



# Solarthermische Kraftwerke

Wärme, Strom und Brennstoffe  
aus konzentrierter Sonnenenergie

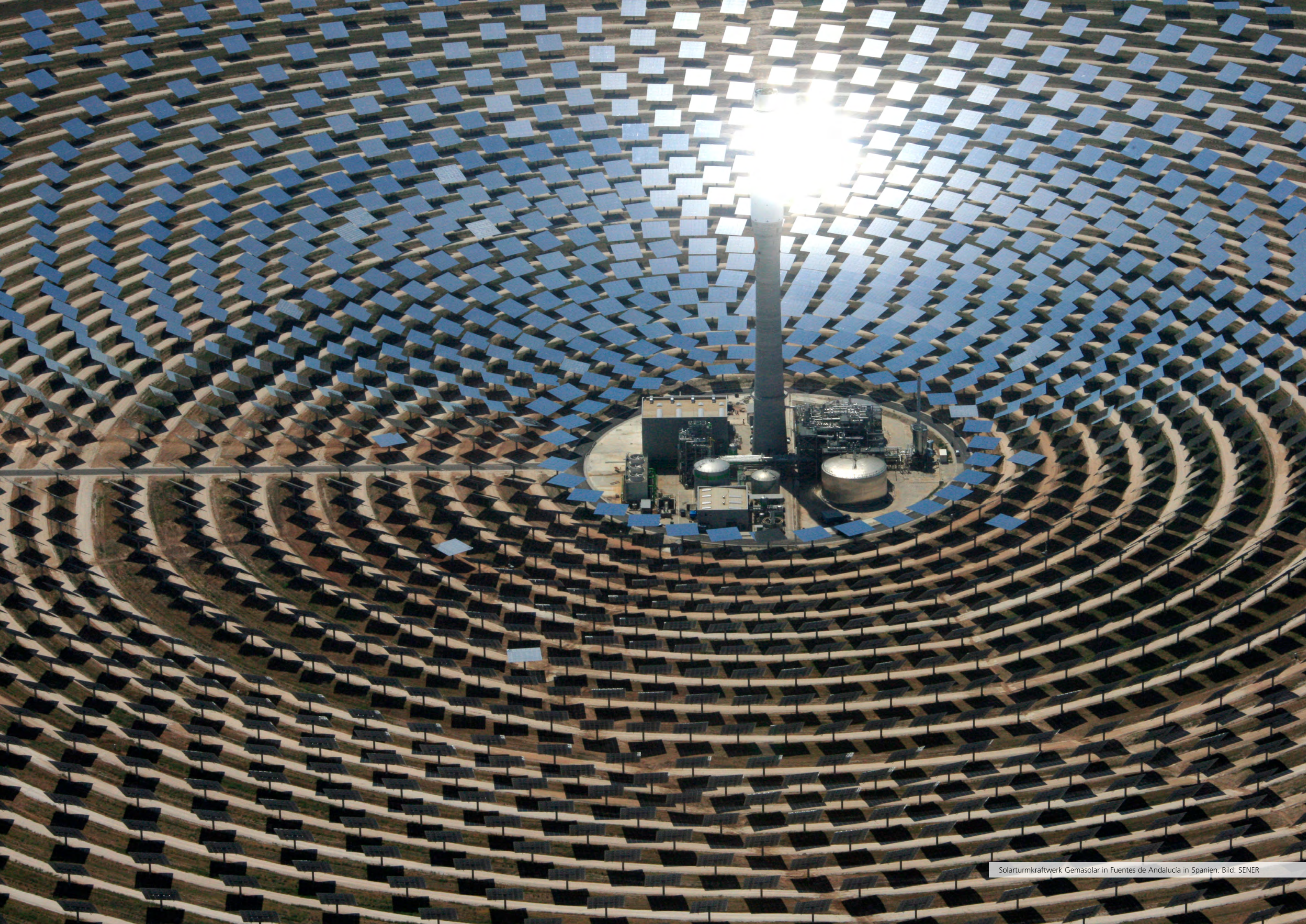


Kollektorstrang des Fresnel-Kraftwerks Puerto Errado, Spanien. Bild: NOVATEC

Titelbild: Solarthermisches Kraftwerk Ouarzazate Noor I & II, Marokko. Bild: SENER

# Inhaltsverzeichnis

|                                                                                                                            |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Einleitung                                                                                                                 | 06 |
| Fragenüberblick und Kernaussagen                                                                                           | 10 |
| 1. Wie funktioniert ein solarthermisches Kraftwerk?                                                                        | 14 |
| 2. Wie können solarthermische Kraftwerke zur Versorgungssicherheit beitragen?                                              | 16 |
| 3. Welche Rolle spielen solarthermische Kraftwerke in einem Energiesystem, das sich auf erneuerbare Energien stützt?       | 18 |
| 4. Sind solarthermische Kraftwerke konkurrenzfähig?                                                                        | 20 |
| 5. Wie wirken sich der Bau und der Betrieb von solarthermischen Kraftwerken auf die Umwelt aus?                            | 22 |
| 6. Welche Voraussetzungen sind für den Betrieb eines solarthermischen Kraftwerkes neben Sonneneinstrahlung noch notwendig? | 24 |
| 7. Welche Kompetenzen sind zum Bau und Betrieb solarthermischer Kraftwerke erforderlich?                                   | 26 |
| 8. Welche Relevanz hat die solarthermische Kraftwerkstechnologie für Deutschland?                                          | 28 |
| 9. Wo befinden sich die Märkte und wie sind die Rahmenbedingungen?                                                         | 30 |
| 10. Welche sozio-ökonomischen Folgen hat der Einsatz der Technologie?                                                      | 32 |
| 11. Welche Faktoren unterstützen eine beschleunigte Verbreitung der Technologie?                                           | 34 |
| 12. Wie kann die Technologie zur Sektorenkopplung beitragen?                                                               | 36 |
| 13. Wie können technische Innovationen die Kosten weiter senken?                                                           | 38 |
| 14. Welchen Beitrag leistet das DLR in der Forschungs- und Entwicklungsarbeit?                                             | 40 |
| Literaturverzeichnis                                                                                                       | 44 |
| Impressum                                                                                                                  | 51 |



# Einleitung

## Hintergrund

Solarthermische Kraftwerke (englisch: CSP plants = Concentrating Solar Power plants) sind eine noch wenig verbreitete Technologie, deren Bedeutung für den klimaneutralen Umbau des weltweiten Energiesystems häufig unterschätzt wird. Wachsende Anteile fluktuierender Einspeisung aus erneuerbaren Energiequellen wie Photovoltaik und Wind in die Stromnetze erfordern unter anderem eine Ergänzung durch regelbare Kraftwerke, damit jederzeit genau die aktuell nachgefragte Strommenge bereitgestellt werden kann. In Energiesystemen in sonnenreichen Ländern, die sich auf erneuerbare Energien stützen, können zukünftig solarthermische anstelle von fossilen Kraftwerken kostengünstig Grundlaststrom und Spitzenlaststrom liefern und die Stromnetze stabilisieren.

Mit rund sechs Gigawatt installierter Leistung weltweit im Jahr 2020 stehen solarthermische Kraftwerke noch am Anfang ihrer Markteinführung, vergleichbar etwa mit der Photovoltaik vor 15 Jahren oder der Windenergie vor 25 Jahren. Kostensenkungspotenziale durch Innovationen, Massenfertigung und zunehmenden Wettbewerb in einem wachsenden Markt sind also bei weitem noch nicht ausgeschöpft. Über die reine Stromerzeugung hinaus kann die Technologie auch zur Bereitstellung von Hochtemperaturprozesswärme oder zur Herstellung synthetischer Kraftstoffe eingesetzt werden und damit zur Dekarbonisierung des Industrie- und des Verkehrssektors beitragen.

Mit ihrer Exportorientierung und großen Kompetenz im Anlagen- und Maschinenbau hat die deutsche Industrie gute Voraussetzungen, sich in diesem Technologiefeld führend zu positionieren. Insbesondere kleinen und mittleren Unternehmen fehlt jedoch häufig die Finanzkraft, um sich bei großen Kraftwerksprojekten gegenüber dem internationalen Wettbewerb durchzusetzen.

Diese Kurzstudie gibt Entscheidern in Politik und Industrie sowie der interessierten Öffentlichkeit in kompakter Form wesentliche Fakten über Technologie, Auswirkungen und Potenziale solarthermischer Kraftwerke an die Hand. Sie ist zur schnellen Information und als Einstieg in die Thematik gedacht.

## Vorgehen und Methodik

Die Struktur der vorliegenden Studie orientiert sich an häufig gestellten Fragen zu unterschiedlichen Aspekten der CSP-Technologie. Dabei liegt der Schwerpunkt auf solarthermischen Kraftwerken zur Stromerzeugung. Andere potenzielle Anwendungsgebiete werden lediglich zusammenfassend dargestellt – mit Verweis auf separate Studien. Zur Beantwortung der Fragen wurden eigene Arbeiten des DLR und externe Quellen ausgewertet. Die Kurzantworten am Anfang fassen die wichtigsten Aussagen kurz und bündig zusammen. Leser erhalten hier einen umfassenden Gesamtüberblick über die Fragen und Antworten. Die einzelnen Aspekte werden in den ausführlichen Antworten vertieft.

## Zusammenfassung und Handlungsempfehlungen

Solarthermische Kraftwerke gewinnen aufgrund ihrer Fähigkeit zur bedarfsgerechten Stromerzeugung wachsende Bedeutung für ein zukünftiges, klimaneutrales Energiesystem. Für eine beschleunigte Verbreitung der Technologie sind jedoch weitere Maßnahmen erforderlich:

- Entwicklung und Demonstration von Innovationen zur Kostensenkung, insbesondere durch Wirkungsgradsteigerung, Qualitätssicherung und digital unterstützte Betriebsoptimierung.
- Abbau von innovationshemmenden Marktbarrieren durch Realisierung von Referenzanlagen.
- Unterstützung mittelständischer Unternehmen bei der Absicherung von Projektrisiken und dem Aufbau von Produktionskapazitäten.
- Einstieg in andere Anwendungsbereiche wie die Wärme- und Brennstoffherzeugung durch Unterstützung von Demonstrationsvorhaben.

Der schnelle Ausbau der Kapazitäten solarthermischer Kraftwerke und der dadurch verfügbaren Netzdienstleistungen ermöglicht wachsende Anteile von Photovoltaik (PV) und Windenergie im zukünftigen Strommix.



Solarthermisches Kraftwerk Andasol 3 in der Provinz Granada, Spanien. Bild: Marquesado Solar

# Wesentliche Fakten zu solarthermischen Kraftwerken

---

## 1. Wie funktioniert ein solarthermisches Kraftwerk?

Ein solarthermisches Kraftwerk (engl. CSP plant = Concentrating Solar Power plant) funktioniert wie ein konventionelles Dampfkraftwerk, bei dem der Brennstoff durch konzentrierte Solarstrahlung ersetzt wird. Zur Bündelung des Sonnenlichts nutzt es verschiedene Systeme nachgeführter Spiegel. Ein integrierter Wärmespeicher ermöglicht die bedarfsgerechte Stromproduktion unabhängig von der im Tagesverlauf schwankenden Solarstrahlung. Bei Bedarf kann eine Zusatzfeuerung mit fossilen oder regenerativen Brennstoffen auch längere strahlungsarme Zeiträume überbrücken.

## 2. Wie können solarthermische Kraftwerke zur Versorgungssicherheit beitragen?

Der größte Zuwachs der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energiequellen kommt heute aus Windkraft- und Photovoltaikanlagen. Deren Einspeisung ins Stromnetz schwankt jedoch mit dem Wind und der Sonneneinstrahlung. Aktuell gibt es noch keine Lösungen zur rentablen Speicherung großer Strommengen, um diese Schwankungen auszugleichen. Solarthermische Kraftwerke speichern Wärme statt Strom, was aktuell etwa 80 bis 90 Prozent günstiger ist. Damit können sie auch dann Solarstrom erzeugen, wenn die Sonne gerade nicht scheint. Sie sind sogar gleich doppelt gegen sogenannte Dunkelflauten abgesichert: Ist der Speicher leer, lässt sich der Dampfprozess des Kraftwerks anstatt mit Solarwärme auch mit anderen erneuerbaren oder mit fossilen Brennstoffen antreiben.

## 3. Welche Rolle spielen solarthermische Kraftwerke in einem Energiesystem, das sich auf erneuerbare Energien stützt?

In einem Energiesystem mit überwiegend erneuerbaren Energiequellen entsteht mit dem zunehmenden Ausbau von Photovoltaik eine systematische Versorgungslücke in den Tagesrand- und Nachtzeiten. In sonnenreichen Ländern sind solarthermische Kraftwerke geeignet, diese Lücke zu füllen, da sie mit ihrem Wärmespeicher und als Hybridkraftwerke jederzeit flexibel Strom produzieren können. Solarthermische Kraftwerke können dort fossile Kraftwerke in ihrer Rolle als Grundlast- und Spitzenlastkraftwerke ablösen. Zur direkten, dezentralen Stromversorgung von Industriegebieten sind kleinere CSP-Anlagen dann wirtschaftlich interessant, wenn die Industriekunden neben Strom auch Prozesswärme abnehmen.

## 4. Sind solarthermische Kraftwerke konkurrenzfähig?

Strom aus solarthermischen Kraftwerken ist heute an guten Standorten bereits konkurrenzfähig gegenüber fossil erzeugtem Strom. PV- und Windstrom werden zwar zu niedrigeren Kosten angeboten, stehen allerdings nur dann zur Verfügung, wenn die Sonne scheint und der Wind weht. Mit ihren integrierten Wärmespeichern sind solarthermische Kraftwerke die günstigere Option für eine zuverlässige Stromversorgung in Zeiten unzureichender Einspeisung aus den im Tagesverlauf schwankenden Energiequellen Sonne und Wind. Mit zunehmender Verbreitung der Technologie werden die Kosten deutlich sinken.

## 5. Wie wirken sich der Bau und der Betrieb von solarthermischen Kraftwerken auf die Umwelt aus?

Solarthermische Kraftwerke zeichnen sich durch sehr niedrige Umweltauswirkungen aus. Insbesondere die Treibhausgasemissionen über den gesamten Lebenszyklus sind vergleichsweise gering. Der Landbedarf entspricht in etwa dem großer Photovoltaikanlagen. Im Kraftwerksprozess neuerer Kraftwerke reduziert der Einsatz von Trockenkühlung den Wasserverbrauch erheblich. Die Auswirkungen auf die Tier- und Pflanzenwelt sind gering. Es fallen nur sehr geringe Mengen an Schadstoffen an, die entsorgt werden können. Zudem haben solarthermische Kraftwerke eine hohe Lebensdauer von bis zu 40 Jahren.

## 6. Welche Voraussetzungen sind für den Betrieb eines solarthermischen Kraftwerkes neben Sonneneinstrahlung noch notwendig?

Ein CSP-Kraftwerk benötigt neben der direkten Solarstrahlung eine große Fläche für die Installation der Solarspiegel. Geeignet sind hierfür vegetationsarme Stein-, Fels- und Kieswüsten sowie Grasland, Buschland und Savannen, für die es praktisch keine anderen wirtschaftlichen Nutzungsmöglichkeiten gibt und die in den Regionen des Sonnengürtels nahezu unbegrenzt zur Verfügung stehen. Von Vorteil ist eine geringe Geländesteigung, eine vorhandene Netzinfrastruktur, die Verfügbarkeit von Wasser und ein geringes Risiko gefährlicher Naturereignisse. Weitere entscheidende Standortfaktoren sind ein niedriges Investitionsrisiko und günstige Finanzierungsbedingungen für Investoren.

## 7. Welche Kompetenzen sind zum Bau und Betrieb solarthermischer Kraftwerke erforderlich?

Ein Solarkraftwerk ist ein ähnliches Großprojekt wie ein konventionelles Dampfkraftwerk. Die Planung und der Bau des solaren Teils mit Spiegelsystem und Wärmeempfänger und seine Anbindung an den Dampfkreislauf erfordern jedoch spezielles Know-how. Weltweit verfügen nur wenige Großunternehmen über diese Qualifikation und sind in der Lage, die Verantwortung als Generalunternehmer zu übernehmen. Sie bedienen sich der Zuarbeit von Bauunternehmen, Komponenten- und Subsystemlieferanten sowie Ingenieur-Dienstleistern. Auch der Betrieb der Anlagen erfordert aufgrund der komplexen Technologie spezielle Kenntnisse, eine besondere Betriebserfahrung und Schulung.

## 8. Welche Relevanz hat die solarthermische Kraftwerkstechnologie für Deutschland?

Deutschland ist zur Erreichung seiner langfristigen Klimaschutzziele auf Energieimporte angewiesen. Mögliche Stromexporteure sind sonnenreiche Länder, in denen solarthermische Kraftwerke regelbaren Solarstrom bereitstellen können – auch für die Produktion von grünem Wasserstoff und synthetischen Kraftstoffen. Nimmt weltweit die Anzahl solarthermischer Kraftwerksprojekte zu, erwachsen daraus Exportchancen für deutsche Unternehmen und Forschungseinrichtungen mit einer breiten Wissensbasis zu solarthermischen Kraftwerkstechnologien. Dies sichert und schafft Beschäftigung in Deutschland. Forschung und Entwicklung in diesem Bereich wirken zudem als Katalysator für Unternehmensneugründungen. Auch in Deutschland können konzentrierende Solarsysteme direkt zur Anwendung kommen: zum Beispiel zur Wärmeversorgung mit erneuerbaren Energien in Fernwärmenetzen.

## 9. Wo befinden sich die Märkte und wie sind die Rahmenbedingungen?

Investitionen in solarthermische Kraftwerke werden bevorzugt an Standorten mit sehr vielen Sonnenstunden getätigt. Stabile wirtschaftliche und politische Verhältnisse sind weitere positive Faktoren für eine Ansiedlung. Projektentwicklung, Planung und Bau der Anlagen erfordern neben dem technischen Know-how eine tragfähige Absicherung der Investitionen.

## 10. Welche sozio-ökonomischen Folgen hat der Einsatz der Technologie?

Ein besonderer Aspekt von solarthermischen Kraftwerken im Hinblick auf die sozio-ökonomischen Effekte ist ihre geographische Lage. Da sie sich meist abseits von Ballungsräumen befinden, bieten sie besonders in strukturschwachen Regionen eine Entwicklungsperspektive. Dabei entstehen neben den direkten und indirekten Arbeitsplätzen auch induzierte Beschäftigungseffekte.

## 11. Welche Faktoren unterstützen eine beschleunigte Verbreitung der Technologie?

Solarthermische Kraftwerke benötigen für eine beschleunigte Verbreitung langfristig stabile Markt- und günstige Finanzierungsbedingungen sowie politische Unterstützung bei der Markteinführung. Durch einen steigenden Kraftwerkszubau und damit einhergehende Kostensenkungen wird zudem eine bessere Wettbewerbsfähigkeit erreicht. Auch verstärkte Forschung und Entwicklung zur Verbesserung von Einzelkomponenten und Systemen trägt dazu bei, die Kosten zu senken. Die Schaffung international anerkannter Qualitätsstandards für Komponenten und Verfahren würde sich darüber hinaus positiv auf die Risikobewertung durch Banken und damit auf die Finanzierungsbedingungen auswirken.

## 12. Wie kann die Technologie zur Sektorenkopplung beitragen?

Konzentrierende Solartechnologien haben ein großes Potenzial, zur Dekarbonisierung der Verbrauchssektoren Industrie und Verkehr beizutragen. Kurzfristig können sie – auch unter hiesigen Klimabedingungen – bei der Wärmeversorgung für Industrieprozesse bis circa 400 °C und der Fernwärmeversorgung zum Einsatz kommen. Hochtemperaturanwendungen bis über 1000 °C zur Erzeugung von Wasserstoff und anderen Grundstoffen benötigen gute Standorte im Sonnengürtel der Erde und befinden sich noch in einer vergleichsweise frühen Entwicklungsphase.

## 13. Wie können technische Innovationen die Kosten weiter senken?

Es wird erwartet, dass die Stromgestehungskosten von grundlastfähigen CSP-Systemen mithilfe technischer Innovationen bis 2030 auf etwa fünf US-Dollarcent pro Kilowattstunde halbiert werden können. Dazu tragen effizientere Kraftwerkzkreisläufe und neuartige Wärmeträgerfluide bei. Zudem können die Investitionskosten für Solar Kollektoren durch Einsparungen bei Serienfertigung und Montagelogistik sowie durch die Verbesserung der optischen Qualität und Nachjustierung erheblich gesenkt werden.

## 14. Welchen Beitrag leistet das DLR in der Forschungs- und Entwicklungsarbeit?

Das DLR ist seit über 40 Jahren maßgeblich an der Entwicklung konzentrierender Solarsysteme für solarthermische Kraftwerke beteiligt. Es hat seit Anfang der 2000-er Jahre die kommerzielle Markteinführung insbesondere in Spanien durch Standortanalysen, Kollektorentwicklung, Machbarkeitsstudien, Qualitätssicherungsmaßnahmen und die Ausbildung von Personal unterstützt. Heute basiert die hohe Leistung in den meisten Solarfeldern solarthermischer Kraftwerke weltweit auf Technologien, die vom DLR entwickelt und vermarktet wurden. In der DLR-Energieforschung sind über 200 Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus sieben DLR-Instituten mit Arbeiten im Forschungsgebiet konzentrierende Solartechnologien befasst. Gemeinsam mit Industriepartnern entwickeln und testen sie neue Technologien, die die Kosten von solarthermisch erzeugtem Strom weiter senken.

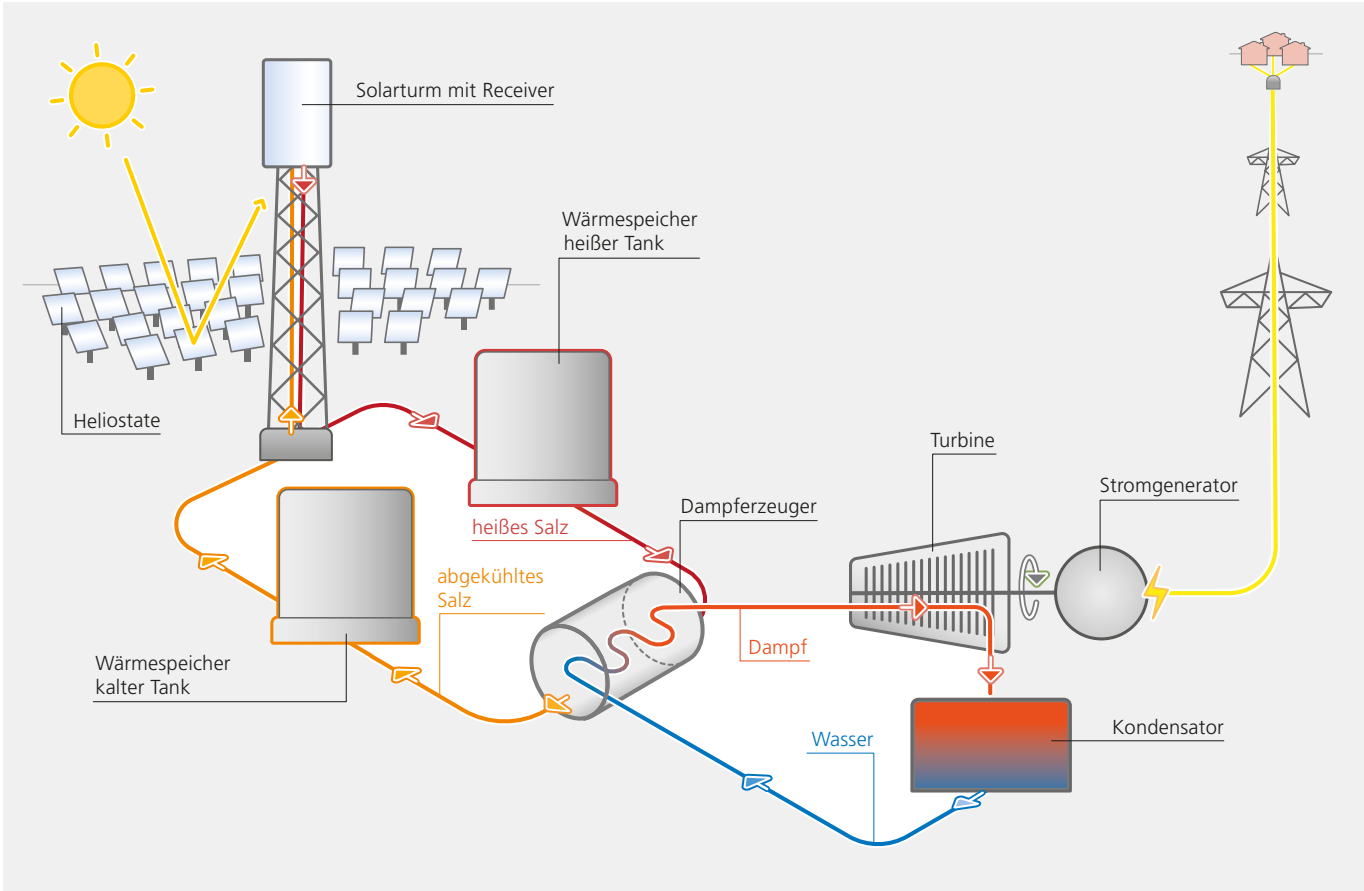
# Antworten auf häufig gestellte Fragen zu solarthermischen Kraftwerken

## 1. Wie funktioniert ein solarthermisches Kraftwerk?

Solarthermische Kraftwerke werden international als „Concentrating Solar Power Plants“ kurz „CSP plants“ bezeichnet.

Ein solarthermisches Kraftwerk konzentriert mit Hilfe von Spiegeln **direktes Sonnenlicht** und wandelt dieses in **Wärme** um. Damit produziert es Dampf zum Betrieb einer Turbine, die wiederum einen Generator antreibt, der die Bewegungsenergie in **Strom** umwandelt. **Integrierte Wärmespeicher** machen es möglich, dass das Kraftwerk unabhängig von der im Tagesverlauf schwankenden Solarstrahlung den Strom genau dann erzeugen kann, wenn er benötigt wird. Längere einstrahlungsarme Zeiten können durch Zusatzfeuerung mit fossilen oder regenerativen Brennstoffen überbrückt werden. Da Dampfturbinen erst ab einer gewissen Mindestgröße wirtschaftlich betrieben werden können, liegen heutige solarthermische Kraftwerke bei Nennleistungen im Bereich von 50 bis 200 Megawatt. Der wesentliche Unterschied zu einem konventionellen Dampfkraftwerk ist das Solarfeld, das die Wärme für den Dampferzeuger liefert.

Um die hohen Temperaturen für die Dampferzeugung zu erreichen, muss die Solarstrahlung stark konzentriert werden. Dafür ist nur das direkte Sonnenlicht nutzbar. Spiegel, die dem Lauf der Sonne nachgeführt werden, bündeln es auf einen Brennpunkt oder eine Brennnlinie. Je stärker die Konzentration, umso höhere Temperaturen können erreicht werden. Dadurch steigt den Gesetzen der Thermodynamik folgend der Wirkungsgrad des Kraftwerksprozesses. Je höher dieser ist, desto weniger Kollektorfläche benötigt das Kraftwerk zur Erzeugung der gewünschten elektrischen Leistung. Die technologische Herausforderung



Funktionsweise eines solarthermischen Kraftwerks, hier gezeigt für ein Solarturmkraftwerk. Bild: DLR

beim Solarfeld besteht darin, die erforderliche optische Präzision und gleichzeitige Robustheit gegen Umwelteinflüsse wie Wind und Temperaturschwankungen bei möglichst niedrigen Kosten zu realisieren. In der Praxis kommen drei verschiedene Grundprinzipien für die Konzentration der Solarstrahlung zum Einsatz: Solarturm-, Parabolrinnen- und Linear-Fresnel-Systeme.

Bei **Solarturmkraftwerken** lenken zweiachsig nachgeführte Spiegel, sogenannte Heliostate, die Sonnenstrahlung auf einen zentralen Strahlungsempfänger (engl. Receiver), der auf einem Turm angebracht ist. Ein Wärmeübertragungsmedium, üblicherweise Flüssigsalz oder alternativ Wasser/Dampf oder Luft, nimmt dort die Energie auf und transportiert sie in den Wärmespeicher und zum Kraftwerkskreislauf. Die Spiegelflächen der einzelnen Heliostate sind bis zu 200 Quadratmeter groß. In kommerziellen Kraftwerken sind mehrere tausend Stück davon im Halbkreis oder kreisförmig auf den Solarturm ausgerichtet. Ihre starke Strahlungskonzentration kann am Receiver Temperaturen von über 1000 °C erzeugen. In der Praxis werden die Anlagen je nach eingesetztem Wärmeträgermedium bei circa 300 °C bis 700 °C betrieben.

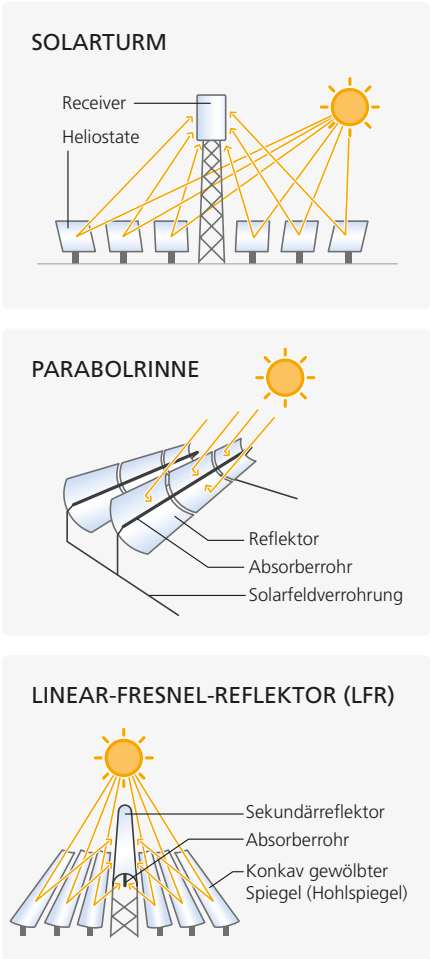
**Parabolrinnenkraftwerke** sind die bisher kommerziell am häufigsten realisierte Variante. Parabolisch geformte Spiegelrinnen werden hier einachsig der Sonne nachgeführt und fokussieren das Licht auf ein in der Brennnlinie verlaufendes Absorberrohr, in dem ein spezielles Thermoöl die Wärme aufnimmt.

Eine optisch selektiv wirkende Beschichtung auf dem Rohr absorbiert das sichtbare Licht und hemmt gleichzeitig die Abstrahlung von Wärme. Das Absorberrohr ist von einem etwas größeren Glasrohr umgeben, und ähnlich wie bei einer Thermoskanne gibt es zwischen den beiden Rohren ein Vakuum. Dadurch werden die Wärmeverluste noch weiter reduziert. Die Kollektoren sind bis zu sieben Meter breit, bis zu 200 m lang und werden mit Hilfe einer hydraulischen Antriebseinheit der Sonne nachgeführt. Die heute kommerziell eingesetzten Thermoöle erlauben eine Betriebstemperatur bis 400 °C.

**Fresnel-Kollektoren** funktionieren ähnlich wie Parabolrinnen. Der Konzentrador ist hierbei in langgestreckte, horizontal angeordnete und einzeln nachgeführte Facetten zerlegt. Das Absorberrohr ist ortsfest installiert. Diese Bauart ist wegen der geringen Windlasten besonders kostengünstig herstellbar und auch für die Aufstellung auf Flachdächern geeignet. Um den aufgrund der Kollektorgeometrie geringeren optischen Wirkungsgrad zu kompensieren, bedarf es rund 20 Prozent niedrigerer Kollektorkosten als bei Parabolrinnen (Morin 2012).

Eine wichtige Komponente solarthermischer Kraftwerke ist der **Wärmespeicher** (vgl. Frage 3). Kommerziell eingesetzt werden meist Zweitank-Systeme mit Flüssigsalz als Speichermedium. In Turmkraftwerken wird das Salz aus dem „kalten“ Tank (bei etwa 300 °C) direkt zum Solarreceiver gepumpt, dort auf über 500 °C erhitzt und zum „heißen“ Tank geleitet. Ein zweiter Kreislauf entnimmt bei Bedarf heißes Salz und führt es dem Dampferzeuger zu, von wo es wieder in den kalten Tank zurückgepumpt wird. Bei Parabolrinnenkraftwerken mit Thermoöl als Wärmeträgermedium erfolgt das Be- und Entladen des Salzspeichers indirekt über Wärmetauscher.

Der indirekte Weg, die Solarstrahlung zunächst in Wärmeenergie und erst dann in elektrische Energie umzuwandeln, erscheint umständlich im Vergleich zu PV-Solarzellen, die das Sonnenlicht sofort in Strom umwandeln. Tatsächlich liegt aber gerade darin der **Wert solarthermischer Kraftwerke für ein zukünftiges Energiesystem ohne fossile Brennstoffe**: Wärme lässt sich einfacher und kostengünstiger speichern als Strom, und mit der in der Wärme gespeicherten Sonnenenergie können solarthermische Kraftwerke auch noch nach Sonnenuntergang wirtschaftlich Solarstrom produzieren.



Solarthermische Konzentratortechnologien. Bild: DLR

## 2. Wie können solarthermische Kraftwerke zur Versorgungssicherheit beitragen?

Wärme lässt sich in großen Tanks mit Flusssalz 80 bis 90 Prozent günstiger speichern als Strom in Batterien.

Der größte Zuwachs bei der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien kommt heute aus Windkraft- und Photovoltaikanlagen. Neben den Überlegungen zum weiteren Ausbau der erneuerbaren Kapazitäten steht die Diskussion um **bedarfsgerechte Bereitstellung** und **Netzstabilität** im Vordergrund. Wind und Photovoltaik sind auf Stromspeicher angewiesen, um die Lieferung von Strom zeitlich flexibel gestalten zu können. Die Investitionskosten von modernen Batteriespeichersystemen sind jedoch aktuell mit 300 Euro pro Kilowattstunde noch vergleichsweise hoch und ihre Lebensdauer ist auf weniger als 10 Jahre begrenzt. Zudem fehlt es noch an Batteriespeichern im Gigawattstundenmaßstab (Cole 2020). Daher ist ein umfassender Ausgleich von Stromangebot und -nachfrage mit dieser Technologie wirtschaftlich bisher nicht vollständig möglich.



Wärmespeicher entkoppeln die Stromerzeugung von der „Ernte“ der Solarenergie. Bild: CSP Services

Wenn große Energiespeicherkapazitäten gefragt sind, lässt sich Wärme etwa 80 bis 90 Prozent günstiger speichern als Strom (Steinmann 2021; Schöniger 2021). Solarthermische Kraftwerke setzen daher auf die Speicherung des Zwischenprodukts Wärme und nicht des Endprodukts Strom. Die Stromerzeugung erfolgt mittels eines Dampfturbinenkreislaufs, der bedarfsorientiert betrieben und aus dem Wärmespeicher versorgt wird. Der Speicher entkoppelt somit die solare „Ernte“ von der bedarfsorientierten Stromerzeugung (Stadler 2019).

Für die Speicherung kommen heute vorwiegend **Flusssalzspeicher** zum Einsatz: Behälter mit bis zu 40 Metern Durchmesser und 15 Metern Höhe, die mit einem Gemisch aus Kaliumnitrat und Natriumnitrat als Wärmespeichermedium befüllt sind (Bauer 2021). Die Solarenergie erwärmt das bei 250 °C aufgeschmolzene Salz auf Temperaturen bis zu 560 °C. Sobald Strom erzeugt werden soll, versorgt der Speichertank einen Dampferzeuger mit Wärmeenergie. Der hier entstehende Dampf treibt dann einen klassischen Dampfturbinenprozess an.

Die in solchen Solarkraftwerken zum Einsatz kommenden Dampfturbinen lassen sich sehr flexibel betreiben und können der Nachfrage ideal folgen. Typische Anlagen verfügen heute über Speicherkapazitäten von sechs bis 15 Volllaststunden. Damit kann ein Betrieb rund um die Uhr oder gezielt zu Spitzenbedarfszeiten erfolgen. Der **Wärmespeicher** erlaubt die



Speicher und Kraftwerksteil des Parabolinnenkraftwerks Andasol 3. Bild: Marquesado Solar

Verschiebung von Energiemengen über einen oder wenige Tage hinweg. Da die Stromerzeugung flexibel an die Nachfrage angepasst werden kann, gehören solarthermische Kraftwerke zu den **regelbaren Kraftwerken**.

Liegt über mehrere Tage wetterbedingt wenig Solarstrahlung vor, spielen solarthermische Kraftwerke eine zweite Eigenschaft aus: Durch ihr Funktionsprinzip lassen sie sich **hybridisieren**. Das bedeutet, dass die Anlage um einen Brenner für fossile oder erneuerbare Energieträger wie Biomasse erweitert wird, der unabhängig vom Solarkreislauf Wärme für die Stromerzeugung und zur Befüllung des Speichers bereitstellen kann. Da Wärmespeicher, Turbine und Rückkühlung bereits vorhanden sind, entstehen bei der Ergänzung vergleichsweise geringe Kosten. Selbst in Perioden mit wenig Sonne und leerem Speicher kann ein Solarkraftwerk so jederzeit eigenständig Strom erzeugen, den das Netz flexibel abrufen kann. Erzeuger erneuerbarer Energien wie PV- oder Windanlagen verlagern diese für das Energiesystem wichtige Aufgabe auf andere Kraftwerke im Netz. Das Tandem aus Energiespeicher für die tageszeitliche Verschiebung von Energiemengen und Hybridisierbarkeit für gesicherte Leistung ist die zentrale Eigenschaft solarthermischer Kraftwerke, die den Wert dieses Anlagentyps für ein zukünftiges Energiesystem ausmacht.

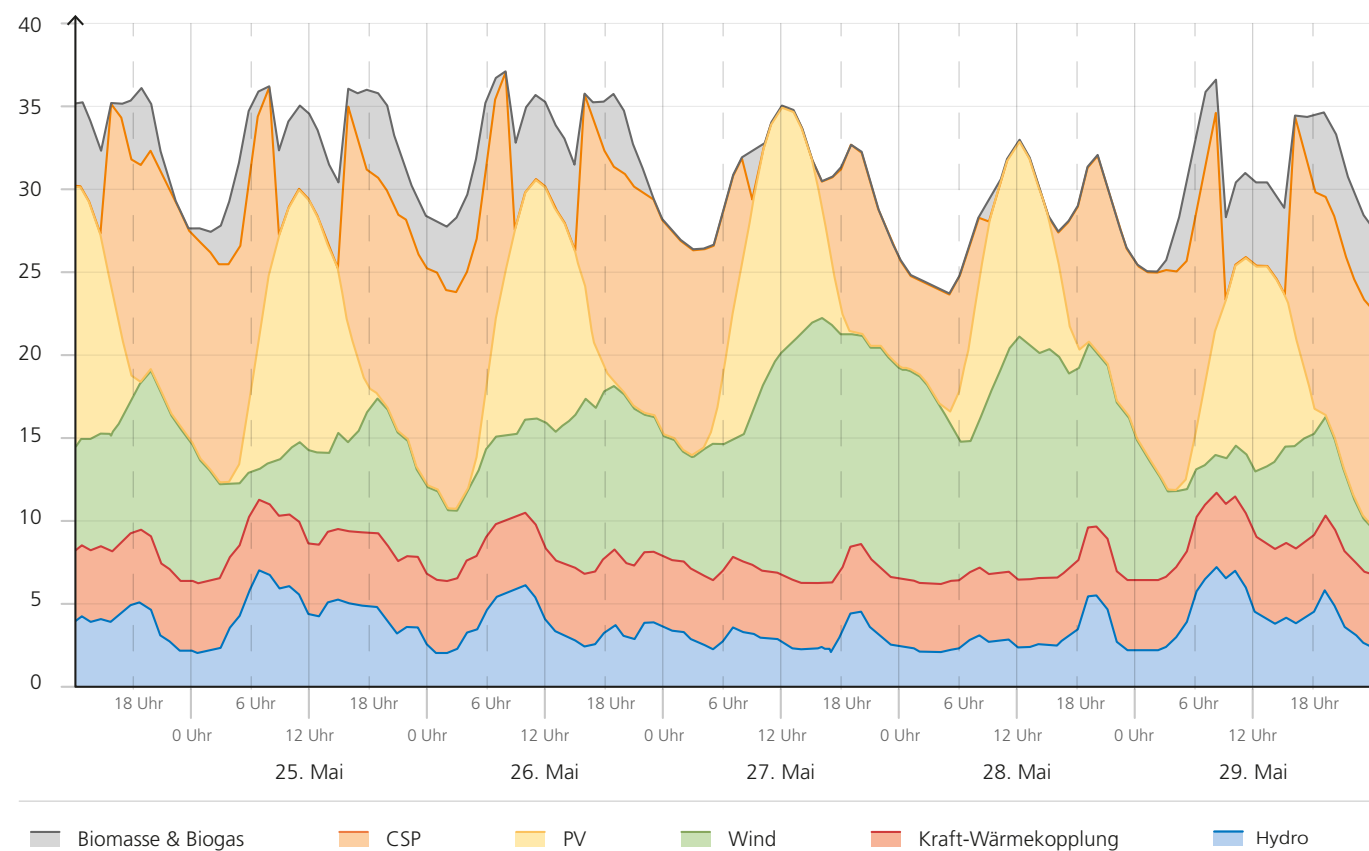
Wie alle Dampfkraftwerke sind solarthermische Kraftwerke auch in der Lage, zur Netzstabilisierung beizutragen. Durch die rotierende Masse von Turbine und Generator entsteht eine stabilisierende Wirkung auf die Frequenz im Stromnetz. Daneben kann die Turbine sehr schnelle Laständerungen abfangen und damit auf kurzfristige Anforderungen des Netzbetreibers reagieren. Ein solarthermisches Kraftwerk kann damit bei Bedarf aktiv am Regelleistungsmarkt teilnehmen.

### 3. Welche Rolle spielen solarthermische Kraftwerke in einem Energiesystem, das sich auf erneuerbare Energien stützt?

In sonnenreichen Ländern können solarthermische Kraftwerke ein wesentlicher Baustein eines Energiesystems werden, das überwiegend erneuerbare Ressourcen nutzt. In einem solchen System entsteht nämlich mit dem weiteren Ausbau der PV-Anlagen eine systematische Stromversorgungslücke in den Tagesrand- und Nachtzeiten und ein Überschuss in der Mittagsspitze. Solarthermische Kraftwerke sammeln über den Tag hinweg Wärmeenergie ein und speichern sie in Hochtemperatur-Wärmespeichern. Sie ergänzen die Stromerzeugung aus PV- und Windanlagen, indem sie als **flexible Solarkraftwerke** vorrangig in den Tagesrand- und Nachtzeiten Strom produzieren und dann, wenn tagsüber nicht ausreichend erneuerbarer Strom aus PV- und Windanlagen verfügbar ist.

Solarthermische Kraftwerke übernehmen damit die Rolle, die heute noch überwiegend von konventionellen, fossil betriebenen Kraftwerken eingenommen wird, welche aber aus Klimaschutzgründen zukünftig nicht weiter betrieben werden können. Erst durch die Kombination der erneuerbaren Technologien PV und CSP sind große Anteile an Solarstrom im Energiesystem von sonnenreichen Ländern möglich, die für eine kostengünstige und CO<sub>2</sub>-arme

STROMPRODUKTION  
GW



Energiemarktszenario in Spanien für ausgewählte Tage im Mai 2030. Quelle: Bonilla 2020

Energiebereitstellung erforderlich sind (Denholm 2011). Dass die Technik dazu geeignet ist, zeigen die Ende 2019 über hundert solarthermischen Kraftwerke mit einer **installierten Gesamtleistung von 6,2 Gigawatt**.

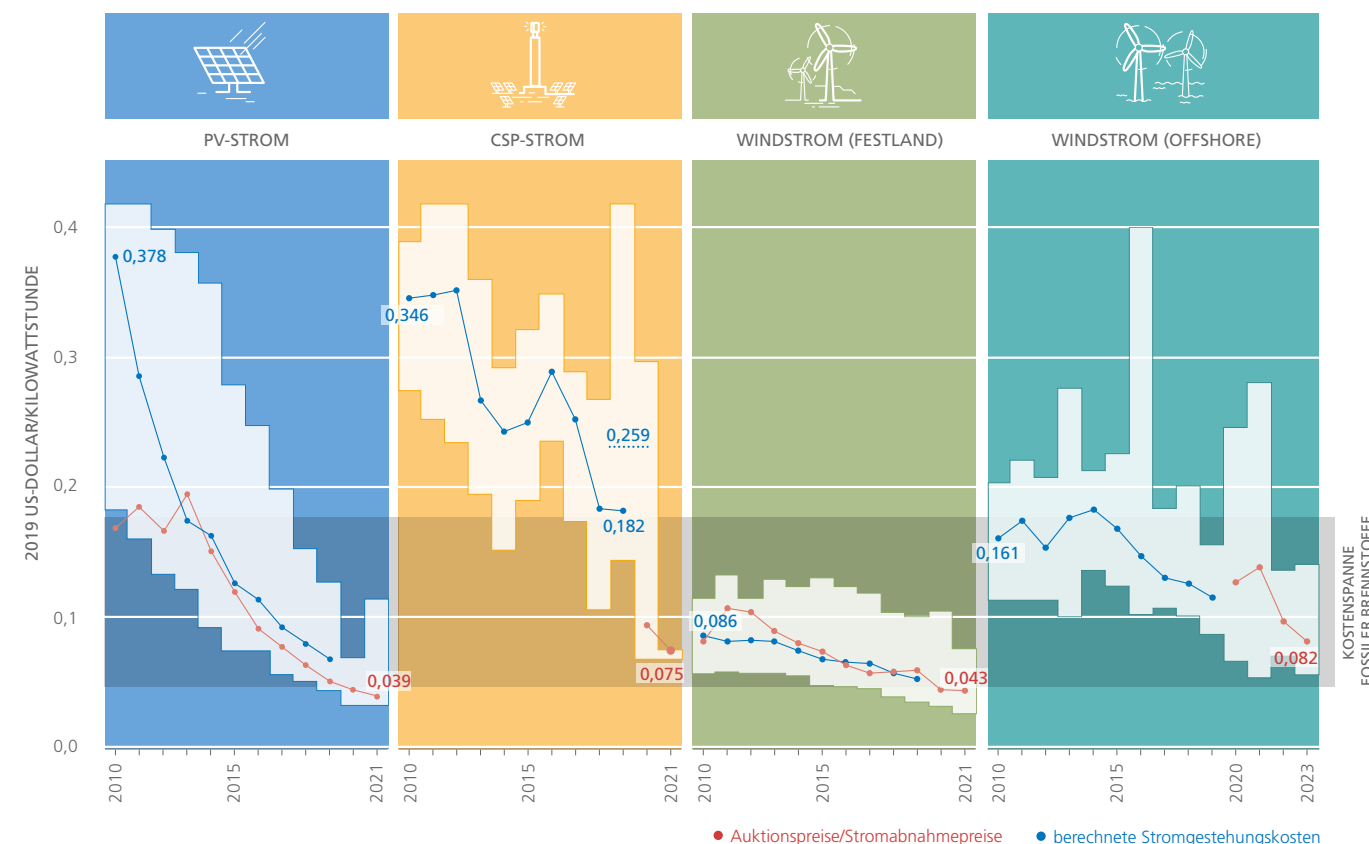
Das Land mit der höchsten installierten Leistung ist Spanien mit 50 Kraftwerken und 2,3 Gigawatt. In Spitzenzeiten werden dort bis zu zehn Prozent des gesamten Strombedarfs aus CSP-Kraftwerken gedeckt (CSPFocus 2020). In CSP-Kraftwerken sind weltweit bereits heute 21 Gigawattstunden thermische Speicherkapazität installiert, was bei einer mittleren Speicherkapazität von sieben Stunden circa drei Gigawatt elektrischer Leistung entspricht (REN21 2020). Diese Leistung kann dem Stromnetz bedarfsgerecht zur Verfügung gestellt werden. Heute werden Solarkraftwerke bereits als an einem Standort integrierte Lösung aus PV- und CSP-Kraftwerken geplant, die den kostengünstigen thermischen Energiespeicher gemeinsam nutzen, um die Anforderungen an die Versorgungssicherheit kostengünstig sicherzustellen.

Die Internationale Energieagentur (IEA) zeigt in verschiedenen Szenarien für ein zukünftiges globales Energiesystem, in welchem Umfang mit dem erwarteten Zuwachs des PV-Stroms im Energiesystem auch der Anteil von CSP-Strom an der weltweiten Stromproduktion steigt (IEA 2020: World Energy Outlook 2020): Im Jahr 2018 kamen auf hundert erzeugte Kilowattstunden PV-Strom zwei Kilowattstunden CSP-Strom. Um den Anteil an erneuerbarer Energie am Gesamtstrommix im Jahr 2040 weltweit auf 44 Prozent erhöhen zu können, werden drei Kilowattstunden CSP-Strom pro 100 Kilowattstunden PV-Strom erforderlich sein. Bei einem noch höheren Anteil erneuerbarer Energien von 67 Prozent, kämen auf 100 Kilowattstunden PV-Strom schon neun Kilowattstunden CSP-Strom. Dazu müsste die heute installierte Leistung von CSP-Kraftwerken etwa verdreifacht werden – auf etwa 180 Gigawatt. Eine Studie (Teske 2016) bestätigt diesen grundsätzlichen Zusammenhang und prognostiziert einen starken Anstieg des Zubaus von CSP im Zeitraum von 2030 bis 2040. Um das Verhältnis von PV- zu CSP-Stromerzeugung einordnen zu können, muss man berücksichtigen, dass sich der Ausbau der CSP-Kraftwerke auf den Sonnengürtel konzentriert, während PV-Systeme weltweit zum Einsatz kommen können. Untersuchungen für die Region Nordafrika / Mittlerer Osten kommen daher zu einem sehr viel ausgeglicheneren Verhältnis von CSP- und PV-Kapazitäten. Sie weisen nach, dass die Kombination dieser Technologien in dieser Region in der Lage ist, über 80 Prozent der Stromerzeugung eines Landes bereitzustellen (Steinbacher 2020). Die Kosten eines solchen auf erneuerbaren Energien basierenden Systems sind mit den Kosten der auf Gas und Kohle basierenden Stromerzeugung vergleichbar. Werden zudem externe Kosten berücksichtigt, zum Beispiel in Form einer CO<sub>2</sub>-Bepreisung, sind sie an diesen Standorten sogar erheblich preiswerter als die fossilen Ausbaupfade.

Solarthermische Kraftwerke sind in der Regel nur als Großanlagen mit einer Nennleistung von 50 bis 200 Megawatt wirtschaftlich zu betreiben. Zur direkten Versorgung von Industriegebieten können kleinere Anlagen an Standorten mit guter Solarstrahlung dann wirtschaftlich interessant sein, wenn die Industriekunden nicht nur Strom, sondern auch **Prozesswärme** abnehmen (siehe auch Frage 12). Insbesondere dort, wo die Stromerzeugung aus fossilen Energieträgern aufgrund einer isolierten geografischen Lage teuer ist, können solche Anlagen bereits mit fossilen Alternativen konkurrieren. Ein Beispiel dafür sind große Minenkomplexe in Chile, wo wegen der hohen Einstrahlungswerte besonders attraktive Standortbedingungen bestehen.

Weltweit waren Ende 2019 etwa 100 solarthermische Kraftwerke mit einer Gesamtleistung von 6,2 Gigawatt in Betrieb.

## 4. Sind solarthermische Kraftwerke konkurrenzfähig?



Kostenentwicklung regenerativer Energieerzeugung seit 2010. Die grau schattierte Fläche zeigt die Bandbreite der Kosten fossiler Energieerzeugung. (IRENA 2020: Renewable Power Generation Costs)

Strom aus solarthermischen Kraftwerken hat in den vergangenen zehn Jahren eine deutliche Kostensenkung erfahren und kann heute das Kostenniveau konventioneller Stromerzeugung erreichen. Ein Bericht der International Renewable Energy Agency IRENA zeigt die durchschnittliche weltweite Entwicklung von Kosten und Preisen erneuerbarer Energien und wirft auch einen Blick in die Zukunft (IRENA 2020: Renewable Power Generation Costs). In der zugrundeliegenden „Auction and PPA database“ erfasst IRENA die tatsächlich erzielten **Auktionspreise** und **Abnahmepreise** für Strom aus erneuerbaren Energiequellen, in der „LCOE database“ **berechnete Stromgestehungskosten**, die auf standardisierten Annahmen für Zinssatz, Lebensdauer und Abschreibung basieren. Die Stromgestehungskosten unterscheiden sich zum Teil erheblich von den Auktionspreisen, unter anderem, da die tatsächlichen Wirtschaftlichkeitsrechnungen der Unternehmen nicht bekannt sind und daher nicht in die Berechnung einfließen. Die kalkulierten Stromgestehungskosten berücksichtigen zudem nicht, dass solarthermische Kraftwerke aufgrund ihrer integrierten thermischen Speicher, anders als PV- und Windanlagen, regelbaren erneuerbaren Strom bereitstellen und somit einen Mehrwert bieten.

Bei der Bewertung der Stromgestehungskosten der unterschiedlichen Technologieoptionen ist zu bedenken, dass solarthermische Kraftwerke bisher wenig im Markt verbreitet sind und dadurch **Kostensenkungspotenziale durch Massenproduktion und Wettbewerb** vieler Marktteilnehmer noch nicht zum Tragen kommen. Die beachtliche Kostendegression von PV-Strom in den letzten zehn Jahren ist zu einem großen Teil durch die große Zahl der installierten Anlagen und Module begründet. So stieg die weltweit installierte Kapazität im Zeitraum 2010 bis 2019 von rund 41 auf 580 Gigawatt (IRENA 2020: Renewable Power Generation Costs).

Da die Sonne an sonnenreichen Standorten im Jahresmittel nur zwölf Stunden über dem Horizont steht, in denen PV-Anlagen günstigen Solarstrom erzeugen können, sind für die restlichen 12 Stunden des Tages **Speicher** oder andere Lösungen zur **Sicherstellung der Stromversorgung** notwendig. Weiterhin schwankt die PV-Stromerzeugung innerhalb eines Tages, auch bei wolkenlosem Himmel, stark und weist üblicherweise eine starke Erzeugungsspitze zur Mittagszeit auf. Speicher können die täglichen Schwankungen und Wolkenbedeckungen ausgleichen.

Es wäre möglich, PV- oder auch Windkraftanlagen mit Batteriespeichern auszustatten und so einen Teil des fluktuierend erzeugten Stroms zu speichern und nach Bedarf einzuspeisen. Die Kosten für den Speicher würden dann auch hier zu höheren Stromkosten führen. In 2019 lagen die Stromgestehungskosten für PV-Strom aus einer Lithium-Ionen-Batterie mit vier Stunden Entladedauer bei circa 0,2 US-Dollar für eine Kilowattstunde Strom (IRENA 2019 und IRENA 2020: Renewable Power Generation Costs). Für Strom aus solarthermischen Kraftwerken berechnete IRENA für das gleiche Jahr durchschnittliche Stromgestehungskosten in Höhe von 0,182 US-Dollar pro Kilowattstunde. Die durchschnittlichen Auktions- und Stromabnahmepreise für neue Solarkraftwerke, die in 2020 und 2021 in Betrieb gehen werden, liegen zwischen 0,073 und 0,094 US-Dollar pro Kilowattstunde, also um 48 bis 59 Prozent unter den berechneten Kosten für 2019. Obwohl die Preise von 2020 und 2021 nicht direkt mit den Kosten für 2019 vergleichbar sind, zeigen sie doch deutlich, dass die Wettbewerbsfähigkeit von CSP-Kraftwerken weiter steigt.

Der **Kostenvergleich von PV- und CSP-Strom** ist stark abhängig von der Kombination der für die Speicherung wichtigen Kennzahlen „Nennleistung“ (maximal mögliche Erzeugungsleistung) und „Kapazität“ (maximal mögliche Speicherdauer). Wenn man eine CSP- und eine PV-Anlage gleicher Nennleistung bei variierender Speicherkapazität vergleicht, steigt der Kostenvorteil von CSP gegenüber PV mit zunehmender Speichergröße. Der Grund dafür ist, dass heute übliche Batterien zur Stromspeicherung die beiden Funktionen Energiespeicherung und Leistungsbereitstellung in einer Einheit enthalten. Hingegen sind sie bei solarthermischen Kraftwerken getrennt: Die Speichertanks nehmen die Energie auf, der Kraftwerksblock erbringt die Leistung. Will man die Kapazität erhöhen, muss man also nur die Speichertanks vergrößern.

In der **Kombination mit PV-Anlagen** (siehe Frage 3) ermöglichen solarthermische Kraftwerke die kontinuierliche Bereitstellung von kostengünstigem Solarstrom und tragen zur Stabilisierung des Stromnetzes bei. Dieser Vorteil kommt im direkten Vergleich der Stromgestehungskosten nicht zum Ausdruck.

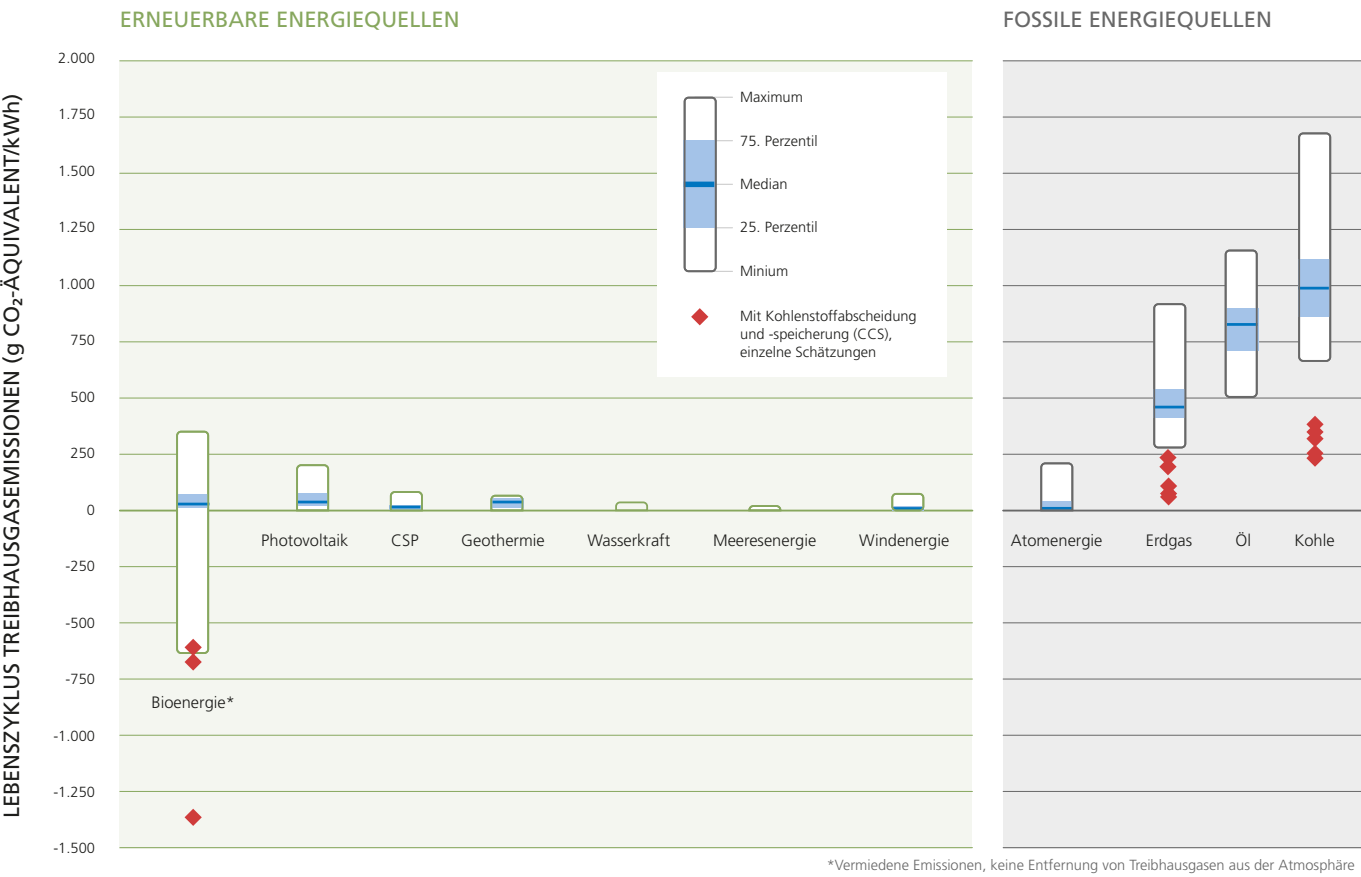
Die erforderliche solare Direktstrahlung vorausgesetzt, sind solarthermische Kraftwerke mit integriertem Speicher in einem zukünftigen treibhausgasneutralen Energiesystem eine wichtige Ergänzung zu den am Tag beziehungsweise bei guten Windverhältnissen preisgünstigeren, aber volatilen PV- und Windanlagen (IRENA 2020: Renewable Power Generation Costs).

Die Preise für Strom aus solarthermischen Kraftwerken mit thermischen Energiespeichern sind inzwischen auf bis zu 0,073 US-Dollar pro Kilowattstunde gefallen.

# 5. Wie wirken sich der Bau und der Betrieb von solarthermischen Kraftwerken auf die Umwelt aus?

Solarthermische Kraftwerke weisen vergleichsweise niedrige **Treibhausgasemissionen** während des gesamten Lebenszyklus auf, auch im Vergleich mit anderen erneuerbaren Stromerzeugungstechnologien. Vor allem liegen die Emissionswerte signifikant unter denjenigen konventioneller Stromerzeugungstechnologien. Die Grafik zeigt die spezifischen Treibhausgasemissionen für verschiedene Technologien während ihres gesamten Lebenszyklus. Typische Werte für die indirekten Emissionen von Solarturmkraftwerken liegen im Bereich von 10 bis 13 Gramm CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro erzeugter Kilowattstunde Strom (CO<sub>2</sub>-Äquivalente stellen das Treibhauspotenzial von Gasmischungen im Verhältnis zu CO<sub>2</sub> dar), für Parabolrinnenkraftwerke im Bereich von 18 bis 24 Gramm (Telsnig 2015).

Die gezeigten CO<sub>2</sub>-Äquivalente beziehen sich auf direkte und indirekte Emissionen. Als indirekt werden die Emissionen bezeichnet, die bei der Herstellung der eingesetzten Baumaterialien Glas, Stahl und Beton, während der Bauarbeiten und beim rein solaren Anlagenbetrieb entstehen. Direkte Emissionen produziert das Kraftwerk, wenn es zusätzlich fossile Energieträger wie Erdgas oder Diesel verbrennt, um den Dampferzeuger zu betreiben. Insbesondere die frühen kommerziellen solarthermischen Kraftwerke, die noch ohne Energiespeicher gebaut wurden, steigern damit ihre Verfügbarkeit. Die daraus entstehenden Emissionen erhöhen die Gesamtemissionen auf bis zu 200 Gramm CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro erzeugter Kilowattstunde Strom. Heute besitzen fast alle neuen Kraftwerke einen integrierten thermischen Speicher. Sie kommen nahezu ohne Zufeuerung aus, um die vereinbarte Menge Strom zu produzieren, und erreichen so die oben genannten niedrigen Emissionswerte.



Vergleich der gesamten Treibhausgasemissionen verschiedener Stromerzeugungstechnologien (IPCC 2012)

Solarthermische Kraftwerke werden vorrangig in wüstenartigen Gebieten errichtet, die aufgrund der Trockenheit keine landwirtschaftliche Nutzung zulassen. Daher stellt der Landverbrauch kein Hindernis dar. Der spezifische **Landbedarf** eines solarthermischen Kraftwerks beträgt circa 1,3 Hektar pro Gigawattstunde Strom und Jahr (Ong 2013).

Bei großen Baumaßnahmen finden in der Regel **Umweltverträglichkeitsprüfungen** statt. Daraus resultieren gemäß den jeweiligen nationalen Bestimmungen **Maßnahmen zum Schutz von Pflanzen und Tieren**. Die Auswirkungen des Kraftwerks auf die Pflanzenwelt können als gering eingeschätzt werden, da an typischen Standorten ohnehin nur wenige Pflanzen wachsen und nur ein kleiner Teil der Kraftwerksfläche versiegelt ist. Für Vögel und Insekten besteht die Gefahr, die Spiegel nicht als Hindernisse zu erkennen und sich daran zu verletzen oder beim Durchfliegen des vom Heliostaten erzeugten Brennflecks zu sterben. Eine 2020 erschienene Untersuchung an einem solarthermischen Kraftwerk in Südafrika ergab, dass die Gefährdung weit geringer ist als bisher angenommen (van Heerden 2020). Durch eine entsprechende Steuerung der Spiegel kann die Gefährdung von Vögeln noch weiter reduziert werden. Parabolrinnen stellen eine geringere Gefahr für Vögel dar als Turmkraftwerke, da sie wesentlich niedrigere Konzentrationen erzeugen und kurze Brennweiten haben.

An den Standorten solarthermischer Kraftwerke ist der **Wasserverbrauch** ein wichtiger Faktor. Wie alle Dampfkraftwerke benötigen auch Solarkraftwerke Wasser, um Strom zu produzieren. Sie setzen Wasser für die Kühlung des Dampfkreislaufs, im Dampfkreislauf selbst und zum Reinigen der Spiegel ein. Der Wasserbedarf hängt auch vom Standort ab. So beeinflussen zum Beispiel Staub und Feuchtigkeit in der Luft den Verschmutzungsgrad der Solarspiegel. Viele laufende und fast alle neuen solarthermischen Kraftwerke nutzen Trockenkühlung mit Umgebungsluft, wodurch der Wasserverbrauch signifikant reduziert werden kann. CSP-Kraftwerke mit Trockenkühlung haben einen durchschnittlichen Wasserbedarf von 0,3 Litern pro Kilowattstunde Strom (Turchi 2010), umgerechnet im Jahr etwa 120 Liter pro Quadratmeter Kollektorfläche beziehungsweise 30 Liter pro Quadratmeter Kraftwerksfläche. Dies ist deutlich weniger, als an vergleichbaren Standorten für eine alternative Flächennutzung verwendet wird. Beispielsweise hat der Getreideanbau in Marokko einen jährlichen Wasserbedarf von circa 1.600 Litern pro Quadratmeter Anbaufläche.

Während des Betriebs eines solarthermischen Kraftwerkes fallen nur in geringem Umfang **umweltgefährdende Abfallstoffe** an. Die in Parabolrinnen verwendeten synthetischen organischen Wärmeübertragungsflüssigkeiten, eine Mischung aus Biphenyl und Biphenylether, haben daran den größten Anteil. Sie können sich in seltenen Fällen entzünden, Böden kontaminieren und andere Umweltprobleme verursachen und müssen daher als gefährlicher Abfall behandelt werden. In heutigen Anlagen sind die Kraftwerksbetreiber verpflichtet, sie entsprechend den geltenden Richtlinien zu entsorgen (EASAC 2011). Ein Ziel der aktuellen Forschungsaktivitäten ist es, die giftige Wärmeübertragungsflüssigkeit durch umweltfreundlichere Silikonöle oder geschmolzene Salze zu ersetzen.

Während Parabolrinnensysteme praktisch keine **visuelle Beeinträchtigung** der Umgebung erzeugen, kann bei Solarturmsystemen die Reflexion der Heliostate sowie die starke Helligkeit der am Receiver reflektierten konzentrierten Solarstrahlung als störend empfunden werden. Die Entfernung von solarthermischen Kraftwerken zu Wohnbebauung ist in der Regel so groß, dass die Reflexionen und gebündelten Lichtstrahlen dort nicht sichtbar sind. Vorbeifahrende Autofahrer oder Besucher der Anlage hingegen könnte das helle Licht stören. Die Gefährdungswerte liegen allerdings deutlich unter denen, die durch die Sonne selbst vorhanden sind.

Insgesamt sind die Umweltauswirkungen von CSP-Kraftwerken deutlich geringer als die von fossilen Kraftwerken (Bošnjaković 2019).

Die Umweltauswirkungen von CSP-Kraftwerken sind deutlich geringer als die von fossilen Kraftwerken.

## 6. Welche Voraussetzungen sind für den Betrieb eines solarthermischen Kraftwerkes neben Sonneneinstrahlung noch notwendig?

Die **Standortanforderungen** für solarthermische Kraftwerke sind vergleichsweise gering: Geeignet sind vegetationsarme Stein-, Fels- und Kieswüsten, sowie Grasland, Buschland und Savannen, für die es praktisch keine anderen wirtschaftlichen Nutzungsmöglichkeiten gibt und die in den Regionen des Sonnengürtels für diese Anwendung nahezu unbegrenzt zur Verfügung stehen. **Die Landkosten sind für diese Regionen daher niedrig.** In der Nähe von stärker besiedelten Gegenden stehen jedoch häufig nur Flächen zur Verfügung, für die es auch alternative Nutzungsmöglichkeiten gibt, was die Landkosten in die Höhe treibt. In diesem Fall hängen die Grundstückskosten auch von der Eigentümerstruktur und der Existenz eines freien Immobilienmarktes ab.

Ein CSP-Kraftwerk benötigt eine große **Fläche für die Installation der Solarspiegel.** Das Spiegelfeld des 50 Megawatt-Parabolrinnenkraftwerks Andasol 3 beispielsweise erstreckt sich über eine Fläche von 200 Hektar, was der Größe von 280 Fußballfeldern entspricht. Für Parabolrinnenanlagen muss die Fläche möglichst eben sein. Solarturmkraftwerke können dagegen auch auf Flächen mit größerer Steigung errichtet werden, da die Spiegel voneinander unabhängige Fundamente haben und nicht durch einen Wärmeträgerkreislauf verbunden sind.

Eine **bestehende Infrastruktur** ist ein weiteres wichtiges Standortkriterium, denn ein Kraftwerk benötigt Zugang zu Transportwegen, zu Hoch- oder Mittelspannungsstromnetzen und zu Wasserressourcen. Sind diese am ausgewählten Standort nicht verfügbar, sind zusätzliche Investitionen, Genehmigungen und mehr Zeit für das Projekt erforderlich. Wasser brauchen neuere Solarkraftwerke vor allem für den Dampfkreislauf und zur Reinigung der Spiegel. Die meisten Kraftwerke decken ihren Bedarf aus dem Grundwasser vor Ort. Falls das nicht möglich ist, muss Wasser zum Kraftwerk transportiert werden, was zusätzliche Kosten verursacht.

**Naturphänomene** wie Erdbeben und Stürme haben generell Einfluss auf die Kosten von Energieanlagen. Sie erfordern im Falle der solarthermischen Systeme, das Design von Solarfeld und Kraftwerksblock an die besonderen Bedingungen anzupassen, was zu Mehrkosten führt.

Weitere entscheidende Standortfaktoren sind ein **niedriges Investitionsrisiko** und **günstige Finanzierungsbedingungen** für Investoren. Die wichtigsten Instrumente, um das Investitionsrisiko zu senken, sind garantierte Einspeisetarife oder -prämien für Strom, der auf der Basis erneuerbarer Energien erzeugt wird, Quoten für den Anteil erneuerbarer Energien, steuerliche Anreize und langfristige Stromabnahmeverträge (engl. PPA = Power Purchase Agreement).

Einspeisetarifsysteme mit **fest zugesicherten Vergütungen** über einen bestimmten Zeitraum, haben sich als sehr wirksam erwiesen. So hat Spanien den Ausbau von 2,3 Gigawatt an CSP-Kapazität durch eine staatlich garantierte Stromeinspeisevergütung erreicht. In **Quotensystemen** verpflichten die Regierungen die Stromversorger, einen Mindestanteil an erneuerbarem Strom zu beziehen. So sind zum Beispiel in den USA die Energieversorger einzelner Bundesstaaten dazu verpflichtet, einen bestimmten Anteil der Stromproduktion aus erneuerbaren Energien bereitzustellen. Spezielle **Steueranreize** und **Investitionszuschüsse** wurden zum Beispiel bereits in den 1980-er Jahren in Kalifornien eingesetzt, um den Bau der ersten solarthermischen Kraftwerke zu fördern.



Solarkraftwerke NOOR I-III in Ouarzazate, Marokko. Bild: SENER

Auch ein **langfristiger Stromabnahmevertrag**, der die gesamten Kosten abdeckt und gleichzeitig eine angemessene Rendite enthält, garantiert den Kapitalrückfluss der Investition. In Verbindung mit einer internationalen Garantie erlaubt dies den Investoren, einen Teil des benötigten Kapitals am Finanzmarkt zu günstigen Konditionen aufzunehmen und damit die Finanzierungskosten zu senken.

# 7. Welche Kompetenzen sind zum Bau und Betrieb solarthermischer Kraftwerke erforderlich?

Solarthermische Kraftwerke sind **verfahrenstechnische Anlagen**, die als Großprojekte nach einem im Anlagenbau bewährten Schema geplant und realisiert werden. Die Planung und der Bau des solaren Teils mit Spiegelsystem und Wärmeempfänger und seine Anbindung an den Dampfkreislauf erfordern jedoch spezielles Know-how. Weltweit verfügen heute nur wenige Großunternehmen über diese Qualifikation und sind in der Lage, die Verantwortung als **Generalunternehmer** zu übernehmen. Die Wertschöpfungskette bei der Erstellung einer Anlage umfasst die Planung, das Beschaffungswesen und die schlüsselfertige Errichtung der Gesamtanlage, auch bekannt als EPC-Projekt (Engineering, Procurement, Construction). Darüber hinaus müssen natürlich auch die spezifischen eingesetzten Komponenten und Systeme geplant, gefertigt und geliefert werden (Hümmer 2020).

Auf die Planungsphase mit den drei Teilschritten Konzeptplanung, Basisplanung und Ausführungsplanung folgen die Phase der Errichtung und Inbetriebnahme sowie die Phase des Betriebs und der Instandhaltung (Sattler 2000).

**EPC-Firmen** sind darauf spezialisiert, die verschiedenen kundenspezifischen Lieferungen und Dienstleistungen zu koordinieren und sie in die Anlage zu integrieren. Dabei bringen sie ihre Erfahrung und ihr Know-how zu den Elementen der Wertschöpfungskette ein, wie Teilsysteme, Maschinen, Komponenten oder Verbindungselemente, Kabel und Rohrleitungen. Auch zur Integration der benötigten Dienstleistungen sind besondere Kenntnisse gefragt, denn diese reichen von der Engineering-Dokumentation über Beschaffung, Fertigung und Inbetriebnahme bis hin zu Wartung und Qualitätskontrolle (PricewaterhouseCoopers 2017).



Qualitätskontrolle einer Parabolrinne aus der Luft. Aufnahme von der Plataforma Solar de Almería (PSA). Eigentümer und Betreiber der PSA ist das spanische Forschungszentrum CIEMAT.

Bauprojekte solarthermischer Kraftwerke erfordern in jedem Teil der Wertschöpfungskette ein hohes Niveau an **Spezialwissen** (Mehos 2020). Jedoch besteht für einige Aufbauarbeiten sowie in der Betriebs- und Instandhaltungsphase die Möglichkeit, Firmen aus der Region einzusetzen. So kann eine **lokale Wertschöpfung** in den betreffenden Ländern entstehen (Dii 2013).

Darüber hinaus sind **spezifische Fachkenntnisse** erforderlich, um das **Solarfeld einer Anlage** planen, errichten und steuern zu können (Mehos 2020). Die **Qualität der optischen Systeme** hat einen signifikanten Einfluss auf die Stromproduktion und damit auf die Wirtschaftlichkeit eines Kraftwerks. Aus diesem Grund werden Fachunternehmen mit **spezieller Messtechnik für die Qualitätssicherung** und Bauüberwachung eingesetzt (Eickhoff 2010).

Auch der Betrieb der Anlage ist komplex und stellt hohe Anforderungen an das Personal. Aus diesem Grund werden neue Mitarbeitende durch erfahrenes Personal geschult. Vorrangige Ziele der **Schulungen** sind die Reduktion von Betriebsfehlern und dass das Kraftwerkspersonal etwaige Störungen der Anlage frühzeitig zu erkennen lernt.

Die Wertschöpfung von CSP-Anlagen ergibt sich aus der Kombination zahlreicher Komponenten und Subsysteme, die von sehr komplexen und technologiespezifisch (zum Beispiel Absorberrohre) bis zu vergleichsweise einfachen und versatil einsetzbaren Komponenten (zum Beispiel Kabel) reichen (Dii 2013). Im Vergleich zur Photovoltaik entsteht ein großer Teil der Wertschöpfung und auch des Technologierisikos während der Anpassung dieser Komponenten und ihrer Integration zu einem funktionierenden Gesamtsystem.

Für den Betrieb ist es wichtig, die Anlagen in einwandfreiem Betriebszustand zu halten. Dadurch wird die maximale Wirtschaftlichkeit der Kraftwerke gewährleistet. Idealerweise wird eine auf regelmäßiger Zustandsüberwachung basierende, vorausschauende **Instandhaltungsstrategie** angewendet, um schadensbedingte Ausfallzeiten zu vermeiden (Papaalias 2016). Bleiben Wärmeverluste, Leckagen, Verschmutzungen, Positionierungsfehler oder defekte Komponenten unerkannt, sinkt die Leistung und damit der Ertrag des Kraftwerks. Kraftwerksbetreiber benötigen dafür effiziente technische Lösungen, wie digitale automatisierte Überwachungssysteme.

Weltweit verfügen heute wenige Großunternehmen über ausreichend Know-how, um als Generalunternehmer solarthermische Kraftwerke schlüsselfertig anbieten zu können.

PROJEKTE

- Projektentwicklung
- Detailplanung & Kontrolle
- Beschaffungswesen
- Bau- und Montagearbeiten
- Besitzer
- Standort, Ressourcen
- Betrieb & Instandhaltung

EPC

KOMPONENTEN

- Turbine, Kraftwerksblock
- Speicher, Wärmetauscher
- Elektrik, Sensoren, Messtechnik
- Steuerung, Automatisierung
- Rohrleitungen, Instrumentierung, Ventile, Isolierung
- Pumpen, Hydraulikantrieb, Wärmetauscher
- Wärmeträgerfluid
- Receiver, Spiegel, Rohrverbinder
- Kollektor, Heliostat, Solarfeld

ERMÖGLICHUNG

- Beratungsdienstleistung
- Technische Planung & Unterstützung
- Fertigungsgeräte & Automatisierung
- Prüfung, Messung, technische Qualitätskontrolle
- Reinigungstechnik
- Infrastruktur, anderes

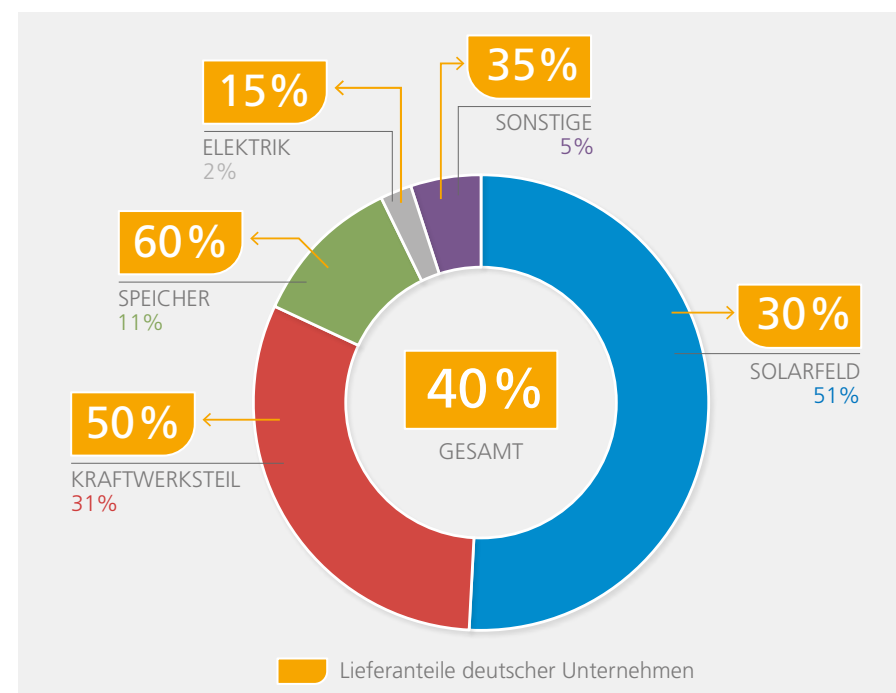
Elemente der Wertschöpfungskette eines solarthermischen Kraftwerks. (DCSP 2018, eigene Bearbeitung)

## 8. Welche Relevanz hat die solarthermische Kraftwerkstechnologie für Deutschland?

Auch wenn Deutschland wegen seiner meteorologischen Bedingungen kein geeigneter Standort für einen wirtschaftlichen Betrieb von solarthermischer Kraftwerke ist, so ergeben sich aus der Entwicklung der dafür erforderlichen Technologie doch eine Reihe von Vorteilen, die Deutschland für sich nutzbar machen kann.

Systemanalytische Untersuchungen der Energiewende zeigen, dass sich ein klimaneutrales Energiesystem in Deutschland nicht ausschließlich aus den heimischen Potenzialen an erneuerbaren Energien realisieren lässt (Öko-Institut 2015). Dies führt dazu, dass Deutschland zukünftig zum Teil von Energieimporten abhängig sein wird, die aus besonders energiereichen Weltregionen wie dem „Sonnengürtel“ der Erde stammen werden. Solche Energieimporte werden aktuell insbesondere für flüssige und gasförmige erneuerbare Energieträger wie Wasserstoff oder strombasierte synthetische Kraftstoffe diskutiert (BMWi 2020). Sie lassen sich, unter anderem durch ihre hohe Energiedichte, besonders kostengünstig transportieren und speichern. Darüber hinaus sind sie flexibel in der Industrie, zur Strom- und Wärmeerzeugung und im Verkehrssektor einsetzbar (DLR 2020, Teil 2). Im Gegensatz zu PV- und Windanlagen können solarthermische Kraftwerke mit integrierten thermischen Speichern kontinuierlich erneuerbaren Strom für die **Erzeugung von grünem Wasserstoff** bereitstellen, was sich vorteilhaft auf die Auslastung der Erzeugungsanlagen und damit auch positiv auf die Erzeugungskosten auswirkt (siehe Frage 2; Trieb 2012).

Ein weiterer Aspekt, der die Relevanz solarthermischer Kraftwerke für Deutschland verdeutlicht, sind die Chancen, die **das in Deutschland vorhandene Know-how** in Bezug auf diese Technologie mit sich bringt. Solarthermische Kraftwerke bestehen zu einem nennenswerten Teil aus Komponenten, die bereits in anderen Anwendungen zum Einsatz kommen, zum Beispiel Turbinen, gebogenes Glas, flexible Rohrverbindungen, Isolierung, Beschichtungen, Prozesstechnik und Anlagenbau, Antriebe und Pumpen,



Lieferanteile deutscher Unternehmen am marokkanischen Kraftwerk NOOR I. (DCSP 2018)

Messtechnik und Wärmetauscher. Deutsche Unternehmen können ihre Kompetenzen und Erfahrungen in diesen Bereichen vergleichsweise einfach für die Entwicklung der solarthermischen Technologie nutzen. Darüber hinaus ist in Deutschland durch das langjährige Engagement in der Forschung zu solarthermischen Kraftwerken neues Wissen entstanden (IEA 2020: Energy Technology R&D Budgets). Die Chancen, die sich daraus ergeben, lassen sich insbesondere anhand von zwei Aspekten erläutern.

Die **vorhandene Wissensbasis** bietet deutschen Unternehmen die Möglichkeit, sich an internationalen Solarkraftwerksprojekten zu beteiligen, und sichert oder schafft damit in einem begrenzten Umfang **Beschäftigung in Deutschland** (O'Sullivan 2020). Dabei sind die bestehenden Industriestrukturen von Vorteil; die neuen Geschäftsfelder wirken aber auch als Katalysator für Unternehmensneugründungen, die direkt mit der Forschung zu und der Entwicklung von solarthermischen Kraftwerken einhergehen. Ein besonders markantes Beispiel für ein etabliertes Unternehmen ist in diesem Zusammenhang Siemens, dessen Dampfturbinen-Technik regelmäßig in solarthermischen Projekten zum Einsatz kommt (Siemens AG 2019). Insgesamt umfassen die Leistungen deutscher Unternehmen aktuell Aspekte der Projektentwicklung und Planung, der Lieferung und Integration von Komponenten, aber auch der Inbetriebnahme von Anlagen sowie der Wartung. Ein Beispiel dafür ist das Kraftwerk Noor I in Marokko: Hier waren deutsche Unternehmen bis 2016 zu etwa 40 Prozent an der Umsetzung des Projektes beteiligt (siehe Grafik).

Eine Möglichkeit, das erworbene Know-how zu solarthermischen Kraftwerken auch in Deutschland selbst zu nutzen, ist der **Technologietransfer hin zu neuen Anwendungen**. Ein aktuelles Beispiel ist die Nutzung thermischer Speichertechnologien, die durch den Einsatz in solarthermischen Kraftwerken eine hohe technische Reife erreicht haben. Ihr Einsatz wird nun auch für **Wärmespeicherkraftwerke** in Deutschland vorbereitet (Steffen 2019; Trieb 2020). Weiterhin können die für solarthermische Kraftwerke entwickelten Speicher für Anwendungen im Bereich **Industrieprozesswärme** genutzt werden. Auch im Bereich der **Zustandsüberwachung** solarthermischer Kraftwerke, die für Betrieb und Wartung der Anlagen erforderlich ist, findet ein Know-how-Transfer statt. Die hierfür entwickelten Methoden und gewonnenen Erkenntnisse, zum Beispiel die Zustandsüberwachung von Spiegelfeldern aus der Luft mittels Flugdrohnen, werden nun auch für PV-Anlagen in Deutschland genutzt oder sind in der Vorbereitung dazu.

Konzentrierende Kollektoren können auch in Deutschland zur Bereitstellung von Wärme aus erneuerbaren Energien einen Beitrag leisten (siehe Frage 12).

## 9. Wo befinden sich die Märkte und wie sind die Rahmenbedingungen?

Große solarthermische Kraftwerke haben eine elektrische Leistung von zurzeit typischerweise 50-200 Megawatt. Die dafür notwendige Investition tätigt man bevorzugt an Standorten, an denen es sehr viele Sonnenstunden pro Jahr gibt: im subtropischen „Sonnen-gürtel“ der Erde. Für die Wirtschaftlichkeit der Kraftwerke sind neben subtropischem Klima weitere Randbedingungen von Bedeutung (siehe Frage 6). Wegen der im Vergleich zu konventionellen Kraftwerken hohen Anfangsinvestition (aber dafür geringen Betriebskosten) ist es wichtig, dass die Abnahme und Vergütung des produzierten Solarstroms privatvertraglich oder gesetzlich langfristig gesichert ist und politisch und wirtschaftlich stabile Verhältnisse herrschen. Projektentwicklung, Planung und Bau der großen Anlagen erfordern neben dem technischen Know-how insbesondere einen starken wirtschaftlichen Hintergrund, um diese über mehrere Jahre laufenden Aktivitäten vorfinanzieren zu können (siehe Frage 7).

Nahezu alle neuen Projekte haben thermische Speicher, um die Versorgung auch außerhalb der Tagesstunden zu sichern.

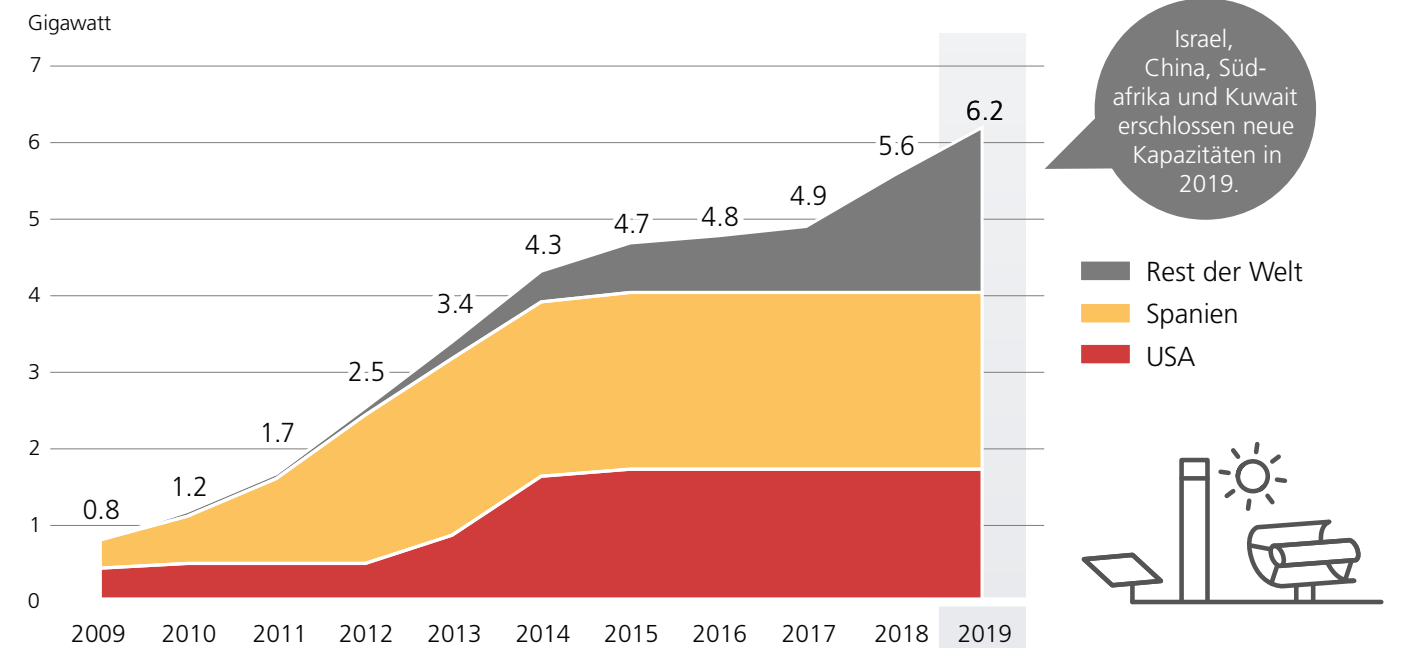
Ende 2019 waren solarthermische Kraftwerke mit einer Gesamtkapazität von 6,2 Gigawatt in Betrieb, ein Anstieg gegenüber dem Vorjahr um 600 Megawatt. Obwohl in den Pioniermärkten **USA** und **Spanien** seit 2015 beziehungsweise 2013 keine zusätzlichen Kraftwerke gebaut wurden, führen bei der Gesamtkapazität Spanien mit 2,3 Gigawatt und die USA mit 1,7 Gigawatt deutlich vor **Marokko** (516 Megawatt), **Südafrika** (500 Megawatt) und **China** (420 Megawatt). Erstmals wurden mit je 45 Prozent des Gesamtzuwachses ebenso viele Turm- wie Parabolrinnenkapazitäten installiert, 10 Prozent entfielen auf Fresnel-Technologie (REN21 2020).

Den größten Anteil am **Zuwachs des Jahres 2019** realisierte **Israel** mit 242 Megawatt, zu gleichen Teilen durch den „Megalim“-Solarturm (ohne Speicher) und das „Negev“-Parabolrinnenkraftwerk mit integriertem Flüssigsalzspeicher mit 4,5 Stunden Speicherkapazität. Diese ersten kommerziellen solarthermischen Kraftwerke in Israel sind gleichzeitig die größten erneuerbare Energien nutzenden Kraftwerke des Landes überhaupt. 200 Megawatt wurden in **China** mit vier Anlagen mit jeweils 50 Megawatt in Betrieb genommen, alle mit Flüssigsalzwärmespeichern: ein Linear-Fresnelkraftwerk mit 13 Stunden Speicherkapazität und drei Turmkraftwerke mit sechs, acht und zwölf Stunden Speicher. Im Bau sind weitere Parabolrinnen- und Turmkraftwerke mit insgesamt 250 Megawatt Kraftwerksleistung und 2,4 Gigawattstunden thermischer/ Speicherkapazität. In **Südafrika** ging das 100-Megawatt-Parabolrinnenkraftwerk „Kathu“ in Betrieb, ebenfalls mit Wärmespeicher (4,5 Stunden). Im Integrated Resource Plan des Landes ist bis 2030 noch ein weiterer Solarturm mit 100 Megawatt vorgesehen. In **Kuwait** ist die 50-Megawatt-Parabolrinnenanlage „Shagaya“ die erste Anlage des geplanten Renewable Energy Park mit drei Gigawatt Nennleistung, in dem neben PV und Wind noch weitere 350 Megawatt solarthermische Kraftwerkskapazität vorgesehen sind. Die kleinste 2019 fertiggestellte Anlage ist das Fresnelkraftwerk „eLLO“ mit neun Megawatt Leistung und vier Stunden Speicherkapazität in **Frankreich**.

Die aktuellen **weltweiten Bauprojekte** umfassen knapp 900 Megawatt Parabolrinnen- und 300 Megawatt Turmkraftwerke sowie eine 14-Megawatt-Fresnel-Anlage. Mehr als 60 Prozent davon entfallen auf die **Vereinigten Arabischen Emirate**, wo im Rahmen des Projektes Noor I drei Parabolrinnenanlagen mit je 200 Megawatt und ein Turmkraftwerk mit 100 Megawatt im Bau sind. In **Chile** wird die Fertigstellung des 110-Megawatt-Turmkraftwerks „Cerro Dominador“ Ende 2020 erwartet. In **Griechenland** beginnt 2021 ein chinesisches Konsortium mit dem Bau des 52-Megawatt-Turmkraftwerks „MINOS“ auf der Insel Kreta. Nahezu alle neuen Projekte haben thermische Speicher. Zunehmend werden diese parallel zu PV-Anlagen eingesetzt, um die Versorgung außerhalb der Tagesstunden

zu sichern. Dieser Trend wird auch durch den Integrated National Energy and Climate Plan in **Spanien** gestützt, nach dem bis 2030 zusätzliche 5 Gigawatt solarthermischer Kraftwerkskapazität mit großen Wärmespeichern realisiert und die Nachrüstung bestehender Kraftwerke mit zusätzlichen Speicherkapazitäten erleichtert werden sollen (HeliosCSP 2019).

Während bis 2015 Unternehmen aus Spanien und den USA den CSP-Markt anführten, waren 2019 chinesische Firmen an fast der Hälfte der Projekte beteiligt. Deutsche Anbieter mit ihrem Know-how und den hochwertigen Ingenieurprodukten behaupten sich in diesem Sektor noch erfolgreich als exportierende Zulieferer und als Berater (siehe Frage 8). Die Marktteilnehmer sind im Deutschen Industrieverband DCSP und im europäischen Verband ESTELA organisiert.



Entwicklung der solarthermischen Kraftwerkskapazitäten 2009 bis 2019 (Ren21 2020)

## 10. Welche sozio-ökonomischen Folgen hat der Einsatz der Technologie?

Der Einsatz solarthermischer Kraftwerke ist aus ökonomischer Sicht weitestgehend auf Länder des sogenannten „Sonnengürtels“ der Erde beschränkt. Da viele dieser Länder zu den Entwicklungsländern der Welt gehören (United Nations 2020), stellt sich insbesondere für sie die Frage, welche Folgen der Einsatz solarthermischer Kraftwerke für ihre wirtschaftliche und gesellschaftliche Entwicklung hat. Allgemein sind die sozio-ökonomischen Folgen der Ansiedlung von Anlagen zur Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien weniger technologiespezifisch. Die meisten Aspekte, die in diesem Zusammenhang diskutiert werden, beziehen sich technologieübergreifend auf die gesamte Energiewende in den jeweiligen Ländern.

Einer der wohl wichtigsten sozio-ökonomischen Effekte des Ausbaus von Infrastrukturen ist die daraus entstehende **Beschäftigungswirkung**. Eine Reihe von Veröffentlichungen hat das Beschäftigungspotenzial solarthermischer Kraftwerke für verschiedene Länder untersucht (Gazzo 2011; Craig 2019; Milani 2020). Sie alle zeigen die Möglichkeit auf, neue Unternehmen anzusiedeln und damit vor Ort zusätzliche (direkte und indirekte) Beschäftigungsmöglichkeiten zu schaffen. Eine Analyse des spanischen Marktes aus dem Jahr 2010 hat für ein 50-MW-Parabolrinnenkraftwerk beispielsweise etwa 2000 direkt und indirekt Beschäftigte für die Errichtung, verteilt auf einen Zeitraum von zwei Jahren, sowie etwa 50 dauerhafte Arbeitsplätze für den Betrieb identifiziert (Deloitte 2010).

Wesentlich für die Realisierung der Potenziale ist allerdings, dass sich in den jeweiligen Ländern und Regionen eine stabile Nachfrage nach solarthermischen Kraftwerken entwickelt. Erst in wenigen Ländern wie Spanien entstand eine gewisse Zeit lang ein kontinuierlicher Markt. Dort wurden zwischen 2008 und 2012 mehr als 40 Kraftwerke installiert, wobei die Beschäftigung zwischenzeitlich auf knapp 29.000 Personen anstieg (Deloitte 2010). In vielen anderen Ländern sind jedoch bislang nur Einzelprojekte realisiert worden, so dass es nicht zu nennenswerten zusätzlichen Industrieansiedlungen kam. Die Anforderungen an **lokale Wertschöpfung**, die mit den bisher erfolgten Investitionen einhergingen, führten aber dazu, dass bereits vorhandene lokale Firmen Leistungen für den Kraftwerksbau erbringen konnten. Insbesondere Gewerke und Dienstleistungen aus dem Baugewerbe sowie für den Betrieb der Anlagen erforderliche Arbeiten trugen zur lokalen Wertschöpfung bei (Gazzo 2011; Wuppertal Institute 2015). Entsprechend der Darstellung in Frage 7 handelt es sich demnach eher um Branchen, in denen ein geringeres spezifisches Know-how über solarthermische Kraftwerke notwendig ist. Es wäre jedoch für viele Länder denkbar, dass sich auch Bereiche der Wertschöpfungskette ansiedeln, die ein höheres spezifisches Wissen erfordern, insbesondere dann, wenn sie sich als Leitmärkte mit stabiler Nachfrage etablieren (Gazzo 2011; WWF 2015).

Ein besonderer Aspekt von solarthermischen Kraftwerken im Hinblick auf die sozio-ökonomischen Effekte ist ihre geographische Lage. Da sie sich meist abseits von Ballungsräumen befinden, bieten sie besonders in strukturschwachen Regionen eine **Entwicklungsperspektive**. Dabei entstehen neben den direkten und indirekten Arbeitsplätzen auch induzierte Beschäftigungseffekte. Diese beziehen sich darauf, dass aufgrund des höheren Einkommens in der Region der Konsum von ganz alltäglichen Gütern steigt und damit neue Beschäftigung auch in diesen Bereichen entsteht (Milani 2020; Craig 2019).

Bei der Errichtung eines 50-MW-Parabolrinnenkraftwerks entstehen während der zweijährigen Bauphase etwa 2000 direkte und indirekte Arbeitsplätze.



Montage von Kollektoren eines Parabolrinnenkraftwerks. Bild: sbp sonne

Des Weiteren kann der Ausbau solarthermischer Kraftwerke in strukturschwachen Regionen bewirken, dass **Infrastrukturen**, wie Transportwege oder die Energie- und Wasserversorgung, entstehen oder verbessert werden. Davon profitieren auch die regionale Bevölkerung und die Wirtschaft. Darüber hinaus steigt die Attraktivität des Standorts für die Ansiedlung weiterer Unternehmen (Wuppertal Institute 2015).

In Bezug auf Beschäftigungswirkungen sei jedoch auch auf mögliche negative Effekte verwiesen, die sich generell auf den Ausbau von erneuerbaren Energien beziehen. Sie betreffen insbesondere Länder, die fossile Energieträger exportieren. So beeinflusst der Ausbau erneuerbarer Energien potenziell die Beschäftigungssituation im bisher überwiegend fossilen Energiesektor, die Entwicklung der nationalen Energiekosten sowie den Exportanteil fossiler Energien und damit die Deviseneinnahmen. Grundsätzlich stellt aber der Export von erneuerbaren Energieträgern im Vergleich zu dem der fossilen Ressourcen eine langfristige Perspektive dar (United Nations 2020, Dii 2013).

Weitere Aspekte, die über die Betrachtung der Beschäftigung hinausgehen, sind beispielsweise eine größere Energieunabhängigkeit und Kostenkontrolle der heimischen Energieversorgung, insbesondere für Länder, die bislang Importeure fossiler Energieträger waren (Dii 2013).

## 11. Welche Faktoren unterstützen eine beschleunigte Verbreitung der Technologie?

Ein neues solarthermisches Kraftwerksprojekt ist in sonnenreichen Ländern in der Regel eine der möglichen Alternativen zur Stromerzeugung aus erneuerbaren Energiequellen, die noch immer in Konkurrenz zu fossilen Kraftwerken stehen. In diesem Wettbewerb spielen die Kosten der Stromerzeugung eine maßgebliche Rolle. Letztlich hängt es aber vom politischen Willen und den energiepolitischen Rahmenbedingungen ab, ob solarthermische Kraftwerke Teil einer nationalen Energieversorgungsstrategie werden (IEA 2010).

In allen Technologiebereichen führen steigende Produktionsmengen in Verbindung mit permanenten Verbesserungen auf der Basis von Forschung und Entwicklung dazu, dass die Produktionskosten sinken. Von solchen „**Skaleneffekten**“ (engl. Economies of Scale) konnten solarthermische Kraftwerke bisher nur wenig profitieren. Ihre Komponenten werden nicht von einer Vielzahl dezentraler Nutzer nachgefragt, wie zum Beispiel PV-Solarmodule von Eigenheimbesitzern, denn weltweit entsteht bisher nur eine überschaubare Anzahl von neuen Kraftwerken pro Jahr. Skaleneffekte entwickeln sich daher hier langsamer als in Branchen mit einer dynamischeren Nachfrageentwicklung.

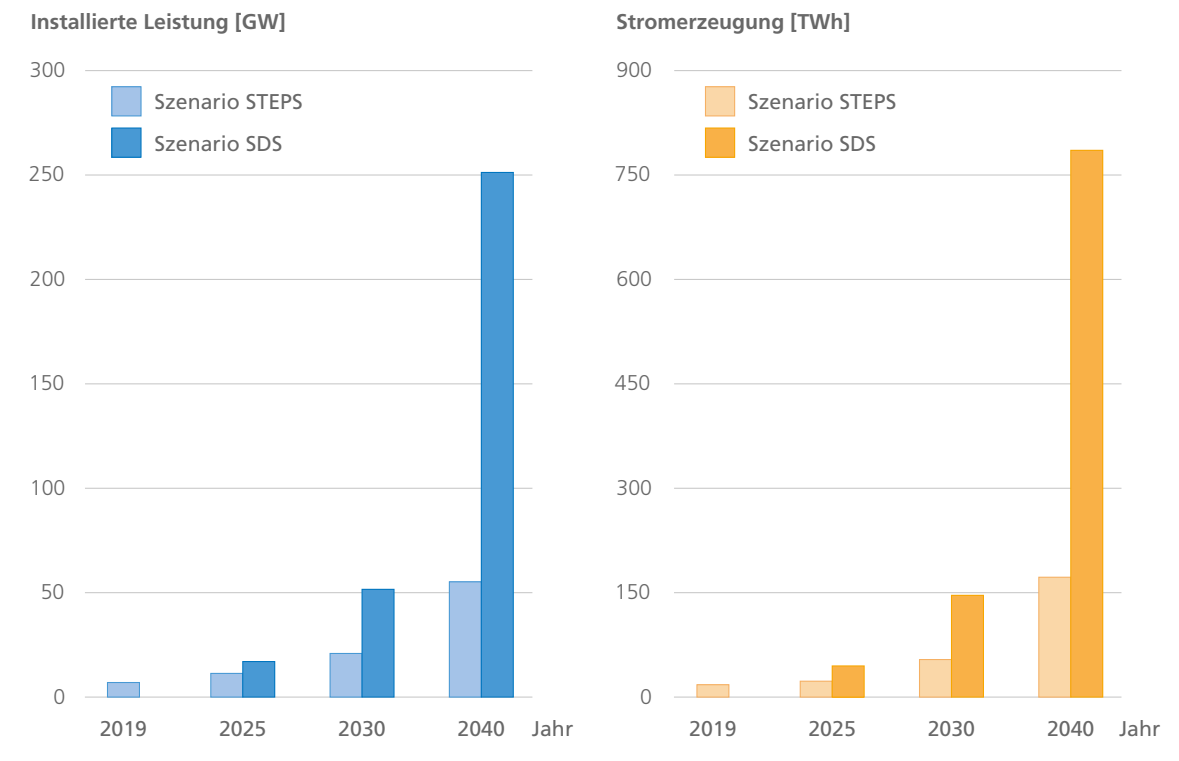
Da solarthermische Kraftwerke ihren Strom auch nach Sonnenuntergang ins Stromnetz einspeisen können, sind sie jedoch von besonderem Wert für ein Energiesystem auf Basis erneuerbarer Energiequelle. Solarthermische Kraftwerke sind in sonnenreichen Ländern von strategischer Bedeutung, um zukünftig auf Kohle- und Gaskraftwerke verzichten zu können. Um sie zu fördern, sollten die politischen Institutionen geeignete und **zuverlässige Marktbedingungen** schaffen (IEA 2014). Nationale Regierungen können beispielsweise Ziele für den Ausbau ausgewählter Technologien festschreiben. So sieht der Nationale Energieplan von Spanien vor, bis zum Jahr 2030 solarthermische Kraftwerke mit einer Gesamtleistung von fünf Gigawatt zu errichten. In technologieoffenen Ausschreibungen für Anlagen zur Energieerzeugung sollten nicht nur die Stromgestehungskosten darüber entscheiden, welche Technologie den Zuschlag bekommt. In die Bewertung sollte auch einfließen, dass solarthermische Kraftwerke regelbaren Solarstrom liefern können und damit die fluktuierende Leistung von PV- und Windanlagen ausgleichen.

Der beschleunigte Ausbau wird zudem durch langfristige Stromlieferverträge zwischen Kraftwerksbetreibern und individuellen Abnehmern (engl. PPA = Power Purchase Agreement) mit einer Laufzeit von 20 bis 30 Jahren, attraktive Finanzierungsbedingungen und Kreditgarantien öffentlicher Finanzierungsinstitute begünstigt (Lilliestam 2020). Solche Voraussetzungen würden Szenarien ermöglichen, wie sie zum Beispiel der aktuelle World Energy Outlook der Internationalen Energieagentur betrachtet (siehe Grafik).

Ein weiteres Instrument zur Kostensenkung ist die Schaffung international anerkannter **Qualitätsstandards** für Komponenten und Verfahren. Sie reduzieren Unsicherheiten bei Investoren und Betreibern, da sie eine gleichbleibend hohe Qualität bei allen Lieferanten garantieren. Darüber hinaus ermöglichen sie standardisierte Prozesse für Montage und Betrieb des Kraftwerks, wodurch sich die Bauzeit des Kraftwerks verkürzt und der Betrieb effizienter erfolgen kann. Dies honorieren auch Versicherungen und Banken in ihrer Risikobewertung und bei den Finanzierungsbedingungen. Für die Einführung von ISO-Standards (ISO = International Organization for Standardization) ist auch die Entwicklung neuer Messverfahren zur Qualitätssicherung erforderlich.

Eine wichtige Voraussetzung für den erfolgreichen Bau und Betrieb eines Kraftwerks sind **qualifizierte Arbeitskräfte**. Nationale Organisationen zur internationalen Entwicklungszusammenarbeit sollten daher geeignete Programme zur Aus- und Weiterbildung lokaler

In den nächsten 20 Jahren wird ein weltweiter Ausbau der solarthermischen Kraftwerkskapazität um das Zehn- bis Vierzigfache erwartet, in Abhängigkeit von der angenommenen Unterstützung.



Mögliche Ausbauszenarien für CSP laut World Energy Outlook der Internationalen Energieagentur.

**STEPS** (Stated Policies Scenario): Erklärte Politikziele (Status 2020);

**SDS** (Sustainable Development Scenario): Notwendige Maßnahmen zur Erreichung der UN-Nachhaltigkeitsziele, insbesondere Begrenzung der globalen Erwärmung möglichst auf 1,5 °C, in jedem Fall auf unter 2 °C.

Fachkräfte fördern. Dies geschah zum Beispiel im im enerMENA-Projekt des DLR zur Ausbildung von Fachkräften im nordafrikanischen Raum mit Unterstützung des deutschen Außenministeriums.

In Europa kann die Förderung **grenzübergreifender Energiemärkte** eine wichtige Rolle spielen, um südeuropäischen Ländern neue Absatzmärkte für Strom, Wärme, Wasserstoff und strombasierte Kraftstoffe aus solarthermischen Kraftwerken zu eröffnen und gleichzeitig die Kosten der Energieversorgung zu senken und die Versorgungssicherheit zu erhöhen (Trieb 2016; Boie 2020).

## 12. Wie kann die Technologie zur Sektorenkopplung beitragen?

Konzentrierende Solarsysteme können zukünftig Beiträge zur Dekarbonisierung des Wärme- und Brennstoffsektors leisten.



Solare Prozesswärmeerzeugung bei Kean Soft Drinks Ltd. in Limassol, Zypern. Foto: Protarget AG

Die Fähigkeit, Wärme auf unterschiedlichen Temperaturniveaus zu erzeugen, zu speichern und bedarfsgerecht wieder abzugeben, eröffnet der solarthermischen Kraftwerkstechnologie Anwendungsbereiche über die Stromerzeugung hinaus: die Bereitstellung von Wärme für den Industriesektor und die Herstellung von erneuerbarem Wasserstoff und synthetischen Kraftstoffen für den Verkehrssektor.

Der Industriesektor beansprucht rund ein Drittel des gesamten weltweiten Energieverbrauchs, davon etwa drei Viertel in Form von Wärme. Der industrielle Wärmeenergiebedarf überstieg den gesamten weltweiten Stromverbrauch um 18 Prozent (85 Exajoule gegenüber 72 Exajoule; eigene Auswertung aus IEA 2020: Data and statistics).

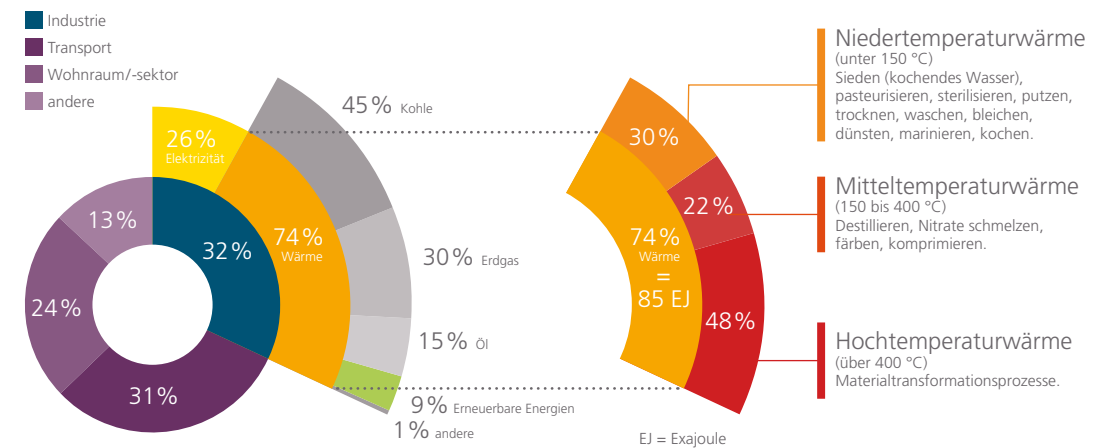
Für den **Temperaturbereich bis 400 °C**, der weltweit über die Hälfte des industriellen Wärmebedarfs ausmacht, stehen anwendungsreife Parabolrinnen- und Linear-Fresnel-Kollektoren verschiedener Hersteller zur Verfügung. Eine Parabolrinnenanlage auf Zypern liefert zum Beispiel über einen Wärmeträger-Ölkreislauf Dampf für eine Fruchtsaftproduktionsanlage. Informationen zu weiteren Anwendungsbeispielen finden sich in der im Rahmen der IEA Task 49/IV initiierten Datenbank im Internet unter [ship-plants.info](http://ship-plants.info).

Zwei Faktoren behindern noch die Verbreitung der Technologie: Zum einen erschweren die Vielfalt der industriellen Anwendungen und die jeweiligen örtlichen Gegebenheiten standardisierte Lösungen für die Integration der Solaranlage in das Gesamtsystem. Zum anderen fehlen wegen der geringen Zahl bisher gebauter Anlagen Erfahrung und Sichtbarkeit und daraus resultierend Vertrauen bei Nutzern und Investoren. Eine Arbeitsgruppe der IEA, an der deutsche Forschungseinrichtungen und Industriepartner maßgeblich beteiligt sind, adressiert diese Herausforderungen mit dem Ziel, die Solarthermie zu einem anerkannten und zuverlässigen Bestandteil industrieller Prozesswärmeversorgung zu machen (IEA 2020: Task 64).

Die EU-Vorgabe an die Mitgliedstaaten, ihren Anteil an erneuerbarer Wärme bis 2030 um jährlich 1,3 Prozentpunkte zu erhöhen (EU Renewable Energy Directive 2018), eröffnet den deutschen Technologieanbietern die Chance, kommerzielle Referenzanlagen im heimischen Markt zu realisieren und Fertigungskapazitäten aufzubauen: Allein die deutschen **Fernwärmenetze** lieferten im Jahr 2017 161 Terrawattstunden (Statistisches Bundesamt). Die Erfüllung der EU-Vorgabe in diesem Sektor würde den Bau von jährlich 5 Millionen Quadratmetern Kollektorfläche erfordern. Zum Vergleich: Das Marktvolumen für solarthermische Kollektoren in Deutschland lag 2019 insgesamt bei rund 0,5 Millionen Quadratmetern (überwiegend Flach- und Vakuumröhrenkollektoren zur Warmwasserbereitung und Heizungsunterstützung) (BSW-Solar 2020). Parabolrinnenkollektoren erreichen bei dieser Anwendung auch im hiesigen Klima gleiche Jahresenergieerträge wie Flach- oder Vakuumröhrenkollektoren – oder höhere als diese – (VDI-Richtlinie 2020) und können gerade für größere Anlagen auch in Deutschland eine vorteilhafte Technologieoption darstellen (DCSP 2020).

Vor allem vier besonders **energieintensive Branchen** nutzen Hochtemperaturwärme im Bereich oberhalb 400 °C: Eisen und Stahl, Aluminium, Chemie und Petrochemie, Kalk und Zement (IRENA 2020: Reaching Zero with Renewables). Solarturmsysteme erzeugen Temperaturen von über 1000 °C und können die benötigte Wärme in den jeweiligen Prozess einbringen – entweder direkt durch konzentrierte Strahlung oder über geeignete Wärmeträgermedien. Technologien für Anwendungen in diesen Branchen befinden sich noch in einem frühen Entwicklungsstadium, im Labor- oder Technikumsmaßstab.

Eine prominente Rolle im Zuge der zukünftigen Transformation des Energiesektors spielt **Wasserstoff**. Er dient als Speicher- und Transportmedium, als Brennstoff sowie als



kohlenstofffreier Energieträger, da er Ausgangsprodukt für die Produktion einer ganzen Reihe von flüssigen Brennstoffen und Grundstoffen ist, wie zum Beispiel Ammoniak. Nachhaltig ist Wasserstoff aber nur dann, wenn er aus dem Rohstoff Wasser abgespalten wird und dafür nachwachsende Biomasse oder erneuerbare Energien als Energiequelle genutzt werden. Eine umfassende Studie beschreibt den Stand der Entwicklung sowie den Forschungsbedarf im Bereich solarer Wasserstoffherzeugung aus Sicht des DLR (DLR 2020). Aktuell stehen folgende Verfahren im Fokus: die Wasserelektrolyse mit erneuerbarem Strom aus Sonne und Wind, die Reformierung von Biogas und die thermochemische Wasserspaltung.



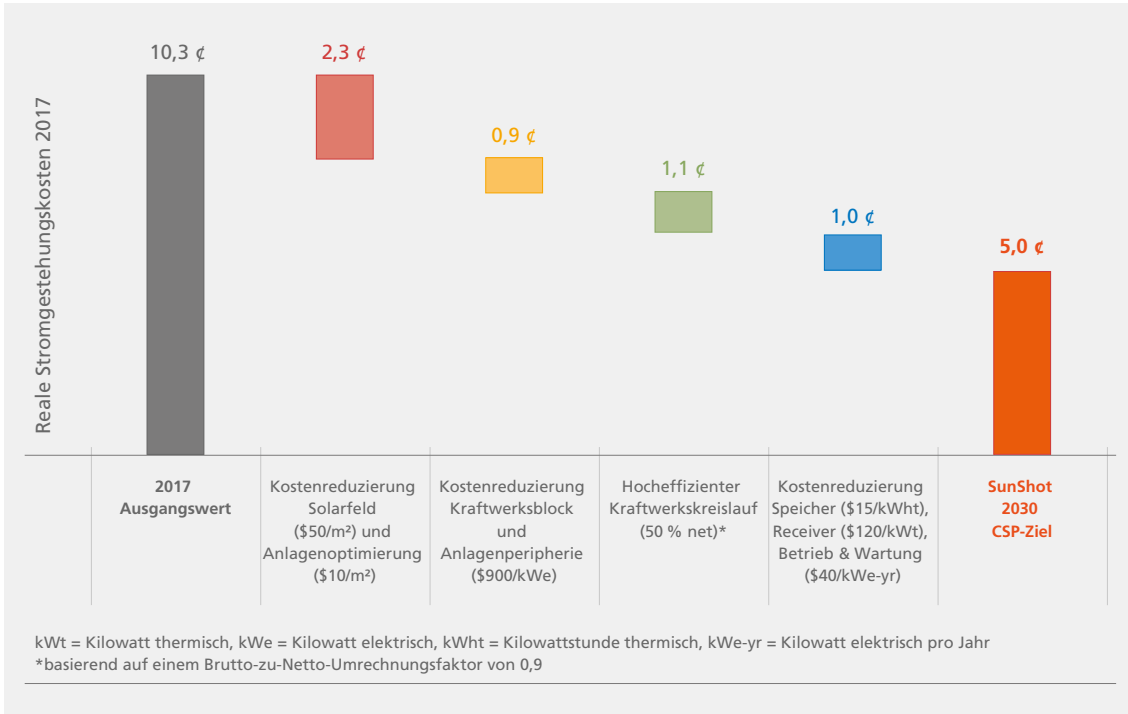
Im Hochleistungsstrahler in Köln testeten Forschende des DLR erfolgreich die solare Kalzinierung von Zementrohmehl, als Teilschritt der Zementherstellung. Bild: DLR

Die am weitesten entwickelte und bislang einzige kommerziell verfügbare Technologie zur Gewinnung von Wasserstoff aus dem Rohstoff Wasser ist die **Elektrolyse**. Schon in den nächsten Jahren sollen große Elektrolysekapazitäten zur Wasserstoffproduktion aus erneuerbarem Strom aufgebaut werden. Für die Herstellung von grünem Wasserstoff kann die CSP-Technologie neben dem Strom auch die in speziellen Hochtemperatorelektrolyseuren benötigte Wärme aus Solarenergie bereitstellen. In diesem Verfahren kann der Strombedarf der Elektrolyse reduziert und damit die Wasserstoff-Erzeugungskosten gesenkt werden. Für thermochemische Prozesse, die ausschließlich Hochtemperaturwärme bei Temperaturen oberhalb von 1000 °C benötigen, bieten sich Solarturmanlagen als Energielieferant ganz besonders an. Diese Verfahren haben einen potenziell höheren Wirkungsgrad und Flächennutzungsgrad als die Elektrolyseverfahren.

Längerfristig stellen insbesondere **solar-thermochemische Metalloxidredox-Kreisprozesse** eine vielversprechende Möglichkeit dar, Wasserstoff großskalig und ökonomisch herzustellen. Forschungsarbeiten in nationalen und internationalen Projekten haben die Prozesse und die dafür notwendigen Komponenten und Materialien in den vergangenen Jahren deutlich weiterentwickelt. Erste Pilotanlagen, wie zum Beispiel die Demonstrationsanlage des EU-Projekts SUN-to-LIQUID in Móstoles, Spanien, sind inzwischen in Betrieb.

# 13. Wie können technische Innovationen die Kosten weiter senken?

Die Stromgestehungskosten von Anlagen zur Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien hängen im Wesentlichen von drei Faktoren ab: wie viel Strom erzeugt eine Anlage einer bestimmten Größe an einem bestimmten Standort? Wie teuer ist es, sie zu errichten, und wie viel Aufwand muss man pro Jahr in Betrieb und Wartung investieren, um sie über einen Zeitraum von mehr als 20 Jahren betreiben zu können? Technische Innovationen können auf alle drei Bereiche Einfluss haben und damit zur Kostensenkung beitragen. Das US-amerikanische Department of Energy (DOE) berechnete für das Jahr 2017 Kosten von 10 US-Cent/Kilowattstunde für Strom aus solarthermischen Kraftwerken an einem guten Standort auf der Basis der zu diesem Zeitpunkt zur Verfügung stehenden Technologien (Solar Energy Technologies Office 2017). Diese Zahl liegt unterhalb der zu diesem Zeitpunkt von solarthermischen Kraftwerken tatsächlich realisierten Preise, da sie in der Regel durch den zeitlichen Vorlauf in der Planung nicht auf die neueste Technologie zugreifen konnten und meist andere Standorte und Finanzierungsbedingungen vorlagen als vom DOE für die USA angenommen. Im Rahmen einer Roadmap zeigt das DOE, wie sich diese Kosten bis zum Jahr 2030 auf etwa 5 US-Cents pro Kilowattstunde Strom halbieren lassen (siehe Grafik). Ähnliche Kostensenkungen hat das DLR im Rahmen einer von IRENA beauftragten Studie ermittelt (Dersch 2019)



Exemplarischer Entwicklungspfad hin zu 5 US-Cent/kWh für grundlastfähigen CSP-Strom (Solar Energy Technologies Office 2017, eigene Übersetzung)

Eine Stellschraube zur Erhöhung der jährlichen Stromproduktion ist der **Wirkungsgrad** der Anlage, also die Effizienz der Umwandlung von Solarstrahlung in elektrische Energie. Da solarthermische Kraftwerke diese über die Wanklungskette „Solarstrahlung-zu-Wärme-zu-Strom“ erzeugen, haben Verbesserungen an allen Gliedern der Kette Einfluss. Der wichtigste Ansatzpunkt ist die Dampfturbine (eine Wärmekraftmaschine), in der Wärmeenergie in mechanische Energie umgewandelt wird. Da nach thermodynamischen Grundsätzen der Wirkungsgrad bei höheren Prozesstemperaturen steigt, suchen Forschende sowie Unternehmen im Bereich der Kraftwerksewicklung nach Möglichkeiten, wie sich hier die

Arbeitstemperatur von heute 565 °C auf zukünftig bis zu 700 °C steigern lässt. Dazu müssen der Wärmeempfänger, das Wärmeträgermedium, der Energiespeicher sowie der gesamte Kraftwerkskreislauf an das höhere Temperaturniveau angepasst werden. Insbesondere der Wechsel des Wärmeträgermediums hat dabei erheblichen Einfluss auf das Design der übrigen genannten Komponenten.

Studien prognostizieren für den Umwandlungswirkungsgrad von Wärme zu Strom eine Erhöhung von heute etwa 42 Prozent auf 50 Prozent im Jahr 2030 (Solar Energy Technologies Office 2017, in der Abbildung unter dem Punkt „Hocheffizienter Kraftwerkskreislauf“ subsumiert). Dazu sind Dampfkraftwerke mit höheren Dampfstufen (Druck, Temperatur) oder neuartige Gasturbinensysteme geeignet, die statt Luft CO<sub>2</sub> als Kreislaufmedium einsetzen (S-CO<sub>2</sub>-Turbinen). Letztere sind heute noch nicht großtechnisch verfügbar. Aussichtsreiche Wärmeträgermedien, die sich für den genannten Temperaturbereich eignen, sind Salzmischungen, keramische Partikel oder flüssige Metalle (Ho 2014). Die Herausforderung besteht darin, auf der Basis dieser Medien Systeme zu entwickeln, die es erlauben, die Wärmeenergie bei den genannten Temperaturen bereitzustellen, zu speichern und in den Kraftwerkskreislauf einzukoppeln.

Die erhöhte Prozesstemperatur wirkt sich zusätzlich kostensenkend auf den thermischen Energiespeicher aus (siehe Grafik, Kostenreduzierung Speicher), da sich bei höherer Temperatur mehr Energie pro Einheit an Speichermasse speichern lässt.

Der zweite wichtige Hebel, um die Stromkosten zu senken, sind die Kosten des **Solarfelds** der Anlage (die Solarspiegel beziehungsweise Konzentratoren). Gezielte Maßnahmen sollen die Kosten von heute etwa 100 auf etwa 50 US-Dollar pro Quadratmeter im Jahr 2030 reduzieren (siehe Abbildung, Kostenreduzierung Solarfeld). Zum einen kann eine effiziente Fertigungstechnik und -logistik die Fertigungskosten der Einzelteile senken und den Aufbau beschleunigen. Zum anderen werden Digitalisierung und kostengünstige optische Sensorik zukünftig eine intelligente, individuelle Nachführung und Nachjustierung der Spiegel ermöglichen. Die geforderte hohe optische Qualität der Systeme ist dann nicht mehr auf eine kostenaufwändige hochpräzise Fertigung und Montage angewiesen. Mit weiteren Kostensenkungen ist zu rechnen, da die Konzentrationstechnologie erst am Anfang einer Lernkurve steht, die in der Regel bei einer Verdopplung der Produktionskapazitäten zu einer Kostensenkung um bis zu 20 Prozent führt (Samadi 2018; Pitz-Paal 2017).

Im Bereich **Wärmespeicher** besteht das Potenzial, die Kapitalkosten durch neuartige Speicherkonzepten im zweistelligen Prozentbereich zu senken. Ein vielversprechender Ansatz besteht darin, die Zweitank-Speichersysteme durch ein Eintank-Speichersystem mit Füllstoff zu ersetzen. Ein kostengünstiger Füllstoff wie Gestein speichert ebenfalls die Wärme und ersetzt dabei einen Großteil des Flüssigsalzes. Dieser Ansatz bringt weitere Vorteile wie kostengünstigere Salzpumpen und wesentlich geringere Wärmeverluste (Klasing 2020). Die bereits erwähnte Nutzung alternativer **Kraftwerkskreisläufe** erlaubt eine höhere Energiedichte in der Anlage und damit eine Senkung der Investitionskosten (siehe Grafik, Kostenreduzierung Kraftwerksblock und Anlagenperipherie).

Die Senkung der jährlichen **Betriebs- und Wartungskosten** von heute 60 auf 40 US-Dollar pro Kilowattstunde erzeugtem Strom (siehe Grafik, Betrieb&Wartung) setzt Verbesserungen bei der Regelung und Steuerung voraus. Dabei geht es um die genaue Erfassung aller Betriebszustände bei weitgehender Automatisierung des Betriebs. Die genauen Kenntnisse zum Zustand der Anlage erlauben es zum Beispiel, Wartungen vorausschauend durchzuführen und die Spiegel wassersparend nur noch bei Bedarf zu reinigen – und nicht in starren Intervallen wie bisher.

Durch technische Innovation lassen sich die Stromgestehungskosten in den nächsten 10 Jahren auf 5 US-Cents/kWh halbieren.

## 14. Welchen Beitrag leistet das DLR in der Forschungs- und Entwicklungsarbeit?

Das DLR ist seit über 40 Jahren maßgeblich an der Entwicklung konzentrierender Solar-systeme für solarthermische Kraftwerke beteiligt. Es war bereits Ende der 1970-er Jahre als Koordinator eines internationalen Konsortiums verantwortlich für den Aufbau eines ersten Pilotkraftwerks im spanischen Almería. Hier wurde erstmals in Europa der Nachweis der technischen Machbarkeit solarthermischer Stromerzeugung erbracht. Ab 2003 wurde auch die kommerzielle Markteinführung insbesondere in Spanien durch Standortanalysen, Kollektorentwicklung, Machbarkeitsstudien, Qualitätssicherungsmaßnahmen und die Ausbildung von Personal unterstützt und damit deutschen Unternehmen der Markteinstieg erleichtert.

Heute basiert die hohe Leistung in den meisten Solarfeldern solarthermischer Kraftwerke weltweit auf Technologien, die vom DLR entwickelt und vermarktet wurden. So hat die Entwicklung fortschrittlicher optischer Messtechnik die Analyse der optischen Genauigkeit von Sonnenkollektoren sowohl vor Ort als auch im Labor mit einer bis dato unerreichten Genauigkeit und Geschwindigkeit ermöglicht. Dies führte zu einer kontinuierlichen Verbesserung dieser Komponenten und Systeme. Heute sind die in Deutschland auf diesem Gebiet umfangreichsten Forschungs- und Entwicklungsarbeiten im DLR-Institut für Solarforschung gebündelt.

Ab Januar 2021 wird außerdem das Forschungsthema solar erzeugte Brennstoffe im neugegründeten DLR-Institut für Future Fuels weiterbearbeitet und ausgebaut. Die Forschung dazu und die Weiterentwicklung des Wärmespeichers führt das Institut für



Im Rahmen einer langjährigen Kooperation arbeiten Forschende des Instituts für Solarforschung auf der größten europäischen Versuchsanlage für konzentrierende Solarsysteme, der Plataforma Solar de Almería (PSA). Eigentümer und Betreiber der PSA ist das spanische Forschungszentrum CIEMAT.

Technische Thermodynamik durch. Andere Fragestellungen, die mit konzentrierenden Solartechnologien verbunden sind, werden in fünf weiteren DLR-Instituten bearbeitet. Insgesamt sind in der DLR-Energieforschung mehr als 200 Forschende aus sieben DLR-Instituten mit Arbeiten im Forschungsgebiet konzentrierende Solartechnologien befasst.

Spezielle Versuchsanlagen des DLR, wie das Forschungs- und Versuchskraftwerk Solarturm Jülich, ermöglichen die Nutzung von konzentrierter Solarstrahlung im Megawatt-Maßstab und unter realen Betriebsbedingungen. In Südspanien haben Forschende des DLR Zugang zu den Testanlagen der Plataforma Solar de Almería des spanischen Forschungszentrums CIEMAT.

Die Zielsetzungen unserer Forschung sind weitere Wirkungsgradverbesserungen der Technologie sowie Produkt- und Prozessverbesserungen, um die Stromgestehungskosten zu senken. Dabei versteht sich das DLR als Brückenbauer zwischen Forschung und Industrie. Wir überführen Innovationen gemeinsam mit Industriepartnern aus dem Labor bis in die großtechnische Anwendung.

### Die aktuellen Forschungsaktivitäten konzentrieren sich auf die folgenden vier Bereiche:

**Neue Wärmeträger- und Speichermedien**, die mit 600 °C höhere Temperaturen aufnehmen können, als es bisher in solarthermischen Kraftwerken möglich ist. Dadurch steigt der Wirkungsgrad der Umwandlung von Solarstrahlung in Wärme und weiter zu Strom. Das Kraftwerk kann dann bei gleicher Kollektorfläche mehr Strom erzeugen, so dass die Kosten pro Kilowattstunde sinken. Das DLR entwickelt und testet Komponenten und Prozesse für den Einsatz geeigneter neuer Wärmeträger- und Speichermedien zusammen mit verschiedenen Industriepartnern. Ein mit Unterstützung des DLR gegründetes Unternehmen wird die im DLR entwickelte Technologie weiterentwickeln und vermarkten (→ HelioHeat).

**Optische Messmethoden**, die auf der Datenerfassung mittels Flugdrohnen und dem im DLR entwickelten System QFly (Prah 2017 und 2018) basieren, sollen eine automatisierte Zustandsüberwachung großer Solarfelder ermöglichen. Aus der Luft ist es wesentlich einfacher möglich, das Spiegelfeld zu inspizieren, als vom Boden aus. Mit Hilfe von ausgefeilten optischen Messmethoden und Sensoren lassen sich defekte Bauteile, Verschmutzungen oder Justagebedarf wesentlich schneller und kostengünstiger lokalisieren als bislang. In diesem Bereich sind bereits zwei Unternehmen aus dem DLR heraus gegründet worden, die die im DLR entwickelte Technologie als Lizenznehmer vertreiben und weiterentwickeln (→ CSP Services, Volateq).

Forschende des DLR nutzen die hochauflösenden Daten des Solarkraftwerks, um zum Beispiel über selbstlernende Algorithmen den **intelligenten und autonomen Betrieb** des Solarkraftwerks zu ermöglichen. Damit sollen Kraftwerke zukünftig ihre Stromproduktion passend zur erwarteten Stromnachfrage regulieren können, durch vorausschauende Wartung sollen die Betriebskosten von Solarkraftwerken weiter sinken (Do Amaral Burghi 2020). Auch hier erfolgt die Entwicklung in enger Zusammenarbeit mit einem ausgegründeten Unternehmen (→ Heliokon).

Schließlich sollen Methoden bis zur industriellen Reife entwickelt werden, die solare **Hochtemperaturwärme für chemische Prozesse** nutzen. Da hier häufig deutlich höhere Temperaturen gefordert sind als bei der solarthermischen Stromerzeugung, steht die Entwicklung und Qualifizierung von geeigneten Materialien, chemischen Reaktionspartnern und Reaktorkonzepten im Fokus (Falter 2018).

DLR-Institute mit Arbeiten im Forschungsbereich konzentrierende Solartechnologien:

- **Institut für Solarforschung**  
› <https://www.dlr.de/sf>
- **Institut für Future Fuels**  
› <https://www.dlr.de/ff>
- **Institut für Technische Thermodynamik**  
› <https://www.dlr.de/tt>
- **Institut für Werkstoff-Forschung**  
› <https://www.dlr.de/wf>
- **Institut für Physik der Atmosphäre**  
› <https://www.dlr.de/pa>
- **Institut für Vernetzte Energiesysteme**  
› <https://www.dlr.de/ve>
- **Institut für CO<sub>2</sub>-arme Industrieprozesse**  
› <https://www.dlr.de/di>

Unternehmensgründungen aus dem DLR im Bereich CSP

- **CSP Services**  
› <https://www.cspservices.de/>
- **HelioHeat**  
› <http://helioheat.de/>
- **Heliokon**  
› <https://heliokon.com/>
- **Volateq**  
› <https://www.volateq.de/>



Solarthermisches Versuchskraftwerk Solarturm Jülich des DLR-Instituts für Solarforschung

# Literaturverzeichnis

## Literatur zur Einführung

**World Bank (2021):** Concentrating Solar Power: Clean Power on Demand 24/7. Washington, DC. World Bank. Digital abrufbar unter: <http://pubdocs.worldbank.org/en/849341611761898393/WorldBank-CSP-Report-Concentrating-Solar-Power-Clean-Power-on-Demand-24-7-FINAL.pdf> [05.02.2021]

**Pitz-Paál, Robert (2020):** Concentrating Solar Power in Future Energy (Third Edition). Pages 413-430, Elsevier, ISBN 9780081028865, digital abrufbar unter: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102886-5.00019-0> [18.12.2020]

**Pitz-Paál, Robert et al. (2017):** Solarthermische Kraftwerke. In: Themen 2017, S. 88-93. Forschungsverbund Erneuerbare Energien. Innovationen für die Energiewende, 8.-9.11.2017, Berlin, ISSN 0939-7582, digital abrufbar unter: <https://elib.dlr.de/124274/> [18.12.2020]

**Pitz-Paál, Robert; Elsner, Peter (2015):** Solarthermische Kraftwerke – Technologiesteckbrief zur Analyse „Flexibilitätskonzepte für die Stromversorgung 2050“. Energiesysteme der Zukunft. actatec – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e.V., digital abrufbar unter: <https://elib.dlr.de/100388/> [18.12.2020]

**Lovegrove, Keith; Stein, Wes (editors) (2021):** Concentrating Solar Power Technology – Principles, Developments, and Applications. Elsevier Ltd. Woodhead Publishing, ISBN: 978-0-12-819970-1 (print), ISBN: 978-0-12-822472-4 (eBook)

**Stieglitz, Robert; Heinzl, Volker (2012):** Thermische Solarenergie – Grundlagen, Technologie, Anwendungen. Springer-Verlag Berlin. Heidelberg, ISBN: 978-3-642-29475-4

## Literatur zu den Antworten auf häufig gestellte Fragen

**Bauer, Thomas; Odenthal, Christian ; Bonk, Alexander (2021):** Molten Salt Storage for Power Generation, Chem. Ing. Tech. 2021, 93, No. 4, 114, DOI 10.1002/cite.202000137

**BMWi (2020):** Die Nationale Wasserstoffstrategie. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), Berlin, digital abrufbar unter: <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/die-nationale-wasserstoffstrategie.html> [23.11.2020]

**Boie, Inga; Franke, Katja (2020):** Synthesis of Key Issues Affecting CSP Development in Europe. Deliverable 10.1, MUSTEC Project, Fraunhofer ISI, Karlsruhe, digital abrufbar unter: [https://www.mustec.eu/sites/default/files/reports/MUSTEC\\_D10.1\\_Synthesis%20of%20key%20issues%20affecting%20CSP%20development%20in%20Europe.pdf](https://www.mustec.eu/sites/default/files/reports/MUSTEC_D10.1_Synthesis%20of%20key%20issues%20affecting%20CSP%20development%20in%20Europe.pdf) [23.11.2020]

**Bošnjaković, Mladen; Tadijanović, Vlado (2019):** Environment impact of a concentrated solar power plant. In: Tehnički Glasnik – (der Titel lautet insgesamt: Tehnicki Glasnik - Technical Journal, vgl. <https://publons.com/journal/166059/tehnicki-glasnik-technical-journal/>) Technical Journal Vol. 13, No. 1 (2019), pp. 68-74, Slavonski Brod/Podvinje, Kroatien, digital abrufbar unter: <https://hrcak.srce.hr/218168?lang=en> [17.12.2020]

**BSW-Solar, Bundesverband Solarwirtschaft e.V. (2020):** Statistische Zahlen der deutschen Solarwärmebranche (Solarthermie). Berlin, digital abrufbar unter: [https://www.solarwirtschaft.de/datawall/uploads/2020/04/bsw\\_faktenblatt\\_solarthermie.pdf](https://www.solarwirtschaft.de/datawall/uploads/2020/04/bsw_faktenblatt_solarthermie.pdf) [01.02.2021]

**Cole, Wesley; Frazier, A. Will (2020):** Cost Projections for Utility-Scale Battery Storage: 2020 Update. Technical Report NREL/TP-6A20-75385, National Renewable Energy Laboratory (NREL), Golden (Colorado), USA, digital abrufbar unter: <https://www.nrel.gov/docs/fy20osti/75385.pdf> [17.12.2020]

**Craig, Toyosi OO; Duvenhage, Frank et. al. (2019):** An Analysis of Local Manufacturing Capacity, Economic and Trade Impact of Concentrating Solar Power (CSP) in South Africa. In: AIP Conference Proceedings (Vol. 2126, No. 1, p. 130002), AIP Publishing LLC, digital abrufbar unter: [https://www.researchgate.net/publication/334727293\\_An\\_analysis\\_of\\_local\\_manufacturing\\_capacity\\_economic\\_and\\_trade\\_impact\\_of\\_concentrating\\_solar\\_power\\_CSP\\_in\\_South\\_Africa](https://www.researchgate.net/publication/334727293_An_analysis_of_local_manufacturing_capacity_economic_and_trade_impact_of_concentrating_solar_power_CSP_in_South_Africa) [17.12.2020]

**CSPFocus (2020):** Generation from Spain’s Existing 2.3 GW of CSP Showing Annual Increases. In: CSP News Briefs (03.03.2020), SolarPACES/ iea Energy Technology Network, digital abrufbar unter: <https://www.solarpaces.org/generation-from-spains-existing-2-3-gw-of-csp-showing-steady-annual-increases/> [18.11.2020]

**DCSP Positionspapier 2020:** Grüner Dampf und grüne Prozesswärme – produziert mit solarthermischen Anlagen in Deutschland. Deutscher Industrieverband Concentrated Solar Power, digital abrufbar unter: <https://docplayer.org/195347780-Positionspapier-positions-papier-gruener-dampf-und-gruene-prozesswaerme-produziert-mit-solarthermischen-anlagen-in-deutschland.html> [12.01.2021]

**Deloitte (2010):** Macroeconomic Impact of Solar Thermal Electricity Industry in Spain. Study elaborated by Deloitte; on request of the Spanish Association of Solar Thermal Industry PROTERMOSOLAR, digital abrufbar unter: [http://www.eusolaris.eu/Portals/0/documents/macro-economic\\_impact\\_of\\_the\\_solar\\_thermal\\_electricity\\_industry\\_in\\_spain\\_protermo\\_solar\\_deloitte\\_21x21.pdf?ver=2016-03-27-201338-373](http://www.eusolaris.eu/Portals/0/documents/macro-economic_impact_of_the_solar_thermal_electricity_industry_in_spain_protermo_solar_deloitte_21x21.pdf?ver=2016-03-27-201338-373) [17.12.2020]

**Denholm, Paul; Hand, Maureen (2011):** Grid flexibility and storage required to achieve very high penetration of variable renewable electricity. In: Energy Policy, Vol. 39, Issue 3, Elsevier, pp. 1817-1830, digital abrufbar unter: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421511000292> [18.11.2020]

**Dersch, Jürgen; Dieckmann, Simon et. al (2019):** LCOE Reduction Potential of Parabolic Trough and Solar Tower Technology in G20 Countries until 2030. SolarPACES Conference 2019, Deagu, Südkorea, digital abrufbar unter: <https://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/5.0028883> [05.02.2021]

**Dii (2013):** The Economic Impacts of Desert Power: Socio-economic Aspects of an EUMENA Renewable Energy Transition. Dii GmbH, München, digital abrufbar unter: [https://dii-desertenergy.org/wp-content/uploads/2016/12/2013-07-30\\_Dii\\_EIDP\\_EN\\_Digital.pdf](https://dii-desertenergy.org/wp-content/uploads/2016/12/2013-07-30_Dii_EIDP_EN_Digital.pdf) [18.12.2020]

**DLR (2020):** Wasserstoff als ein Fundament der Energiewende, **Teil 1:** Technologien und Perspektiven für eine nachhaltige und ökonomische Wasserstoffversorgung. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), digital abrufbar unter: <https://www.dlr.de/content/de/downloads/publikationen/broschueren/2020/wasserstoffstudie-teil-1.pdf> [12.01.2021]

**DLR (2020):** Wasserstoff als ein Fundament der Energiewende, **Teil 2:** Sektorenkopplung und Wasserstoff: Zwei Seiten der gleichen Medaille. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), digital abrufbar unter: [https://www.dlr.de/content/de/downloads/publikationen/broschueren/2020/wasserstoffstudie-teil-2.pdf?jsessionid=D4EA311BD8B1FDD7A7539203E823574.delivery-replication1?\\_\\_blob=publicationFile&v=3](https://www.dlr.de/content/de/downloads/publikationen/broschueren/2020/wasserstoffstudie-teil-2.pdf?jsessionid=D4EA311BD8B1FDD7A7539203E823574.delivery-replication1?__blob=publicationFile&v=3) [24.11.2020]

**Do Amaral Burghi, Ana Carolina; Hirsch, Tobias; Pitz-Paál, Robert (2020):** Artificial Learning Dispatch Planning for Flexible Renewable-Energy Systems. In: Modeling and Control of Smart Energy Systems. Energies 2020, 13 (6), 1517, digital abrufbar unter: <https://doi.org/10.3390/en13061517> [24.11.2020]

**EASAC (2011):** Concentrating solar power: its potential contribution to a sustainable energy future. EASAC policy report 16, ISBN: 978-3-8047-2944-5, European Academies Science Advisory Council EASAC, 2011, Halle (Saale), digital abrufbar unter <https://easac.eu/publications/details/concentrating-solar-power-its-potential-contribution-to-a-sustainable-energy-future/> [05.02.2021]

**Eickhoff, Martin (DLR); Brakmann, Georg (Fichtner Solar GmbH) (2010):** Bauüberwachung Solarthermischer Kraftwerke in Nordafrika. 13. Kölner DLR-Sonnenkolloquium, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), Köln, digital abrufbar unter: [https://www.dlr.de/sf/en/PortalData/73/Resources/dokumente/Soko/Soko2010/5\\_Eickhoff\\_Bau\\_berwachung\\_Nordafrika.pdf](https://www.dlr.de/sf/en/PortalData/73/Resources/dokumente/Soko/Soko2010/5_Eickhoff_Bau_berwachung_Nordafrika.pdf) [18.11.2020]

**EU Renewable Energy Directive (2018):** Richtlinie (EU) 2018/2001 vom 12. Dezember 2018 zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen, digital abrufbar unter: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2018/2001/oj> [21.1.2021]

**Falter**, Christoph; Pitz-Paal, Robert **(2018)**: Energy analysis of solar thermochemical fuel production pathway with a focus on waste heat recuperation and vacuum generation. In: Solar Energy, Vol. 176, pp. 230-240, Elsevier, digital abrufbar unter: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.10.042> [21.01.2021]

**Gazzo**, Alexis; Kost, Christoph et al. **(2011)**: Middle East and North Africa Region Assessment of the Local Manufacturing Potential for Concentrated Solar Power (CSP) Projects. The World Bank, Washington, digital abrufbar unter: [https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/ccx/2019/CSP\\_MENA\\_\\_report\\_17\\_Jan2011.pdf](https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/ccx/2019/CSP_MENA__report_17_Jan2011.pdf) [17.12.2020]

**HeliosCSP (2019)**: ESTELA welcomes the proposed “Integrated National Energy and Climate Plans” from the Spanish government – HeliosCSP, PROTERMOSOLAR. Digital abrufbar unter: <http://helioscsp.com/estela-welcomes-the-proposed-integrated-national-energy-and-climate-plans-from-the-spanish-government/> [13.01.2021]

**Ho**, Clifford K.; Iverson, Brian D. **(2014)**: Review of high-temperature central receiver designs for concentrating solar power. In: Renewable & Sustainable Energy Reviews, Vol. 29, pp. 835-846, Elsevier, digital abrufbar unter: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.099> [24.11.2020]

**Hümmer**, Matthias **(2020)**: Komplexität und deren Beherrschung in internationalen Groß- und Megaprojekten des deutschen Großanlagenbaus. Dissertation, Technische Fakultät, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU), Erlangen 2020, digital abrufbar unter: <https://opus4.kobv.de/opus4-fau/frontdoor/index/index/year/2020/docId/14804> [18.12.2020]

**IEA International Energy Agency (2010)**: Technology Roadmap – Concentrating Solar Power. International Energy Agency, Paris, digital abrufbar unter: [https://energypedia.info/images/e/e1/Concentrating\\_Solar\\_Power\\_-\\_Technology\\_Road\\_Map.pdf](https://energypedia.info/images/e/e1/Concentrating_Solar_Power_-_Technology_Road_Map.pdf) [23.11.2020]

**IEA International Energy Agency (2014)**: Technology Roadmap – Solar Thermal Electricity. International Energy Agency, Paris, digital abrufbar unter: [http://www.solarpaces.org/wp-content/uploads/IEA\\_TechnologyRoadmapSolarThermalElectricity\\_2014edition.pdf](http://www.solarpaces.org/wp-content/uploads/IEA_TechnologyRoadmapSolarThermalElectricity_2014edition.pdf) [17.12.2020]

**IEA International Energy Agency (2020): Energy Technology R&D Budgets** – Database. Digital abrufbar unter: [https://www.oecd-ilibrary.org/energy/data/iea-energy-technology-r-d-statistics\\_enetech-data-en](https://www.oecd-ilibrary.org/energy/data/iea-energy-technology-r-d-statistics_enetech-data-en) [20.1.2021]

**IEA International Energy Agency (2020): Task 64** – Solar Process Heat. Digital abrufbar unter: <https://task64.iea-shc.org/> [15.01.2021]

**IEA International Energy Agency (2020): World Energy Outlook 2020**. OECD Publishing, Paris, digital abrufbar unter: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2020> [20.01.2021]

**IRENA (2019)**: Utility-Scale Batteries – Innovation Landscape Brief. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, digital abrufbar unter: [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Sep/IRENA\\_Utility-scale-batteries\\_2019.pdf](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Sep/IRENA_Utility-scale-batteries_2019.pdf) [14.01.2021]

**IRENA (2020): Reaching Zero with Renewables**: Eliminating CO<sub>2</sub> emissions from industry and transport in line with the 1.5 °C climate goal. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. ISBN 978-92-9260-269-7, digital abrufbar unter: <https://www.irena.org/publications/2020/Sep/Reaching-Zero-with-Renewables> [05.02.2021]

**IRENA (2020): Renewable Power Generation Costs** in 2019. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, digital abrufbar unter: <https://www.irena.org/publications/2020/Jun/Renewable-Power-Costs-in-2019> [14.01.2021]

**Klasing**, Freerk; Hirsch, Tobias et al. **(2020)**: Techno-Economic Optimization of Molten Salt Concentrating Solar Power Parabolic Trough Plants with Packed-Bed Thermocline Tanks. Journal of Solar Energy Engineering, Vol. 142 (5), digital abrufbar unter: <https://asmedigitalcollection.asme.org/solarenergyengineering/article/142/5/051006/1074911/Techno-Economic-Optimization-of-Molten-Salt> [05.02.2021]

**Krüger**, Dirk; Epp, Bärbel et al. **(2020)**: Developments in Solar Heat from Concentrating Solar Systems. Paper submitted at SolarPACES 2020, in review for AIP proceedings

**Lilliestam**, Johan; Ollier, Lana et al. **(2020)**: The near- to mid-term outlook for concentrating solar power: mostly cloudy, chance of sun. Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy, DOI: 10.1080/15567249.2020.1773580, digital abrufbar unter: <https://doi.org/10.1080/15567249.2020.1773580> [21.01.2021]

**Mehos**, Mark; Price, Hank et. al. **(2020)**: Concentrating Solar Power Best Practices Study. Technical Report NREL/TP-5500-75763, National Renewable Energy Laboratory (NREL), Golden (Colorado), USA, digital abrufbar unter: <https://www.nrel.gov/docs/fy20osti/75763.pdf> [18.11.2020]

**Milani**, Rodrigo; Caiado Couto, Lilia et. al. **(2020)**: Promoting social development in developing countries through solar thermal power plants. Journal of Cleaner Production, Vol. 246, 119072, digital abrufbar unter: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652619339423?via%3Dihub> [17.12.2020]

**Morin**, Gabriel; Dersch, Jürgen et. al **(2012)**: Comparison of Linear Fresnel and Parabolic Trough Collector power plants. In: Solar Energy, Vol. 86, pp. 1-12, Elsevier, digital abrufbar unter: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2011.06.020> [24.11.2020]

**Öko-Institut e.V. und Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI) (2015)**: Klimaschutzszenario 2050 – 2. Endbericht, im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB), Berlin, digital abrufbar unter: <https://www.oeko.de/oekodoc/2451/2015-608-de.pdf> [23.11.2020]

**Ong**, Sean; Campbell, Clinton et. al. **(2013)**: Land-Use Requirements for Solar Power Plants in the United States. Technical Report NREL/TP-6A20-56290, National Renewable Energy Laboratory (NREL), Golden (Colorado), USA, digital abrufbar unter: <https://www.nrel.gov/docs/fy13osti/56290.pdf> [17.12.2020]

**O’Sullivan**, Marlene; Edler, Dietmar **(2020)**: Gross Employment Effects in the Renewable Energy Industry in Germany: An Input-Output Analysis from 2000 to 2018. In: Sustainability 12 (15), 6163, digital abrufbar unter: <https://doi.org/10.3390/su12156163> [23.11.2020]

**Papaelias**, Mayorkinos; Cheng, Liang et al. **(2016)**: Inspection and Structural Health Monitoring Techniques for Concentrated Solar Power Plants. In: Renewable Energy, Vol. 85, pp.. 1178-1191, digital abrufbar unter: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960148115301683> [18.11.2020]

**Pitz-Paal**, Robert **(2017)**: Concentrating Solar Power Systems. Nature Energy, Nature Publishing Group, digital abrufbar unter: <https://doi.org/10.1038/nenergy.2017.95> [05.02.2021]

**Prahl**, Christoph; Porcel, Laura et al. **(2018)**: Airborne Characterization of the Andasol-3 Solar Field, AIP Conference Proceedings 2033, 030013 (2018), SolarPACES, Santiago de Chile, 2017, ISBN: 978-0-7354-1757-1, digital abrufbar unter: <https://doi.org/10.1063/1.5067029> [05.02.2020]

**Prahl**, Christoph; Röger, Marc; Hilgert, Christoph **(2017)**: Air-borne shape measurement of parabolic trough collector fields: AIP Conf. Proc. 1850, 020013 (2017); SolarPACES 2016, Abu Dhabi, UAE, published Jun 27, 2017, digital abrufbar unter: <http://doi.org/10.1063/1.4984338> [05.02.2020]

**PricewaterhouseCoopers GmbH (2017)**: EPC-Fähigkeit der deutschen Unternehmen im Bereich der Bauwirtschaft und des Maschinen- und Anlagenbaus. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi), digital abrufbar unter: <https://www.bmw.de/Redaktion/DE/Publikationen/Studien/epc-faehigkeit-lang.html> [18.12.2020]

**REN21 (2020)**: Renewables 2020 – Global Status Report. UN Environment Programme, REN21 Secretariat, Paris, digital abrufbar unter: [https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/gsr\\_2020\\_full\\_report\\_en.pdf](https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/gsr_2020_full_report_en.pdf) [18.12.2020]

**WWF (2015)**: Concentrated Solar Power: A Strategic Industrial Development Opportunity for South Africa. World Wide Fund (WWF) South Africa, digital abrufbar unter: [http://awsassets.wwf.org.za/downloads/concentrated\\_solar\\_power\\_report\\_final.pdf](http://awsassets.wwf.org.za/downloads/concentrated_solar_power_report_final.pdf) [17.12.2020]

**Samadi, Sascha (2018):** The Experience Curve Theory and its Application in the Field of Electricity Generation Technologies – A Literature Review. In: Renewable & Sustainable Energy Reviews, Vol. 82, Part 3, pp. 2346-2364, Elsevier, digital abrufbar unter: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.08.077> [24.11.2020]

**Sattler, Klaus; Kasper, Werner (2000):** Verfahrenstechnische Anlagen: Planung, Bau und Betrieb. Band 1, Wiley-VCH.

**Schöniger Franziska; Thonig Richard; Resch Gustav; Lilliestam Johan (2021):** Making the sun shine at night: comparing the cost of dispatchable concentrating solar power and photovoltaics with storage. Energy Sources. Part B: Economics, Planning, and Policy, DOI. Digital abrufbar unter: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/15567249.2020.1843565> [09.03.2021]

**Siemens AG (2019):** Solar Power Night and Day – Dispatchable Power Made Available by Industrial Steam Turbines. Erlangen, digital abrufbar unter: <https://assets.siemens-energy.com/siemens/assets/api/uuid:1e8dc642-4c91-46ee-b9e4-417b494bc0db/csp-brochure-2019.pdf> [23.11.2020]

**Stadler, Ingo et. al. (2019):** Thermal Energy Storage. In: Sterner, Michael; Ingo Stadler (2019): Handbook of Energy Storage – Demand, Technologies, Integration. S. 563-609, Springer Verlag Berlin Heidelberg.

**Statistisches Bundesamt:** Pressemitteilung Nr. 434 (9.11.2018), digital abrufbar unter: [https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2018/11/PD18\\_434\\_434.html](https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2018/11/PD18_434_434.html) [18.1.2021]

**Steffen, Guido (2019):** Erste Hürde genommen: Pilotprojekt StoreToPower auf Shortlist möglicher „Reallabore der Energiewende“. Pressemitteilung, RWE Power AG, Essen/Köln, digital abrufbar unter: <https://www.group.rwe/presse/rwe-power/2019-07-18-erste-huerde-genommen-pilotprojekt-storetopower-auf-shortlist> [23.11.2020]

**Steinbacher, Karoline; Fichter, Tobias et. al. (2020):** The role of coal in the energy mix of MENA countries and alternative pathways. Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ), digital abrufbar unter: [https://www.giz.de/de/downloads/GIZ\\_2020\\_Role-of-coal-in-energy-mix-of-MENA-countries.pdf](https://www.giz.de/de/downloads/GIZ_2020_Role-of-coal-in-energy-mix-of-MENA-countries.pdf) [18.11.2020]

**Steinmann, Wolf-Dieter (2021):** Thermal energy storage systems for concentrating solar power plants. In: Lovegrove, Keith; Stein, Wes: Concentrating Solar Power Technology (Second Edition). S. 399-440, Woodhead Publishing.

**Telsnig, Thomas (2015):** Standortabhängige Analyse und Bewertung solarthermischer Kraftwerke am Beispiel Südafrikas. Forschungsbericht, D 93 (Dissertation der Universität Stuttgart), Band 123, Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, Universität Stuttgart, digital abrufbar unter: [https://elib.uni-stuttgart.de/bitstream/11682/2401/1/Dissertation\\_TELSNIG.pdf](https://elib.uni-stuttgart.de/bitstream/11682/2401/1/Dissertation_TELSNIG.pdf) [17.12.2020]

**Teske, Sven (Greenpeace International); Janis Leung (ESTELA) et. al. (2016):** Solar Thermal Electricity. Global Outlook 2016. Greenpeace International, European Solar Thermal Electricity Association (ESTELA), SolarPACES Secretariat, digital abrufbar unter: [https://www.estelasolar.org/wp-content/uploads/2016/02/GP-ESTELA-SolarPACES\\_Solar-Thermal-Electricity-Global-Outlook-2016\\_Full-report.pdf](https://www.estelasolar.org/wp-content/uploads/2016/02/GP-ESTELA-SolarPACES_Solar-Thermal-Electricity-Global-Outlook-2016_Full-report.pdf) [18.11.2020]

**Trieb, Franz; Hess, Denis (2016):** Solarstromexport als Baustein einer Energiepartnerschaft Europas und Nordafrikas. Energiewirtschaftliche Tagesfragen, 10, ETV Energieverlag, digital abrufbar unter: [https://www.researchgate.net/publication/312216229\\_Solarstromexport\\_als\\_Baustein\\_einer\\_Energiepartnerschaft\\_Europas\\_und\\_Nordafrikas](https://www.researchgate.net/publication/312216229_Solarstromexport_als_Baustein_einer_Energiepartnerschaft_Europas_und_Nordafrikas) [05.02.2021]

**Trieb, Franz; Schillings, Christoph et al. (2012):** Solar Electricity Imports from the Middle East and North Africa to Europe. In: Energy Policy, Vol. 42, pp. 341-353, Elsevier, digital abrufbar unter: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.11.091> [23.11.2020]

**Trieb, Franz; Thess, André (2020):** Storage plants – a solution to the residual load challenge of the power sector? In: Journal of Energy Storage, Vol. 31, 101626, Elsevier, digital abrufbar unter: <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101626> [24.11.2020]

**Turchi, C.S.; Wagner, M.J.; Kutscher, C.F. (2010):** Water Use in Parabolic Trough Power Plants: Summary Results from WorleyParsons' Analyses. Technical Report NREL/TP-5500-49468, National Renewable Energy Laboratory, Golden (Colorado), USA, digital abrufbar unter: <https://www.nrel.gov/docs/fy11osti/49468.pdf> [18.11.2020]

**United Nations (2020):** World Economic Situation and Prospects 2020. United Nations, New York, 2020, digital abrufbar unter: [https://unctad.org/system/files/official-document/wesp2020\\_en.pdf](https://unctad.org/system/files/official-document/wesp2020_en.pdf) [05.02.2021]

**Van Heerden, Hendrik Petrus (2020):** Avian Impact of South Africa's first Concentrating Solar Power Facility in the Northern Cape. Thesis Master of Science in Conservation Ecology, Faculty of AgriSciences, Stellenbosch University, Südafrika, online abrufbar unter: <https://scholar.sun.ac.za/handle/10019.1/107937>

**VDI-Richtlinie (2020):** 3988 Solarthermische Prozesswärme. Beuth Verlag, Berlin

**Wuppertal Institut; Germanwatch (2015):** Social CSP – Energy and development: exploring the local livelihood dimension of the Noorol CSP project in Southern Morocco. Final report to the German Federal Ministry for Economic Cooperation and Development (BMZ), Wuppertal Institute for Climate, Environment and Energy (Wuppertal) Germanwatch (Bonn), digital abrufbar unter: <https://germanwatch.org/en/10566> [18.1.2021]

---

## Grafiken und Daten

### Frage 3:

Datenquelle der Grafik: Bonilla, Javier; Crespo, Luis (2020): Inductive Projection Planning: Putting CSP in the Picture. SolarPACES Conference 2020 (noch nicht veröffentlicht).

### Frage 4:

IRENA (2020): Renewable Power Generation Costs in 2019. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, digital abrufbar unter: <https://www.irena.org/publications/2020/Jun/Renewable-Power-Costs-in-2019> [14.01.2021]

### Frage 5:

IPCC (2012): Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation. Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. S. 19, Cambridge University Press, New York, digital abrufbar unter: <https://www.ipcc.ch/report/renewable-energy-sources-and-climate-change-mitigation/> [17.12.2020]

### Frage 7 und Frage 8:

DCSP Deutscher Industrieverband Concentrated Solar Power (2018): Verbandspräsentation, digital abrufbar unter: <https://deutsche-csp.de/wp-content/uploads/180124-Deutsche-CSP-Verbandspr%C3%A4sentation.pdf> [21.02.2021]

### Frage 9:

REN21 (2020): Renewables 2020 – Global Status Report. UN Environment Programme, REN21 Secretariat, S. 121, Paris, digital abrufbar unter: [https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/gsr\\_2020\\_full\\_report\\_en.pdf](https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/gsr_2020_full_report_en.pdf) [18.12.2020]

### Frage 11:

IEA International Energy Agency (2020): World Energy Outlook 2020. OECD Publishing, Paris, <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2020> [20.01.2021]

### Frage 12:

Epp, Bärbel; Oropeza, Marisol (Editors) (2017): Solar Heat for Industry. Projektbroschüre Solar Payback, gefördert durch BMU, digital abrufbar unter: <https://www.solar-payback.com/download/solar-heat-for-industry-april-2017/> [13.01.2021]

IEA (2020): Data and statistics. Digital abrufbar unter: <https://www.iea.org/data-and-statistics> [21.02.2021]

### Frage 13:

Solar Energy Technologies Office, U. S. Department of Energy (2017): The Sunshot 2030 Goals: 3¢ per Kilowatt Hour for PV and 5¢ per Killowatt Hour for Dispatchable CSP. The Sunshot Goals, DOE/EE-1501, Office of Energy Efficiency & Renewable Energy, digital abrufbar unter: <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2020/09/f79/SunShot%202030%20White%20Paper.pdf> [23.11.2020]



Parabolrinne auf der Plataforma Solar de Almería (PSA). Eigentümer der PSA ist das spanische Forschungszentrum CIEMAT.

# Impressum

**Herausgeber:**

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR)  
Institut für Solarforschung  
[www.dlr.de/sf/](http://www.dlr.de/sf/)

**Anschrift:**

Linder Höhe, 51147 Köln  
Tel.: +49 2203 601 3226  
E-Mail: [solarforschung@dlr.de](mailto:solarforschung@dlr.de)

**DLR.de****Redaktion:**

Prof. Dr.-Ing. Robert Pitz-Paal (Direktor, Institut für Solarforschung)  
Elke Reuschenbach  
Klaus Hennecke

**Autoren:**

Daniel Benitez  
Dr.-Ing. Reiner Buck  
Dr.-Ing. Jürgen Dersch  
Dr.-Ing. Hans-Gerd Dibowski  
Martin Eickhoff  
Klaus Hennecke  
Dr.-Ing. Tobias Hirsch  
Dirk Krüger  
Dr.-Ing. Eckhard Lüpfert  
Dr. Marlene O'Sullivan  
Dr.-Ing. Andreas Pfahl  
Prof. Dr.-Ing. Robert Pitz-Paal  
Dr. Christoph Richter  
Dr. Martin Roeb  
Anne Schlierbach  
Jana Stengler  
Dr.-Ing. Kai Wieghardt

**Beteiligte Institute:**

Institut für Solarforschung  
Institut für Technische Thermodynamik  
Institut für Vernetzte Energiesysteme

**Design:**

bplUSD agenturgruppe GmbH  
The Ship, Vitalisstraße 67, 50827 Köln  
[www.bplUSD.de](http://www.bplUSD.de)

**Veröffentlichung:**

Köln, Februar 2021

**Images:**

Die Bilder sind Eigentum des DLR, soweit nicht anders angegeben.

## Das DLR im Überblick

Das DLR ist das Forschungszentrum der Bundesrepublik Deutschland für Luft- und Raumfahrt. Wir betreiben Forschung und Entwicklung in Luftfahrt, Raumfahrt, Energie und Verkehr, Sicherheit und Digitalisierung. Die Deutsche Raumfahrtagentur im DLR ist im Auftrag der Bundesregierung für die Planung und Umsetzung der deutschen Raumfahrtaktivitäten zuständig. Zwei DLR-Projekträger betreuen Förderprogramme und unterstützen den Wissenstransfer.

Global wandeln sich Klima, Mobilität und Technologie. Das DLR nutzt das Know-how seiner 54 Institute und Einrichtungen, um Lösungen für diese Herausforderungen zu entwickeln. Unsere 10.000 Mitarbeitenden haben eine gemeinsame Mission: Wir erforschen Erde und Weltall und entwickeln Technologien für eine nachhaltige Zukunft. So tragen wir dazu bei, den Wissens- und Wirtschaftsstandort Deutschland zu stärken.



**Deutsches Zentrum  
DLR für Luft- und Raumfahrt**

Gefördert durch:



**Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie**

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages