um dem AHDE mehr Abgas zufuehren zu koennen. Der Verdichter und der gefuehrte Expander entsprechen dabei prinzipiell einer „geteilten“ Gasturbine, wie im Fall von Huntorf, McIntosh und ISACOAST. Abb. 2 zeigt die entsprechende Schaltung.

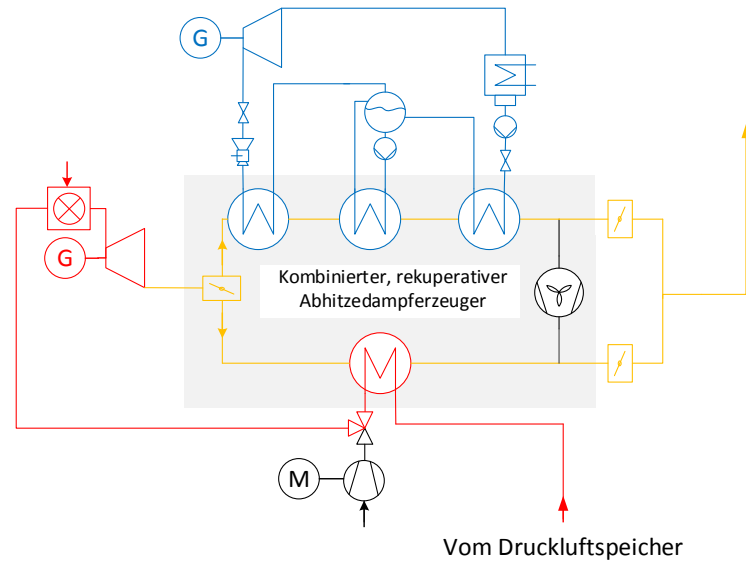


Abb. 2: Neues Anlagenkonzept mit gefuehrttem Expander im Ausspeicherbetrieb

### 3.4.2 Version 2: Ungefuehrter Expander

Da der gefuehrte Expander eine technische Herausforderung darstellt wurde zusaetzlich ein ungefuehrter Druckluftexpander untersucht. Zusaetzlich ist eine herkoemmlische Gasturbine ins System integriert. Diese Variante ist in Abb. 3 dargestellt.

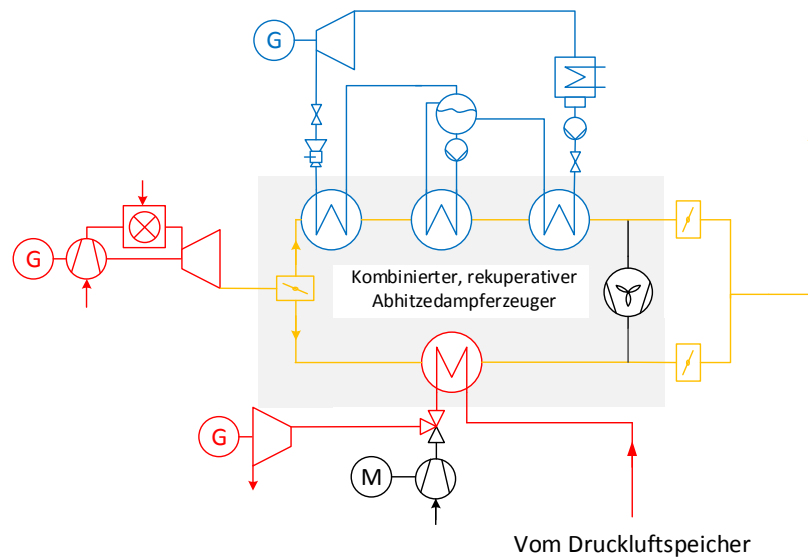


Abb. 3: Neues Anlagenkonzept mit ungefuehrttem Expander im Ausspeicherbetrieb

### 3.4.3 Version 3: Gasturbineninjektion

Als dritte Option besteht je nach Bautyp an verschiedenen Stellen einer konventionellen Gasturbine die Möglichkeit zusätzliche Druckluft einzuspeisen, beispielsweise am Verdichteraustritt, in die Brennkammer oder über die Kühlluftkanäle. Auf diese Weise wird der Massenstrom durch den Gasturbinenexpander gegenüber dem Verdichter gesteigert und somit die Ausgangsleistung erhöht. Dies kann einerseits durch Verminderung des Verdichtermassenstroms über eine Verstellung des Vorleitgitters (Inlet-Guide-Vane, IGV) geschehen, oder durch eine Steigerung des Massendurchsatzes der Expansionsturbine, oder eine Kombination von beidem. Die Zugabe von extern erzeugter Druckluft in eine Gasturbine wurde bereits erfolgreich demonstriert [8].

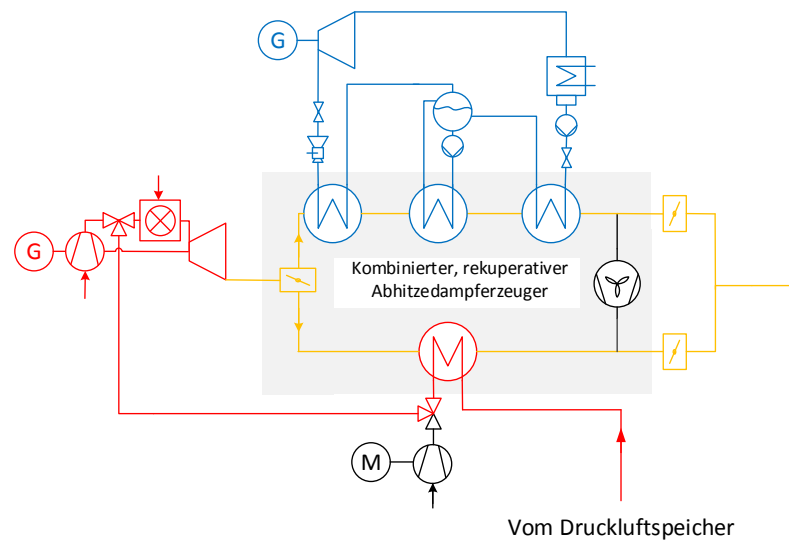


Abb. 4: Neues Anlagenkonzept mit Gasturbineninjektion im Ausspeicherbetrieb

### 3.5 GuD-Betrieb

Wie bereits zuvor erwähnt kann das Kraftwerk unabhängig von der gewählten Ausspeicherkonfiguration ebenfalls im „konventionellen“ GuD-Betrieb gefahren werden. Dies ist vorteilhaft, wenn der Druckluftspeicher leer ist, wenn die Druckluft für Zeiten mit höheren Strompreisen gespart werden soll. Abb. 5 zeigt beispielhaft ein System mit gefeuertem Expander im GuD-Betrieb.

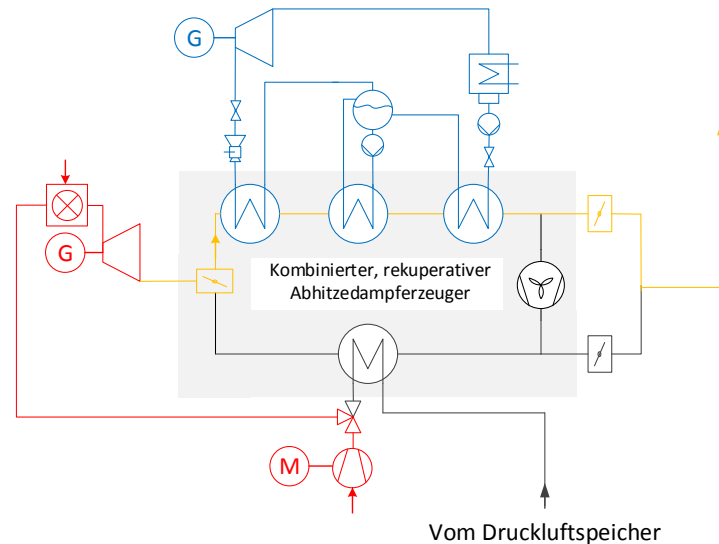


Abb. 5: Neues Anlagenkonzept mit gefeuertem Expander im GuD-Betrieb

## 4 Modellbeschreibung

Für die verschiedenen Konfigurationen des neuen Anlagenkonzepts wurden Kreislaufsimulationen in Epsilon Professional® durchgeführt. Diese unterscheiden sich wie zuvor beschrieben im Wesentlichen im Ausspeichervorgang. Der Einspeichervorgang ist für alle Konfigurationen identisch. Als Gasturbine wurde die Alstom GT26 [9] ausgewählt, welche in der Simulation auf Grundlage der veröffentlichten Kenndaten modelliert worden ist. Der gleiche Gasturbinentyp wird ebenfalls im ISACOAST Konzept verwendet, da die technische Auslegung mit hohem Druckverhältnis besonders vorteilhaft für Druckluftspeicherkraftwerke ist. Zudem ist die Gasturbine selbst sehr effizient, da sie eine zweistufige Entspannung mit Zwischenerhitzung aufweist. Für den Dampfkreislauf wurde eine Dreidruck-Anlage mit Durchlaufdampferzeuger in der Hochdruckstufe gewählt. Der Verdichter für die Einspeicherung ist identisch mit dem modellierten Verdichter der GT26. Für den gefeuerten Expander wird der Expansionsteil der GT 26 genutzt. Das Modell des Druckluftexpanders ist eine Luftturbine, welche an typischen Werten für Dampfturbinen der gleichen Leistungsklasse orientiert ist. Im Fall der Gasturbineninjektion wird der zusätzliche Druckluftmassenstrom auf 25% des nominellen Ansaugmassenstroms begrenzt und der Verdichter wird mittels des IGV gedrosselt. Andere Optionen sind wie oben beschrieben möglich, aber hier nicht betrachtet.

Bei der Auslegung des Rekuperators musste ein Kompromiss zwischen der Baugröße, den Druckverlusten und der Temperaturdifferenz gefunden werden. Hierfür wurde als Maßstab der AHDE herangezogen. Bei vergleichbarer Baugröße und gleichen rauchgasseitigen Druckverlusten konnte ein Rohrrinnendruckverlust von 1 bar und eine Temperaturdifferenz von 35K eingehalten werden. Die wichtigsten Parameter der Simulationen sind in Tabelle 1 zusammengestellt.

Tabelle 1: Wesentliche Parameter der Kreislaufsimulation

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
	Frischdampf Temperatur (HD/ MD/ ND)	603/596/341°C
	Pinchpoint (HD/ MD/ ND)	20/20/15K
	Druckverlust Rauchgasseite	24 mbar
Rekuperator	$\Delta T$ Druckluftseite/ Rauchgasseite	35K
	Druckverlust Druckluftseite	1bar
	Druckverlust Rauchgasseite	25mbar
Umlaufgebläse	Leistungsbedarf	2,2MW
Dampfturbine	Auslegungsleistung	145MW
	Isentroper Wirkungsgrad	89,0%
	Kondensatordruck (Volllast)	33mbar



## 5 Simulationsergebnisse

### 5.1 Bewertungskriterien

Zur Bewertung des kombinierten (Speicher-)Kraftwerks müssen zunächst die wesentlichen Kenngrößen festgelegt werden. Hierfür wird der elektrische Gesamtwirkungsgrad definiert als Verhältnis der Leistung beim Ausspeichern  $P_{el,aus}$  zu der für die Erzeugung der ausgespeicherten Druckluftmenge aufgewandten elektrischen Leistung  $P_{el,ein}$  und der Feuerungswärmeleistung  $\dot{Q}_F$  (basierend auf dem Heizwert des Brenngases):

$$\eta_{el} = \frac{P_{el,aus}}{P_{el,ein} + \dot{Q}_F} \quad (1)$$

Die Angabe eines aussagekräftigen Speicherwirkungsgrades ist in der kombinierten Bauweise nicht trivial. Zur Ermittlung wird die Anlage als Summe eines reinen GuD-Kraftwerks und eines reinen Energiespeichers betrachtet. Die elektrische Leistung  $P_{el,GuD}$ , die ein gleichwertiges GuD-Kraftwerk mit der gleichen Feuerungswärmeleistung erzeugt, wird von der elektrischen Leistung beim Ausspeichern  $P_{el,aus}$  abgezogen. Die daraus resultierende Speicherleistung wird durch die aufgewandte elektrische Leistung  $P_{el,ein}$  beim Einspeichern der äquivalenten Druckluftmenge geteilt:

$$\eta_{sp} = \frac{P_{el,aus} - P_{el,GuD}}{P_{el,ein}} \quad (2)$$

### 5.2 Vergleich der Ausspeichervarianten

Die Ergebnisse der Simulation für die drei Varianten sind in Abb. 7 dargestellt. Als Referenz ist das ebenfalls mit identischen Parametern simulierte GuD-Kraftwerk dargestellt. Dieses hat eine elektrische Ausgangsleistung von 479 MW. Es zeigt sich, dass die Version mit gefeuertem Expander sowohl mit 707 MW die höchste elektrische Leistung, wie auch mit 79,3 % den höchsten Speicherwirkungsgrad aufweist. Die Option mit ungefeuertem Expander hat eine Ausgangsleistung von 637 MW und mit 55,2 % den geringsten Speicherwirkungsgrad. Die Druckluftinjektion in die Gasturbine ermöglicht eine elektrische Leistung von 531,9 MW mit einer Speichereffizienz von 77,0 %. Dabei ist zu beachten, dass nur im Fall des gefeuerten und des ungefeuerten Expanders der gleiche Druckluftmassenstrom ein- und ausgespeichert werden kann. Für die Gasturbineninjektion beträgt der Massenstrom nur 25 % des Einspeichermassenstroms, entsprechend skaliert in der Grafik die aufgewandte elektrische Leistung.

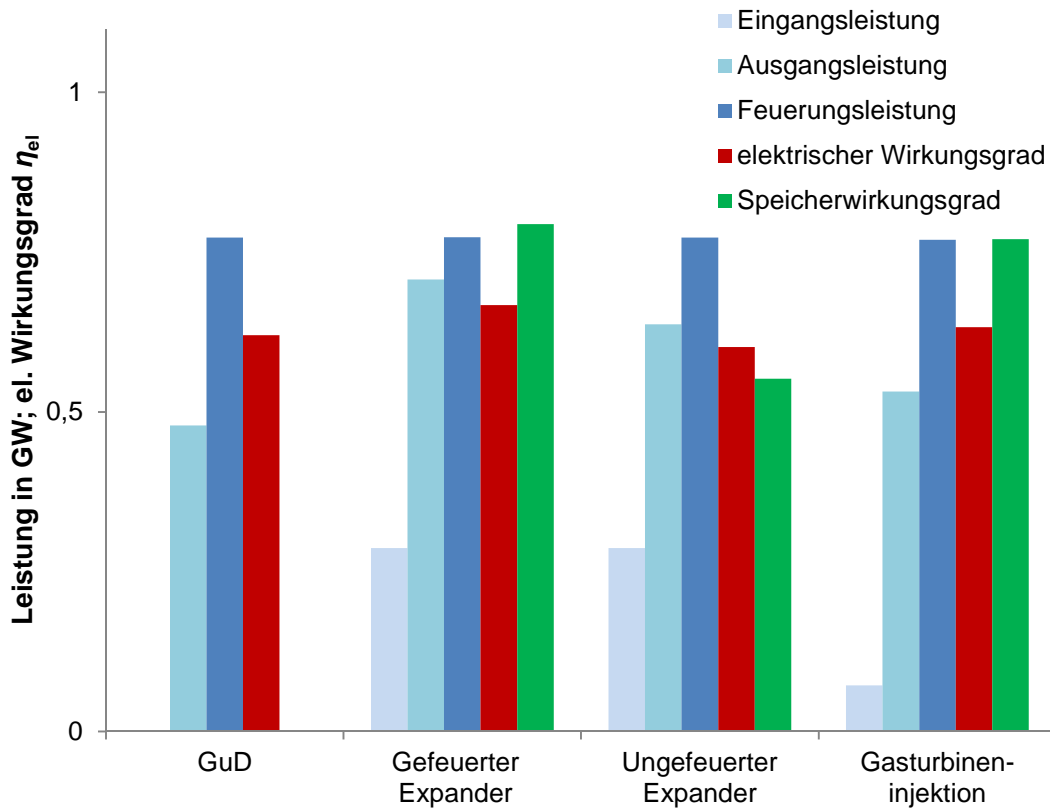


Abb. 7: Vergleich der spezifischen Leistungsparameter der verschiedenen Varianten

### 5.3 Vergleich mit weiteren Druckluftspeicherkonzepten

Abbildung 8 zeigt einen Vergleich der in der Simulation erzielten Wirkungsgrade mit den eingangs beschriebenen Konzepten.

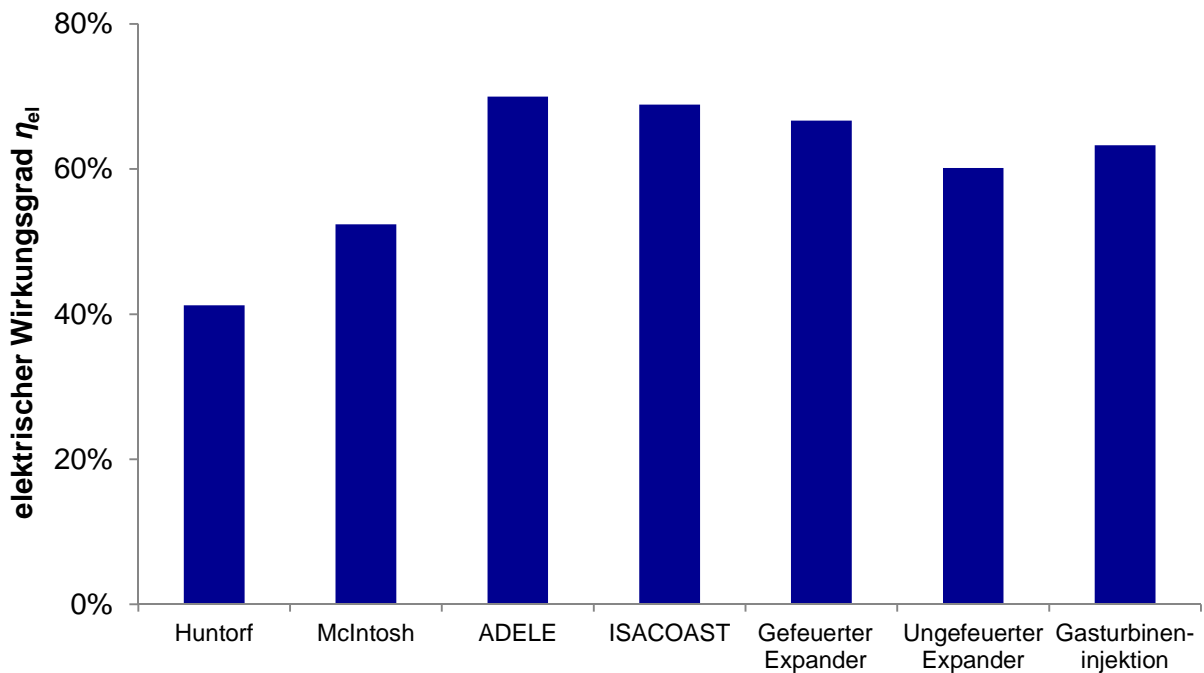


Abb. 8: Vergleich des elektrischen Wirkungsgrads mit anderen Druckluftspeicherkonzepten

Im reinen Gesamtwirkungsgradvergleich erzielen ADELE und ISACOAST mit 70 % bzw. 69 % etwas höhere Werte als die untersuchten Varianten (66,7 % / 60,1 % / 63,3 %). Die technisch nicht mehr aktuellen Anlagen in Huntorf und McIntosh liegen hier weit zurück. Für die Gesamtbewertung gilt es allerdings die technische Umsetzbarkeit der verschiedenen Anlagenkonzepte zu beachten.

#### **5.4 Anmerkungen zur technischen Umsetzbarkeit**

- **Gefeuertes Expander**

Es hat herausgestellt, dass einzelne gefeuerte Expander zwar technisch ohne Zweifel möglich sind, allerdings derzeit nicht kommerziell angeboten werden und erheblicher zeitlicher wie auch finanzieller Entwicklungsaufwand nötig wäre um diese bereitzustellen. Diese Nebenbedingung gilt neben weiteren auch für die Umsetzbarkeit des ISACOAST-Konzepts.

- **Ungefeuertes Expander**

Diese Einheiten sind auf dem Markt bereits je nach Leistungsklasse z.B. für Anwendungen in der Öl- und Gasindustrie verfügbar. Außerdem können für größere Anlagen wie in dieser Arbeit vorgestellt, Dampfturbinenderivate verwendet werden.

- **Gasturbineninjektion**

Dieser Ansatz ist vergleichbar zu einer Dampf-injektion in einer Steam Injected Gasturbine (STIG) bzw. einem Cheng Cycle. Die Druckluftinjektion in die Gasturbine ist maßgeblich durch die Eigenschaften des Gasturbinenverdichters, insbesondere dessen Pumpgrenze, beschränkt. Da es keine derartig modifizierte GT26-Anlage gibt, wurde um einen möglichst konservativen Ansatz zu wählen die Druckluftinjektion wie oben beschrieben auf 25% des nominellen Massenstroms der Gasturbine beschränkt. Zudem wurde um eine Überschätzung der Leistungsfähigkeit zu verhindern mithilfe des verstellbaren Vorleitgitters der Massenstrom durch den Verdichter in gleichem Maß vermindert. Da den Autoren kein Verdichterkennfeld der GT26 vorlag konnte keine Validierung dieses Ansatzes durchgeführt werden.

#### **5.5 Weitere bisher nicht betrachtete Vorteile**

Das neuartige Anlagenkonzept weist einige „weiche“ Vorteile auf, welche im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter quantifiziert werden konnten, aber Gegenstand zukünftiger Arbeiten sein werden. Diese sind die eingangs erwähnte schnelle Umschaltbarkeit zwischen Ein- und Ausspeicherbetrieb insbesondere im Vergleich mit ISACOAST, was eine Nutzung zur Regelleistungsbereitstellung ermöglicht. Der größte Vorteil gegenüber allen anderen bekannten Anlagenkonzepten ist jedoch die Möglichkeit zur Nutzung für die Kraft-Wärme-Kopplung.

KWK-Kraftwerke weisen bekanntermaßen einen höheren Gesamtwirkungsgrad auf als reine Stromerzeugungsanlagen. Weiterhin steigert KWK die Wirtschaftlichkeit von Kraftwerken, auch durch die Möglichkeit von Förderinstrumenten wie z.B. dem KWK-Bonus in Deutschland zu profitieren. Bisher wurde allerdings nach Wissenstand der Autoren noch kein

Versuch unternommen, ein Speicherkraftwerk „KWK-fähig“ zu machen. Erheblicher Vorteil eines KWK-Speicherkraftwerks ist die Kopplung der Strom- und Wärmenetze. Wenn ein hohes Angebot an erneuerbarem Strom im Netz vorhanden ist, sind die Strompreise i. d. R. niedrig und das Speicherkraftwerk befindet sich im Einspeicherbetrieb. So kann effektiv auch bei einem erdgasgefeuerten Speicherkraftwerk im Einspeicherbetrieb überschüssiger erneuerbar erzeugter Strom zur Wärmebereitstellung genutzt werden. Bei hohen Strompreisen, wenn das Speicherkraftwerk im Ausspeicher- oder im GuD-Betrieb befindet, wird die Wärme wie in konventionellen KWK-Anlagen aus fossilen Quellen bereitgestellt. Zudem ist die Wärmeauskopplung aus Druckluftabwärme exergetisch betrachtet wesentlich effizienter als Power-to-Heat, da nur niederexergetische Abwärme statt vollständig exergetischer elektrischer Strom als Wärme ausgekoppelt wird. Das System arbeitet demnach im Einspeicherbetrieb analog zu einer Hochtemperaturwärmepumpe. Somit weist das KWK-Speicherkraftwerk im Vergleich zu vorhandenen KWK-Anlagen ein großes Potential auf hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit und der CO<sub>2</sub>-Emissionen und es könnte einen großtechnischen Beitrag zur Wärmewende leisten.

## 6 Zusammenfassung

In dieser Studie wurde ein neuartiges Anlagenkonzept vorgestellt, bei welchem ein Druckluftspeicherkraftwerk mit einem GuD-Kraftwerk derart gekoppelt wird, dass eine Nutzung der Kompressionsabwärme ohne thermische Speicher möglich ist. Das Konzept beruht auf einer Rückverstromung der bei der Verdichtung anfallenden Wärme, so dass keine Wärmespeicher benötigt werden.

Es wurden drei verschiedene Konfigurationen des Konzepts in einer Kreislaufsimulation mit dem Programm Epsilon Professional® untersucht. Dabei zeigt sich, dass die erste Konfiguration mit gefeuerter Expansionsturbine eine Leistung von 707 MW und einen Speicherwirkungsgrad von 79,4 % aufweist. Diese Lösung ist jedoch nicht mit aktuell verfügbaren Komponenten realisierbar. Die zweite Alternative einer separaten ungefeuerten Luftturbine erzielt einen Speicherwirkungsgrad von 55,2 % und lässt sich mit einem geringeren Entwicklungsbedarf umsetzen. Als dritte Variante wurde die Injektion von Druckluft in eine Gasturbine betrachtet, deren Werte zwischen den beiden ersten Varianten liegen. Die Druckluftinjektion ist technisch möglich, jedoch wird die injizierbare Druckluftmenge durch das eingeschränkte Kennfeld des Gasturbinenkompressors begrenzt. Mit der dritten Konfiguration ist ein Speicherwirkungsgrad von 77,0 % möglich.

Im direkten Vergleich des elektrischen Wirkungsgrads mit den bestehenden Konzepten aus der Literatur zeigt sich, dass ADELE und ISACOAST prinzipiell etwas höhere Effizienzen aufweisen. Allerdings sind die dort angegebenen Werte ebenfalls im Hinblick auf die technische Umsetzbarkeit dieser Konzepte zu betrachten.

Der vermutlich größte Vorteil des neuen Anlagenkonzepts liegt in der Kraft-Wärme-Kopplung. Diese konnte aufgrund des Umfangs jedoch im Rahmen der hier vorliegenden Studie nicht mehr untersucht werden und ist, wie ebenfalls eine detaillierte Wirtschaftlichkeitsbewertung, Gegenstand zukünftiger Arbeiten.

## 7 Literatur

- [1] Rogers et. al., Compressed air energy storage: Thermodynamic and economic review, IEEE Power and Energy Society General Meeting, Issue October, 29 October 2014, Article number 6939098
- [2] Nakhamkin et al., AEC 110 MW CAES plant. Status of project, Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, Volume 114, Issue 4, October 1992, Pages 695-700
- [3] Schainker et al., Compressed-Air Energy Storage (CAES): Overview, Performance and Cost Data for 25MW to 220MW Plants, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Volume PAS-104, Issue 4, April 1985, Pages 791-795
- [4] ADELE Broschüre, online verfügbar unter:  
[http://www.dlr.de/portaldata/1/resources/standorte/stuttgart/broschuere\\_adele\\_1\\_.pdf](http://www.dlr.de/portaldata/1/resources/standorte/stuttgart/broschuere_adele_1_.pdf), zuletzt abgerufen Januar 2016
- [5] Moser et al., Status der Entwicklung des adiabaten Druckluftspeichers ADELE, Leopoldina-Symposium Halle (2014), online verfügbar unter:  
[http://www.leopoldina.org/fileadmin/redaktion/Politikberatung/pdf/Peter\\_Moser\\_-\\_Druckluftspeicher.pdf](http://www.leopoldina.org/fileadmin/redaktion/Politikberatung/pdf/Peter_Moser_-_Druckluftspeicher.pdf), zuletzt abgerufen Januar 2016
- [6] Nielsen et al., Druckluftspeicherkraftwerke zur Netzintegration – ISACOAST CC, 4. Göttinger Tagung zu aktuellen Fragen zur Entwicklung der Energieversorgungsnetze, Göttingen (2012), online verfügbar unter: [https://www.efzn.de/uploads/media/Fachforum\\_1\\_-\\_Zusammenfassung.pdf](https://www.efzn.de/uploads/media/Fachforum_1_-_Zusammenfassung.pdf), zuletzt abgerufen Januar 2016
- [7] Buttler, A.; Hentschel, J.; Kahlert, S.; Angerer, M., 2015, „Statusbericht Flexibilitätsbedarf im Stromsektor“, Schriftenreihe Energiesystem im Wandel, Technische Universität München, Garching bei München, Deutschland
- [8] De Biasi et al., Air injected power augmentation validated by Fr7FA peaker tests, Gas Turbine World: March-April 2002, Pages 12-15
- [9] Alstom, The Next Generation KA24/GT24 From Alstom, The Pioneer In Operational Flexibility, Technischer Bericht, online verfügbar unter:  
<http://www.energiadebate.com/alstom/Turbina%20de%20Gas%20GT24/GT24%20-%20Technical%20Paper.pdf>, zuletzt abgerufen Januar 2016