

Solar Topping von Dampfkraftwerken

Christoph Guder und Dirk Neumann

1.	Voraussetzungen für die Errichtung solarthermischer Anlagen	424
2.	Solarthermische Technologien.....	425
3.	Solar Topping von Dampfkraftwerken.....	426
4.	Zusammenfassung	429

Nachhaltigkeit und Umweltfreundlichkeit gewinnen bei der Stromerzeugung immer mehr an Bedeutung. Der Fokus wurde in den letzten Jahren insbesondere auf die Vermeidung von Emissionen gerichtet. Dies kann sowohl durch den Bau effizienterer Kraftwerke als auch durch einen massiven Ausbau von Anlagen zur Nutzung von erneuerbaren Energien, wie zum Beispiel Wind- und Solarenergie, erreicht werden. Während Windenergieanlagen seit Jahrzehnten eine stetige Weiterentwicklung durchlaufen haben, erlebte die Solarthermie vor allem in den letzten Jahren eine Renaissance.

Solarthermische Anlagen zur Stromerzeugung, sogenannte Stand-alone CSP-Kraftwerke (Concentrating Solar Power), weisen dabei viele Analogien zur Stromerzeugung aus fossilen Brennstoffen auf. Während der Wärmeeintrag durch die Sonnenenergie über Solar Kollektoren erfolgt, ist der angeschlossene Wasser-Dampf-Kreislauf vergleichbar mit dem bei fossil-befeuerten Dampfkraftwerken. Es kann also auf bewährte Kraftwerkstechnik zurückgegriffen werden. Eine interessante Option sind sogenannte Solar Topping Systeme, eine Kombination von solarthermischen Anlagenkomponenten und fossil-befeuerten Dampfkraftwerken.



Abb: 1:

Solar Topping von Dampfkraftwerken

1. Voraussetzungen für die Errichtung solarthermischer Anlagen

Im Gegensatz zur Photovoltaik kann bei solarthermischen Anlagen zur Stromerzeugung nur der direkte Strahlungsanteil der Sonnenstrahlung zur Fokussierung und damit zur Wärmeerzeugung genutzt werden. Der diffuse und reflektierte Strahlungsanteil trägt nicht messbar zur erzeugten Leistung bei. Aus diesem Grund ist ein geeignetes Direktstrahlungsangebot am Standort eine grundlegende Voraussetzung für die Errichtung von solarthermischen Anlagen. Wolken oder diesige Wetterbedingungen, die zu ausschließlich diffuser und reflektierter Strahlung führen, verursachen bei solarthermischen Anlagen einen Ausfall der *Brennstoffversorgung*.

Bewertet werden können Standorte durch DNI-Werte (Direct Normal Irradiation). In Vorstudien und Machbarkeitsstudien können Datensätze aus Modellen und Satellitenmessungen herangezogen werden. Es empfiehlt sich dabei ein Vergleich verschiedener Quellen, um eine gute Bewertungsgrundlage zu schaffen. Vor der Errichtung einer solarthermischen Anlage ist allerdings die Aufstellung einer Bodenmessstation zur Messung von DNI-Werten und Wetterdaten über mindestens ein Jahr dringend empfehlenswert, um eine solide Basis für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung zu haben.

Für die Aufnahme von Strahlungsmesswerten bieten sich verschiedene Messgeräte an. Eine Messeinheit mit Pyrheliometer und Pyranometer zeichnet sich durch eine geringe Messunsicherheit, allerdings auch durch hohe Investitionskosten und hohen Wartungsaufwand aus. Eine Alternative ist ein sogenanntes Rotating Shadowband Pyranometer, das eine höhere Messunsicherheit aufweist, aber deutlich weniger kosten- und wartungsintensiv ist. Durch eine entsprechende Kalibrierung kann die Qualität der aufgenommenen Messwerte deutlich erhöht werden.

Mittels der aufgenommenen, hochpräzisen Bodenmessungen können langjährig verfügbare Satellitenmessdaten neu ausgewertet und dadurch die Bewertungsgrundlage deutlich verbessert werden. Dazu müssen die Bodenmessungen und Satellitendaten im gleichen Messzeitraum vorliegen. Durch die Bestimmung von Korrekturfaktoren und das Korrigieren der Satellitendaten, kann dann ein Zeitraum nutzbar gemacht werden, der die Bildung langfristiger Mittelwerte zulässt und in dieser Weise den Einfluss von den unvermeidbaren Jahresschwankungen reduziert.

Standorte mit exzellenten Strahlungsbedingungen finden sich in der MENA-Region (Middle East and North Africa), dem südlichen Afrika, USA, insbesondere Kalifornien, Teilregionen Chiles und Argentiniens sowie in Australien. Außerdem gibt es viele weitere Regionen mit noch sehr guten oder guten Direktstrahlungsbedingungen, wie z.B. Süd-Spanien, Süd-Türkei oder Teilregionen Indiens. Eine zuverlässige Bewertung eines Standorts allein auf Grundlage der geografischen Koordinaten ist dabei nicht möglich.

Neben den Strahlungsbedingungen ist eine weitere wichtige Standortvoraussetzung die Verfügbarkeit einer großen, möglichst ebenen Fläche ohne Neigung. Solarthermie ist eine sehr flächenintensive Technologie. Die Leistung einer Anlage ist dabei direkt abhängig von der Fläche, die zur Nutzung der einfallenden Strahlung verfügbar ist und damit von der Grundfläche zur Errichtung der Anlage. Die solarthermischen Kollektoren sind Präzisionsinstrumente, die der Sonne nachgeführt werden müssen. Das Auftreten von Längskräften ist so weit wie möglich zu vermeiden. Weist ein Gebiet Höhenunterschiede auf, sind mitunter umfangreiche Erdarbeiten nötig. Zum Ausgleich kann zum Beispiel eine Terrassierung erfolgen.

Neben Strahlung und Fläche muss am potentiellen Standort außerdem eine entsprechende Infrastruktur vorhanden sein. Eine wichtige Voraussetzung ist die elektrische Netzanbindung. Zudem muss ein CSP-Kraftwerk verkehrstechnisch zugänglich sein (z.B. für

Wartungs- und Instandhaltungsmaßnahmen). Da CSP-Kraftwerke viele Analogien zu fossil-befeuerten Dampfkraftwerken aufweisen, bestehen auch ähnliche Anforderungen. So wird z.B. Wasser für den Kreislauf-Prozess benötigt. Die Menge richtet sich wesentlich nach der Rückkühlungsart (Nass- oder Trockenkühlung). Zusätzlich ist bei solarthermischen Anlagen noch Wasser zur Spiegelreinigung erforderlich, um die thermische Leistung des Solarfeldes aufrecht zu erhalten. Gegebenenfalls ist auch eine geringfügige Zufeuerung von fossilen Brennstoffen notwendig (z.B. für eine Vergleichmäßigung der Stromerzeugung oder für ein fossil-befeuertes Frostschutzsystem).

2. Solarthermische Technologien

Derzeit werden für die Stromerzeugung mittels solarthermischer Anlagen vor allem vier Technologien genutzt: Parabolrinnenkollektoren, Fresnel-Kollektoren, Solarturmtechnologie und Dish-Sterling-Systeme. Allen Bauformen gemeinsam sind das Fokussieren der direkten Sonnenstrahlung zur Erzeugung von Wärme und das Nutzen dieser Wärme zur Stromerzeugung. Interessant für eine Kombination aus solarthermischen Anlagen und fossil-befeuerten Dampfkraftwerken sind derzeit vor allem Parabolrinnenkollektoren und Fresnel-Kollektoren. Beide Kollektorsysteme sind modular aufgebaut. Damit lässt sich die thermische Nennleistung eines Solarfeldes in diskreten Stufen variieren. In Abbildung 2 werden beide Kollektorbauformen schematisch dargestellt.

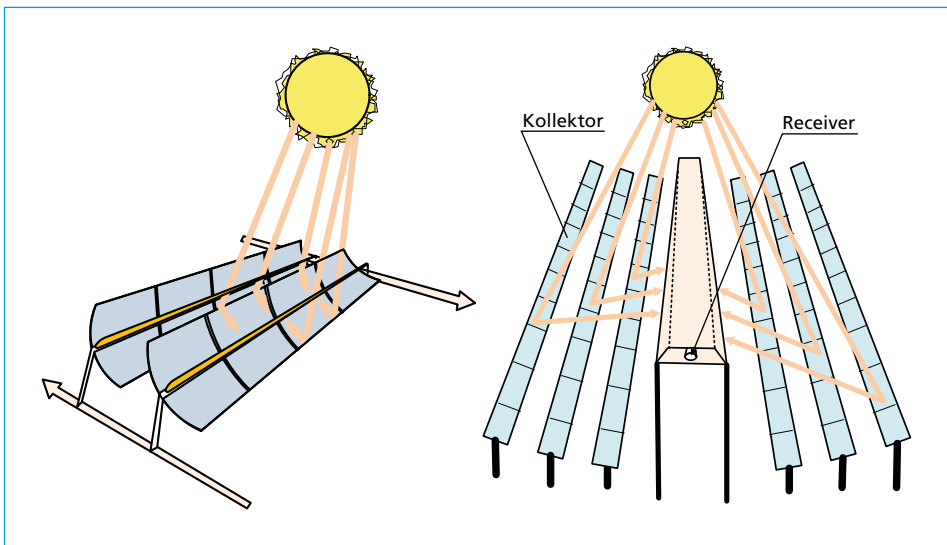


Abb. 2: Schematische Darstellung von Parabolrinnenkollektoren (links) und Fresnel-Kollektoren (rechts)

Als Stand der Technik können Parabolrinnenkollektoren angesehen werden. In den neunziger Jahren des letzten Jahrhunderts entstanden in Kalifornien die SEGS-Anlagen (Solar Energy Generating Systems) mit einer elektrischen Gesamtnennleistung von 354 MW_{el}, die aktuell noch in Betrieb sind und als einzige Solarkraftwerke eine Betriebsdauer von über 20 Jahren aufweisen. Darüber hinaus wenden auch die meisten Kraftwerksneubauten der letzten Jahre in Spanien diese Technologie an.

In fast allen kommerziellen Parabolrinnenkollektor-Anlagen wird derzeit ein Wärmeträgermedium verwendet, das die Sonnenenergie in den Receiverrohren als Wärme aufnimmt. In der Regel ist das Wärmeträgermedium ein Thermoöl, das in einem solaren Dampferzeuger für die Erzeugung von überhitztem Wasserdampf genutzt wird. Aufgrund der thermischen Stabilität des bisher meist verwendeten Thermoöls ist die Frischdampf Temperatur bei Parabolrinnenkollektoren auf etwa 380 °C (bei etwa 100 bar Frischdampfdruck) begrenzt. Eine Direktverdampfung in den Kollektoren hat sich bisher nicht kommerziell durchsetzen können, obwohl diese das Potential bietet, auf ein teures und nicht umweltfreundliches Wärmeträgermedium verzichten zu können und durch höhere Frischdampf Temperaturen die Effizienz von Stand-alone CSP-Kraftwerken erhöhen zu können.

Als Alternative zu Parabolrinnenkollektoren sind in den letzten Jahren als Sonderform die Fresnel-Kollektoren entwickelt worden. Im Gegensatz zu Parabolrinnenkollektoren, wo sowohl Spiegel als auch Receiverrohr der Sonne nachgeführt werden müssen, sind bei den Fresnel-Kollektoren nur die Spiegel nachzuführen. Das Receiverrohr ist fest installiert und muss nur die thermische Längenänderung ausgleichen. Die Parabolrinne wird dabei durch einzelne Spiegelstreifen nachgebildet, die jeweils so im Winkel zur Sonne gestellt werden müssen, dass die reflektierte Strahlung das Receiverrohr trifft. Durch die näher am Boden installierten Spiegel und die geringere Angriffsfläche wirkt auf das Gesamtsystem eine deutlich geringere Windlast.

Aufgrund des feststehenden Receiverrohrs hat sich bei Fresnel-Kollektoren die Direktverdampfung durchgesetzt. Allerdings ist der Stand der Technik die Erzeugung von gesättigtem Dampf mit etwa 55 bar und 270 °C. Damit werden deutlich geringere Frischdampfparameter erreicht als bei Parabolrinnenkollektoren. Als interessante Weiterentwicklung kann deshalb die direkte Erzeugung von überhitztem Dampf in den Fresnel-Kollektoren genannt werden. Allerdings ist dazu eine Modifikation der Kollektoren notwendig, weil an den Überhitzungsteil im Solarfeld deutlich höhere technische Anforderungen gestellt werden. Mit Fresnel-Kollektoren lassen sich zwar nur geringere optische Wirkungsgrade als bei Parabolrinnenkollektoren erreichen, durch die einfachere Bauform und eine bessere Flächennutzung hat diese Technologie aber durchaus das Potential einen Kostenvorteil gegenüber der Parabolrinnentechnologie zu erreichen.

3. Solar Topping von Dampfkraftwerken

Stand-alone CSP-Kraftwerke weisen viele Analogien zu fossil-befeuerten Dampfkraftwerken auf. Im Gegensatz zu der Wärmeerzeugung über die Verbrennung eines fossilen Rohstoffes, erfolgt der Wärmeeintrag durch die Fokussierung der solaren Direktstrahlung. Für die Stromerzeugung nutzen beide Kraftwerkstypen einen konventionellen Wasser-Dampf-Kreislauf. Unterschiede ergeben sich gegenüber modernen fossil-befeuerten Dampfkraftwerken (Frischdampfparameter von z.B. 265 bar und 600 °C) durch die geringeren Frischdampfparameter bei kommerziellen Parabolrinnenkraftwerken von etwa 100 bar und 380 °C oder bei Fresnel-Kraftwerken von etwa 55 bar und 270 °C (gesättigter Dampf). Dadurch lassen sich bei CSP-Kraftwerken nur geringere Wasser-Dampf-Kreislaufwirkungsgrade erreichen. Dennoch ist ein Großteil der Kraftwerkskomponenten bewährte Technik.

Ein grundlegender Nachteil solarthermischer Kraftwerke ist die direkte Abhängigkeit des Betriebs von der Sonnenstrahlung. Bei speicherlosen Kraftwerken ist eine Stromerzeugung nur möglich, wenn eine minimale Strahlungsintensität verfügbar ist. Der maximale Lastpunkt des Kraftwerks ist damit direkt vorgegeben. Allerdings lässt sich jederzeit eine reduzierte Last durch das Defokussieren von Spiegeln erreichen.

Durch den Einbezug eines thermischen Langzeitspeichers kann die direkte Abhängigkeit von der Sonnenstrahlung abgemindert werden. Dennoch kann selbst mit einem geeignet dimensionierten Speichersystem die Erzeugung einer geforderten Leistung nicht garantiert werden. Fällt durch eine ungünstige Wetterlage die direkte Sonnenstrahlung mehrere Tage aus, ist eine Stromerzeugung nur eingeschränkt oder gar nicht mehr möglich. Zudem muss in Abhängigkeit der Kapazität des Speichers das Solarfeld vergrößert werden, um auch bei Volllast den Speicher für die Nachtstunden füllen zu können. Eine Reihe zusätzlicher Komponenten und Nebensysteme sind notwendig, die die Investitionskosten signifikant erhöhen. Dennoch sind mit thermischen Speichersystemen geringere Stromgestehungskosten und eine zuverlässigere Stromerzeugung erreichbar. Je nach Standort, Speichersystem und verwendetem Wärmeträgermedium, muss zusätzlich eine externe Wärmequelle verfügbar sein (in der Regel fossil-befeuert), um in Anlagenkomponenten geforderte Temperaturniveaus bei Stillstand sicherzustellen. Das Abfahren eines bestimmten Lastfahrplans kann mit Stand-alone CSP-Kraftwerken nicht zuverlässig abgedeckt werden.

Eine sehr interessante Option stellt deshalb ein sogenanntes Solar Topping System dar. Bei diesem Konzept handelt es sich um die Kombination von solarthermischen Anlagen mit fossil-befeuerten Großkraftwerken. Während unter dem Namen ISCC-Kraftwerk (Integrated Solar Combined Cycle) bereits einige Anlagen als Kombinationen von GuD-Anlagen und Parabolrinnenkollektorfeldern realisiert wurden, ist eine Kombination von fossil-befeuerten Dampfkraftwerken und solarthermischen Anlagen noch im Erprobungsstadium. Dabei stellt gerade auch diese Kombination ein großes Potential dar.

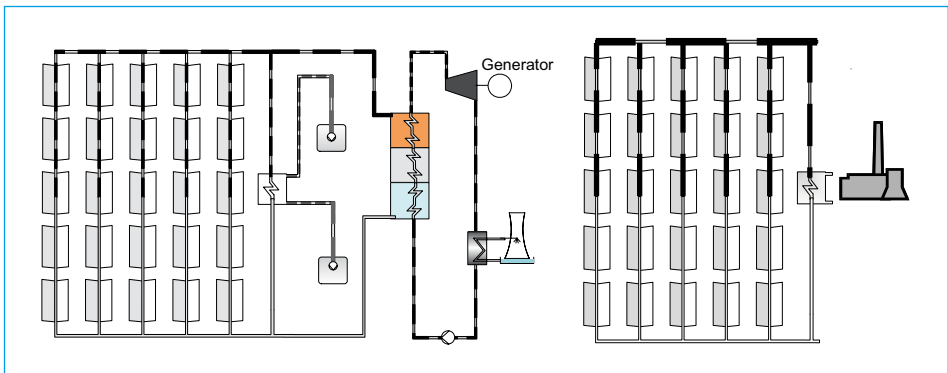


Abb. 3: Schematische Darstellung eines Stand-alone CSP-Kraftwerks mit thermischem Speichersystem (links) und einer Ankopplung eines Solarfelds an ein fossil befeuertes Kraftwerk (rechts)

Große Vorteile ergeben sich, wenn das Solarfeld an ein bestehendes Kraftwerk angekoppelt werden kann. In diesem Fall müssen lediglich das Solarfeld und die solaren Nebensysteme neu errichtet und an das bestehende Kraftwerk angeschlossen werden, siehe Abbildung 3. Auf Basis der Untersuchungen der STEAG Energy Services GmbH können die solaren Stromgestehungskosten gegenüber einem Stand-alone CSP-Kraftwerk um bis zu etwa 40 % gesenkt werden. Als weitere Vorteile lassen sich nennen:

- Nutzung vorhandener, hoch effizienter Kraftwerkskomponenten,
- Nutzung vorhandener Nebensysteme,
- zusätzliche Erzeugung von *grünem Strom* ohne Emissionen (insbesondere CO₂),

- erfahrene Kraftwerkspersonal vor Ort,
- bestehende Netzanbindung,
- bei Ausfall der Solaranlage kann Strom durch fossile Brennstoffe erzeugt werden,
- Rund-um-die-Uhr-Betrieb möglich,
- geringere solare Stromgestehungskosten als beim Stand-alone CSP-Kraftwerk erreichbar.

Als Einschränkungen sind zu nennen:

- Standort nicht frei wählbar,
- Betrieb der solarthermischen Anlage ist an den Betrieb des Kraftwerks gebunden,
- ausreichende Restlaufzeit des vorhandenen Kraftwerks erforderlich.

Bei bestehenden fossil-befeuerten Dampfkraftwerken kann ein Solarfeld dazu genutzt werden, eine Mehrleistung des Kraftwerksblocks zu erzeugen oder fossile Brennstoffe einzusparen, sowie einer Kombination daraus. Kann in dem jeweiligen Land ein Solartarif in Anspruch genommen werden, ist eine Methode zur Bestimmung des solar erzeugten Stromanteils zu vereinbaren.

Grundsätzlich ist ein solarthermisches Kollektorfeld selbstverständlich nicht nur als Nachrüstung möglich, sondern auch als Bestandteil eines Kraftwerkneubaus eines fossil-befeuerten Dampfkraftwerks. Dies bietet die Möglichkeit, die Kraftwerkskomponenten im Zusammenspiel mit dem solarthermischen Kollektorfeld entsprechend optimiert auszulegen.

Eine exergetisch günstige Einbindung von solar erzeugter Wärme in fossil-befeuerte Dampfkraftwerke, z.B. mit Steinkohlefeuerung, stellt die Nutzung in der Speisewasservorwärmstrecke dar, siehe Abbildung 4. In der Regel bietet sich eine Umfahrung der HD-Vorwärmer mittels eines neuen *solaren* Bypasses und eines zusätzlich installierten *solaren* HD-Vorwärmers an. Eine Umfahrung der gesamten Vorwärmstrecken, einschließlich der ND-Vorwärmer, ist thermodynamisch ungünstiger, weil die solar erzeugte Wärme auf einem deutlich geringeren mittleren Temperaturniveau eingebracht wird.

Die Einbindung der solar erzeugten Wärme kann durch verschiedene Konzepte realisiert werden. Eine Möglichkeit ist die direkte Einspeisung von Dampf in die Anzapfleitung der Turbine. Allerdings erfordert diese Lösung entsprechende Sicherheitssysteme. Um das neue Solarsystem und das fossil-befeuerte Kraftwerk weitgehend zu entkoppeln, bietet sich, wie oben bereits beschrieben, die Installation eines Bypass-Wärmetauschers an. Ein Vorteil ist die Unabhängigkeit von dem im Solarfeld verwendeten Wärmeträgermedium. Je nach Wahl müssen aber auch hier entsprechende Sicherheitskonzepte beachtet werden.

Wenn bei einem Solar Topping System die fossile Brennstoffzufuhr konstant gehalten wird, kann durch die Nutzung der solar erzeugten Wärme in der Vorwärmstrecke Anzapfdampf der HD- und MD-Turbine verdrängt werden und eine Mehrleistung am Generator erzeugt werden. Grundsätzlich ist natürlich auch möglich, die Stromerzeugung konstant zu halten und die fossile Brennstoffzufuhr zurückzufahren, d.h. fossile Brennstoffe einzusparen. Beide Konzepte lassen sich auch kombinieren.

Durch das Solar Topping stellen sich im fossil-befeuerten Dampfkraftwerk geänderte Betriebszustände ein. Insbesondere bei einer Nachrüstung eines bestehenden Kraftwerks müssen diese detailliert untersucht werden. Betroffen sind unter anderem die Hauptkomponenten Kessel und Turbine. Während im Kessel weniger Frischdampf erzeugt werden muss, um eine geforderte elektrische Leistung zu generieren, muss mehr Dampf in der

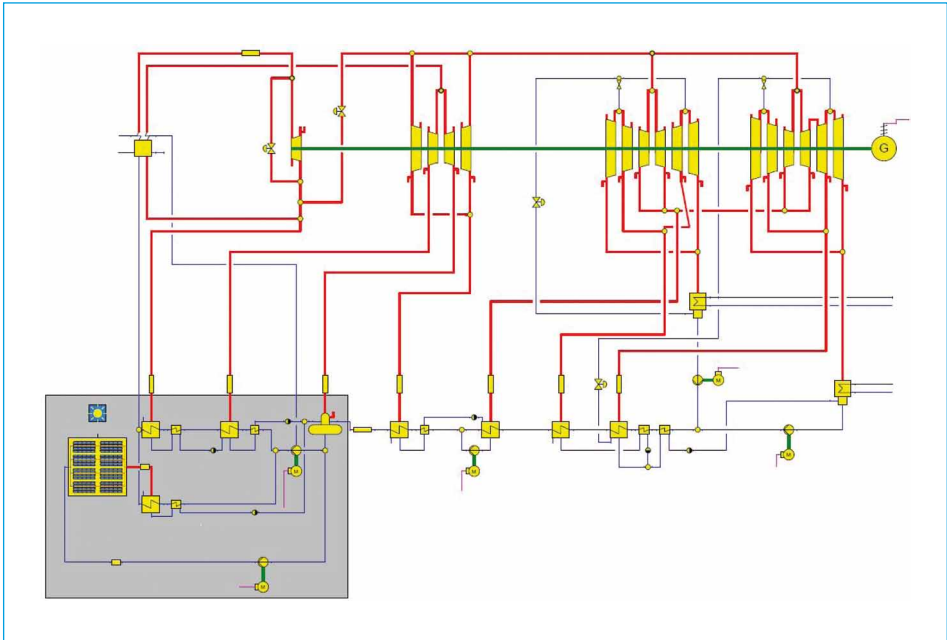


Abb. 4: Solar Topping System: Kombination aus fossil-befeuertem Dampfkraftwerk und solarthermischem Kollektorfeld und Nutzung der solar erzeugten Wärme zur Speisewasservorwärmung

Zwischenüberhitzung erwärmt werden. Die Turbine wird dementsprechend ungleichmäßiger belastet. Während weniger Frischdampf in die Turbine eintritt, verbleibt der verdrängte Anzapfdampf in der Turbine und führt zu einem größeren Dampf-Massenstrom im ND-Teil. Die Auswirkungen sind, abhängig von der Größe des Solar Topping Systems und der am Standort vorhandenen oder geplanten Kraftwerkstechnik, detailliert zu untersuchen.

Ein Solar Topping von fossil-befeuerten Dampfkraftwerken hat das Potential, bei entsprechender Direktstrahlung und Eignung der einzelnen Kraftwerkskomponenten, bis zu etwa 10 % zur Generatornennleistung beizutragen. Ein begrenzender Faktor ist häufig die direkt am Kraftwerk verfügbare und geeignete Landfläche zur Errichtung solarthermischer Anlagen.

4. Zusammenfassung

Die Kopplung von solarthermischen Komponenten mit fossil-befeuerten Kraftwerken ermöglicht das Abfahren eines geforderten Lastfahrplans und einen Rund-um-die-Uhr-Betrieb. Ein Teil der Kraftwerksleistung kann auf Basis erneuerbarer Energien erzeugt werden, so dass Emissionen eingespart werden können. Bei einer Nachrüstung eines bestehenden Dampfkraftwerks und Nutzung der hocheffizienten Kraftwerkskomponenten können die solaren Stromgestehungskosten deutlich gesenkt werden. Eine Methode für die Bestimmung des solar erzeugten Stromanteils muss allerdings vereinbart werden, wenn ein Solartarif genutzt werden kann.

Solarthermische Anlagen werden als reine solarthermische Kraftwerke oder als Kopplung mit fossil-befeuerten Kraftwerken einen Beitrag in dem Mix zur Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien leisten. Wie hoch dieser Beitrag ausfallen wird, hängt von den jeweiligen technischen und politischen Randbedingungen ab. Wesentlich wird, neben der Preisentwicklung für fossile Rohstoffe, eine Verringerung der Investitionskosten solarthermischer Anlagen und damit der Stromgestehungskosten im Vergleich zu anderen Technologien zur Nutzung von erneuerbaren Energien sein.