

Primärregelung von solarthermischen Kraftwerken in Südafrika

Untersuchung technischer Lösungen mit thermischem Speicher

Ausgangssituation:

In Südafrika müssen Kraftwerke mindestens **3 % ihrer Nennleistung** als Primärregelleistung bereitstellen. Die Primärregelleistung muss dort innerhalb **10 s** vorhanden sein und für **10 min** verfügbar bleiben. Für solarthermische Kraftwerke gelten bislang Ausnahmeregelungen, da sie bislang keine Möglichkeit haben, ihre Leistung innerhalb von 10 s zu ändern. Verstellen der Spiegel dauert **etwa 15 min** und für Kraftwerke mit Salzspeicher ist dessen thermische Trägheit zu hoch; der Leistungsgradient des Salzspeichers beträgt **4 %/min**.

Die Arbeit untersuchte die beiden Möglichkeiten **Gefälle-Dampfspeicher** und **Widerstandserwärmung** für verschiedene betriebliche Aspekte – sowohl für das Parabolrinnenkraftwerk als auch für das Turmkraftwerk.

Gefälle-Dampfspeicher:

Durch Erfahrungen in konventionellen Kraftwerken ist der Gefälle-Dampfspeicher bereits eine bekannte Technik und zeichnet sich dadurch aus, dass er unmittelbar Dampf aufnehmen und bereitstellen kann. Da der Speicherinhalt im Nassdampfzustand vorliegt, ist die volumetrische Leistungsdichte des Dampfspeichers hoch. Ein weiterer Vorteil ist, dass der Dampf direkt gespeichert wird; d.h. es entstehen keine Verluste durch Energieumwandlung – der Dampf kann direkt wieder entnommen und zur Turbine geleitet werden. Verluste, die durch das Laden und Entladen entstehen und Wärme, die über die Behälterwand an die Umgebung abgegeben wird, sind sehr gering. Trotzdem ist der Dampfspeicher keine optimale Lösung. Der Dampfspeicher liefert **Sattdampf**, dessen **Druck während der Entladung abnimmt**. Dies kann zu Problemen im Turbinenbetrieb führen. Mögliche nachgeschaltete Verdampfer bzw. Überhitzer erhöhen den Exergieverlust des Dampfes. Außerdem sind die Kosten für einen Druckbehälter sehr hoch und steigen mit zunehmendem Druck.

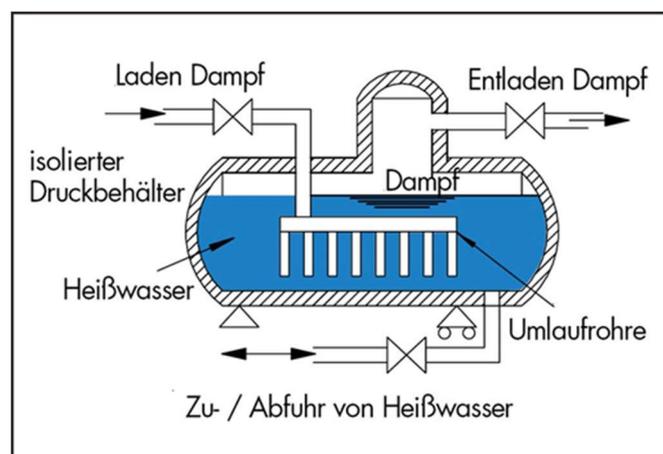


Abb. 1: Aufbau und Funktionsweise eines Gefälle-Dampfspeichers

Das Dampfspeichervolumen ist abhängig von der nötigen Energie, die zu speichern ist; also indirekt vom Umwandlungswirkungsgrad der thermischen in elektrische Energie. Da dieser Wirkungsgrad im Turmkraftwerk mit 35 % 5 % besser ist als der im Parabolrinnenkraftwerk, ist ein möglicher Dampfspeicher im Parabolrinnenkraftwerk größer als ein Dampfspeicher im Turmkraftwerk. Für einen Dampfspeicher, der von 100 bar auf 50 bar entladen wird („Ausgangsmodell“), ergibt sich ein nötiges Dampfvolumen von ca. 33 m³ im Parabolrinnenkraftwerk bzw. ca. 28 m³ im Turmkraftwerk. Verschieden betriebliche Aspekte zeigen auf, wie stark das Dampfvolumen beeinflusst werden kann. Die Tab. 1 zeigt zusammenfassend diese Ergebnisse.

Tab. 1: Vergleich verschiedener Betriebsweisen mit Gefälle-Dampfspeicher bzgl. spez. Speicherkapazität und bzgl. dem nötigen Dampfspeichervolumen

Modell/ Variante	Spezifische Speicherkapa- zität [kg/m ³]	Bokpoort CSP		Khi Solar One CSP	
		Zu speichernde Energie [MJ]	Speichervolumen [m ³]	Zu speichernde Energie [MJ]	Speichervolumen [m ³]
Ausgangsmodell	96,85	3.000	32,97	2.571	28,26
HD-Turbine mit 30 % Leistungsabgabe	96,85	9.900	108,8	8.486	93,3
Dampfgefälle von 120 auf 100 bar	39,4	3.000	86,15	2.571	73,85
Negative PRL	96,85	6.000	65,94	5.143	56,52

Widerstandserwärmung:

Die Widerstandserwärmung, die aus elektrischer Energie über einen Widerstand Wärme erzeugt, ist ebenfalls eine bekannte Technik und wird durch den Zuwachs an erneuerbarer Energien zunehmend auch für große Leistungsbereiche interessant. Um die Widerstandserwärmung zu installieren, werden ein **Transformator**, der die Spannung von 15 kV auf 690 V transformiert, ein **Thyristor** und der eigentliche **Heizwiderstand** benötigt. Da die Wirksamkeit der Solarabsorber umso besser ist, je niedriger die Temperatur des Wassers/Dampfes im Dampfkraftwerksblock ist, ist die Verwendung der entstehenden Wärme im Dampfkraftwerksblock nicht sinnvoll. Vor allem im Parabolrinnenkraftwerk, in welchem das Sonnenlicht schwächer konzentriert wird als im Turmkraftwerk, hätte eine zusätzliche Beheizung von Vorwärmer, Verdampfer oder Überhitzer negative Auswirkungen auf den Absorberwirkungsgrad. Deshalb wurde vorgeschlagen, die entstehende Wärme der Widerstandserwärmung im Parabolrinnenkraftwerk zu nutzen, um den vorhandenen Salzspeicher zu beheizen. Für das Turmkraftwerk, bei welchem die Wirkungsgradeinbußen aufgrund der hohen Konzentrationen des Sonnenlichts geringer sind, wurde vorgeschlagen einen elektrischen Überhitzer zu installieren. Damit könnten unregelmäßige Dampfparameter, welche bei Schwankungen der Sonneneinstrahlung auftreten, verringert werden.

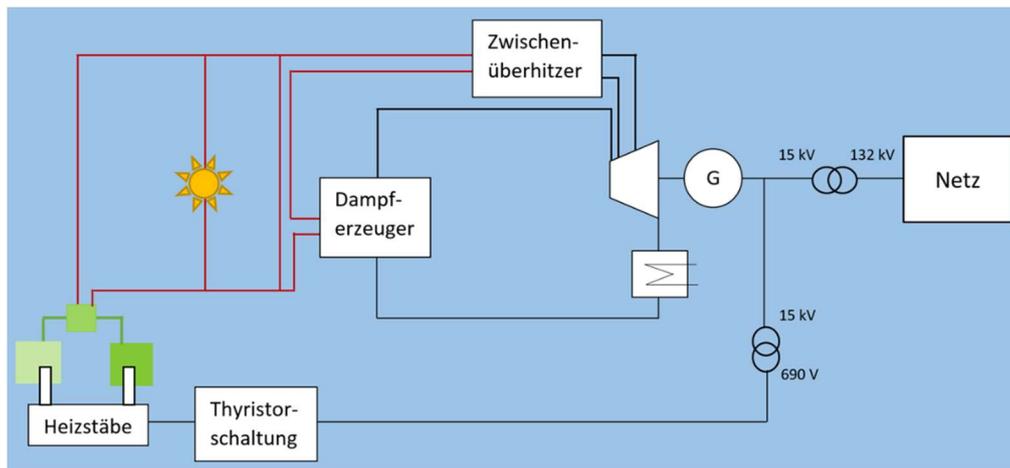


Abb. 2: Mögliche Verwendung der Widerstandserwärmung im Parabolrinnenkraftwerk (Beheizung Salzspeicher)

Vergleich der beiden Optionen und Ausblick:

Folgende Tabelle zeigt zusammenfassend die wichtigsten Unterschiede der beiden Option.

Tab. 2: Vergleich der beiden Optionen Gefälle-Dampfspeicher und Widerstandserwärmung

	Gefälle-Dampfspeicher	Widerstandserwärmung
Netzanforderungen	Benötigt ca. 9 min bis zum vollständigen Laden	Jederzeit verfügbar
Wirkungsgrad des solarthermischen Kraftwerks (bzgl. Dampferzeugung)	Ca. 30 %	Ca. 29 %
Platzbedarf	Mind. 10 mal größer	Alle Komponenten insgesamt kleiner
Kosten	Hohe Investitionskosten Geringe Betriebskosten	Geringe Investitionskosten Hohe Betriebskosten

Grundsätzlich ist die Regelung der elektrischen Energie mittels eines Widerstands sehr schnell und einfach. Primärregelleistung kann somit problemlos ohne Auswirkungen auf den Kraftwerksbetrieb bereitgestellt werden. Allerdings wird mit dieser Methode die höherwertige elektrische Energie in niederwertige thermische Energie umgewandelt. Diese so entstehende thermische Energie wird dann später wieder in elektrische Energie umgewandelt, was wiederum hohe Verluste zur Folge hat. Insgesamt verschlechtert sich der Wirkungsgrad des solarthermischen Kraftwerks mit Widerstandserwärmung um etwa 1 % gegenüber dem Kraftwerk, das einen Dampfspeicher zur Primärregelung einsetzt. Energetisch betrachtet ist damit der Dampfspeicher die bessere Lösung. Dies hat möglicherweise auch Auswirkungen auf die Wirtschaftlichkeit. Zwar sind die reinen Investitionskosten für einen Dampfspeicher deutlich höher als für eine Widerstandserwärmung – jedoch könnte aufgrund der Wirkungsgradeinbußen durch die Widerstandserwärmung der Dampfspeicher auf lange Sicht die bessere Lösung sein. V.a. wenn die solarthermischen Kraftwerke am Regelenergiemarkt teilnehmen und damit ständig Primärregelleistung vorhalten müssen. Wenn die solarthermischen Kraftwerke allerdings nur zu definierten Zeiten Primärregelleistung anbieten sollen – d.h. nur die technische Anforderung erfüllen müssen – würde möglicherweise seltener

Primärregelung angefordert; d.h. die Widerstandserwärmung würde wieder wirtschaftlicher werden. Andererseits könnte mithilfe einer Kombination aus Dampfspeicher und Salzspeicher auch Primärregelung betrieben werden, wenn der Dampfspeicher so ausgelegt wird, dass er nur für die erste Minute die Leistung regelt und danach der Salzspeicher die geforderte Leistung für die weiteren 9 min liefert. Eine dynamische Untersuchung wäre hilfreich, um auch hierfür zum einen die Dampfspeicherdimension und zum anderen die Wirtschaftlichkeit zu prüfen. Um die wirtschaftlich günstigste Option definieren zu können, wäre es sinnvoll eine Kapitalwertrechnung durchzuführen. Des Weiteren sollte zur Beurteilung des Dampfspeichers eine dynamische Berechnung durchgeführt werden, die die thermische Trägheit der Rohre und möglicher Überhitzer bzw. Entspannungsverdampfer berücksichtigt; denn dadurch verändert sich möglicherweise die Zeitkonstante des Systems. Ggf. ergeben sich daraus andere Betriebsarten des Dampfspeichers, welche ihn entweder vergrößern und damit teurer machen würden oder welche zu höherem Exergieverlust beitragen und damit ebenfalls den Dampfspeicher unattraktiv machen würden.