

SunSonne





1	Introduction <i>Einführung</i>	4
2	Reliable and Predictable Electricity Supply <i>Zuverlässige, planbare Strombereitstellung</i>	10
3	Design <i>Entwurf</i>	16
4	Structure <i>Struktur</i>	22
5	Optics <i>Optik</i>	34
6	Drive Mechanisms <i>Antriebe</i>	46
7	Techno-economic Analysis and Optimisation <i>Techno-ökonomische Analyse und Optimierung</i>	54
8	Thermodynamics <i>Thermodynamik</i>	60
9	Power Station <i>Kraftwerk</i>	68
10	Prospects <i>Ausblick</i>	74
	Appendix <i>Anhang</i>	78
	Imprint <i>Impressum</i>	80

1 Introduction

Einführung

schlaich bergemann partner has been an independent engineering office working in the renewable energy sector for over 35 years. Starting out as far back as the first oil crisis in 1973, we have worked on concepts and ideas in solar power generation and gained experience in the design, construction and operation of solar thermal power plants with projects in both Germany and abroad.

Some of our other building projects realised in those days, such as the 2nd Hooghly River Bridge in Calcutta/India, showed us that there can be no prosperity and human existence without sufficient energy supply.

For us as a civil engineering office, the focus of our first projects was the development of new innovative structures for renewable energy systems. Examples include developing tower and collector designs for the first solar updraft tower and collector designs for the first solar updraft tower plant in Spain and the introduction of prestressed metal membranes for parabolic mirrors used for solar energy supply close to the city of Riyadh in Saudi Arabia (**Fig. 3**). Over the course of the years, however, it became clear that solar energy would develop into a completely new field of activity for engineers that does not fit effectively or successfully into one traditional engineering discipline alone. It is impossible to develop efficient and cost-effective systems with just structural engineering knowledge alone and without an understanding of thermodynamics, control and drive technology or knowledge of optics in concentrating solar structures, as well as many other spheres.

***schlaich bergemann partner** ist als unabhängiges Ingenieurbüro seit über 35 Jahren im Bereich der erneuerbaren Energien tätig. Bereits nach der ersten Ölkrise 1973 haben wir uns mit Konzepten und Ideen zur solaren Stromerzeugung beschäftigt und in ersten Projekten Erfahrungen bei der Planung, dem Bau und dem Betrieb von solarthermischen Anlagen im In- und Ausland gesammelt. Auch manche unserer anderen damaligen Bauprojekte, wie z. B. die 2. Hooghly River Bridge in Kalkutta/Indien, führten uns immer wieder vor Augen, dass es ohne ausreichende Energieversorgung keinen Wohlstand und kein menschenwürdiges Dasein geben kann.*

*Für uns als Bauingenieurbüro lag der Schwerpunkt bei den ersten Projekten auf der Entwicklung von neuen innovativen Strukturen für erneuerbare Energiesysteme. Beispiele sind die Entwicklung von Kamin- und Kollektorvarianten für den Bau des ersten Aufwind-Kraftwerkes in Spanien oder die Einführung von vorgespannten Metallmembranen für große Parabolspiegel bei Riad in Saudi-Arabien (**Abb. 3**). Im Laufe der Jahre stellte sich aber heraus, dass sich hier ein völlig neuartiges Betätigungsfeld für Ingenieure eröffnet, das durch eine der bekannten Ingenieurdisziplinen alleine nicht effektiv und erfolgreich bearbeitet werden kann. Allein mit Bauingenieurwissen aber ohne Verständnis von Thermodynamik, ohne Steuerungs- und Antriebstechnik, ohne Kenntnis der reflektierenden und brechenden Optik bei konzentrierenden Solarstrukturen usw., sind effiziente und kostengünstige Systeme nicht entwickelbar.*



The classical way of implementing complex projects, i.e. cooperation between several offices with different areas of expertise, leads to high expenditure in terms of interface management, a consequential loss of innovation, systemic 'blindness' and the inability to optimise the overall system with the objective of creating trend-setting integrated system solutions.

Based on this insight, a highly productive team has emerged over the course of projects and the years. Initially formed only of structural engineers, the team later added mechanical engineers, electrical engineers, aerospace engineers, physicists, mathematicians and specialists in optical systems and thermodynamics—creating a team that can now perform complex tasks comprehensively.

Why are we focussed on the sun? The greatest source of energy mankind has at its disposal is the sun. Year after year, the earth's outer atmosphere is hit by radiation energy of around 1.5×10^{18} kWh or 5,461,000 Exajoules, corresponding to around ten thousand times the level of today's primary energy consumption throughout the world (approx. 580 exajoules in 2018). Only if mankind succeeds in using this cost-free energy supply in a cost-effective way by developing suitable new technologies will a resource-saving and environmentally friendly source of energy be available to the world for the foreseeable future (Fig. 4).

As a result of the increase in global population and the exhaustion of fossil-based energy sources such as crude oil or natural gas, and

Die klassische Art der Bearbeitung wiederum, d.h. durch mehrere Büros mit unterschiedlichen Schwerpunkten, führt zu großem Aufwand bei der Schnittstellenbetreuung mit damit einhergehendem Innovationsverlust, systemischer „Blindheit“ und der Unfähigkeit, das Gesamtsystem zu optimieren, um zukunfts-trächtige ganzheitliche Systemlösungen zu erarbeiten. Ausgehend von dieser Erkenntnis wuchs im Zuge der Projekte und Jahre ein leistungsfähiges Team heran, anfänglich bestehend aus reinen Bauingenieuren, dann erweitert durch Ingenieure des Maschinenbaus, der Elektrotechnik und der Luft- und Raumfahrttechnik, Physiker, Mathematiker sowie Spezialisten für optische Systeme und Thermodynamik, mit dem die komplexen Aufgabenstellungen bearbeitet werden können.

Warum konzentrieren wir uns auf die Sonne?

Die größte Energiequelle, die der Menschheit zur Verfügung steht, ist die Sonne. Jahr für Jahr trifft auf die äußere Erdatmosphäre eine Strahlungsenergie von etwa $1,5 \times 10^{18}$ kWh bzw. 5.461.000 Exajoule, was ungefähr dem Zehntausendfachen des heutigen Primärenergieverbrauchs der Welt entspricht (2018 ca. 580 Exajoule). Nur wenn es gelingt, durch die Entwicklung geeigneter Technologien dieses kostenlose Energieangebot wirtschaftlich zu nutzen, steht der Welt eine zeitlich unbegrenzte, ressourcenschonende und umweltfreundliche Energiequelle zur Verfügung (Abb. 4).

Durch die Zunahme der Weltbevölkerung, die Erschöpfung der bisher verwendeten fossilen Energiequellen wie Erdöl und Erdgas und den Wunsch, der gesamten Weltbevölkerung ein menschenwürdiges Dasein mit Zugang zu ausreichender und erschwinglicher Energie zu ermöglichen, wird es Aufgabe dieser

1 Andasol 1 collector field in Spain, 2008
Andasol 1 Kollektorfeld in Spanien, 2008



Location | Ort Jülich, Germany
Jülich, Deutschland

Client | Bauherr
Bundesministerium für
Wirtschaft und Energie, Bonn

Completion | Fertigstellung
2017

Scope of our work
Research: design, construction,
operation and evaluation

Unser Auftrag
*Planung, Konstruktion
und Erprobung*



thanks to the desire to provide everyone on the planet with a decent life which includes access to sufficient, affordable energy, it is and will be the task of the present and next generation of engineers to promote solar technology based on new ideas and technologies on a large scale. For almost 40 years now, we have been committed to this task, learning, gaining experience, coping with setbacks and working with an entire range of different systems. And we continue to take real pleasure in shaping this part of the future.

What are our objectives? Global energy supply, which will have to rely more and more on renewable sources of energy in the future, require a wide spectrum of technologies ranging from hot water collectors on the roofs of residential buildings, wind power plants, tidal power plants, small and large-scale photovoltaic power stations and process heat provision systems to large solar thermal power plants with two- and three digit Megawatt outputs. If requested and wherever possible, we offer our knowledge and experience in all areas ranging from the preparation of new concepts to engineering design services for large power stations.

In addition to economic efficiency and environmental concerns, the security of supply is one of the main objectives of energy policy and future renewable power supplies. Solar thermal power plants provide a way of achieving this goal: By means of a large collector field, a heat transfer medium (oil, water, salt or air) is heated to temperatures ranging from 200°C to sometimes over 1,000°C by concentrating solar radiation using point- or line-focusing collectors. The heat created this way can be made available either directly or by means of heat exchangers at large storage facilities and then transferred by preference to a conventional steam or gas turbine, which converts the heat into mechanical energy and then into electricity by means of a connected generator. The development, optimisation and use of these so-called CSP (**C**oncentrating **S**olar **P**ower) technologies in power plants at scales relevant in terms of energy economics are our most important objectives.

How do we try to achieve these objectives?

At the beginning of a new project or a new development, there is almost always a techno-economic consideration: in addition to the technical function and elaboration of a new idea, anticipated energy costs are very much in focus. Renewable energy systems are capital-intensive. As a rule, they do not cause fuel costs, which represent the dominant and ever

und der nächsten Ingenieurgeneration sein, die Solartechnik im großen Stil mit neuen Ideen und Technologien voranzubringen. Seit nunmehr fast 40 Jahren haben wir uns dieser Aufgabe verschrieben, gelernt, Erfahrungen gesammelt, Rückschläge verkraftet, unterschiedlichste Systeme bearbeitet und haben weiterhin Freude daran, diesen Teil der Zukunft mitzugestalten.

Was sind unsere Ziele? *Eine zukünftig verstärkt auf regenerativen Energien aufbauende Energieversorgung benötigt eine Vielzahl an neuen Technologien, angefangen beim Warmwasserkollektor auf dem Dach eines Wohnhauses über Windkraftanlagen, Gezeitenkraftwerke, kleine und große Photovoltaikanlagen, Anlagen zur Prozesswärmebereitstellung, bis hin zu großen solarthermischen Kraftwerken mit Leistungen im zwei- und dreistelligen Megawattbereich. Wo immer möglich und gewünscht, bieten wir unser Wissen und unsere Erfahrungen an, angefangen bei der Ausarbeitung neuer Konzepte bis hin zur ingenieurtechnischen Bearbeitung großer Kraftwerke.*

*Eines der drei Hauptziele der Energiepolitik und der zukünftigen regenerativen Stromversorgung ist, neben Wirtschaftlichkeit und Umweltverträglichkeit, die Versorgungssicherheit. Eine Möglichkeit, sie zu erreichen, stellen die solarthermischen Kraftwerke dar: Mithilfe eines großen Kollektorfeldes wird durch Konzentration der Sonnenstrahlung auf einen punkt- oder linienförmigen Absorber ein Wärmeträgermedium (Öl, Wasser, Salz oder Luft) auf Temperaturen von 200 bis teilweise über 1000°C erhitzt. Die so erzeugte Wärme kann direkt oder über Wärmetauscher in großen Speichern vorgehalten und bei Bedarf einer herkömmlichen Dampf- oder Gasturbine zugeführt werden, die die Wärme in mechanische Energie und über einen angeschlossenen Generator in Elektrizität umwandelt. Die Entwicklung, Optimierung und der Einsatz dieser sogenannten CSP- (**C**oncentrating **S**olar **P**ower) Technologien in Kraftwerken, und damit in energiewirtschaftlich relevanter Größe, ist unser wichtigstes Ziel.*

Wie versuchen wir, diese Ziele zu erreichen?

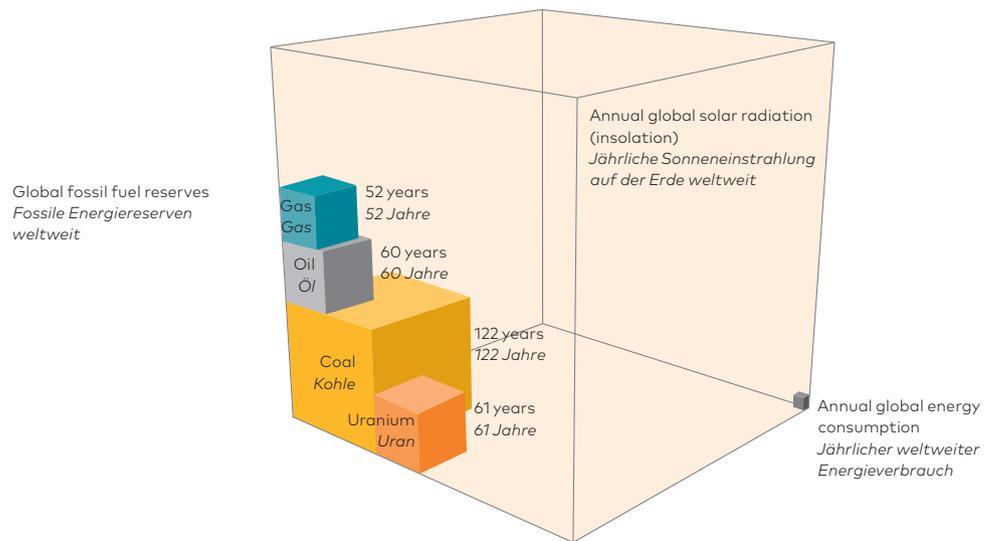
*Am Anfang eines neuen Projektes oder einer neuen Entwicklung steht fast immer eine techno-ökonomische Betrachtung: Neben der technischen Funktion und Ausgestaltung einer Idee stehen immer die zu erwartenden Energiekosten im Vordergrund. Regenerative Energiesysteme sind kapitalintensiv. In der Regel verursachen sie keine Brennstoffkosten, die bei herkömmlichen fossilen Kraftwerken den dominanten und immer größer werdenden Anteil an den Energiekosten darstellen. Dafür sind die anfänglichen Investitionskosten zur Errichtung einer regenerativen Anlage hoch. Ziel bei allen Entwicklungen ist es daher, diese Baukosten möglichst niedrig zu halten. Dabei sind nicht nur die Materialkosten von Bedeutung, sondern auch die Kosten für die Errichtung und den Betrieb der Anlage. Gleichzeitig soll das System soviel Energie wie möglich bereitstellen (**Kap. 7**).*

2 Stello heliostat prototype Jülich, Germany, 2017
Stello Heliostat Prototyp Jülich, Deutschland, 2017

3 50 kW Dish/Stirling systems in Saudi Arabia, 1985
50 kW Dish/Stirling-Systeme in Saudi-Arabien, 1985

4 Global fossil energy reserves and respective reserves to production ratio compared to selected energy flows

Weltweite fossile Energiereserven und dazugehörige statische Reichweite mit ausgewählten Energieströmen



4

increasing share of energy costs in the case of conventional fossil power plants. However, the initial construction investment costs of a renewable energy plant are high. The objective of all new developments is to keep these construction costs as low as possible. In this context, not only are material costs relevant, but also the cost of constructing and operating the plant. At the same time, the system is supposed to provide as much energy as possible (**chapter 7**).

The resulting optimisation tasks and the field of solar energy generation as a whole provide us with an exciting and multifaceted area of activity, which we cover from early concept development to the last bolt of the serial production process. Particularly in the solar energy generation sector, whether concentrating or non-concentrating (as in the case of the solar updraft tower), the technology (with the exception of parabolic trough power plants) is still very young. This means we continually need to break new ground and develop solutions that are tailor-made for the task at hand. It is a challenge, but one that is important to us and that we remain happy to accept.

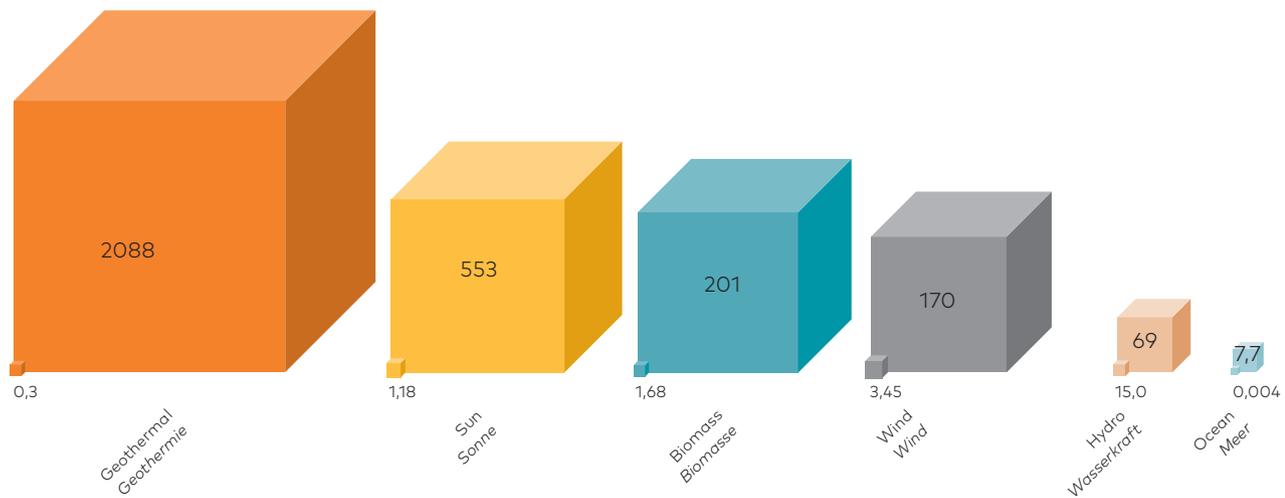
What are the trends? Almost all energy forecasts for the coming years and decades raise similar prospects. It is expected that, by the middle of the century, approx. 50% to 75% of the global energy demand will be covered by renewable sources¹. This requires an enormous structural change of the power plant park. Since renewable energy sources are often

Die daraus resultierenden Optimierungsaufgaben und das Gebiet der solaren Energiegewinnung allgemein bieten uns ein spannendes und vielseitiges Betätigungsfeld, in dem wir Projekte von der frühen Konzeptentwicklung bis zur letzten Schraube in der Serienfertigung betreuen. Speziell der Bereich der solaren Stromerzeugung, konzentrierend oder wie beim Aufwindkraftwerk nichtkonzentrierend – ausgenommen die Technologie der Parabolrinnenkraftwerke – ist noch sehr jung. So gilt es, ständig Neuland zu betreten und an die jeweilige Aufgabe angepasste Lösungen zu entwickeln. Eine Herausforderung, aber eine sinnvolle, die wir daher gerne annehmen.

Wo liegen die Trends? Nahezu alle Energieprognosen für die kommenden Jahre und Jahrzehnte zeigen ein ähnliches Bild. Es wird erwartet, dass in der Mitte dieses Jahrhunderts ca. 50% bis 75% des weltweiten Elektrizitätsbedarfs aus regenerativen Quellen kommen werden¹. Dies erfordert eine enorme strukturelle Veränderung des Kraftwerksparks. Da es sich bei erneuerbaren Energien vielfach um fluktuierende Quellen handelt, kommt der Entwicklung und Verbreitung von Energiespeichern eine große Bedeutung zu. Nur so können regenerative Erzeugung und Nutzung zeitlich entkoppelt (**Kap. 2**) und eine sichere Energiebereitstellung gewährleistet werden. Weiterhin sind die elektrischen Transportnetze an die geänderte räumliche Verteilung der Erzeugung anzupassen.

All dies ist bereits eine große Herausforderung im Hinblick auf die Bereitstellung der erforderlichen politischen Randbedingungen und finanziellen Ressourcen, aber eine noch größere für die Ingenieure, Techniker und Entwickler. Neue Technologien müssen erdacht, entwickelt, erprobt und realisiert werden.

■ = 1 EJ (Exajoule)



Potentials and current use of renewable energy sources (comparison)
Potenzial und derzeitige Nutzung erneuerbarer Energiequellen im Vergleich

fluctuating, the development and proliferation of energy storage facilities are of major importance. Only with the help of this process can the generation and utilisation of renewable energy be temporarily decoupled (**chapter 2**) and reliable energy provision guaranteed. Moreover, the electricity transportation networks need to be modified to cope with the future changes in where our electricity is produced.

On the one hand, it is a great challenge to provide the necessary political framework and financial resources, while it is a still greater challenge for engineers, technicians and developers on the other hand. In all areas, new technologies have to be conceived, developed, tested and introduced to the market. This ranges from energy-saving measures and the development of new renewable energy production technologies to the construction and integration of facilities and power plants into infrastructures. Certainly, it would be presumptuous to already state which mix of technologies will have eventually established itself in the market at the end of the century. However, the present and next generation of engineers will have to set the crucial trends in this respect. What we can predict already, however, is that besides wind, wave and tidal power plants, biomass utilisation and geothermal energy, the use of solar radiation will play the most important role in our future energy supply.

Dies reicht von Maßnahmen zur Energieeinsparung über die Entwicklung neuer Technologien zur regenerativen Energieerzeugung bis zum Bau und zur Integration von Anlagen und Kraftwerken in Infrastrukturen. Heute schon zu sagen, welcher Technologiennmix sich am Ende des Jahrhunderts am Markt etabliert haben wird, wäre vermessen, aber diese und die nächste Ingenieurgeneration werden hier die entscheidenden Weichen stellen. Absehbar ist, dass neben Wind-, Wellen- und Gezeitenkraftwerken, Biomassenutzung und Erdwärme die Nutzung der Sonnenstrahlung die wichtigste Rolle bei der zukünftigen Energieversorgung übernehmen wird.

2 Reliable and Predictable Electricity Supply

Zuverlässige, planbare Strombereitstellung

Nowadays, we take it for granted that we will have continuous access to electrical energy, day and night, 365 days a year.

However, it rarely occurs to us that the electricity grid is unable to store electricity, meaning that, at any point in time, precisely the same amount of electricity needs to be produced as is currently consumed.

In the past, all that was needed was to adjust electric power generation to the electricity demand. For this purpose, controllability of the power plant system was sufficient.

Today, unequal regional distribution, fluctuations and the limited predictability of electric power generation from photovoltaic (PV) and wind power plants give rise to huge challenges when it comes to integration into the existing power generation network. Essentially, this is because the conventional power plant system has to compensate not only for the known fluctuations in demand, but also for the fluctuations on the supply side. Since renewable energies like wind power and solar energy have priority in feed-in, the conventional power plant system needs to cover the difference between demand and renewable feed-in, the so-called residual load (Fig. 2).

Wir setzen es heute als selbstverständlich voraus, immer, d.h. Tag und Nacht, an 365 Tagen im Jahr, über elektrische Energie zu verfügen. Selten machen wir uns aber bewusst, dass das Stromnetz keinen Strom speichern kann – das bedeutet, dass zu jedem Zeitpunkt immer genau so viel Strom produziert werden muss, wie gerade verbraucht wird.

In der Vergangenheit musste ausschließlich die Erzeugung an die Nachfrage angepasst werden. Dazu reichte die Regelbarkeit des Kraftwerksparks aus.

Heute führt die regional ungleich verteilte sowie schwankende und nur eingeschränkt vorhersagbare Stromerzeugung von Photovoltaik (PV)- und Windkraftanlagen zu großen Herausforderungen für deren Integration in das bestehende Stromversorgungssystem, denn der konventionelle Kraftwerkspark muss zusätzlich zu den bekannten Nachfrageschwankungen auch noch die neu hinzugekommenen Schwankungen auf der Erzeugungsseite ausgleichen. Da erneuerbare Energien wie Windkraft- und Solarenergie bei der Einspeisung Vorrang haben, muss der konventionelle Kraftwerkspark die Differenz zwischen Bedarf und erneuerbarer Einspeisung, die sogenannte Residuallast, decken (Abb. 2).



Storage In this context, solar thermal power plants represent an important option: in contrast to technologies like PV and Wind power, the thermal storage facilities of solar thermal power plants facilitate a demand-based supply of electricity comparable to that of fossil power plants, but based on the sun as a renewable fluctuating source of energy. Storage facilities are already capable of making electric power generation predictable and controllable (**Fig. 3**).

Alternatively, gas burners integrated into the solar thermal power stations (in which steam for the turbines can be produced at night or during the day in the event that there is insufficient sunshine) can also help balance shortfalls.

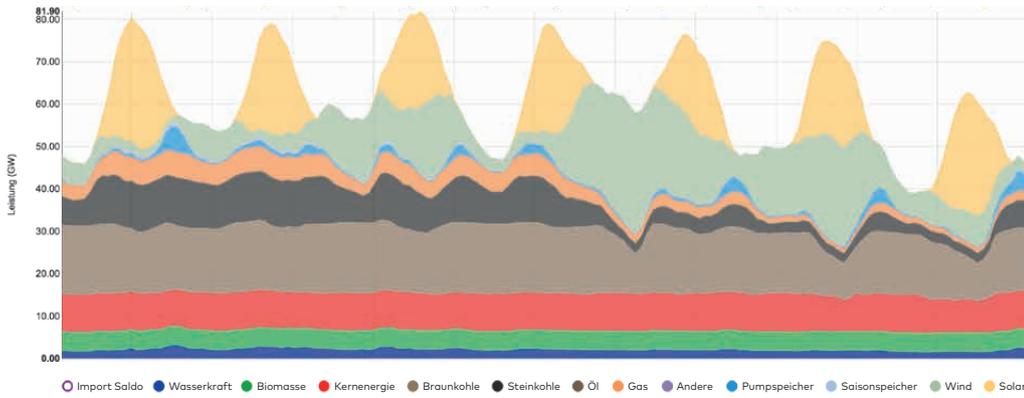
In Spain for instance, solar thermal power stations help compensate the fluctuations on the demand side and in the generation of electric power by wind and PV plants. In the future, this will be required on a significantly larger scale (**Fig. 4**). Fig. 4 clearly shows that solar thermal power stations (orange) continue to generate electricity after sunset, whereas PV systems (yellow) are no longer able to make a contribution to power supply. A technically and economically optimal layout, as well as the planning and integration of storage into solar power stations, are therefore of major importance.

Speicher Solarthermische Kraftwerke stellen in diesem Kontext eine wichtige Option dar: Im Gegensatz zu Technologien wie PV und Wind ermöglichen die thermischen Speicher der solarthermischen Kraftwerke die nachfragegerechte Strombereitstellung, vergleichbar mit fossilen Kraftwerken, aber basierend auf der erneuerbaren fluktuierenden Energiequelle Sonne. Speicher machen die Stromerzeugung plan- und steuerbar – und das bereits heute (**Abb. 3**).

Alternativ kann dies auch mit in die solarthermischen Kraftwerke integrierten Gasbrennern erreicht werden, mit denen nachts Dampf für die Turbinen erzeugt werden kann, und sollte die Sonne nicht ausreichend scheinen, auch tagsüber.

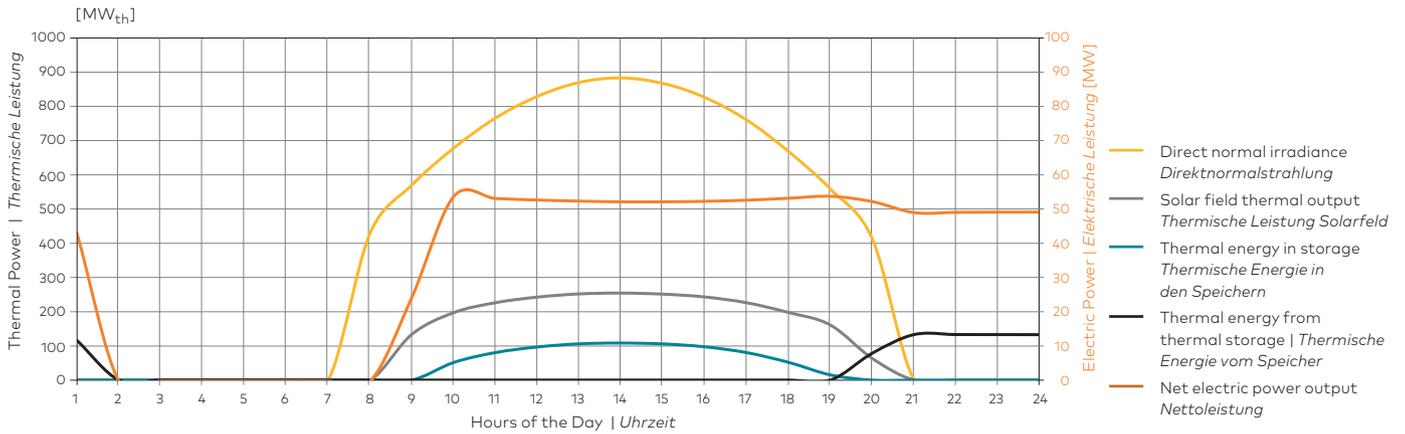
In Spanien beispielsweise helfen solarthermische Kraftwerke, die Schwankungen auf der Nachfrageseite sowie bei der Stromerzeugung durch Wind- und PV-Anlagen auszugleichen. In Zukunft wird das noch deutlich verstärkt erforderlich sein (**Abb. 4**). In Abb. 4 ist gut zu erkennen, dass die solarthermischen Kraftwerke (orange) nach Sonnenuntergang, wenn die PV-Systeme (gelb) keinen Beitrag zur Stromversorgung mehr leisten können, weiter Strom bereitstellen. Der technisch und wirtschaftlich optimalen Auslegung, Planung und Integration des Speichers in ein Solar-kraftwerk kommt somit große Bedeutung zu.

1 50 MW parabolic trough power plant Andasol 2 with 7.5 h full-load energy storage, Spain, 2009
50 MW Parabolrinnenkraftwerk Andasol 2 mit 7,5 h Volllastspeicherung, Spanien, 2009



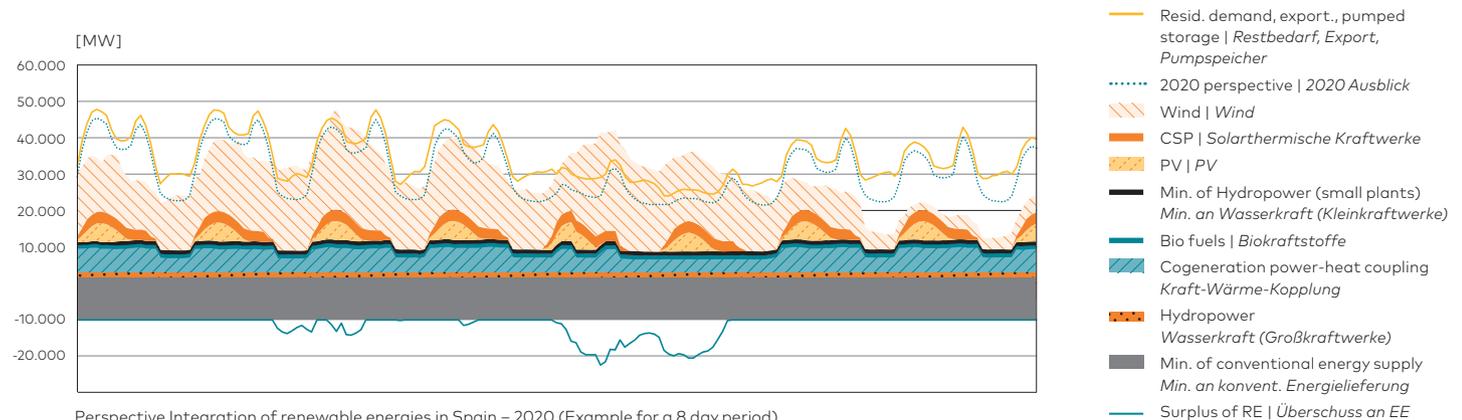
Electricity production in Germany per week | *Stromproduktion in Deutschland pro Woche*

2



Use of storage facilities in solar thermal power stations in order to shift electric power generation to the evening hours in compliance with the demand structure
Einsatz des Speichers in solarthermischen Kraftwerken, um die Stromerzeugung nachfragegerecht in den Abend zu verschieben

3



Perspective Integration of renewable energies in Spain – 2020 (Example for a 8 day period)
Vorraussichtliche Integration von Erneuerbaren Energien in Spanien – 2020 (Beispiel für einen Zeitraum von 8 Tagen)

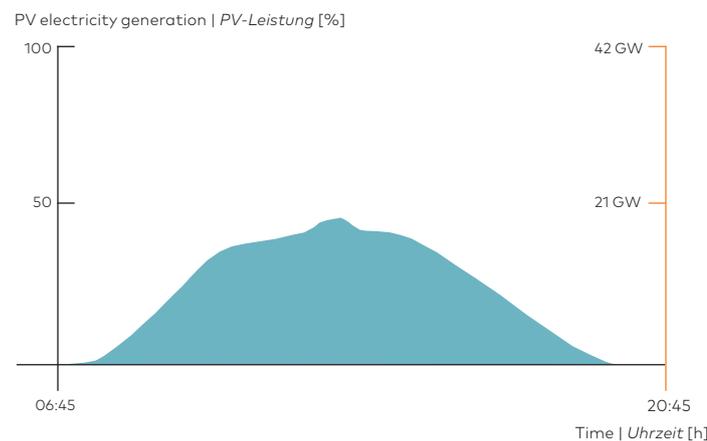
4

For consumers and the electricity market as a whole, electricity available on a safe and predictable basis is worth significantly more than electricity with limited predictability, since reserve capacities permanently need to be held available for electricity from fluctuating sources without a storage facility; this can be achieved for instance by not operating coal-fired power stations at full load in order to raise their output correspondingly if required.

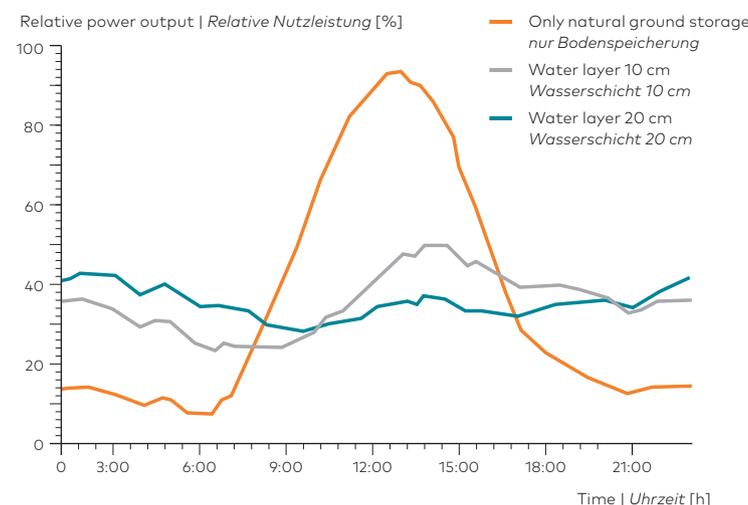
In the future, decentralised PV systems will increasingly be equipped with battery storage facilities. At present, these systems are still associated with high costs, though with a falling trend. Likewise, the cost of storage facilities for solar thermal power stations, which are already available on a standard basis, will decrease significantly as a result of higher temperatures through which the same storage mass is able to store more energy—and maybe through transition from the two-tank to the one-tank system.

Für die Verbraucher, und damit auch für den Strommarkt an sich, hat Strom, der sicher und planbar zur Verfügung steht, einen wesentlich höheren Wert, als eine Strombereitstellung, die nur begrenzt vorher-sagbar ist, denn für Strom aus fluktuierenden Quellen ohne Speicher muss permanent eine Reservekapazität vorgesehen werden. Das kann beispielsweise nicht erzielt werden, indem man Kohlekraftwerke nicht unter Vollast laufen lässt, um dann bei Bedarf die Leistung entsprechend zu steigern.

Zukünftig werden dezentrale PV-Systeme verstärkt mit Batteriespeichern ausgestattet sein. Batterien sind allerdings aktuell noch mit großen Kosten verbunden. Ebenso werden die Kosten der heute bereits standardmäßig verfügbaren Speicher solarthermischer Kraftwerke noch deutlich sinken, und zwar insbesondere durch höhere Temperaturen. Damit kann dieselbe Speichermasse mehr Energie speichern und ggf. der Übergang vom Zwei-Tank- zum Ein-Tank-System möglich werden.



5



6

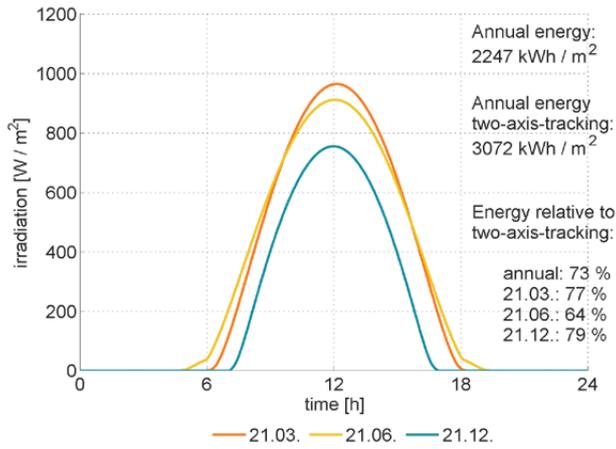
2 Demand load, electricity generation from renewable energies and residual load in Germany for week 32, 2018³
Nachfrage, Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien und Residuallast in Deutschland für Woche 32, 2018³

3 Use of storage facilities in solar thermal power stations in order to shift electric power generation to the evening hours in compliance with the demand structure
Einsatz des Speichers in solarthermischen Kraftwerken, um die Stromerzeugung nachfragegerecht in den Abend zu verschieben

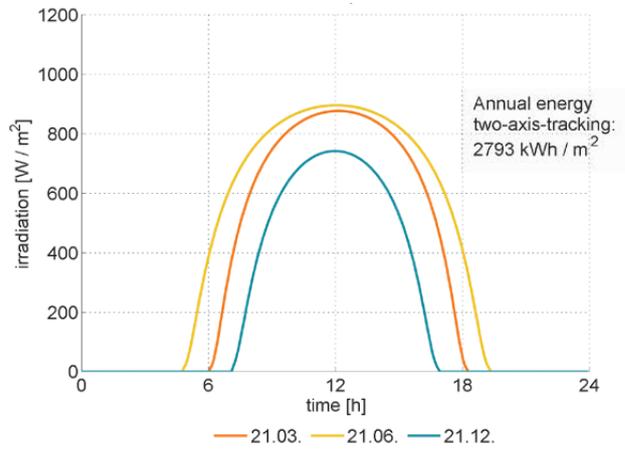
4 Integration of renewable energy sources in Spain, 2011–2020
Integration erneuerbarer Energien in Spanien, 2011–2020

5 Daily course of PV output in Germany (example: August 2018)¹
Tagesgang der PV-Leistung in Deutschland (Beispiel August 2018)¹

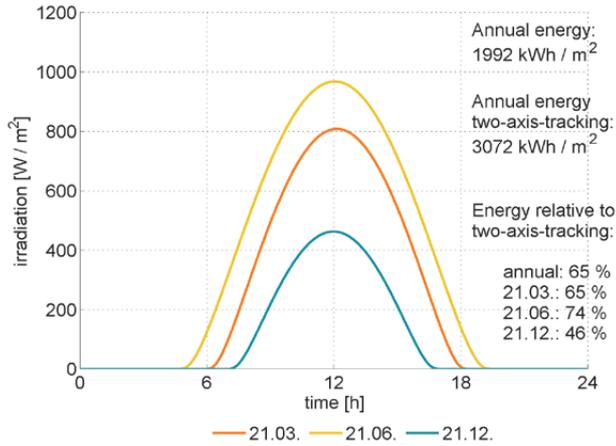
6 Daily course of electricity generation by solar updraft towers with a natural storage facility (soil underneath the collector, orange) and additional storage elements (water-filled bags, blue/grey)²
Tagesgang der Stromerzeugung von Aufwindkraftwerken mit natürlichem Speicher (Boden unter dem Kollektor, orange) und zusätzlichen Speicherelementen (wassergefüllte Säcke, blau/grau)²



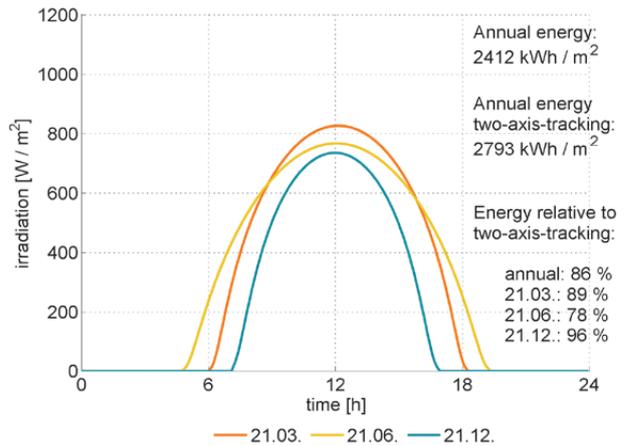
Without tracking, global irradiance (direct and diffuse), surface tilted towards equator (tilt angle = degree of latitude) | *Ohne Nachführung, Globalstrahlung (direkt und diffus), Fläche geneigt zum Äquator hin orientiert (Neigungswinkel = Breitengrad)*



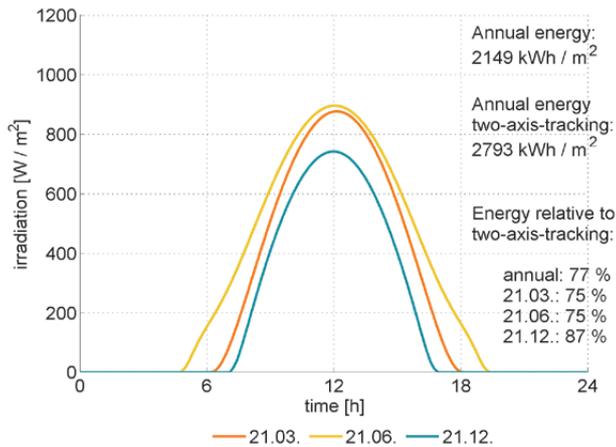
Biaxial tracking, only direct irradiance, surface normal always points to the sun | *Zweiachsige Nachführung, nur Direktstrahlung, Flächennormale zeigt immer zur Sonne*



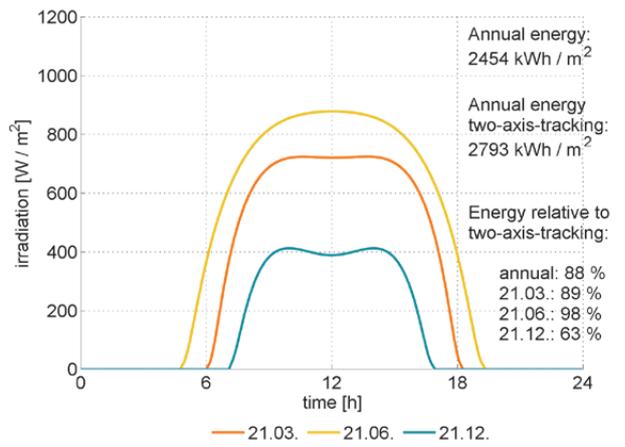
Without tracking, global radiation (direct and diffuse), horizontal surface | *Ohne Nachführung, Globalstrahlung (direkt und diffus), horizontale Fläche*



Heliostat: two axis tracking, only direct irradiance, surface normal in direction of the bisector between sun vector and vector from heliostat to target point | *Heliostat: Zweiachsige Nachführung, nur Direktstrahlung, Flächennormale hat Richtung der Winkelhalbierenden zwischen Sonnenvektor und Vektor vom Heliostat zum Zielpunkt*



Uniaxial tracking, only direct irradiance, axis oriented in east-west direction | *Einachsige Nachführung, nur Direktstrahlung, Achse in Ost-West-Richtung*



Uniaxial tracking, only direct irradiance, axis oriented in north-south direction | *Einachsige Nachführung, nur Direktstrahlung, Achse in Nord-Süd-Richtung orientiert*

7 Daily course of solar irradiance at a clear location at 35° latitude for various tracking types (showing direct radiation in each case except for the diagram 'without tracking' with an additional estimated 10% diffuse radiation)
Tagesverlauf der solaren Einstrahlung für einen klaren Standort auf 35° Breite für verschiedene Nachführarten (dargestellt ist jeweils die Direktstrahlung, Ausnahme: Diagramm „ohne Nachführung“, da zzgl. pauschal 10% Diffusstrahlung)

Daily variations in electricity generation

Even without integrated storage facilities, the daily variation in electricity generation differs according to the various types of solar power stations. A distinction should be made between two essential effects:

1. Whereas PV electricity generation directly follows the course of solar radiation (**Fig. 5**), thermal inertia of the plants provides for a significant equalisation of electric power generation in the solar thermal power stations. This effect is particularly strong in parabolic trough power stations with extensive inventory of heat transfer medium (thermal oil or molten salt), as well as in solar updraft towers (**Fig. 6**).
2. In concentrating systems, variations in daily power generation depend on the kind of tracking. Here, tracking means whether the concentrator is designed to follow the movement of the sun, and if so, how this is accomplished (**Fig. 7**). The two diagrams at the bottom of **Fig. 7** show the course of solar radiation on single-axis tracking parabolic trough collectors for a rotational axis oriented in north-south direction (bottom right) and for a rotational axis oriented in east-west direction (bottom left). It is clearly recognisable that the most common orientation of the rotational axis in north-south direction produces more evenly distributed intensity over the course of the day than the orientation in the east-west direction; however, the differences are greater between the seasons.

Zeitlicher Verlauf der Stromerzeugung

Auch ohne integrierte Speicher unterscheidet sich der Tagesgang der Stromerzeugung der unterschiedlichen Solarkraftwerkstypen. Zwei wesentliche Effekte sind zu unterscheiden:

1. Während die PV-Stromerzeugung direkt dem Verlauf der Solarstrahlung folgt (**Abb. 5**), sorgt bei solarthermischen Kraftwerken die thermische Trägheit der Anlagen für eine deutliche Vergleichmäßigung der Stromerzeugung. Besonders ausgeprägt ist dies bei Parabolrinnenkraftwerken mit ihrem großen Inventar an Wärmeträgerflüssigkeiten (Thermoöl oder Salzschnmelze) und bei Aufwindkraftwerken (**Abb. 6**).
2. Bei konzentrierenden Systemen ergeben sich je nach Art der Nachführung ebenfalls Unterschiede beim Tagesgang. Nachführung bedeutet hier, ob und wie der Konzentrador dem Sonnenverlauf nachgeführt wird (**Abb. 7**). Die beiden unteren Diagramme in **Abb. 7** zeigen den Verlauf der Solarstrahlung auf einachsigen nachgeführten Parabolrinnenkollektoren für eine in Nord-Süd-Richtung orientierte Drehachse (unten rechts) bzw. für eine in Ost-West-Richtung orientierte Drehachse (unten links). Es ist deutlich zu sehen, dass die üblicherweise gewählte Orientierung der Drehachse in Nord-Süd-Richtung einen im Tagesverlauf gleichmäßigeren Intensitätsverlauf bedingt als die Orientierung in Ost-West-Richtung; dafür sind allerdings die Unterschiede zwischen den Jahreszeiten größer.

3 Design

Entwurf

During the design phase of a new technology, a new collector or a new structure, it is first and foremost important to understand the entire system as comprehensively as possible, and then develop an idea that meets the requirements of the problem and the overall task. In general, this requires an intensive exchange between various disciplines in order to understand all aspects and their influence on the overall system. Only afterwards do various possible approaches emerge, which in most cases have to be processed in parallel until an integrated assessment within the team can take place in order to go into further details on one or more proposed solutions.

Assessing, changing, rejecting and modifying are the predominant tasks during this phase. Additionally, there is focus on producibility, mountability, optical efficiency, precision requirements, drive concepts, structural properties, choice of materials and, last but not least, serviceability. Initial cost estimates and assessments need to be performed, sometimes with potential manufacturers and assembly companies getting involved already at this early stage.

In this context, the focus is always the search for new methods and solutions to further reduce energy generation costs and hence enhance economic efficiency as well as improve market prospects. This requires leaving beaten paths, finding new solutions and further pursuing ideas and concepts even when they initially seem to be difficult at first sight. Precise knowledge of existing solutions is needed to come up with new ideas.

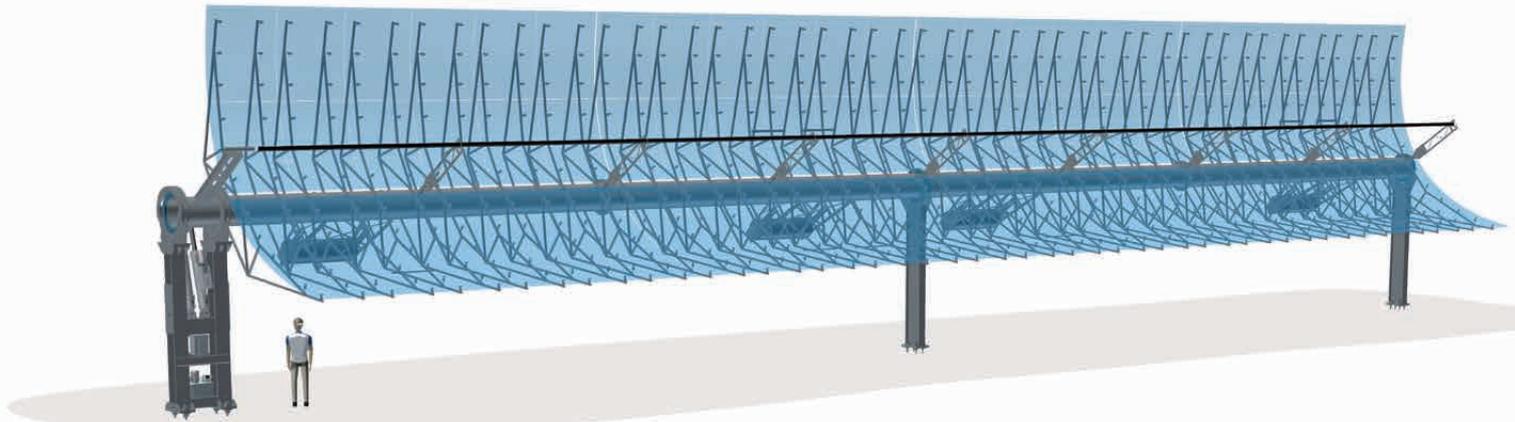
In der Entwurfsphase für eine neue Technologie, einen neuen Kollektor oder eine neue Struktur ist es zunächst wichtig, das gesamte System möglichst umfassend zu verstehen, um dann eine Idee zu entwickeln, die dem Gesamtproblem oder der Gesamtaufgabe gerecht wird. In der Regel ist hierbei ein intensiver Austausch unter den verschiedenen Disziplinen erforderlich, um alle Aspekte und deren Einfluss auf das Gesamtsystem zu verstehen. Erst danach kristallisieren sich dann verschiedene, mögliche Ansätze heraus, die zuerst meistens parallel zu bearbeiten sind, bis eine gesamtheitliche Beurteilung im Team erfolgen kann, um dann Lösungsansätze, weiter im Detail auszuarbeiten.

Abwägen, Verwerfen, Ändern und Anpassen sind in dieser Phase die wesentlichen Aufgaben. Herstellbarkeit, Montierbarkeit, optische Effizienz, Genauigkeitsanforderungen, Antriebskonzepte, Struktureigenschaften, Materialwahl und nicht zuletzt Betriebsfähigkeit stehen im Vordergrund. Erste Kostenschätzungen und Bewertungen müssen durchgeführt werden, wobei teilweise bereits in dieser frühen Phase potenzielle Hersteller und Montagefirmen mit einbezogen werden.

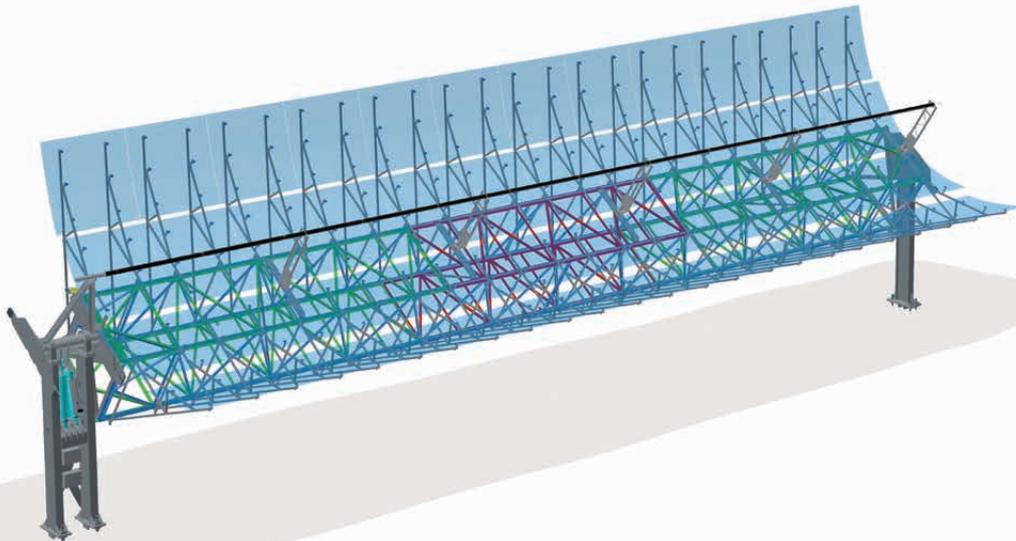
An erster Stelle steht dabei immer die Suche nach neuen Wegen und Ansätzen, die Energiegestehungskosten weiter zu senken, damit die Wirtschaftlichkeit zu erhöhen und die Marktaussichten zu verbessern. Dazu ist es erforderlich, neue Ansätze zu finden und auch auf den ersten Blick schwierige Lösungswege und Konzepte weiterzuerfolgen. Genaue Kenntnisse bestehender Lösungen sind erforderlich, um deren Schwachstellen zu erkennen und neue Ideen zu finden.

1 HelioTrough collector
design 2010
*HelioTrough-Kollektor-
entwurf 2010*

2 Ultimate Trough® collector
design 2011
*Ultimate Trough® Kollektor-
entwurf 2011*

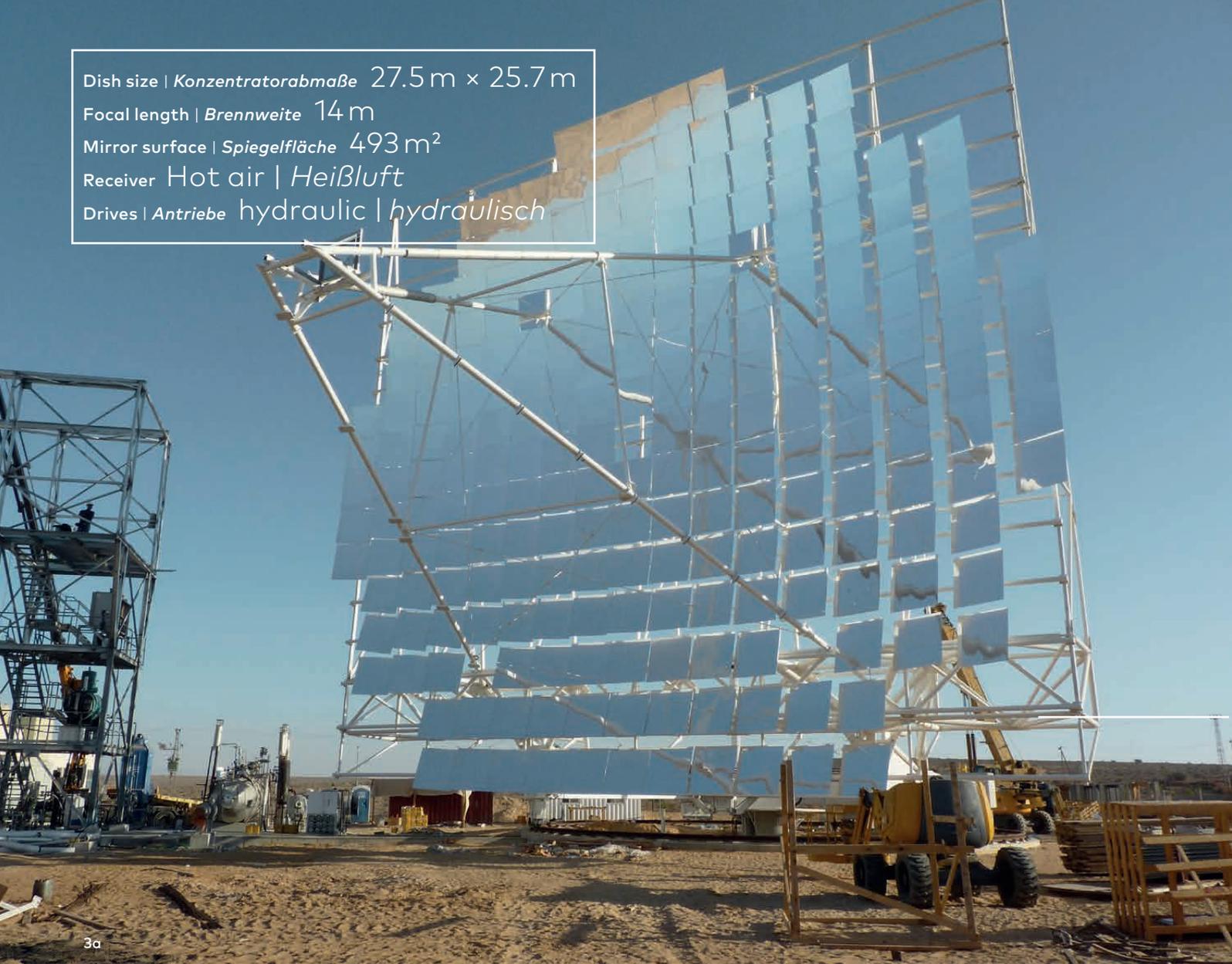


1



2

Dish size | *Konzentratorabmaße* 27.5 m × 25.7 m
Focal length | *Brennweite* 14 m
Mirror surface | *Spiegelfläche* 493 m²
Receiver Hot air | *Heißluft*
Drives | *Antriebe* hydraulic | *hydraulisch*



3a



3b



3c



3d

3a Heliostats dish 2011
Heliostats Dish 2011
b+c Stow position | *Ruhestellung*
d Operation | *Betrieb*

New and innovative solutions bear certain development risks, associated with correspondingly high development costs until cost-effective utilisation finally becomes possible. Therefore, evaluation of the development risk is an essential part in selecting and assessing complete designs.

Designs and ideas always have to be adjusted to the technology on the one hand and to the future area of application on the other. For instance, a new parabolic trough collector for the Indian market needs to meet other framework conditions than a development for the US market with its high labour costs especially for construction site works. For the US market, one will certainly design a collector with a high level of automation in the manufacturing process and consisting of as few components as possible, which are then assembled on the construction site in order to take the high assembly costs into account. By contrast, a collector specially designed for the Indian market will be distinguished by a material-saving design preferably consisting of several smaller components and admitting as much 'manual labour' as possible in the process of manufacturing and assembly. However, both concepts need to deliver the necessary optical quality so that, at the end of the day, a collector with similarly good optical and thermal efficiency attributes can be made available in both countries. For this reason, suitable manufacturing and assembly concepts must be taken into consideration from the very beginning and specified at a later stage in the context of execution planning (Fig. 1+2).

In the design of a parabolic concentrator, size is one of the crucial factors. For instance, a biaxially curved concentrator with 20 m² mirror surface will not be designed as a turntable solution, but preferably as a pole mounted system (Fig. 2), whereas the turntable solution is more advantageous in case of concentrators with a very large mirror surface of e.g. 500 m². In addition, a design needs to be developed that is able to withstand the enormous wind loads. In most cases, the elevation drives are designed in such a way that the concentrator can be moved out of the wind in the event of high wind speeds (Fig. 3).

Neue und innovative Lösungen bergen ein gewisses Entwicklungsrisiko, einhergehend mit entsprechend hohen Entwicklungskosten, bis schließlich eine wirtschaftliche Nutzung möglich wird. Deshalb ist die Bewertung des Entwicklungsrisikos ein wesentlicher Bestandteil bei der Auswahl und Beurteilung der erarbeiteten Entwürfe.

Entwürfe und Ideen müssen immer einerseits auf die Technologie und andererseits auch auf das zukünftige Einsatzgebiet abgestimmt sein. Ein neuer Parabolrinnenkollektor für den indischen Markt hat anderen Randbedingungen zu genügen als z.B. eine Entwicklung für den amerikanischen Markt mit seinen hohen Lohnkosten, insbesondere für Arbeiten auf der Baustelle. So wird man für den amerikanischen Markt einen Kollektor entwerfen, der sich bei der Fertigung durch einen hohen Automatisierungsgrad auszeichnet und aus möglichst wenigen Baugruppen besteht, die dann auf der Baustelle zusammenzufügen sind, um so die Montagekosten möglichst gering zu halten. Ein speziell für den indischen Markt konzipierter Kollektor hingegen zeichnet sich durch einen materialsparenden Entwurf aus, der bestenfalls aus vielen kleineren Bauteilen besteht und möglichst viel „Handarbeit“ bei der Herstellung und Montage zulässt. Beide Konzepte müssen aber die geforderte optische Qualität liefern, um letztendlich in beiden Ländern einen Kollektor zur Verfügung zu stellen, der eine ähnlich gute optische und thermische Effizienz aufweist. Deshalb müssen geeignete Fertigungs- und Montagekonzepte von Beginn an mit betrachtet und später in der Ausführungsplanung mit detailliert werden (Abb. 1 + 2).

Beim Entwurf eines Parabolkonzentrators spielt u.a. dessen Größe eine entscheidende Rolle. Einen zweiachsig gekrümmten Konzentrador mit 20 m² Spiegelfläche würde beispielsweise nicht als Drehstandlösung ausgebildet werden, sondern einen mastgestützten Entwurf bevorzugen (Abb. 2), wohingegen bei Konzentratoren mit einer sehr großen Spiegelfläche um 500 m² die Drehstandlösung vorteilhafter ist. Zusätzlich muss eine Konstruktion gefunden werden, die den enormen Windkräften gerecht wird. Meist werden die Elevationsantriebe so ausgebildet, dass der Konzentrador bei hohen Windgeschwindigkeiten aus dem Wind gedreht werden kann (Abb. 3).



Location | Ort

Dimona, Israel

Client | Bauherr

Heliofocus Ltd. Ness Ziona, Israel

Scope of our work

Conceptual design, detailed design, supervision of fabrication and erection, commissioning; including drive system, electrics and control

Unser Auftrag

Konzeptentwicklung, Ausführungsplanung, Fertigungs- und Bauüberwachung, Inbetriebnahme; jeweils auch inkl. Antriebs-, Elektro- und Steuerungstechnik

An astronomical telescope for observation of the Cherenkov radiation with a mirror surface of 100 m² will not be designed as a tower-supported concentrator, but as a turntable solution especially because of its size, but also due to the required sun tracking precision and the necessary structural rigidity, which is an order of magnitude higher than that of the concentrating solar collectors.

The standard deformation-resistant mounting of the kinematic components on the centre of mass of the concentrator may impose constraints on the design of an efficient structure. With the help of intelligent control engineering, undesired deformation due to the dead weight can be compensated, thereby also making material-saving, rigid structures with eccentric mounting a possibility. When discussing the configuration of the drive axes, azimuthal arrangement is often preferred to polar, however this should not exclude the variety of other possible drive concepts which should be investigated and evaluated each time afresh during the design phase.

The design of a concentrator must also take into account the foundations as well as the components above ground—a concept which saves money and is quick and precise to install may involve differing technologies depending on the location. Just like automotive, mechanical and aircraft engineering, construction engineering shows constant evolution with regard to manufacturing technologies and materials. Monitoring how current and predictable developments can be applied to solar concentrators can enrich the design process and may even result in unconventional designs.

Designing is always an integrated process; it will only lead to good and cost-effective solutions if all systems and aspects from manufacturing and assembly to utilisation are understood comprehensively as well, as integrated and considered as significant factors already in the design preparation phase.

Auch ein astronomisches Teleskop zur Beobachtung der Cherenkov-Strahlung mit 100 m² Spiegelfläche wird man nicht als mastgestützten Konzentrador entwerfen, sondern es als Drehstandlösung ausbilden, insbesondere wegen seiner Größe, aber auch aufgrund der geforderten Nachführgenauigkeit und der erforderlichen Struktursteifigkeit, die nochmals um eine Größenordnung höher liegt als bei konzentrierenden Solarkollektoren.

Die übliche, verformungsarme Lagerung der kinematischen Bauteile im Schwerpunkt des Konzentrators kann eine nachteilige Randbedingung für den Entwurf einer effizienten Struktur sein. Intelligente Steuerungstechnik ermöglicht es, unerwünschte Verformungen aus Eigengewicht zu kompensieren und so materialsparende und steife Strukturen mit exzentrischer Lagerung zu bilden.

Bei der Diskussion über die Anordnung der Antriebsachsen wird oft die azimuthale Aufhängung gegenüber der polaren bevorzugt. Dieser Vergleich darf den Blick auf die Vielfalt möglicher Antriebskonzepte nicht versperren, die beim Entwurf immer aufs Neue geprüft und bewertet werden sollten.

Der Entwurf eines Konzentrators berücksichtigt neben den überirdischen Bauteilen auch die Gründung. Ein materialsparendes Gründungskonzept, das schnell und präzise zu installieren ist, kann in Abhängigkeit des Standortes verschiedene Technologien vereinen.

Der konstruktive Ingenieurbau unterliegt wie der Automobil-, Maschinen- und Flugzeugbau einer ständigen Weiterentwicklung in Bezug auf Herstellungstechnologien und Materialien. Die Übertragbarkeit aktueller und vorhersehbarer Entwicklungen auf Solarkonzentratoren zu prüfen, kann den Entwurfsprozess bereichern und unkonventionelle Entwürfe fördern.

Entwerfen ist immer ein ganzheitlicher Prozess; er wird nur dann zu guten und kostengünstigen Lösungen führen, wenn alle Systeme und Aspekte von der Fertigung über die Montage bis zur späteren Nutzung gut verstanden und maßgeblich in den Entwurf mit eingebracht und berücksichtigt wurden.



4 Structure

Struktur

The development and design of structures for concentrating solar energy plants is one of our most important tasks. Due to its particular technical requirements, supporting structures for solar collectors are uncharted territory. Whether heliostats, parabolic trough or linear Fresnel collectors, structures for Dish/Stirling systems or concentrating photovoltaic systems are concerned, the task is to design a precise movable optical instrument consisting of component groups that are as simple to manufacture as possible in order to meet the high technical and cost requirements of the production and assembly process.

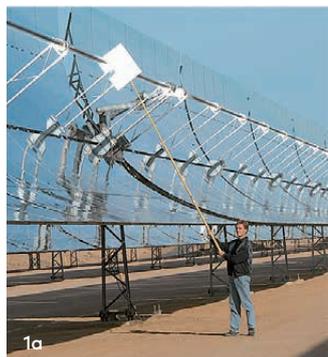
In this context, the necessary precision always poses a challenge: even minor deviations from the target geometry lead to optical losses, reducing the system's solar performance and eventually its economic efficiency.

In today's parabolic trough collectors for instance, the average path of the reflected light from the mirror to the absorber is around 3 m. Where the target geometry changes by only a few millimetres (2–3 mm) as a result of the dead weight or wind, the reflected ray on the absorber tube can be displaced by 10 to 15 mm. Owing to the absorber tube diameter of only around 70 mm, this already leads to significant optical losses, since parts of the reflected radiation no longer hit the absorber tube (**Fig. 1**). Deformations on point focusing solar concentrators such as Dish/Stirling systems or heliostats can also cause energy losses if they result in part of the two-axis (and therefore highly concentrated) light missing the receiver.

Das Entwickeln und Planen von Strukturen für konzentrierende Solaranlagen ist eine unserer wesentlichen Aufgaben. Tragstrukturen für Solarkollektoren sind aufgrund ihrer speziellen technischen Anforderungen Neuland. Egal, ob es sich um Heliostaten, Parabol- oder Fresnelkollektoren, Strukturen für Dish/Stirling-Systeme oder konzentrierende PV-Anlagen handelt, besteht die Aufgabe darin, ein präzises bewegliches optisches Instrument zu entwerfen, das aus möglichst einfach zu fertigenden Baugruppen besteht, um die hohen technischen und wirtschaftlichen Anforderungen bei Herstellung und Montage zu erfüllen.

Eine Herausforderung ist dabei stets die geforderte Präzision: Schon geringfügige Abweichungen von der Sollgeometrie führen zu optischen Verlusten, reduzieren den solaren Ertrag des Systems und mindern am Ende die Wirtschaftlichkeit.

*Bei heutigen Parabolrinnenkollektoren beträgt beispielsweise der Weg des reflektierten Lichts vom Spiegel zum Absorber im Mittel rund drei Meter. Verändert sich die Sollgeometrie unter Eigengewicht oder Wind bereits um wenige Millimeter (2–3 mm), verschiebt sich der reflektierte Strahl auf dem Absorberrohr um 10 bis 15 mm. Bei einem Absorberrohrdurchmesser von nur etwa 70 mm führt das bereits zu erheblichen optischen Verlusten, da ein Teil der reflektierten Strahlung das Absorberrohr nicht mehr trifft (**Abb. 1**). Auch bei punktfokussierenden Konzentratoren wie Dish/Stirling-Systemen oder Heliostaten führen Verformungen zu Energieverlust, wenn durch sie Teile des zweiachsig und damit hoch konzentrierten Lichts den Receiver verfehlen. Zudem entsteht durch die Verformung eine ungleichmäßige Verteilung der Energiemenge auf der Oberfläche des Receivers, sodass dieser überlastet und geschädigt werden kann.*



An uneven distribution of the energy onto the surface of the receiver as a result of deformation can also overload and cause damage.

Features The relatively low energy density of solar radiation even in regions with high levels of sunshine leads to very extensive and hence wind-susceptible constructions in order to 'collect' the desired energy. In addition to the high rigidity requirements, collectors with a very low surface weight are also used for cost reasons. While the dead weight often plays an important role in conventional structural designs, the influence of variable loads like snow, ice and wind is dominant in the case of solar collectors.

For that reason, an important component to solve the assigned task is the systematic use of comprehensive wind tunnel tests (Fig. 2). For solar collectors, these tests are absolutely essential for several reasons:

Available conservative dimensioning regulations—which are thoroughly suitable for normal buildings—lead to substantial surplus masses and hence higher electricity production costs. Wind tunnel tests therefore make sense for economic reasons alone, as they permit the use of realistically low values instead of the ones used in the standards and regulations, which are too conservative for this particular purpose.

Technical reasons also favour detailed wind tunnel tests: on the one hand, deformations of the collectors must not exceed certain limiting values in the course of regular operation, since

Besonderheiten Bedingt durch die auch in sonnenreichen Gegenden vergleichsweise geringe Energiedichte der solaren Einstrahlung ergeben sich sehr großflächige und damit windanfällige Konstruktionen, um die gewünschte Energie „einzusammeln“. Zusätzlich zu den hohen Steifigkeitsanforderungen werden aus Kostengründen Kollektoren mit sehr geringem Flächen-gewicht gefordert. Während bei konventionellen Baukonstruktionen oft das Eigengewicht eine wichtige Rolle spielt, dominiert bei Solarkollektoren der Einfluss der veränderlichen Lasten wie Schnee, Eis und Wind.

Deshalb ist der gezielte Einsatz umfangreicher Windkanaluntersuchungen ein wichtiger Baustein zur Lösung der gestellten Aufgabe (Abb. 2). Diese Untersuchungen sind für Solarkollektoren aus mehreren Gründen unumgänglich:

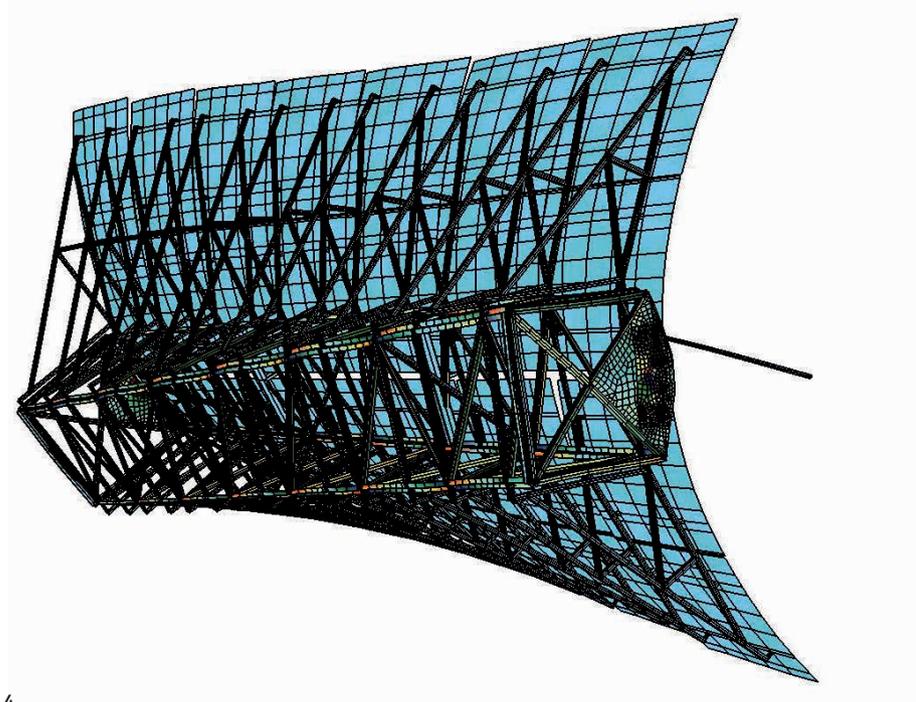
Vorhandene konservative Bemessungsregelungen – die für normale Bauwerke durchaus geeignet sind – führen zu erheblichen Mehrmassen und damit höheren Stromgestehungskosten. Allein aus wirtschaftlichen Gründen machen Windkanaluntersuchungen also Sinn, denn sie erlauben es, realistisch niedrige Werte anzusetzen anstatt der in den Normwerken verwendeten Zahlen, die für diesen Zweck zu konservativ sind.

Auch technische Gründe sprechen für detaillierte Windkanalversuche: Einerseits dürfen die Verformungen der Kollektoren im normalen Betrieb gewisse Grenzwerte nicht überschreiten, weil sonst die optische Qualität und letztendlich die Stromerzeugung sinkt. Andererseits muss auch das „Überleben“ des Kollektors, d.h. seine Standsicherheit, bei der maximal anzusetzenden Windgeschwindigkeit sichergestellt sein. Die Bauteile der Kollektorstruktur müssen so dimensioniert sein, dass sowohl Gebrauchstauglichkeit (und damit optische Effizienz) als auch Stand-

1a+b 'Pizza plate method': A slotted sheet metal plate is inserted into the radiation path of a parabolic trough collector in order to make the rays visible „Pizzablech-Methode“: Ein geschlitztes Blech wird in den Strahlengang eines Parabolrinnenkollektors eingebracht, um die Strahlen sichtbar zu machen

2 Parabolic trough collector in the wind tunnel
Parabolrinnenkollektor im Windkanal

3a+b Parabolic trough collector with slots to reduce wind loading
Parabolrinnenkollektor mit Wind-Entlastungsschlitzen



4 Structure of a trough collector deformed under load, the deformation being shown in a strongly exaggerated way (Finite-Elemente-Methode) *Unter Last verformte Struktur eines Rinnenkollektors, Verformung stark überhöht dargestellt (Finite-Element-Methode)*

the optical quality and hence eventually power generation will otherwise decrease. On the other hand, the survival of the collector, that is, its structural safety in case of the maximum anticipated wind speed, needs to be guaranteed. The constructional elements of the collector structure must therefore be dimensioned in such a way that serviceability and hence optical efficiency as well as structural safety are guaranteed. A structure optimally designed in technical and economic terms is distinguished by the fact that the loading capacity of the employed materials and fasteners is utilised to a great extent in both cases.

The need for a high level of rigidity results in large construction heights, the need for better material utilisation in lower wall thicknesses and the need for low specific surface weights in distributed structures. Solar concentrators are typical lightweight structures in which the stability depends heavily on sizing.

The results of the wind tunnel tests then serve as initial parameters for the structural analysis, performed by means of the Finite Element Analysis (FEA). The outcome of the FEA, i.e. the collector geometry deformed under load (Fig. 4) is then used for optical analysis purposes. Based on the results of these calculations, the structure is adjusted and calculated again. After repeating several iterations, the structure approximately reaches the optimal solution.

The possibility of further reducing the load through geometric modifications on the collector is also investigated (Fig. 2).

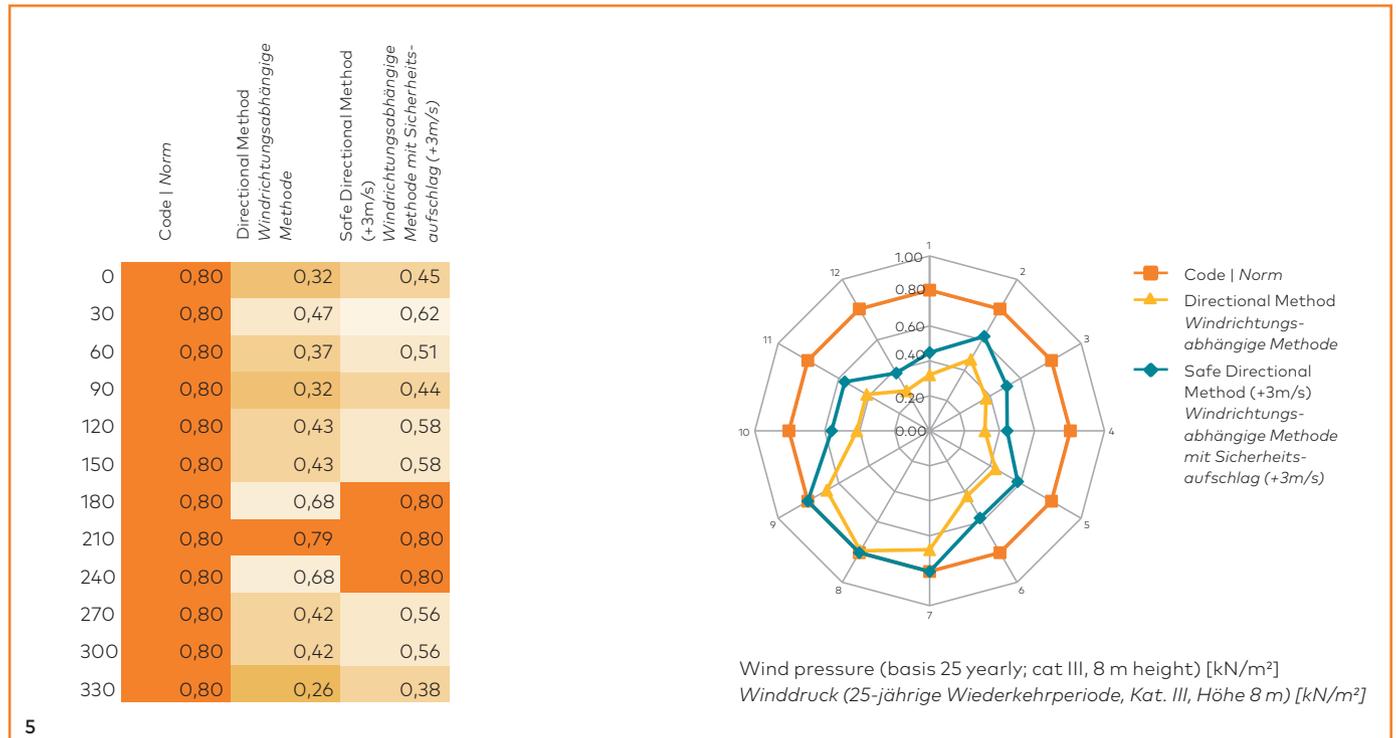
sicherheit gewährleistet sind. Eine technisch und wirtschaftlich optimal ausgelegte Struktur zeichnet sich dadurch aus, dass die Belastbarkeit der eingesetzten Materialien und Verbindungsmittel in beiden Fällen in hohem Maße ausgenutzt wird.

Die Anforderung einer hohen Steifigkeit führt zu großen Bauhöhen, die Anforderung der hohen Materialausnutzung zu geringen Wandstärken und die Anforderung des geringen spezifischen Flächengewichts zu aufgelösten Strukturen. Solarkonzentratoren sind typische Leichtbaustrukturen, bei denen Stabilität für die Bemessung maßgebend ist.

Die Ergebnisse der Windkanaluntersuchungen sind dann die Eingangsgrößen für die Strukturanalyse mittels der Finite-Elemente-Methode (FEM). Das Ergebnis der FEM, d.h. die unter Last verformte Kollektorgeometrie (Abb. 4), wird dann für optische Analysen verwendet. Anhand der Ergebnisse dieser Berechnungen wird die Struktur angepasst und erneut berechnet. Nach mehrfachem Durchlaufen dieser Prozedur nähert sich schließlich die Struktur dem Optimum an.

Wann immer möglich, wird bei Windkanalversuchen auch untersucht, ob sich die Lasten durch Änderungen an der Kollektorgeometrie weiter reduzieren lassen (Abb. 2).

Mit der windrichtungsabhängigen Bemessung für klar ausgerichtete Strukturen, wie z.B. Parabolrinnenkollektoren, nutzen wir einen weiteren Weg zur Windlastminimierung (Abb. 5). Dieser Ansatz berücksichtigt, dass der Wind, und vor allem die bemessungsrelevanten Extremwindereignisse, an einem bestimmten Standort in der Regel nur aus wenigen Richtungen auftreten, welche oft nicht mit der „schwächsten“ Richtung der Struktur korrelieren.



In the case of wind direction-dependent dimensioning of structures with a clear orientation such as parabolic trough collectors, we make use of another method for minimising wind loads (**Fig. 5**). This approach takes into account that the wind and extreme incidents relevant to dimensioning especially, usually occur at a certain location only from a few directions, which generally do not correlate with the structure's 'weakest' direction.

For this type of analysis, statistical evaluation of extreme wind events where the power station is located will be necessary in addition to the wind direction-dependent shape parameters from the wind tunnel testing.

This statistic evaluation, which has not been included yet in many standards and regulations, is based on the evaluation of comprehensive meteorological data measured on site or in the vicinity.

Compared to control values, such evaluations tend to come up with less conservative design loads. Understanding the frequency distribution of average wind speeds provides more realistic predictions of operating hours and deformation-related energy losses. Solar concentrators are ground-level structures whose design depends heavily on exact information on the height profile of the wind speed and the turbulence intensity where the concentrator is located.

It is essential to factor in the influence of the wind in the case of large-scale structures with a low weight and eigenfrequency around 1 Hz. The oscillating mass of the structure

Für eine solche Analyse ist neben den windrichtungsabhängigen Formbeiwerten aus dem Windkanalversuch eine statistische Auswertung der Extremwindereignisse am Kraftwerksstandort erforderlich.

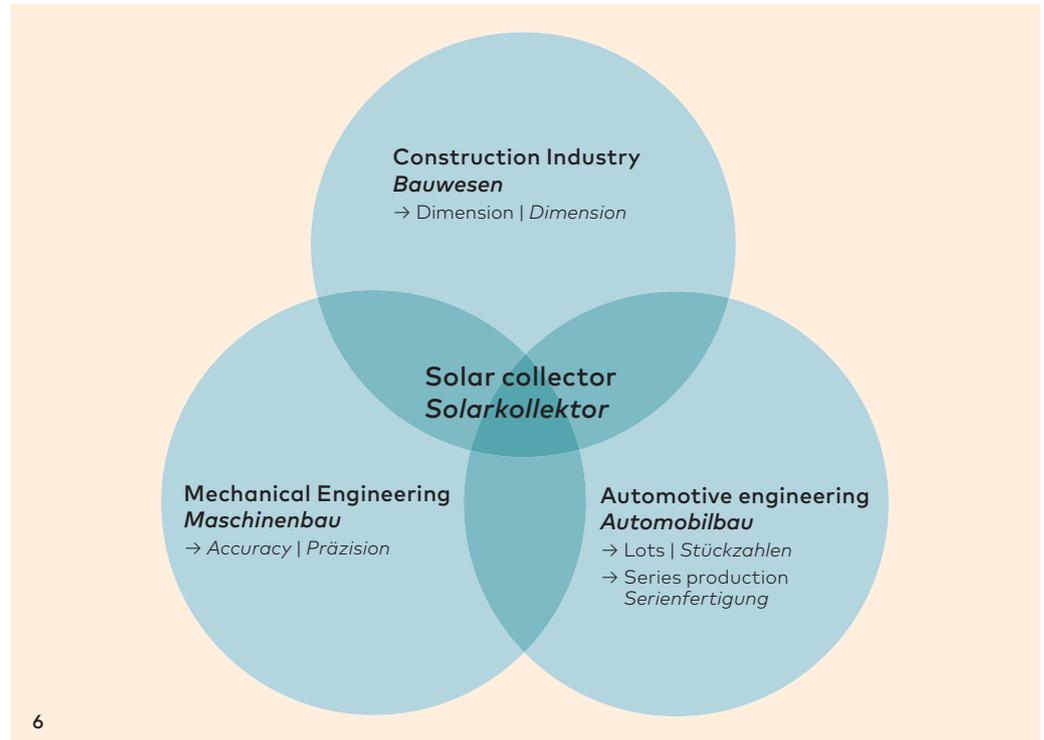
Diese statistische Auswertung, die in vielen Regelwerken noch keinen Einzug gehalten hat, basiert auf der Auswertung von umfangreichen, vor Ort oder in der Umgebung gemessenen meteorologischen Daten.

Sie liefert im Vergleich zu den Regelwerken üblicherweise Bemessungslasten, die weniger konservativ sind. Die Kenntnis der Häufigkeitsverteilung mittlerer Windgeschwindigkeiten erlaubt eine realistische Vorhersage der Betriebsstunden und der verformungsabhängigen Energieverluste. Solarkonzentratoren sind bodennahe Strukturen, für deren Auslegung genaue Informationen zum Höhenprofil der Windgeschwindigkeit und der Turbulenzintensität am Standort erforderlich sind.

Für großflächige Strukturen mit geringem Gewicht und Eigenfrequenzen von etwa 1 Hz ist der dynamische Einfluss des Windes zu berücksichtigen. Die schwingende Masse der Struktur wird durch einen Böenreaktionsfaktor berücksichtigt, der die zunächst statisch angenommene Windlast erhöhen kann. Aerodynamische Instabilität wie Flattern, Galloping, Divergenz, Lock-in, etc. muss ausgeschlossen werden.

Nicht zuletzt besteht eine weitere wichtige Anforderung an die Struktur darin, dass die großen, der Witterung ausgesetzten optischen Geräte langlebig sein müssen und nicht nur bei der Herstellung möglichst kostengünstig sein sollen, sondern auch im späteren jahrelangen Betrieb.

5 Evaluation for the wind direction-dependent dimensioning of a solar field
Auswertung für die windrichtungsabhängige Bemessung eines Solarfeldes



6 Combination of different engineering disciplines for the planning of collector structures
Kombination verschiedener Ingenieurdisziplinen für die Planung von Kollektorstrukturen

includes a gust response factor which can increase the initial static hypothetical wind load. Aerodynamic instability such as flutter, galloping, divergence and lock-in must be excluded.

In addition, another important requirement on the structure is that the large, weather-exposed optical devices have to be long-lasting and as favourably priced as possible not only in production terms, but also during their operation over decades.

Approach To successfully solve the assigned tasks, we use methods and auxiliary means from various branches of industry. Currently, precise, light yet very rigid structures cannot be assigned adequately to any of the existing branches of industry: the traditional construction industry is not familiar with the necessary precision requirements, mechanical engineering is much too cost-intensive, and the required construction component sizes are unusual in the automotive industry. For this reason, we make use of solutions and procedures from all three sectors (**Fig. 6**).

Steel construction: The elaborate structural components of the steel structure are delivered by various steel construction companies. Due to logistical reasons and the number of parts, often several companies deliver the same structural components. Due to the serial production and the corresponding quality controls, these elements have low manufacturing tolerances in the millimetre range, as usual in

Herangehensweise Um die gestellten Aufgaben erfolgreich zu lösen, nutzen wir Methoden und Hilfsmittel aus verschiedenen Industriezweigen. Die exakten, leichten und dennoch sehr steifen Strukturen lassen sich derzeit keinem existierenden Industriezweig richtig zuordnen: Die traditionelle Bauindustrie ist nicht mit den erforderlichen Genauigkeiten vertraut, der Maschinenbau ist deutlich zu kostenintensiv und in der Automobilindustrie sind die erforderlichen Bauteilgrößen unüblich. Daher nutzen wir Lösungen und Verfahren aus allen drei Bereichen (**Abb. 6**).

Stahlbau: Die filigranen Einzelbauteile der Stahlstruktur werden von verschiedenen Stahlbauunternehmen angeliefert. Aus Gründen der Logistik und der Stückzahlen liefern teilweise mehrere Firmen die gleichen Bauteile. Aufgrund der Serienfertigung und entsprechender Qualitätskontrollen verfügen diese Elemente zwar über geringe Fertigungstoleranzen im Millimeterbereich – wie im Stahlbau üblich – aber auch die sind noch deutlich zu hoch, um die erforderliche Genauigkeit des fertigen Kollektors und damit die notwendige optische Qualität zu erreichen.

Maschinenbau: Deshalb werden präzise Lehren verwendet, in denen die „ungenauen“ Einzelteile auf der Baustelle so gefügt werden, dass die wichtigen Anschlusspunkte der Baugruppe hinreichend genau sind. Damit entsteht nach dem letzten Fügevorgang auf der größten Präzisionslehre (**Abb. 7**) eine Kollektorstruktur, die nur im Bereich von Zehntelmillimetern von der Sollgeometrie abweicht. Die Lehren verfügen über sehr exakte Auflagerpunkte, die gefräst bzw. geschliffen und mittels aufwendiger 3D-Messverfahren justiert werden. Entwurf, Bau und Einsatz dieser

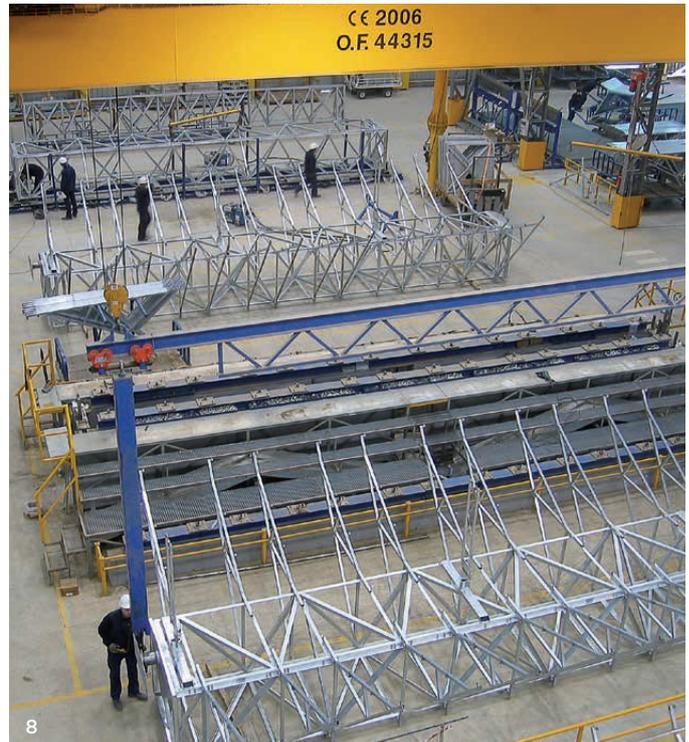


the steel construction industry. However, these tolerances are still far too large to achieve the necessary precision of the finished collector and hence the necessary optical quality.

Mechanical engineering: For this reason, precise jigs are used, in which the 'imprecise' individual parts are assembled on the construction site in a way that the important connection points of the subassemblies are sufficiently precise. As a result, a collector structure emerges on the largest precision jig after the last assembly process, which deviates from the designed geometry by only tenths of a millimetre (Fig. 7). The jigs have very exact support points, which are milled or grounded and adjusted by means of expensive 3D measuring procedures. To perform the assigned task, the design, construction and use of these jigs, as well as of the corresponding assembly lines and assembly sequences (Fig. 8) have to be included in the planning and development process.

A joining technology based on pre-stressed, abrasion-resistant threaded connections and positive joint bonds which can compensate the tolerances is used to fit imprecise components.

Automotive engineering: The assembly line is located in an assembly hall right next to the solar field. The hall is supplied with the structural components from one side, which are then transported to the individual assembly stations, for instance with an indoor crane. Although the assembly works on the jigs are still based on manual labour, special fasteners fully



Lehren und der zugehörigen Montagestraßen und Montagesequenzen (Abb. 8) müssen deshalb mit geplant und entwickelt werden, um der gestellten Aufgabe gerecht zu werden. Für das Fügen der ungenauen Bauteile wird eine Verbindungstechnik eingesetzt, die Toleranzen ausgeglichen kann und auf vorgespannten, reibfesten Schraubverbindungen sowie formschlüssigen Verklebungen basiert.

7 Assembly jig for assembly of the collector element
Montagelehre („Jig“) für die Montage der Kollektorelemente

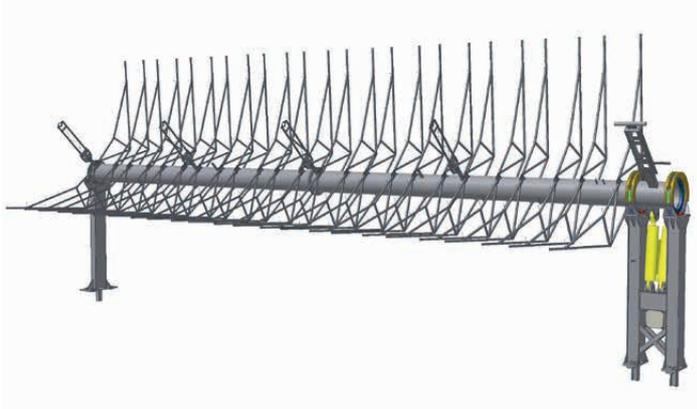
8 Assembly line for parabolic trough collectors with large assembly jigs for the individual assembly steps
Fertigungsstraße für Parabolrinnenkollektoren mit großen Montagelehren („Jigs“) für die einzelnen Montageschritte

9 Main bearing structures of parabolic trough collectors:
 Haupttragwerke von Parabol-
 rinnenkollektoren:

a Torque tube as a continuous beam
 Torsionsrohr als Durchlaufträger

b Torque tube as a single-span beam
 (SENER Trough)
 Torsionsrohr als Einfeldträger
 (SENER Trough)

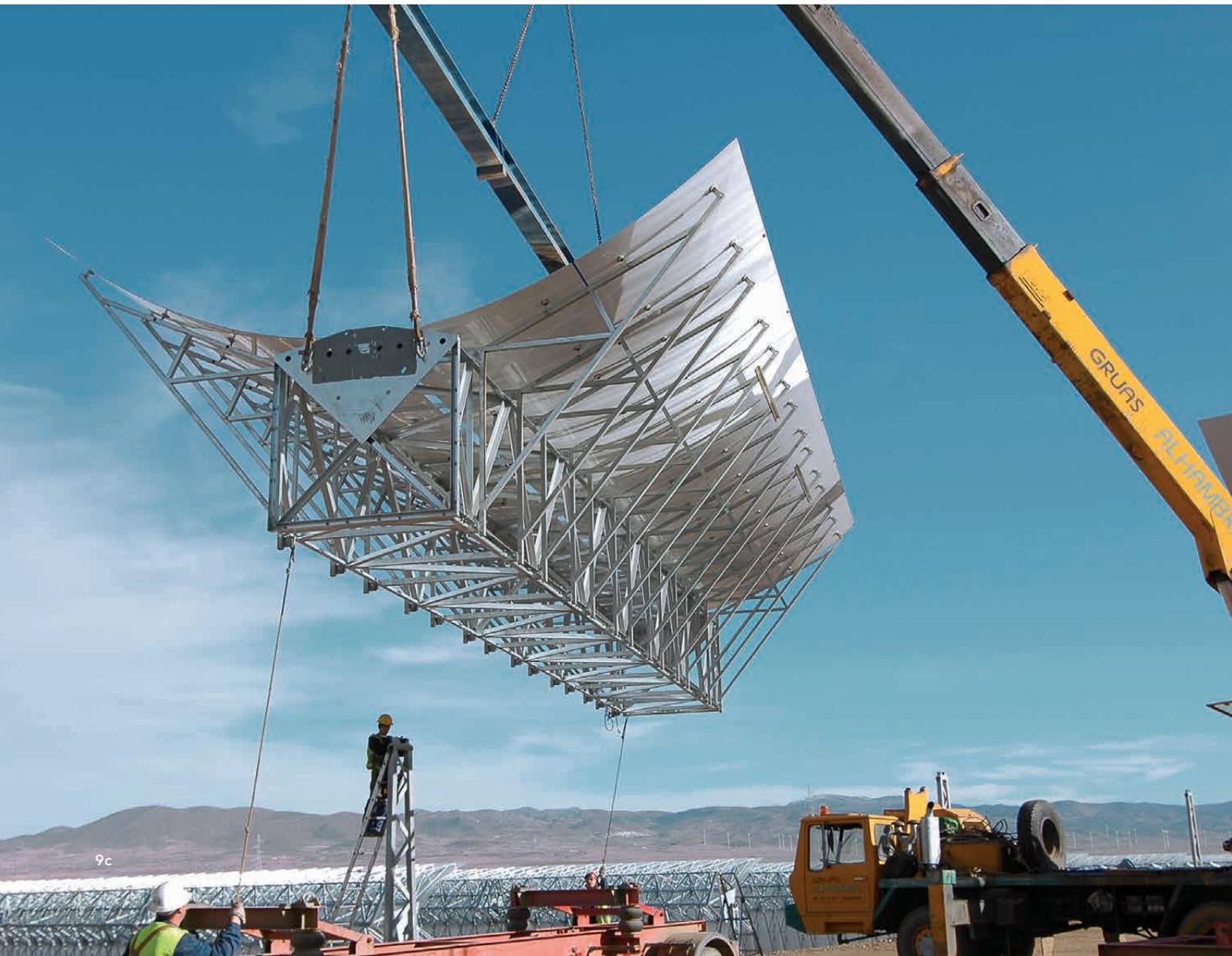
c Torque box
 Torsionsbox



9a



9b



9c

developed in terms of serial technology are used. The manufacturing sequence also includes quality assurance stations, for instance by means of photogrammetric dimensioning and a balancing station for adjusting the centre of gravity of the collector. Every collector has a serial number, so that all relevant production and dimensioning can be accessed at any time for each collector. Finally, the collector is transported to the field in a specially cushioned vehicle.

In the next section, we will look into what has so far been rather abstract in further detail with the help of specific examples, first from the area of parabolic troughs and then for a Dish/Stirling system.

Example of the parabolic trough collector

Techno-economic studies (**chapter 7**) show that the stiffness of a structure has major influence on the annual solar energy performance due to its impact on optical efficiency. For this reason, a stiffer structure can often make economically sense despite the associated additional costs. Therefore, the efficient collectors designed by us are mostly characterised by large construction heights and voluminous supporting structures in order to minimise the deformations caused by wind and dead load, all this with low material usage.

As a typical example, this requirement can be explained by means of two customary parabolic trough supporting structure types: the so-called torsion box of the EuroTrough (**Fig. 9c**) consists of many individual component parts, but reaches a very high stiffness in the relevant direction and hence high thermal performance in all positions due to the large cross-section depth and the 'mirror support cantilever arms', which also have a large cross-section. The likewise customary single-span torque tube solar collectors use a compact supporting tube (**Fig. 9b**) as a 'spine' and can generally be manufactured and assembled more simply, but achieve a lower solar performance due to the lower stiffness of the overall structure.

To reduce this disadvantage of the torque tube collector designed as a single-span system, the HelioTrough (**Fig. 9a**) has been designed as a continuous beam, whereby deformations across the torque tube axis are reduced to one fifth and greater span widths are rendered possible. In addition, the mirror support cantilever arms of the HelioTrough are connected to the torque tube in such a way that they reach a larger cross-section depth, which likewise contributes to a significantly increased productivity due to the fact that

Automobilbau: Die Montagestraße befindet sich in einer Montagehalle direkt neben dem Solarfeld. Die Halle wird von einer Seite mit den Bauteilen beschickt, die dann z.B. mit einem Hallenkran zu den einzelnen Montagestationen transportiert werden. Die Montagearbeiten auf den Lehren erfolgen noch von Hand, es werden jedoch spezielle, serientechnisch ausgereifte Verbindungsmittel verwendet. Der Fertigungsablauf beinhaltet auch Stationen zur Qualitätssicherung, z.B. mittels fotogrammetrischer Vermessung und einer Auswuchtstation zur Einstellung des korrekten Kollektorschwerpunktes. Jeder Kollektor hat eine Seriennummer, sodass jederzeit und für beliebige Kollektoren alle relevanten Daten aus der Fertigung und Vermessung eingesehen werden können. Schließlich wird der Kollektor mittels eines speziell gefederten Fahrzeugs ins Feld transportiert.

Die eher abstrakten Ausführungen sollen im Folgenden anhand ausgewählter Beispiele erläutert werden. Dazu zunächst ein Beispiel aus dem Bereich der Parabolrinnen, dann eines für ein Dish/Stirling-System.

Beispiel Parabolrinnenkollektor *Techno-ökonomische Untersuchungen (Kap. 7) zeigen, dass die Steifigkeit einer Struktur wegen der Auswirkungen auf den optischen Wirkungsgrad den solaren Jahresertrag maßgeblich bestimmt, weshalb eine steifere Struktur in vielen Fällen trotz Mehrkosten ökonomisch sinnvoll sein kann. Deshalb sind die von uns geplanten effizienten Solarkollektoren meist durch große Bauhöhen und raumgreifende Tragwerksstrukturen gekennzeichnet, um so trotz geringen Materialeinsatzes die Verformungen durch Wind und Eigengewicht zu minimieren.*

Als typisches Beispiel lässt sich diese Anforderung anhand zweier üblicher Parabolrinnen-Tragwerkstypen erläutern: Die sogenannte Torsionsbox des EuroTrough (Abb. 9c) besteht aus vielen Einzelbauteilen, erreicht jedoch aufgrund der großen Bauhöhe und der auskragenden „Spiegeltragarme“ mit ebenfalls großer Bauhöhe eine sehr hohe Steifigkeit in der relevanten Richtung und damit in allen Stellungen eine hohe thermische Leistung. Die ebenfalls üblichen Einfeld-Torsionsrohr-Solarkollektoren verwenden ein kompaktes Tragrohr (Abb. 9b) als „Rückgrat“ und sind generell einfacher zu fertigen und zu montieren. Sie erzielen aber aufgrund der geringeren Steifigkeit der Gesamtstruktur einen geringeren solaren Ertrag.

Um diesen Nachteil des als Einfeldträger ausgeführten Torsionsrohrkollektors zu kompensieren, wurde der HelioTrough (Abb. 9a) als Durchlaufträger entworfen, wodurch sich die Verformungen quer zur Rohrachse auf ein Fünftel verringern, was höhere Spannweiten ermöglicht. Zudem werden die auskragenden Spiegeltragarme beim HelioTrough so an das Torsionsrohr angeschlossen, dass sie eine größere Bauhöhe erreichen, was aufgrund der mit der Bauhöhe kubisch zunehmenden Steifigkeit zu einer deutlich gesteigerten Leistungsfähigkeit beiträgt.

stiffness rises in cubic terms along with the cross-section depth.

Moreover, a sophisticated structure is also characterised by its adjustability to loads and regulations and to specific manufacturing possibilities of different locations in a simple and cost-efficient way: in the latticed framework systems of the EuroTrough and Ultimate Trough® for instance, the wall thickness of the profiles can be adjusted in a simple manner without having to change the structural concept.

In the example of a mirror support cantilever arm, adjustment of different locations to the locally most cost-effective manufacturing possibilities should be made: the same component part can either be welded manually (**Fig. 10**), which is recommended in a country with low wages, or by means of a robot (**Fig. 11**). The latter makes sense in highly industrialised countries.

Example of the Dish/Stirling system

Parabolic trough power stations consist of thousands of collector elements at one location. Dish/Stirling systems or PV stations are also suitable for decentralised use, where only one or a few facilities are set up at a particular location. In this event, it is not economical to install costly production jigs on site. The assembly has to be managed without such auxiliary means, where possible, and only easily transportable devices should be used.

Nevertheless, the necessary precision of the structure has to be achieved, in this case through the highly precise production of the components, which are then joined to form the overall structure. This approach is common in automotive engineering and was realised in a system developed by us together with an automotive supplier for Infinia Corp.: the structure of the solar concentrator displayed in **Fig. 12** consists of highly precise deep-drawn steel sheet parts, which are finally assembled on site.

The outlined requirements of the structure of solar concentrators make it clear that an efficient and economically advantageous solution can only be found if suitable tools and methods are applied, experience and creativity are put to work and the specific framework conditions of each individual project are taken into consideration as far back as the conceptual stage.

Eine ausgeklügelte Struktur ist dadurch gekennzeichnet, dass sie sich einfach und kosteneffizient an die lokalen Lasten und Vorschriften und die von Standort zu Standort unterschiedlichen Fertigungsmöglichkeiten anpassen lässt: Bei den Fachwerkssystemen des EuroTrough und Ultimate Trough® kann z.B. die Wandstärke der Profile einfach angepasst werden, ohne dass das Strukturkonzept geändert werden muss.

*Am Beispiel eines Spiegeltragarms soll die Anpassung an die lokal günstigsten Fertigungsmöglichkeiten illustriert werden: Dasselbe Bauteil kann entweder von Hand geschweißt werden (**Abb. 10**), was sich in einem Land mit niedrigen Lohnkosten anbietet, oder von einem Roboter (**Abb. 11**). Letzteres ist die sinnvolle Variante für hochindustrialisierte Länder.*

Beispiel Dish/Stirling-System *Parabolrinnenkraftwerke bestehen aus Tausenden von Kollektorelementen an einem Standort. Dish/Stirling-Systeme und PV-Anlagen sind auch für den dezentralen Einsatz geeignet, bei dem nur eine oder wenige Anlagen an einem Standort errichtet werden. In diesem Fall ist es unwirtschaftlich, aufwendige Fertigungslehren vor Ort zu installieren. Die Montage muss möglichst ohne solche Hilfsmittel auskommen, lediglich leicht transportable Vorrichtungen können eingesetzt werden.*

*Die erforderliche Strukturgenauigkeit muss jedoch trotzdem erreicht werden, in diesem Fall über die hochpräzise Fertigung der Komponenten, die dann zur Gesamtstruktur gefügt werden. Diese Vorgehensweise ist im Automobilbau üblich und wurde bei einer Anlage realisiert, die wir zusammen mit einem Automobilzulieferer für das Unternehmen Infinia Corporation entwickelt haben: Die Struktur des in **Abb. 12** dargestellten Solarkonzentrators besteht aus hochpräzisen tiefgezogenen Stahlblechteilen, die vor Ort endmontiert werden. Aus den umrissenen Anforderungen an die Struktur von Solarkonzentratoren wird deutlich, dass eine effiziente und wirtschaftliche Lösung nur gefunden werden kann, wenn mit geeigneten Werkzeugen und Methoden gearbeitet wird, Erfahrung und Kreativität eingebracht und die individuellen Randbedingungen jedes Projekts bereits im Konzeptstadium berücksichtigt werden.*



Example of the heliostat Thousands of heliostats reflect sunlight onto a receiver located at the top of a tower in the middle of a solar field. Depending on the area of the solar field, distances between the heliostat and the receiver can reach over 1,000 m. The energy density on the surface of the receiver is extremely high and needs to be distributed as evenly as possible. Deformation caused by external loads such as the dead weight and wind must not widen the beam too much or shift it from its target position—meaning the requirements for stiffness and tracking accuracy are particularly high in the case of heliostats.

The stiffness requirements for the Stellio heliostats were taken into consideration right at the beginning when choosing the reflecting surface. The Stellio has a surface area of around 50 m², which represents the optimum ratio of required stiffness and weight of steel. The minimum values for stiffness guaranteed by the Stellio consortium are far below those of other commercial heliostats, and they have been found to be compliant (even performing better than expected) during testing by independent institutes. The pentagram shape of the reflecting surface makes it symmetrical to the centre point, meaning energy losses due to shading experienced by similar rectangular heliostats are avoided. The size and number of the mirrors is chosen specifically to prevent waste during manufacture out of float glass.

The focal length of Stellio heliostats can be specified individually during manufacturing according to the position in the field.

Beispiel Heliostat In einem Solarfeld reflektieren tausende Heliostaten das Sonnenlicht auf einen Receiver, der sich auf der Spitze eines Turms befindet. Der Abstand zwischen Heliostat und Receiver kann je nach Größe des Solarfeldes mehr als 1000 Meter betragen. Auf der Oberfläche des Receivers ist die Energiedichte sehr hoch und muss möglichst gleichmäßig verteilt werden. Verformungen aufgrund der äußeren Lasten Eigengewicht und Wind dürfen den Lichtstrahl weder zu stark aufweiten noch zu stark von seiner Sollposition entfernen. Daher sind die Anforderungen an die Steifigkeit und Nachführgenauigkeit bei Heliostaten besonders hoch.

Bei der Entwicklung des Stellio-Heliostats wurde die Anforderung an die Steifigkeit bereits bei der Wahl der Spiegelfläche berücksichtigt. Stellio besitzt eine Spiegelfläche von rund 50 m², die das Optimum des Quotienten aus notwendiger Steifigkeit und dazu erforderlicher Stahlmenge darstellt. Die vom Stellio-Konsortium garantierten Mindestwerte für die Steifigkeit liegen weit unter dem über denen von anderen kommerziellen Heliostaten; und ihre Einhaltung wurden mehrfach bei Messungen von unabhängigen Instituten bestätigt und unterschritten. Die als Pentagramm geformte Spiegelfläche ist die Grundlage für die effiziente punktsymmetrische Struktur und minimiert Energieverluste, die bei der gegenseitigen Verschattung rechteckiger Heliostaten auftritt. Die Größe und Anzahl der Spiegel ist so gewählt, dass bei der Herstellung aus Floatglas kein unnötiger Verschnitt entsteht.

Die Brennweite des Stellio-Heliostats kann bei der Fertigung individuell eingestellt werden und sie richtet sich nach der jeweiligen Position im Solarfeld. Die Anzahl und Position der rückseitigen Verbindungspunkte

10 Manual welding of mirror support cantilever arms using a jig in India
Manuelles Schweißen von Spiegeltragarmen auf einer Lehre in Indien

11 Production of mirror support cantilever arms by means of a welding robot in Spain
Fertigung von Spiegeltragarmen mittels Schweißroboter in Spanien

12 Solar concentrator structure on the basis of stamped parts: automotive engineering meets solar technology | Solarkonzentratorstruktur aus Stanzteilen: Automobilbau trifft Solartechnik
a Overall view | Gesamtübersicht
b Hub detail | Detail der Nabe

The number and position of the connection points on the back between the mirrors and the structure is specified to ensure the reflector contour under load in any position only deviates minimally from the target geometry. The reflectors are connected to the structure using bonded surfaces which have proven themselves ideal in parabolic trough collectors.

The eccentric mounting of the concentrator on the pylon reduces the size of the drives and increases the accuracy of the tracking as the pretension nullifies the play in the drive due to its dead weight. The alignment of the drive axes in the direction of the receiver minimises the travel range required for operation and permits the use of stiffer, more economical and easier to keep clean linear drives rather than rotary drives. The maintenance-free bearings made of fibre-reinforced plastic are designed so as to ensure accurate tracking throughout the entire lifetime of the Stello heliostat, even in the punishing conditions of a dusty desert location.

The supporting structure of the Stello heliostat is characterised by standard components and simple connection points. Radial lattice girders and tangential purlins act, similar to a shell, as a statically undefined structure with very little deformation. Bending stresses are substantially reduced, meaning the dimensions and thicknesses of the components can be reduced to a minimum.

The purlins are made out of strip-galvanised steel plates which are profiled to thin open sections. The strength of the extremes of the purlins is tripled by rolling them meaning there is no need for welding and they can be installed quickly simply using rivets.

The cross-section of the triangular pylon is design in accordance with stresses and offers maximum torsional and flexural rigidity for low material usage. The large triangular base provides an anchor point for the foundations using three fast-install driven piles. The distribution of the restraining torque into vertical forces, unlike in the case of the bored pile, reduces the need for space and lowers deformation.

zwischen Spiegel und Struktur wurde so gewählt, dass die Spiegelkontur unter Belastung in jeder Betriebsposition nur geringfügig von der Sollgeometrie abweicht. Der Anschluss der Spiegel an die Struktur erfolgt über eine formschlüssige Klebeverbindung, die sich bei Parabolrinnen bewährt hat.

Die exzentrische Aufhängung des Konzentrators am Pylon erlaubt schlanke Antriebe und erhöht die Nachführgenauigkeit, da die Zugvorspannung aus Eigengewicht das Spiel im Antrieb unwirksam macht. Die Ausrichtung der Antriebsachsen in Richtung des Receivers minimiert den für den Betrieb erforderlichen Fahrbereich während des Betriebs und erlaubt die Verwendung steiferer, kostengünstigerer und leichter von Schmutz schützbarer Linearantriebe anstelle von Drehantrieben. Die wartungsfreien Lager auf Faserverbundkunststoff sind so ausgelegt, dass die hohe Nachführgenauigkeit über die Lebensdauer des Stello-Heliostats unter den anspruchsvollen Bedingungen eines staubreichen Wüstenstandorts garantiert werden kann.

Die Tragstruktur des Stello-Heliostats zeichnet sich durch wiederkehrende Bauteile und einfache Verbindungspunkte aus. Radiale Fachwerkträger und tangentiale Pfetten wirken, ähnlich einer Schale, als mehrfach statisch unbestimmte Struktur, die sich durch geringe Verformungen auszeichnet. Biegebeanspruchungen werden weitgehend vermieden, sodass die äußeren Abmessungen und Wandstärken der Bauteile auf ein Minimum reduziert werden können.

Die Pfetten sind aus bandverzinktem Blech gefertigt, das zu einem dünnwandigen offenen Querschnitt profiliert wird. Die Wandstärke der Pfetten wird an deren Enden durch Quetschen verdreifacht, um auf Schweißen verzichten und sie zeitsparend mit Nieten verbinden zu können.

Der Querschnitt des dreieckförmigen Pylons folgt der Beanspruchung und bietet maximale Torsions- und Biegesteifigkeit bei geringem Materialeinsatz. Die große Basis der Dreieckform am Boden bietet die Anschlusspunkte für die Gründung, die aus drei schnell zu installierenden Rammpfählen besteht. Die Aufteilung des Einspannmomentes in vertikale Kräfte reduziert, im Vergleich zum Bohrpfehl, die Beanspruchung des Erdreichs und die Verformungen.



5 Optics

Optik

Since solar concentrators are optical systems, profound knowledge of optics is required for their development. In combination with the mechanical properties of the concentrator, detailed calculation of the optical properties and their optimisation represents an integral part of any successful development process.

The sun Sunlight is composed of several wavelengths from ultraviolet through visible light to infrared light (**Fig. 1**). Before it hits the surface of the earth or a solar concentrator, the sunlight traverses the atmosphere. In this process, it is attenuated to an extent that varies depending on the wavelength. In addition, diffusion in the atmosphere turns part of the direct (directional) radiation into diffuse (non-directional) radiation. Direct radiation can cause shadows and can be reflected as a beam of light. If clouds block out the sun, only diffuse radiation hits the surface of the earth.

Concentrating systems can only use direct light, in contrast to flat collectors which are used for hot water generation or electric power generation by means of (non-concentrating) photovoltaic systems, which can transform both direct and diffuse light. The transformation of radiation energy into thermal energy takes place (depending on absorptive capacity) across the entire solar spectrum, whereas photovoltaic systems can only use a part of the solar spectrum (**Fig. 2**).

Diffusion of the solar radiation when it traverses the atmosphere also leads to broadening of the apparent solar diameter, the

Solarkonzentratoren sind optische Systeme, daher sind für ihre Entwicklung fundierte Optik-Kenntnisse erforderlich. Die detaillierte Berechnung der optischen Eigenschaften und ihre Optimierung im Zusammenspiel mit den mechanischen Eigenschaften des Konzentratoren ist wesentlicher Bestandteil einer erfolgreichen Entwicklungsarbeit.

Die Sonne Sonnenlicht setzt sich aus verschiedenen Wellenlängen zusammen: von Ultraviolett über das sichtbare Licht bis in den Infrarot-Bereich (**Abb. 1**). Bevor es auf die Erdoberfläche bzw. auf einen Solarkonzentrator trifft, durchläuft das Sonnenlicht die Erdatmosphäre. Dabei wird es abgeschwächt – je nach Wellenlänge unterschiedlich stark. Zusätzlich wird durch Streuung in der Atmosphäre ein Teil der direkten (gerichteten) Strahlung zu diffuser (ungegerichteter) Strahlung. Direktstrahlung kann Schatten erzeugen und als Strahlenbündel reflektiert werden. Verdecken Wolken die Sonne, trifft nur noch diffuse Strahlung auf die Erdoberfläche.

Konzentrierende Systeme können nur gerichtete Strahlung nutzen, während Flachkollektoren für die Wassererwärmung oder (nicht konzentrierender) Photovoltaik bei der Stromerzeugung direktes wie auch diffuses Licht absorbieren. Die Umwandlung von Strahlungs- in Wärmeenergie erfolgt je nach Absorptivität über das gesamte Strahlungsspektrum, wohingegen bei photovoltaischen Systemen nur ein Teil des Solarspektrums genutzt werden kann (**Abb. 2**).

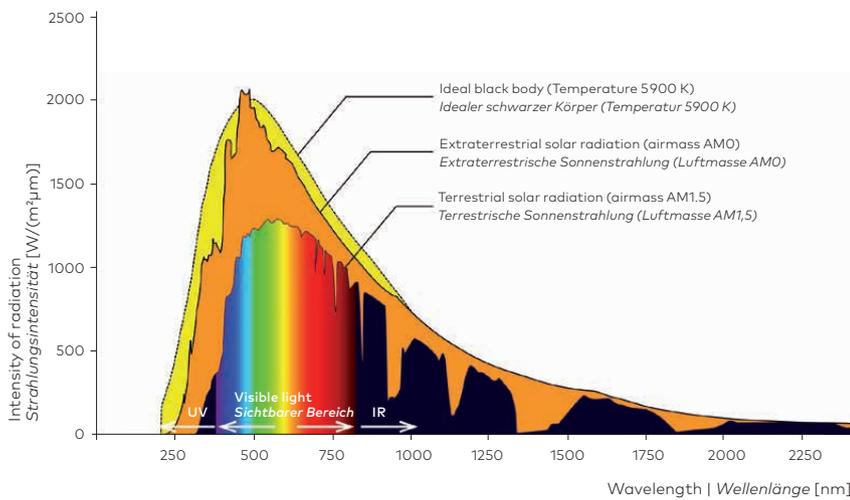
Die Streuung der Sonnenstrahlung beim Durchdringen der Atmosphäre führt zusätzlich zu einer Verbreiterung des scheinbaren Sonnendurchmessers, der sogenannten „Sunshape“ (**Abb. 3**). Bei klarem Himmel ist der Rand der Sonnenscheibe scharf und

so-called 'sunshape' (Fig. 3). When the sky is clear, the edge of the solar disc is sharp and has an aperture angle of approx. 9.5 mrad (0.54°) when observed from the earth. The larger and more blurred the sun disc appears, the lower the solar radiation—the focal spot widens correspondingly and not all of the reflected radiation may hit the receiver.

When the sun is high and the sky is clear, the solar irradiation on the surface of the earth reaches values of around 1,000 W/m², which suffices for instance for hot water generation at temperatures from 80°C up to 150°C. However, to produce higher temperatures as required for solar thermal power generation or process heat generation, the radiation needs to be concentrated.

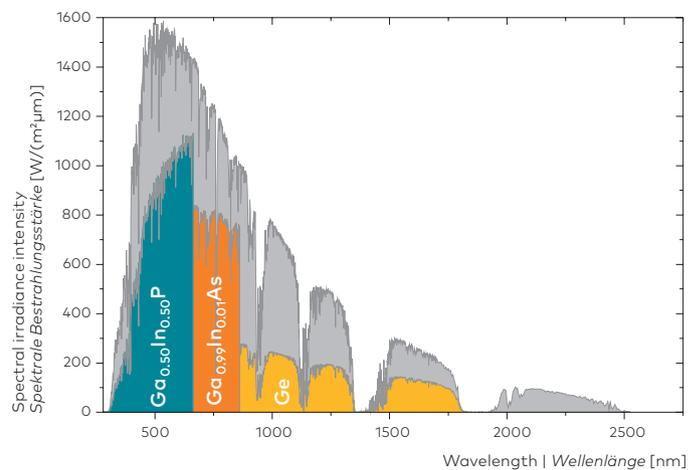
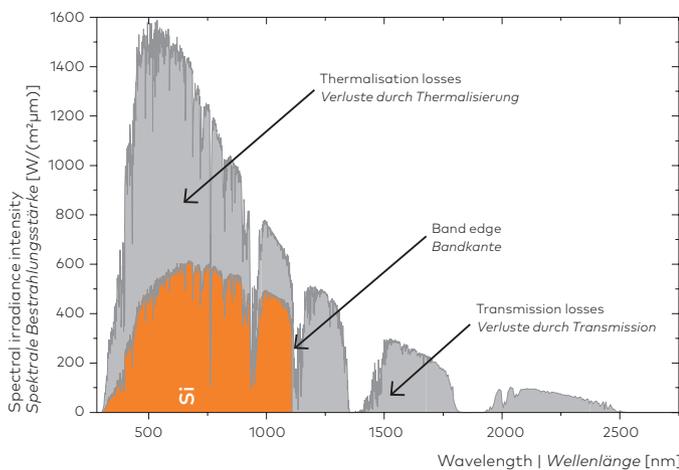
hat von der Erde aus betrachtet einen Öffnungswinkel von ca. 9,5 mrad (0,54°), bei diesigem Himmel dagegen wird das Licht teilweise abgelenkt und auch die Umgebung der Sonne scheint zu strahlen. Von der Erde aus betrachtet erscheint ein heller Kranz um die Sonne. Je größer und verschwommener die scheinbare Sonnenscheibe ist, desto mehr wird die Konzentration der Solarstrahlung beeinträchtigt. Denn auch der Brennfleck vergrößert sich entsprechend, verringert die Konzentration der Strahlung und es trifft ggf. weniger reflektierte Strahlung den Strahlungsempfänger (engl. Receiver).

Die solare Bestrahlungsstärke auf der Erde erreicht bei klarem Himmel und hoch stehender Sonne Werte um 1000 W m², was z. B. zur Warmwassererzeugung bis auf Temperaturen von 80 bis 150 °C ausreicht. Für die Erzeugung von höheren Temperaturen, wie sie für die solarthermische Stromerzeugung oder Prozesswärmeerzeugung erforderlich sind, muss die Strahlung jedoch konzentriert werden.



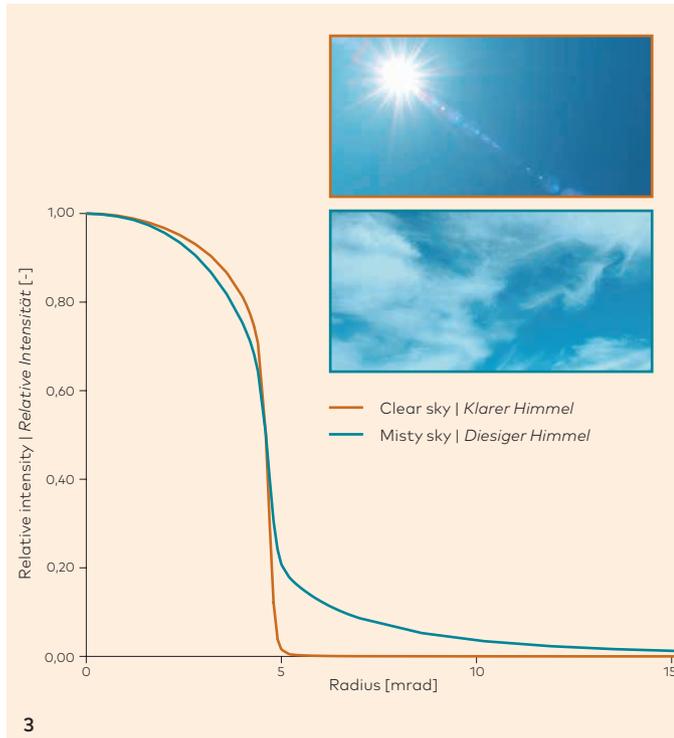
- 1 Solar spectrum
Spektrum des Sonnenlichts
- 2 Spectral use of the sunlight in photovoltaic systems
Spektrale Nutzung des Sonnenlichts bei Photovoltaik
 - a Silicon cell | Siliziumzelle
 - b Triple junction cell
Dreifachzelle

1



2a

2b



3 Sunshape: Brightness over the radius of the solar disc in clear and for misty sky
Sunshape: Helligkeit über dem Radius der Sonnenscheibe bei klarem und bei diesigem Himmel

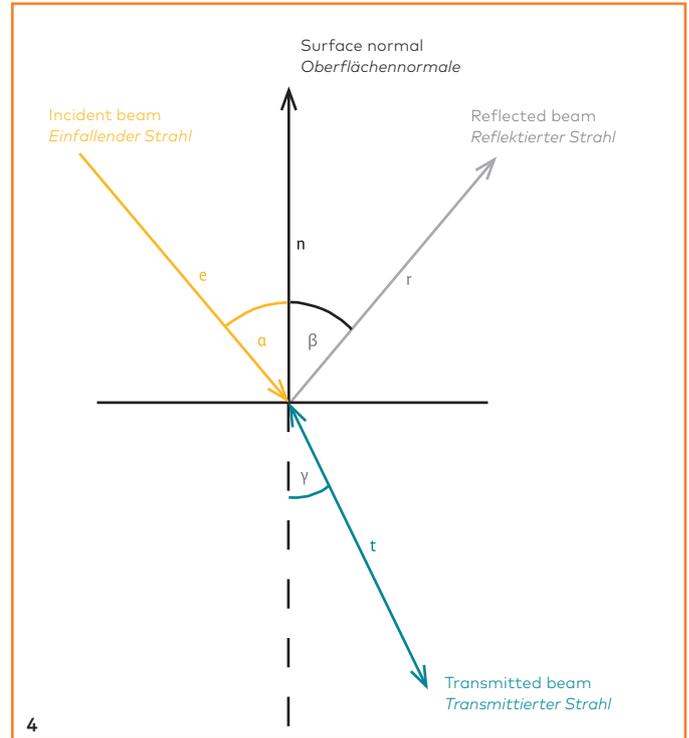
4 Law of reflection
 Reflexionsgesetz

Solar concentrators Most concentrators are designed as mirror (or reflecting) systems. In addition, sunlight can also be concentrated using (refracting) lenses; in the case of concentrating photovoltaic systems, these lenses are often Fresnel lenses.

According to Snell's law (the law of reflection—geometric optics), light rays are reflected from a mirror surface at the same angle at which they hit this surface ($\alpha = \beta$, Fig. 4). In the case of solar concentrators, this is made use of with a parabolically curved mirror surface, which concentrates incoming parallel sun rays onto the focal point.

Reflection is always associated with losses: it occurs on the reflecting surface itself through absorption in the reflector material. In case of the most commonly used glass mirrors with silver plate on the rear side, part of the radiation is also absorbed by the glass on its way from the front to the reflective coating on the rear side and back. Depending on the thickness and type of glass, the effective degree of reflection reaches values of up to 90–95%.

Further optical losses occur if the reflecting surface is not perfect. Here, a distinction is made between microscopic surface roughness, which can lead to diffusion (broadening) of the reflected light (especially in case of plastic foils with a reflective coating and aluminium mirrors), and macroscopic faults such as ripples and contour distortions of the mirrors, which cause incorrect deflection of the incoming solar radiation (Fig. 5).



Solkonzentratoren Meist sind Konzentratoren als Spiegelsysteme ausgeführt. Daneben kann Sonnenlicht aber auch mit (lichtbrechenden) Linsen gebündelt werden. Diese werden häufig bei konzentrierender Photovoltaik als Fresnellinsen ausgeführt.

Dem Snellschen Reflexionsgesetz (geometrische Optik) zufolge, werden Lichtstrahlen an einer Spiegelfläche mit demselben Winkel zur Oberflächennormale reflektiert, mit dem sie auf die Fläche auftreffen ($\alpha = \beta$, Abb. 4). Das macht man sich bei Solarkonzentratoren zunutze, indem die Spiegelfläche in der Regel parabolisch gekrümmt wird, denn dann werden parallel einfallende Strahlen in genau einem Brennpunkt (Fokus) konzentriert.

Reflexion ist verlustbehaftet: Die eigentlichen Reflexionsverluste entstehen an der spiegelnden Fläche selbst durch Absorption des verwendeten Spiegelmaterials. Bei den typischen, rückseitig versilberten Glasspiegeln wird auf dem Weg von der Vorderseite zur verspiegelten Rückseite und zurück zudem noch ein Teil der Strahlung vom Glas absorbiert. Je nach Glasdicke und -art erreicht der effektive Reflexionsgrad Werte bis zu 90 oder 95 %. Weitere optische Verluste entstehen, wenn die reflektierende Oberfläche nicht perfekt ist. Hier wird unterschieden zwischen mikroskopischen Rauigkeiten, die zu einer Streuung (Aufweitung) des reflektierten Lichts führen (vor allem bei verspiegelten Kunststofffolien und Aluminiumspiegeln), und makroskopischen Fehlern wie Welligkeiten und Konturfehler der Spiegel, die eine nicht korrekte Ablenkung der einfallenden Strahlen bewirken (Abb. 5).

Essentiell für Solarkonzentratoren ist der „Intercept-Faktor“ genannte Anteil der reflektierten Strahlung, der auf den Receiver trifft. Zusätzlich werden

Another important parameter of solar concentrators is the fraction of reflected rays that hit the receiver, the so-called 'intercept factor'. The intercept factor also quantifies further losses caused by shadowing of the mirrors through component parts and by blockage of the reflected rays. The 'sun shape' (see above) and receiver dimensions also have an impact on the intercept factor: the larger the receiver, the more rays hit the receiver. As larger receivers have increased thermal losses, however, a well-balanced compromise needs to be found. In practice, intercept factors ranging from 80 to 99% are achieved.

Surface errors are shown in the deflectometry measurement results. Even at distances of 400m, the mirrors achieve concentration ratios of up to 7. The focal points hardly expand beyond the perfect solar image.

Construction types of solar concentrators

Solar concentrators are mostly designed with uniaxially or biaxially curved mirrors.

Uniaxial systems: The most common construction type uses uniaxially curved parabolic mirrors concentrating the incoming solar radiation in a focal line, along which the absorber tube is located (parabolic trough concentrators, **Fig. 6a**). These collectors track the daily course of the sun through rotation around their longitudinal axis. The typical concentration factors (defined as the ratio between the absorber tube diameter and the aperture width of the concentrator) are 60 to 80, which is sufficient for operating temperatures from 400°C to over 500°C.

A variation of this construction type is the so-called linear Fresnel collector (**Fig. 6b**). The continuous parabolically-shaped reflector of this collector type is divided into longitudinal strips, which are mounted at one level. In contrast to the parabolic troughs, where the entire reflector is designed to track the sun together with the absorber, here only the individual strips rotate, with the absorber position fixed.

Biaxial systems: Biaxially curved concentrators (Dish), also referred to as dishes, generally have a rotationally symmetric parabolic shape and collect the radiation at a focal point (**Fig. 7**). This way a significantly higher degree of concentration is achieved; the latter can reach 2,000 to 4,000 and renders possible useful temperatures of 800°C to 1,500°C; without heat removal, these temperatures can rise up to and above 3,000°C.

auch weitere Verluste berücksichtigt, die infolge von Verschattung der Spiegel durch Bauteile und Blockierung der reflektierten Strahlung entstehen. Auch die Sunshape (s. o.) sowie die Receiverabmessungen wirken sich auf den Intercept-Faktoren aus; je größer der Receiver, desto leichter trifft die Strahlung auf diesen auf. Da aber größere Receiver die thermischen Verluste erhöhen, muss ein ausgewogener Kompromiss gefunden werden. In der Praxis werden Intercept Faktoren von 80 bis 99% erreicht.

Die Oberflächenfehler werden an Deflektometrie-messergebnissen gezeigt. Der Spiegel erzielt selbst auf 400 Meter Abstand noch Konzentrationsverhältnisse von bis zu 7. Die Brennflecken sind gegenüber dem perfekten Sonnenbild kaum aufgeweitet.

Bauarten von Solarkonzentratoren Solarkonzentratoren werden meistens mit ein- oder zweiachsig gekrümmten Spiegeln ausgeführt.

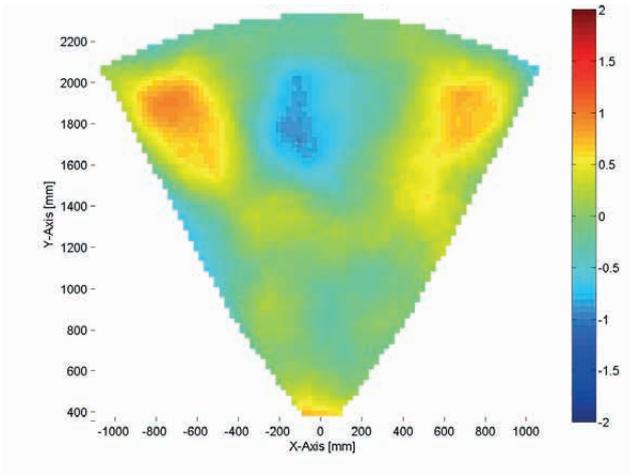
Einachsige Systeme: Bei der am häufigsten angewandten Bauart werden einachsig parabolisch gebogene Spiegel verwendet, die die einfallende Solarstrahlung in einer Brennlänge bündeln, in der das Absorberrohr verläuft (Parabollinnenkonzentratoren, **Abb. 6a**). Diese Kollektoren werden durch Rotation um ihre Längsachse dem täglichen Gang der Sonne nachgeführt. Typische Konzentrationsfaktoren (definiert als Verhältnis von Absorberrohrdurchmesser zu Aperturbreite des Konzentrators) liegen bei 60 bis 80, ausreichend für Nutztemperaturen von 400 bis über 500°C.

Eine Abwandlung dieser Bauart sind die linearen Fresnel-Kollektoren (Abb. 6b). Bei ihnen wird der Reflektor in einzelne Längsstreifen aufgeteilt und in einer Ebene montiert. Anders als die Parabolrinnen, bei denen der ganze Reflektor zusammen mit dem Absorber der Sonne nachgeführt wird, erfolgt hier nur die Drehung der einzelnen Streifen bei feststehendem Absorber.

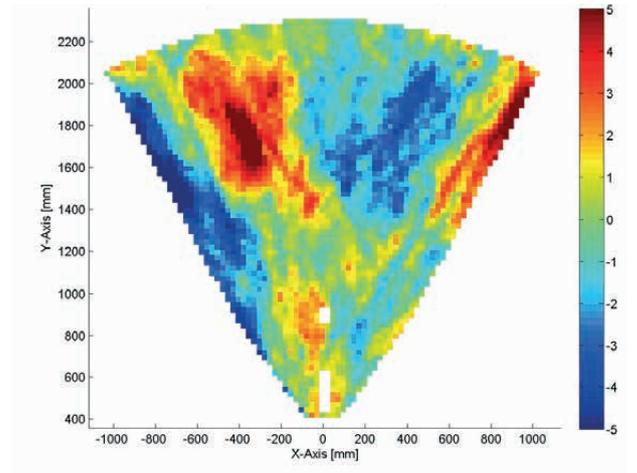
Zweiachsige Systeme: Zweiachsig gekrümmte Konzentratoren (Dish) haben meist eine rotationssymmetrische, parabolische Krümmung und sammeln die Strahlung in einem Brennpunkt (**Abb. 7**). Dadurch kann ein wesentlich höherer Konzentrationsgrad von 2000 bis 4000 erreicht werden und ermöglicht Nutztemperaturen von 800 bis 1500°C, ohne Abfuhr von Nutzwärme bis zu 3000°C und darüber.

Die höchste Strahlungskonzentration wird erreicht, wenn der Durchmesser (D) des Reflektors groß zur Brennweite (f, Abstand zwischen Brennpunkt und Scheitelpunkt der Parabel) wird: Das Verhältnis f/D liegt üblicherweise zwischen 0,5 und 1.

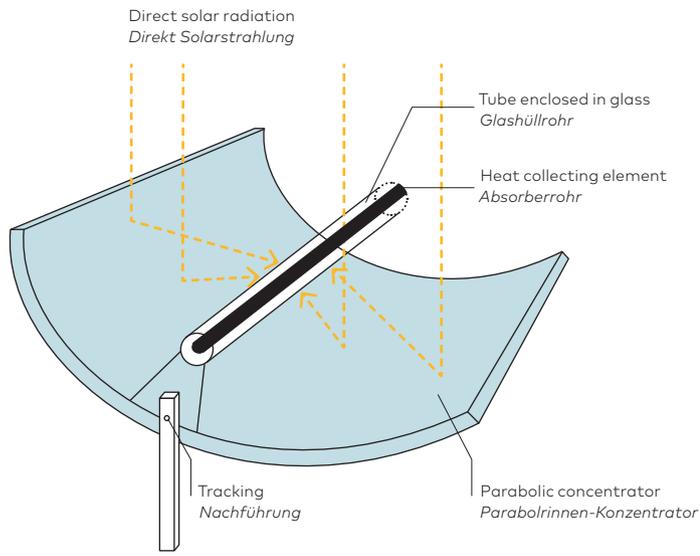
*Bei Turm-Solarkraftwerken hingegen konzentrieren viele einzeln der Sonne nachgeführte Spiegel (Heliostaten), das Sonnenlicht auf einen zentralen, auf einem Turm angebrachten Receiver (Wärmetauscher, **Abb. 8**). Die Heliostaten verwenden leicht parabolisch*



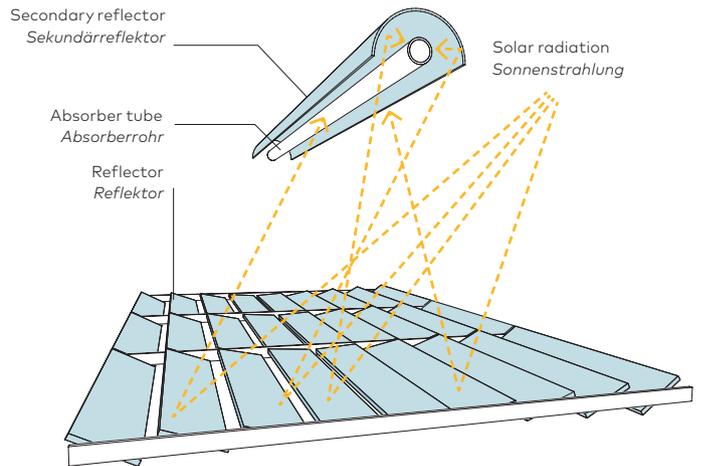
5a



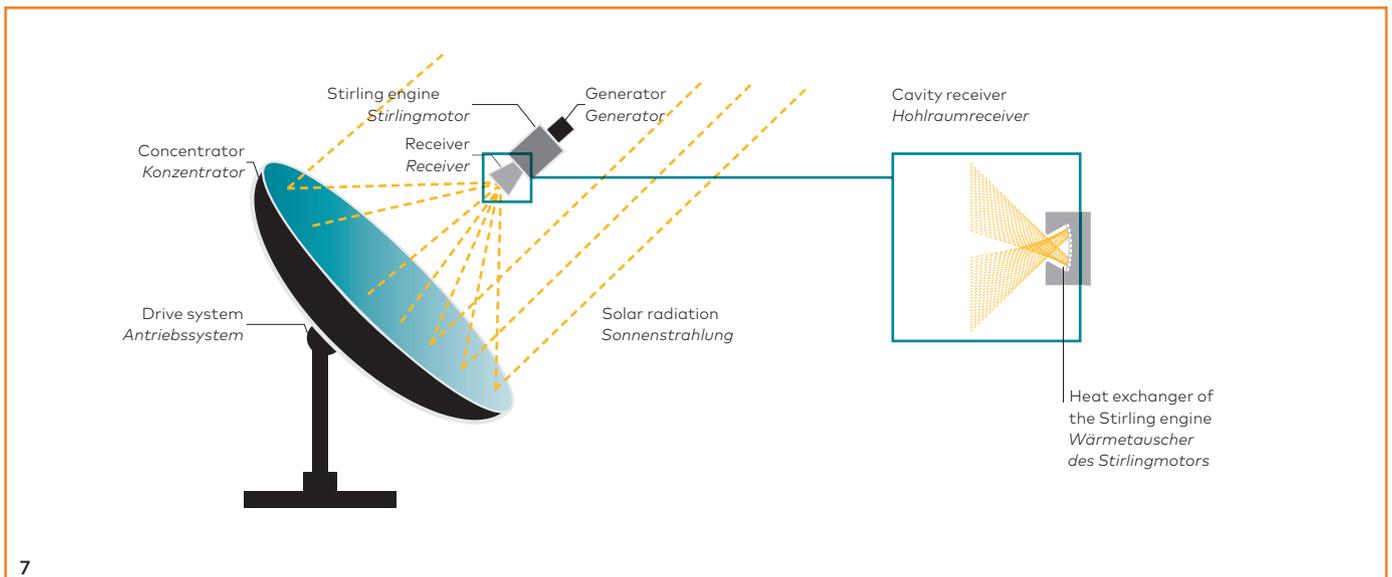
5b



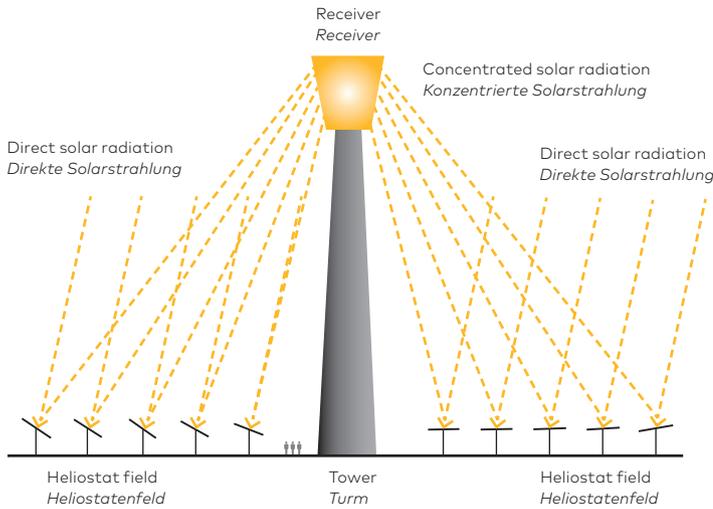
6a



6b



7



8

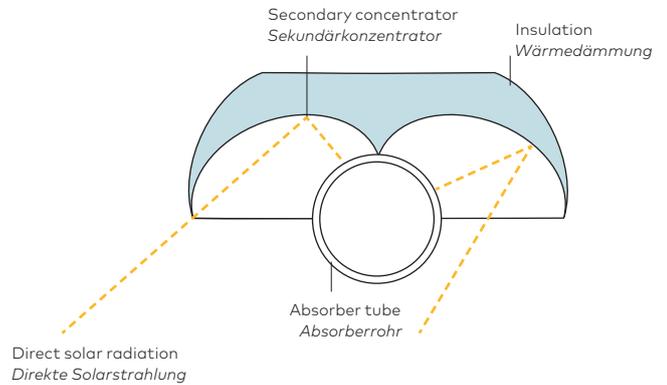
The highest concentration of the radiation is achieved when the diameter (D) is high in proportion to the focal length (f , distance between focal point and the parabola vertex); values of the f/D relationship usually lie between 0.5 and 1.

In central receiver systems also known as power towers, however, many mirrors called heliostats track the sun and concentrate the sunlight onto a central receiver installed on a tower (heat exchanger, Fig. 8). The heliostats use mirrors with a slightly parabolic shape and a consequently large focal distance of several hundred meters in general, such that the f/D ratio also becomes large. As a result the degree of concentration of an individual heliostat is reduced to a low level; only through superimposition of the focal spots of many heliostats on the receiver can high concentration factor and hence high achievable useful temperatures result. (Fig. 8) Astigmatism is another optical phenomenon which results from the varying angle of incidence as the day progresses.

Secondary concentrators: In a number of applications, especially when the optical quality of the concentrator is insufficient or extremely high concentration is required, a second mirror is installed in addition to the 'primary concentrator' (Fig. 9). This secondary concentrator is located close to the focal point and further concentrates the rays already condensed by the primary concentrator. However, the benefits resulting from higher concentration come along with higher losses through multiple

gekrümmte Spiegel, jedoch mit großer Brennweite von meist vielen 100 Metern, sodass auch das f/D -Verhältnis groß wird. Damit ist der Konzentrationsgrad eines einzelnen Heliostaten nur noch gering; erst durch die Überlagerung der Brennflecken vieler Heliostaten auf dem Receiver ergeben sich wieder ein hoher Konzentrationsfaktor und damit hohe erzielbare Nutzttemperaturen. (Abb. 8) Durch variable Einfallswinkel der Strahlung auf die Spiegel im Tagesverlauf tritt Astigmatismus als weiteres optisches Phänomen auf.

Sekundärkonzentratoren: In einigen Anwendungen, vor allem wenn die optische Qualität des Konzentrators nicht ausreicht oder wenn extrem hohe Konzentration der Sonnenstrahlen gefordert ist, wird zusätzlich zum „Primärkonzentrator“ ein zweiter Spiegel eingesetzt, der sog. Sekundärkonzentrator (Abb. 9). Dieser befindet sich nahe dem Brennpunkt und konzentriert die bereits vom Primärkonzentrator verdichteten Strahlen weiter. Dem Gewinn durch die höhere Konzentration stehen allerdings höhere Verluste durch mehrfache Reflexion und der Aufwand für den zusätzlichen Reflektor gegenüber, der zudem eine hohe Strahlungsflussdichte ertragen muss. Sekundärkonzentratoren werden oft bei linearen Fresnelkollektoren verwendet.



9

5 Surface errors: Gemessene Oberflächenfehler einer Spiegeloberfläche:

a Contour errors [mm] Konturfehler [mm]

b Slope errors [mrad] (green: perfect, red: deflection in one direction, blue: deflection in the other direction) Neigungsfehler [mrad] (grün = perfekt, rot = Ablenkung in die eine Richtung, blau = Ablenkung in die andere Richtung)

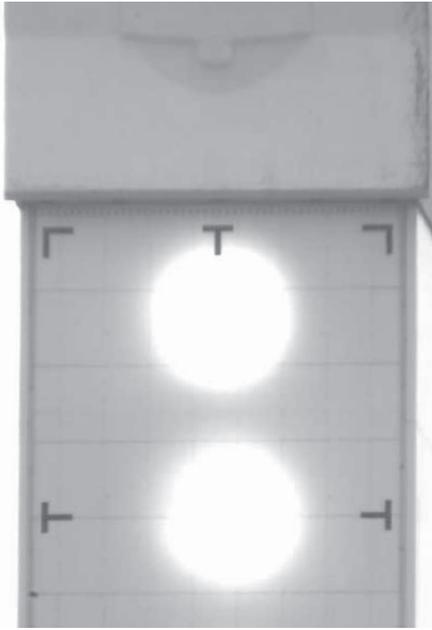
6a Principle of the parabolic trough collector Prinzip des Parabolrinnenkollektors

6b Principle of the linear Fresnel collector Prinzip des linearen Fresnelkollektors

7 Principle of the dish concentrator Prinzip Dish-Konzentrator

8 Principle of the central receiver system Prinzip des Turm-Solarkraftwerks

9 Principle of the secondary concentrator Prinzip eines Sekundärkonzentrators



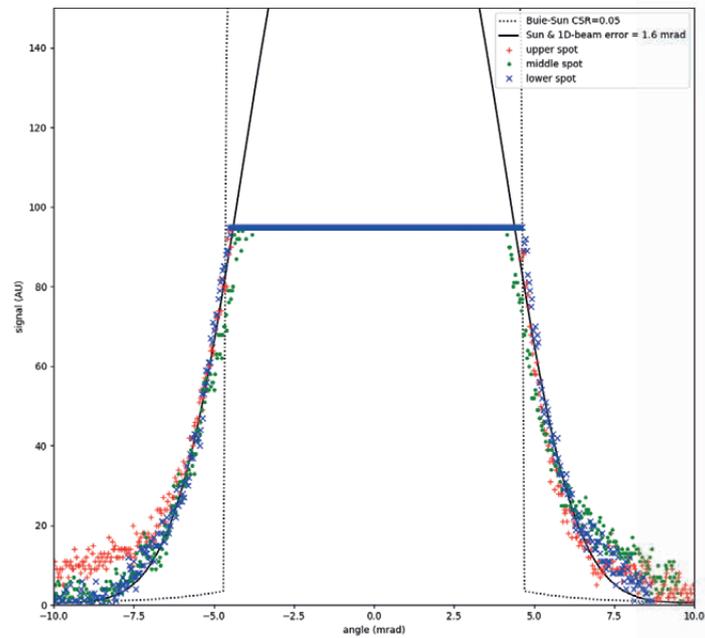
10a

10 Stello heliostats tracking in Jülich research power plant. The total 1D-beam error is measured as 1.6 mrad, i.e. the total slope error (due to deformations of metal structure and glass by gravity, wind, temperature, fabrication, deviating focal length), is 0.8 mrad.

Nachführung von Stello-Heliostaten im Forschungs- und Versuchskraftwerk in Jülich. Der Fehler des 1D-Strahls wird insgesamt als 1,6 mrad gemessen. Beispielsweise beträgt der Gesamtnichtungsfehler (aufgrund von Verformung der Metallstruktur und des Glases durch Schwerkraft, Wind, Temperatur, Herstellung und abgelenkter Brennweite) 0,8 mrad.

a Photo of beams on measurement target
Foto der Strahlen auf einem zu messenden Ziel

b Compar simulated
Simulierter Vergleich



10b

reflections and the expenditure related to the additional reflector, which also has to endure a high radiation flux density.

Secondary concentrators are often used for linear Fresnel collectors.

Optical simulation and optimisation

The complex interrelations between all these factors which ultimately determine the system's optical efficiency require comprehensive simulation for realistic forecasting and control. Besides precise reproduction of the incoming solar radiation and the concentrator geometry, these simulations also take into account the optical properties of the mirror elements and especially their errors. The optical simulation outputs the intercept factor and the anticipated radiation flux density distribution on the surface of a receiver of any shape, which then serves as an input parameter for the thermodynamic design of the receiver.

Depending on the properties of the receiver, a certain flux distribution of the radiation is further required in some cases. This can be controlled through modification of the reflector contour, such that the intended distribution can be approached through semiautomated optimisation procedures. This leads to the final target contour of the mirror, which deviates from the parabolic form and serves as a construction specification for the mirror manufacturer.

Optische Simulation und Optimierung

Die komplexen Zusammenhänge all dieser Faktoren, die letztlich die optische Leistungsfähigkeit des Systems bestimmen, erfordern zur realistischen Vorhersage und Kontrolle eine umfassende Simulation. Dazu gehören neben der genauen Abbildung der einfallenden Solarstrahlung und der Konzentratorgeometrie die optischen Eigenschaften der Spiegelemente und insbesondere deren Fehler. Die Optiks simulation liefert als Ergebnis den Intercept-Faktor und die zu erwartende Strahlungsflussdichteverteilung auf der Oberfläche eines beliebig geformten Receivers. Sie dient als Eingangsgröße für die thermodynamische Auslegung des Receivers.

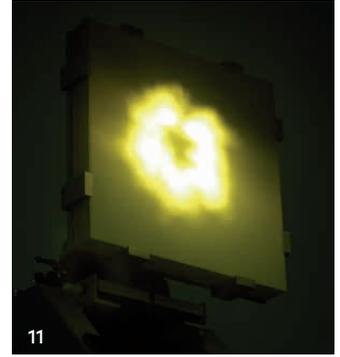
Abhängig von den Eigenschaften des Receivers ist in manchen Fällen zudem eine bestimmte Verteilung der Strahlung erforderlich. Diese kann durch Änderung der Reflektorkontur gesteuert werden, sodass die angestrebte Verteilung mit teils manuellen, teils automatisierten Optimierungsverfahren angenähert werden kann. Daraus entsteht die finale, von der Parabelform abweichende Sollkontur des Spiegels, die dann die Vorgabe für den Spiegelhersteller ist.

Zusätzlich erschwert wird der Prozess dadurch, dass die Oberfläche eines realen, auf einer Tragstruktur montierten Spiegels nicht exakt dieser Sollkontur folgt. Um hierdurch bedingte Einflüsse auf die Strahlung auf dem Receiver zu erfassen, sind die Imperfektionen des Konzentrators möglichst genau zu ermitteln und in die Simulation mit einzubeziehen. Deshalb wird die Geometrie der Spiegeloberfläche von FEM-Strukturberechnungsprogrammen und Messung für die Optiks simulation verwendet (Abb. 11).

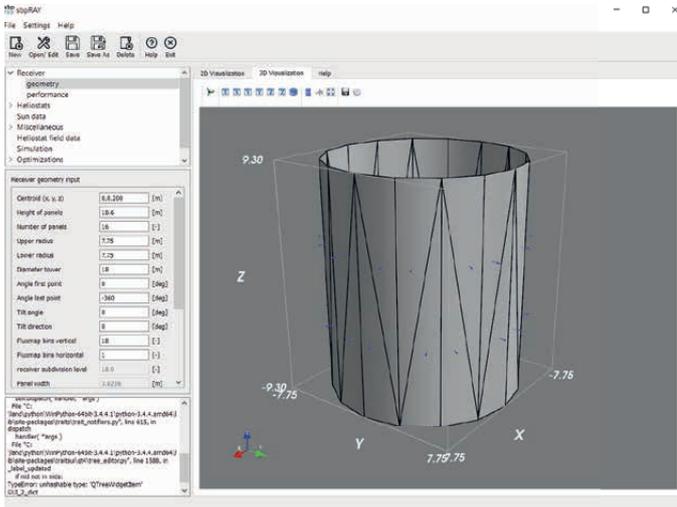
The process is further made difficult by the fact that the surface of a real mirror mounted on a supporting structure does not exactly match the target contour. To determine their influence on the radiation at the receiver, the imperfections of the concentrator need to be considered as accurately as possible and integrated into the simulation. In this context, the geometry of the mirror surface found using structural analysis software (FEA) is integrated into the optical simulation (**Fig. 11**).

Essential factors of this calculation are deformations of the structure and the mirrors that result from the dead weight and the wind forces. Both depend on the orientation of the concentrator, whereas the latter also depends on wind direction and speed. For this reason, a number of load cases are usually examined. Together with the results of the static analysis, corresponding results are used for the optimisation of the structure with the objective of maximum optical quality and efficiency, as well as minimal costs and material usage. Only through a comprehensive analysis of the overall system is it possible to come close to these goals (**chapter 7**).

*Wesentlicher Faktor dieser Berechnung sind die Verformungen der Struktur und der Spiegel durch Eigengewicht und Windkräfte. Beide hängen von der Ausrichtung des Konzentrators ab, die Verformung durch Wind auch von Windrichtung und -geschwindigkeit. Es wird meist eine Reihe von Lastfällen untersucht. Die Resultate gehen zusammen mit den Ergebnissen der statischen Berechnung in die Optimierung der Struktur ein. Das Ziel ist das techno-ökonomische Maximum als Kompromiss aus hoher optischer Qualität und Leistungsfähigkeit bei geringem Materialeinsatz bzw. minimalen Kosten. Nur durch eine umfassende Analyse des Gesamtsystems ist es möglich, diesem Ziel nahezukommen (**Kap. 7**).*



11 Flux distribution of a dish concentrator on a measurement target. *Flussdichte eines Dish-Konzentrators auf einer Messfläche mit ringförmiger Verteilung und zusätzlicher Imperfektion*

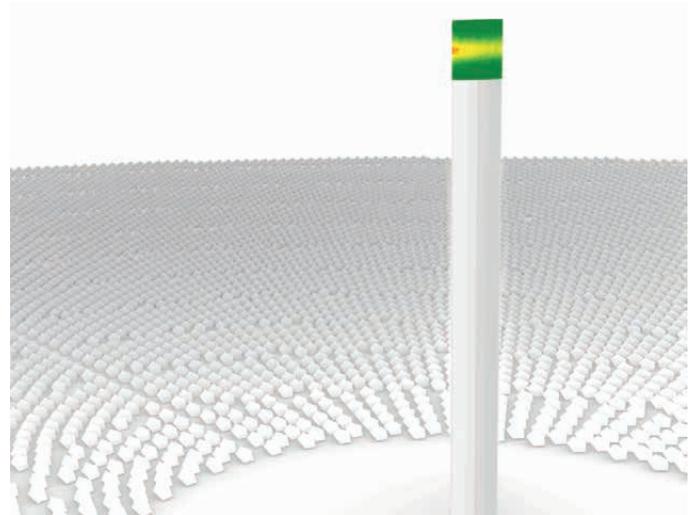


12

12 + 13 sbpRAY graphical user interface enables interactive 3D visualisation of the simulated optical system
Die grafische Benutzeroberfläche sbpRAY ermöglicht eine interaktive 3D-Visualisierung des simulierten optischen Systems

sbpRAY Our optical simulation software called sbpRAY is used for simulation of optical systems with raytracing. Raytracing numerically approximates the flux density distribution by tracing many rays through a virtual geometry with defined optical surface properties. The high number of calculations required are computationally expensive, however, sbpRAY enables fast computation times by parallelising these calculations on a Graphical Processing Unit (GPU).

Beyond the raytracing core, multiple configurable software packages enable engineers to adapt and use the features in custom applications to solve relevant problems.



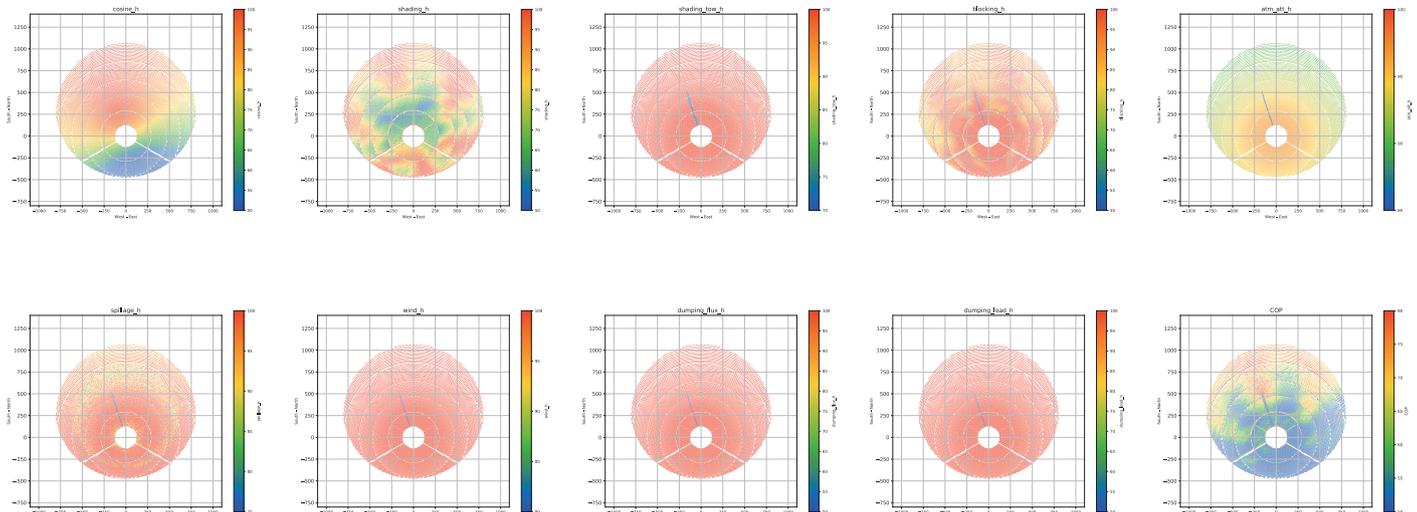
13

sbpRAY Für die Simulation des optischen Systems mit Strahlverfolgung kommt eine optische Simulationssoftware namens sbpRAY zum Einsatz.

Mithilfe der numerischen Strahlverfolgung wird die Flussdichteverteilung geschätzt, indem viele Strahlen durch eine virtuelle Geometrie mit bestimmten optischen Oberflächeneigenschaften nachverfolgt werden.

Die große Anzahl der dazu erforderlichen Berechnungen ist sehr rechenintensiv. Die Software sbpRAY ermöglicht jedoch kurze Rechenzeiten, indem sie diese Berechnungen parallel über einen Grafikprozessor (GPU) durchführt.

Neben dem Strahlverfolgungskern können die Ingenieure mithilfe von zahlreichen konfigurierbaren Software-Paketen die Funktionen von maßgeschneiderten Anwendungen anpassen und verwenden, um auftretende Probleme zu lösen.



14

Heliostat field layout optimisation

Heliostat fields typically contain several thousand heliostats distributed over a large areas of up to 5 km² for a single tower.

The optical performance of each heliostat in this vast array is important to ensure a maximised efficiency and productive operation. The optical efficiency of a single heliostat does not only depend on its location relative to the tower and the sun but also relative to the neighbouring heliostats which could shade incident light or block reflected light. The further a heliostat is away from the tower, the more it suffers from attenuation losses and low intercept efficiencies.

The wind, e.g. based on a typical meteorological year, changes the slope and tracking quality which affect the flux distribution and the intercept.

Heliostat field layout optimisation determines the optimum spacing between heliostats in all areas of the field to best compromise between these losses.

The complexity of this optimisation problem intensifies as numerous other factors are introduced. The optical performance and the receiver limitations vary with time. Fields typically have topographic features and towers cast shadows which must be accounted for. Additional factors such as boundaries, access roads for washing, heliostat cabling, and avoiding heliostat collisions are also considered.

Optimierung der Planung des Heliostatenfelds

Das Heliostatenfeld enthält für gewöhnlich mehrere 1000 Heliostaten, die über große Flächen von bis zu 5 km² für einen einzigen Turm verteilt sind.

Die optische Leistung jedes einzelnen Heliostats innerhalb dieser großen Anordnung ist wichtig, um maximale Effizienz und einen produktiven Betrieb sicherzustellen.

Dabei hängt die optische Leistungsfähigkeit eines einzelnen Heliostats nicht allein von der Position zum Turm und zur Sonne ab, sondern auch von den benachbarten Heliostaten, die einfallendes Licht verschatten oder reflektiertes Licht blockieren können. Je weiter ein Heliostat vom Turm entfernt steht, desto mehr Verluste durch Absorption treten auf, was zu geringeren Intercept-Faktoren führt.

Der Wind ändert beispielsweise im Laufe eines meteorologisch typischen Jahres die Neigungs- und Nachführfehler.

Die optimierte Planung des Heliostatenfelds legt den richtigen Abstand zwischen den Heliostaten in allen Bereichen des Feldes fest, um den besten Kompromiss aus diesen Verlusten zu erzielen.

Die Komplexität dieses Optimierungsproblems nimmt zu, je mehr weitere Faktoren dazukommen.

Die optische Leistung und die Grenzen des Strahlungsempfängers (engl. Receiver) variieren von Tag zu Tag. Die Felder weisen gewöhnlich eigene topografische Merkmale auf, und die Türme werfen Schatten, die berücksichtigt werden müssen. Daneben müssen zusätzliche Faktoren wie Grundstücksgrenzen, Zufahrten für Reinigung oder Verkabelung der Heliostaten berücksichtigt und Kollisionen von Heliostaten vermieden werden.

14 The various factors which affect optical efficiency are analysed and used to further enhance the system's performance

Die verschiedenen Faktoren, die die optische Effizienz beeinflussen, werden analysiert und genutzt, um die Leistung des Systems weiter zu verbessern

4 The software utilises an aim-point strategy which ensures that the irradiative flux distribution on the receiver surface is distributed according to both temporal and spacial limitations

Die Software verwendet eine Zielpunktstrategie, die sicherstellt, dass die Verteilung des Strahlungsflusses auf der Empfängeroberfläche sowohl zeitlich als auch räumlich begrenzt ist

Aim Point Strategy Central receivers have additional complexities which must be accounted for. Like dish systems, central receivers have flux density requirements which vary with time and between the receiver panels. Typically, these panels require near uniform incident radiation pose, however spreading the heliostat images to achieve uniformity results in a reduction of intercept efficiency. Furthermore, both the heliostat images change with meteorological conditions and the receiver requirements change with its operational state. For this reason, an aim point strategy software is used to determine an optimal compromise between the receiver operational efficiency and that of the heliostat field.

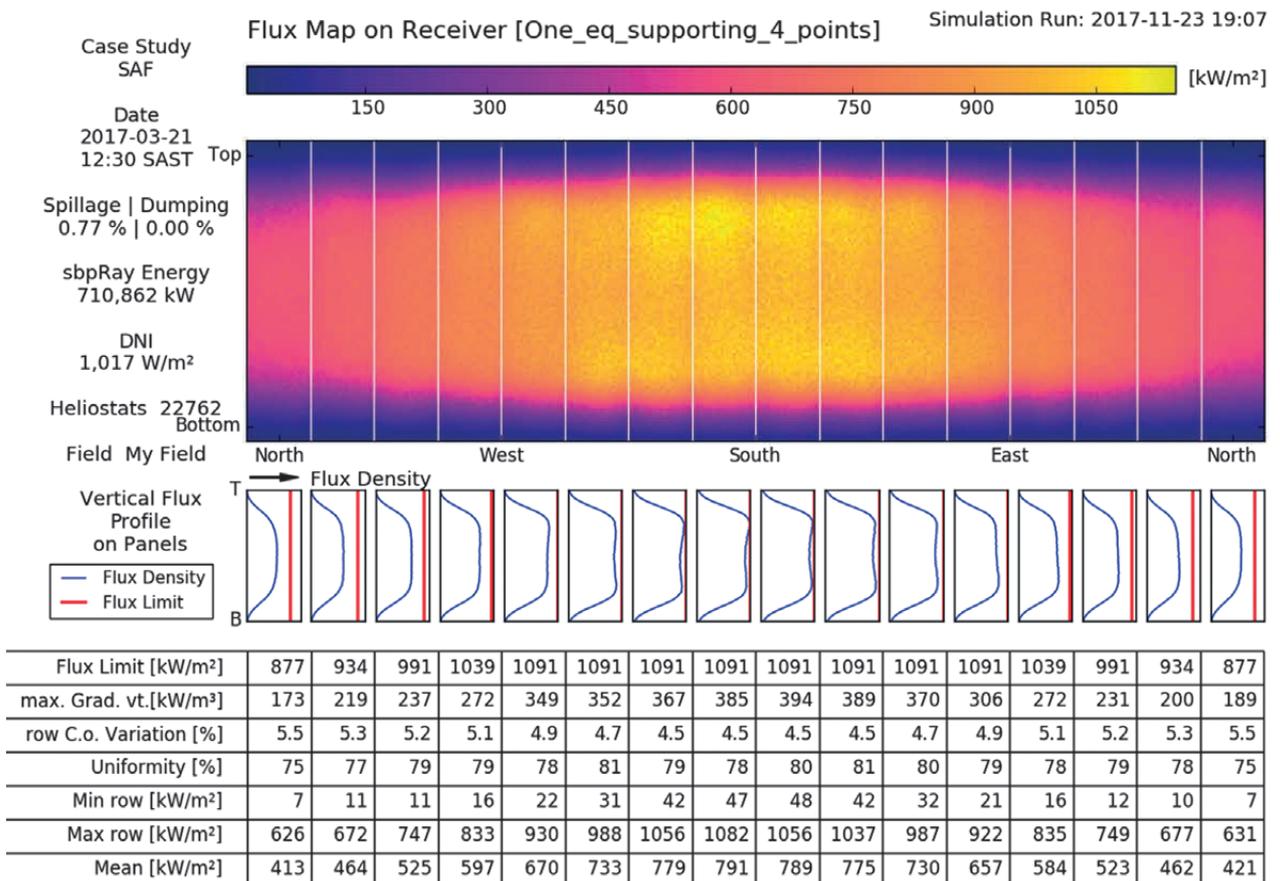
Zielpunktstrategie Turm-Solkraftwerke weisen zusätzliche Komplexitäten auf, die ebenfalls einkalkuliert werden müssen.

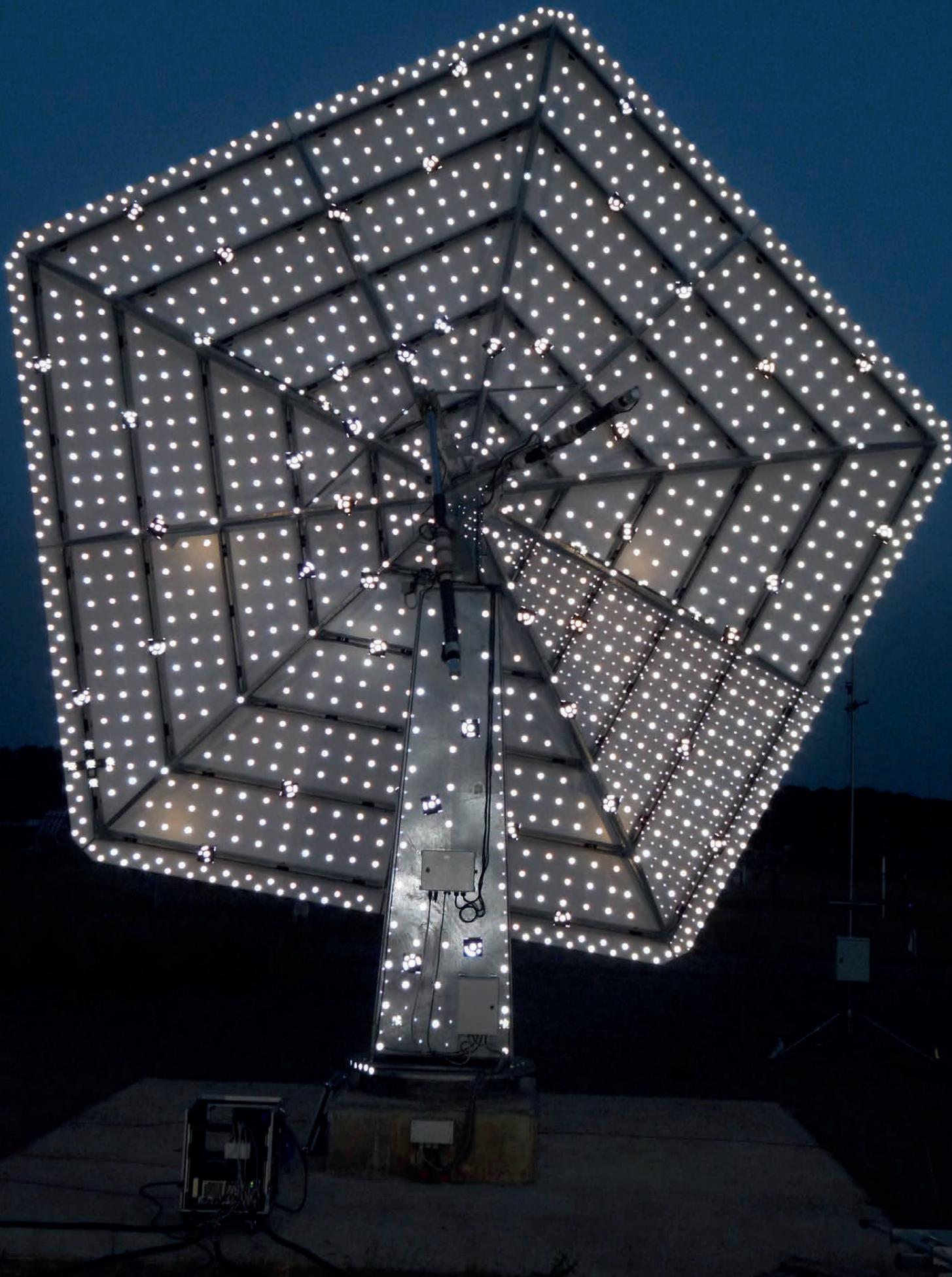
Wie Dish-Systeme haben Turm-Solkraftwerke Anforderungen an die Flussdichte, die sich mit der Zeit ändern und je nach Receiver-Fläche abweichen.

Bei diesen Flächen ist es gewöhnlich notwendig, dass die Strahlung gleichmäßig auftrifft. Die Verteilung der von den Heliostaten reflektierten Strahlung, um diese Gleichmäßigkeit zu erzielen, führt jedoch zu einem niedrigeren Intercept-Faktor.

Weiterhin ändern sich einerseits die von den Heliostaten reflektierte Strahlung mit den meteorologischen Bedingungen und andererseits die Anforderungen des Receivers mit dessen Betriebszustand.

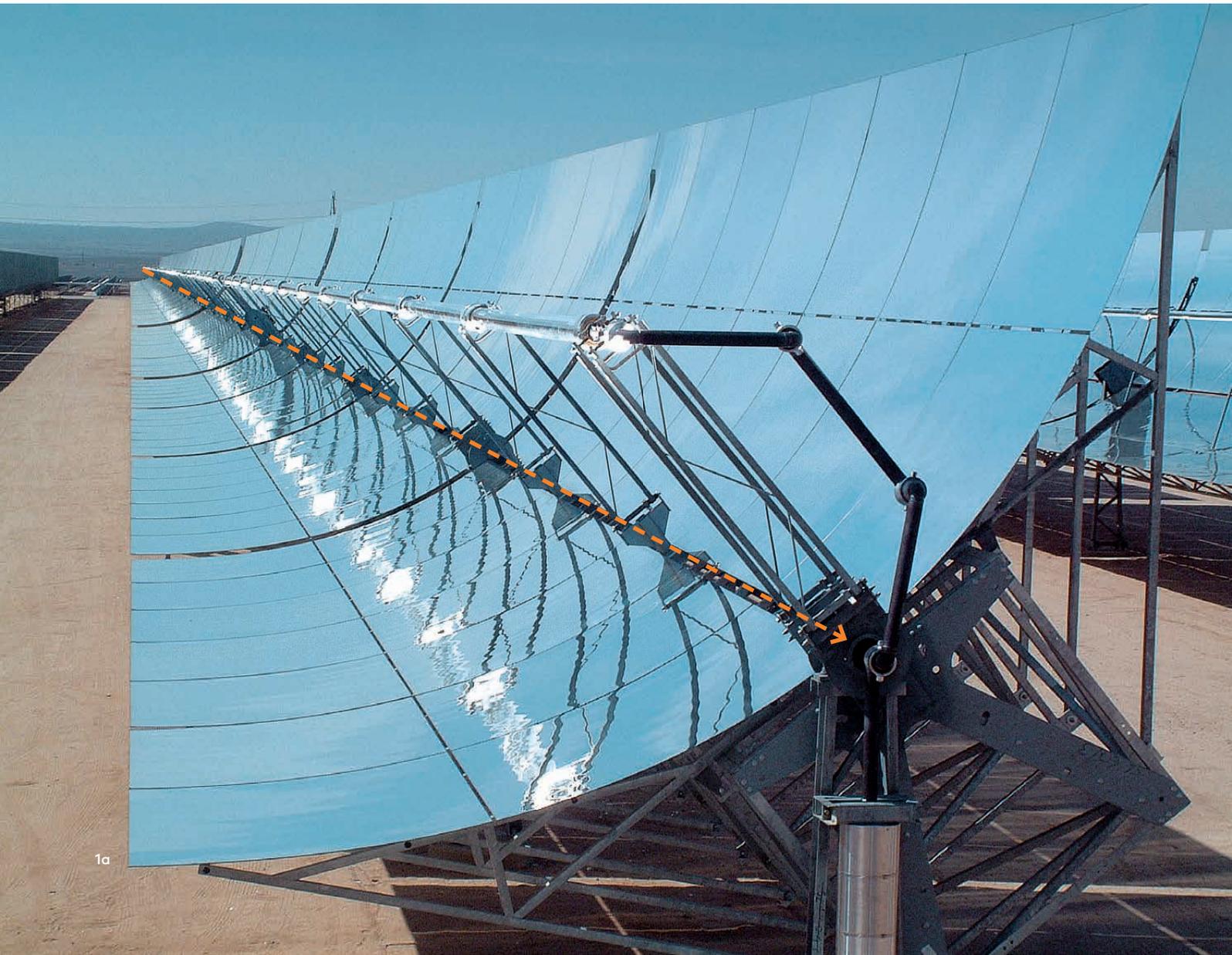
Aus diesem Grund kommt eine Zielpunktstrategie-Software zum Einsatz, um einen optimalen Kompromiss zwischen betrieblicher Leistungsfähigkeit und der Effizienz des Heliostatenfeldes zu erzielen.

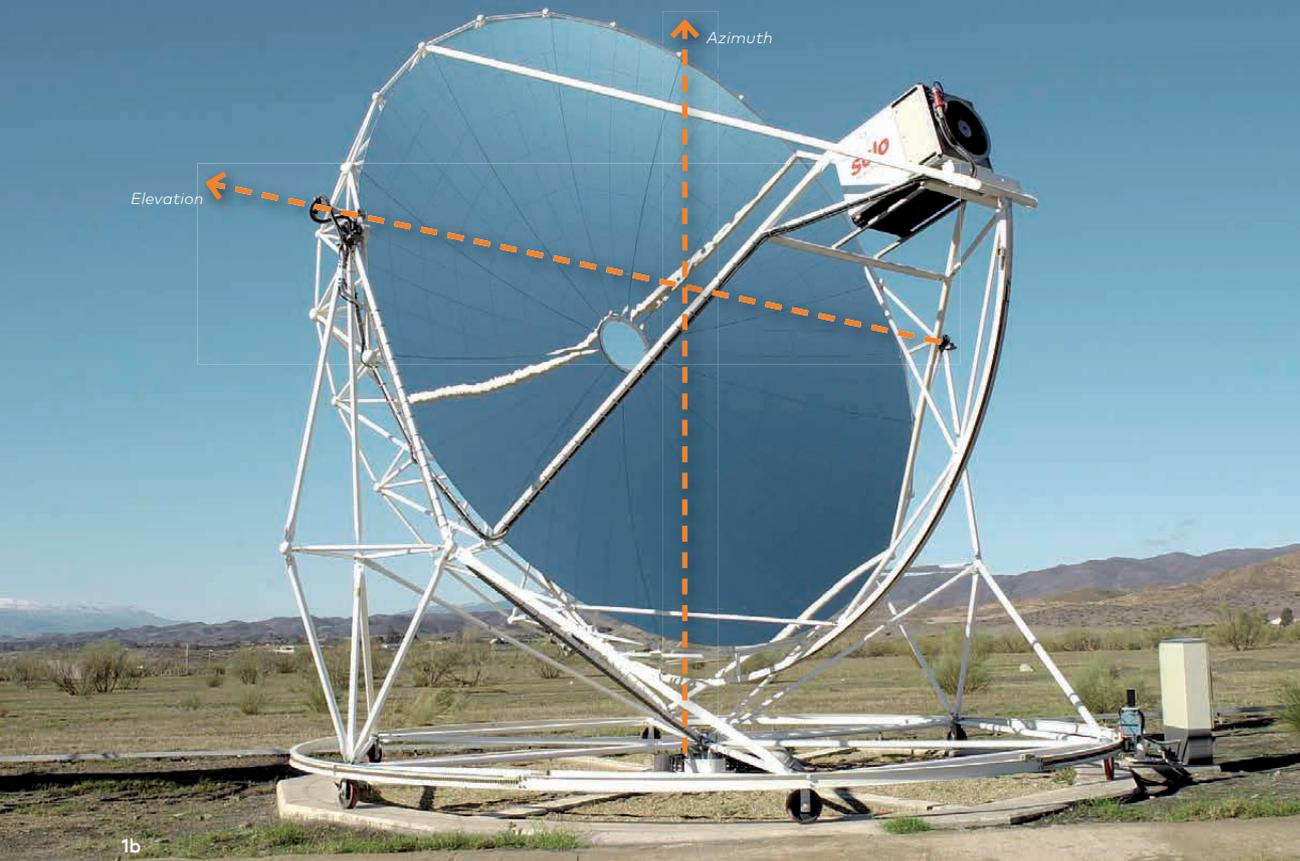




6 Drive Mechanisms

Antriebe





1b

All solar concentrators have to be equipped with drive elements in order to follow the daily and seasonal course of the sun. In most systems, entire mirrors or individual reflectors are rotated in a way that the sunrays reflected and concentrated by them directly hit the heat-exchanging device (receiver).

In case of the parabolic trough collectors and generally in line-focus systems, sun tracking is achieved through rotation about a horizontal axis (**Fig. 1a**). Dish concentrators and heliostats of central receiver systems, i.e. point focussing systems, require a two-axis tracking system (**Fig. 1b**). In most cases, this is the vertical or azimuth axis and the horizontal or elevation axis; however, there are also other axis configurations such as polar mounting, where one axis runs parallel to the axis of the earth (tracking over the course of the day) and the other one runs perpendicular to the first one (seasonal tracking).

The most important starting point for the development of suitable kinematics is the (apparent) course of the sun. The depiction of this course in a diagram (**Fig. 2**) leads to different daily courses depending on the degree of latitude where the facility is set up. On this basis, the necessary rotation angles and angular velocities are calculated for the selected drive axis.

Due to the very different requirements of the individual projects—with surfaces ranging from 10 m² to over 1,600 m² to be moved around the selected rotating axes—we have developed an entire series of drive solutions.

Alle Solarkonzentratoren müssen mit beweglichen Elementen ausgestattet werden, um dem täglichen und jahreszeitlichen Verlauf der Sonne folgen zu können. Bei den meisten Systemen werden hierzu komplette Spiegel oder einzelne Reflektoren so gedreht, dass die von ihnen reflektierten und konzentrierten Sonnenstrahlen stets direkt auf den Wärme-tauscher (Receiver) treffen.

*Im Falle der Parabolrinnenkollektoren, und allgemein bei linienfokussierenden Systemen, erfolgt diese Nachführung in der Regel durch die Drehung um eine horizontale Achse (**Abb. 1a**). Bei Dish-Konzentratoren und den Heliostaten von Turm-Solkraftwerken, also bei punktfokussierenden Systemen, ist eine zwei-achsige Nachführung erforderlich (**Abb. 1b**). In den meisten Fällen sind dies die vertikale (Azimut-)Achse und die horizontale (Elevations-)Achse. Es gibt jedoch auch andere Achsenanordnungen, eine davon ist die polare Montierung, bei der eine Achse parallel zur Erdachse liegt (Bewegung im Tagesverlauf), die andere senkrecht dazu (jahreszeitliche Nachführung).*

*Wichtigste Ausgangsgröße für die Entwicklung einer geeigneten Kinematik ist der Verlauf der Sonne. Aufgetragen in einem Diagramm (**Abb. 2**) ergeben sich je nach Breitengrad, auf dem die Anlage aufgestellt wird, unterschiedliche Bilder. Daraus werden die erforderlichen Drehwinkel und Winkelgeschwindigkeiten für die gewählten Antriebsachsen ermittelt.*

Aufgrund der sehr unterschiedlichen Anforderungen in den einzelnen Projekten – es müssen Flächen von 10 m² bis über 1600 m² um die jeweils gewählten Drehachsen bewegt werden – haben wir eine Reihe von Lösungen für die Antriebstechnik entwickelt.

1a Uniaxial rotation of solar concentrators
Einachsige Drehung von Solarkonzentratoren

1b Biaxial rotation of solar concentrators
Zweiachsige Drehung von Solarkonzentratoren

Drive concepts and requirements

In tracking mode, that is, when following the course of the sun, the concentrators are rotated very slowly. In this context, a high level of accuracy is required to ensure that the concentrated solar radiation stays directed at the receiver with sufficient precision to minimise the losses that result from tracking deficiencies. Typically, tracking deviations of up to 0.1° are permissible for solar thermal concentrators. This is a significantly stricter requirement than those posed for usual trackers of photovoltaic plants; however, high concentration photovoltaic systems are subject to similarly strict requirements.

For quick positioning in case of a wind alarm or malfunction, as well as at the beginning and end of operation, the drives are equipped with a fast gear. This serves to bring the concentrator in the desired position within only a few minutes at more than 100 times the regular tracking speed. In addition, at least one axis

Antriebskonzepte und Anforderungen

Im Nachführbetrieb, also der Sonne folgend, werden die Konzentratoren sehr langsam gedreht. Dabei ist eine hohe Genauigkeit gefordert, um die konzentrierte Solarstrahlung im Tagesverlauf hinreichend genau auf dem Receiver zu halten und aus Nachführfehlern resultierende Verluste zu minimieren. Typischerweise werden für solarthermische Konzentratoren Abweichungen von nicht mehr als $0,1^\circ$ zugelassen. Dies sind deutlich schärfere Anforderungen als bei Photovoltaikanlagen üblich. An hochkonzentrierende Photovoltaiksysteme werden wiederum vergleichbar hohe Anforderungen gestellt.

Für schnelles Positionieren bei Windalarm und Betriebsstörungen sowie bei Betriebsbeginn und -ende werden die Antriebe mit einem Schnellgang ausgestattet. Damit wird der Konzentrator innerhalb von wenigen Minuten (hundertmal schneller) in die gewünschte Stellung gebracht. Zudem sollte immer mindestens ein Achsantrieb seine Energie aus einer Notstromversorgung, einer Batterie oder einem hydraulischen Energiespeicher beziehen können, damit

2 Course of the sun

Verlauf der Sonnenbahn

3 Stellio wind tunnel model

Stellio Windkanal Modell

4 Electric linear actuator

for a heliostat

Elektrischer Linearantrieb

an einem Heliostaten

5 Valve block of a hydraulic drive

drive

Ventilblock eines hydraulischen

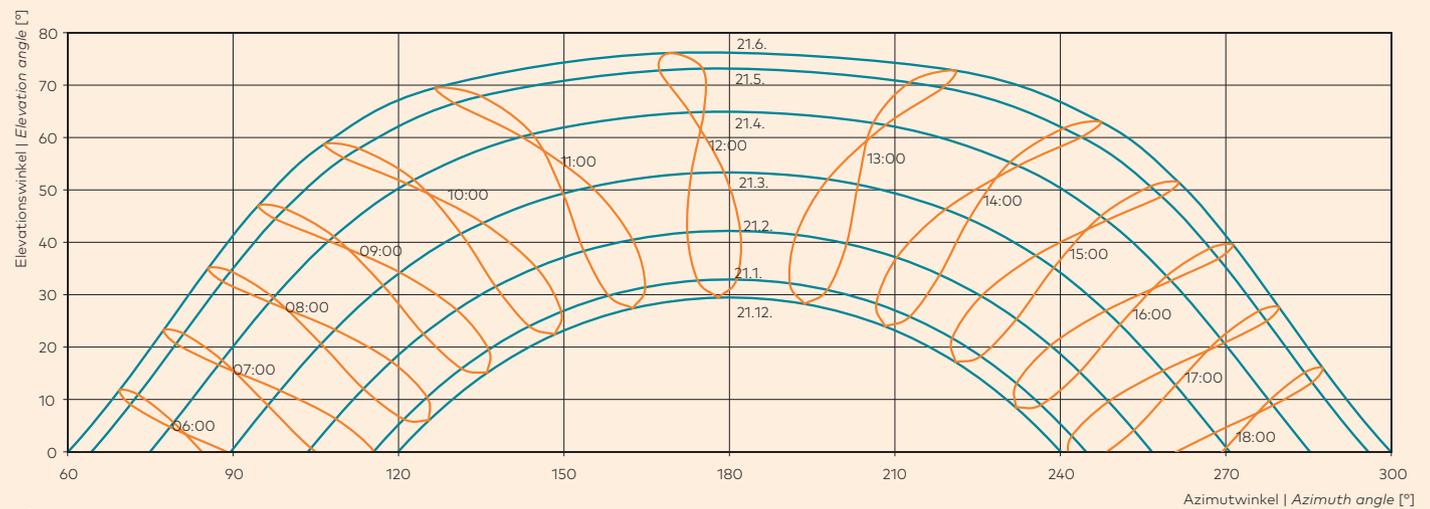
Antriebs

6 Wheel/track of the driving

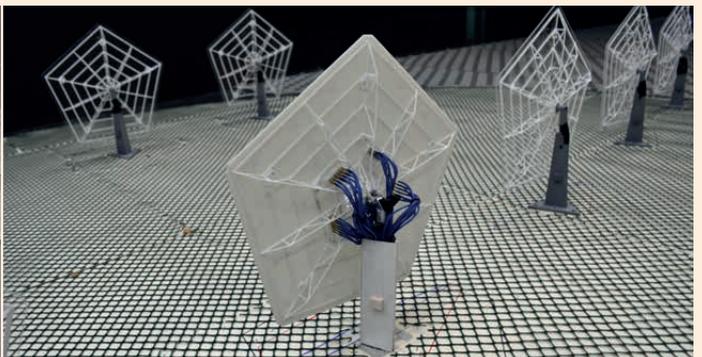
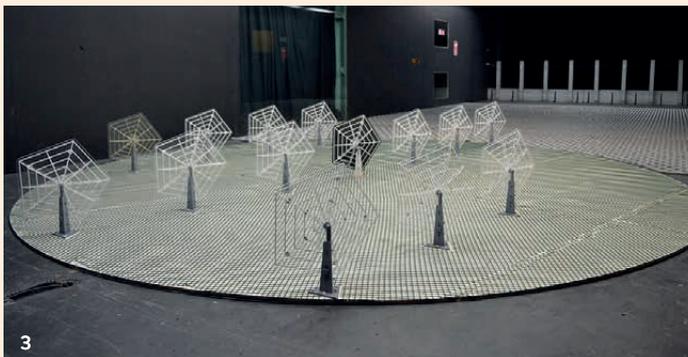
unit of a large solar concentrator

Rad/Schiene-Fahreinheit eines

großen Solarkonzentrators



2



3

drive should draw its energy from an emergency supply system, a battery or a hydraulic energy storage facility, such that the plant can always be put out of operation safely and a wind-safe position can be reached.

As loads for the drive of the concentrators, mainly wind forces are considered as well as loads resulting from the construction's dead weight in case of an unbalanced system. Where the admissible operational wind speed is exceeded, a wind alarm is triggered and the concentrator is moved into a favourable position, in which even the highest wind loads can be resisted. In many cases, wind tunnel tests (Fig. 3) are performed to identify the loads with a high level of precision and reduce them through intelligent modifications of the design in order to achieve high economic efficiency in terms of dimensioning of the drives and the structure.

die Anlage stets sicher außer Betrieb genommen und eine windsichere Stellung angefahren werden kann.

Als Lasten für den Antrieb der Konzentratoren sind vor allem Windkräfte anzunehmen, bei nicht ausbalancierter Lagerung auch Belastungen aus dem Eigengewicht der Konstruktion. Beim Überschreiten der zulässigen Betriebs-Windgeschwindigkeit wird ein Windalarm ausgelöst und der Konzentrator in eine günstige Stellung gefahren, in der auch höchste Windlasten überstanden werden können. In vielen Fällen werden Windkanalversuche (Abb. 3) durchgeführt, um die Belastungen mit hoher Genauigkeit zu ermitteln und durch intelligente Modifikationen am System zu reduzieren, damit eine hohe Wirtschaftlichkeit bei der Dimensionierung der Antriebe und der Struktur erzielt werden kann.

Die sehr unterschiedlichen Drehzahlen, die hohe erforderliche Genauigkeit, der ungeschützte Betrieb im Freien, die minimierte Wartung sowie die Lebensdauer von 20 Jahren oder mehr stellen besondere und in dieser Kombination ungewöhnliche Anforderungen an die Antriebstechnik.



4



5



6

The very different rotational speeds, the necessary high precision, unprotected operation in the open air, minimised maintenance and a useful life of 20 years or more impose special requirements on the drive technology, requirements that are unusual in this particular combination. For this purpose, we are able to make use of experience from numerous projects, though new, adjusted and economically attractive solutions continuously need to be found.

The drives for solar concentrators are often electric: rotation of the electric motors is reduced by means of multi-stage gear units in order to move the concentrator either directly or via for instance chain or gear wheel drives. Depending on the requirements, either continuous tracking is realised by means of speed-controllable motors, or small steps are performed. In the latter case, the focal point always migrates slightly out of the required position during the break between two steps.

Unless the necessary rotation angles are too large, electromechanical drives (so-called lift cylinders or screw jacks) are also used to create a rotational motion by means of levers (**Fig. 4**). Until now, such drives have only been possible to use in one axis (elevation) due to the limitation to the angle of rotation in heliostats. The slope drive developed by sbp, however, can be used in both axes thanks to optimised kinematics and the resulting reduced angle of rotation.

Especially in the event of high loads, such linear drives are designed as hydraulic lift cylinders. In addition to cost advantages, hydraulic drives also offer a number of specific functions such as simple synchronisation of several drives, power limitation in the event of overloads and storage-supported emergency operation (**Fig. 5**).

In most solar concentrators, additional drive components are used such as sliding and roller bearings. Large rotating structures are equipped with wheels that run on concrete surfaces or steel rails (**Fig. 6**).

Wir können hierfür auf Erfahrungen aus zahlreichen Projekten zurückgreifen, aber dennoch müssen stets neue, angepasste und wirtschaftliche Lösungen gefunden werden.

Die Antriebe für Solarkonzentratoren werden oft elektrisch ausgeführt. Die Drehung von Elektromotoren wird über mehrstufige Getriebe untersetzt, um dann den Konzentrador direkt über spezielle Drehantriebe, oder über Ketten- oder Zahnräder in Bewegung zu setzen. Je nach Anforderung erfolgt mittels drehzahlregelbarer Motoren eine kontinuierliche oder schrittweise Nachführung. Bei der schrittweisen Nachführung wandert der Brennpunkt in der Pause zwischen zwei Schritten geringfügig aus der Sollposition.

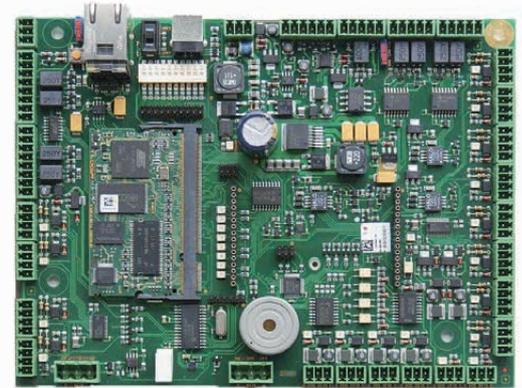
*Wenn die erforderlichen Drehwinkel nicht zu groß sind, werden auch elektromechanische Linearantriebe (sog. Hubzylinder oder Spindelhubantriebe) verwendet, um mit Hilfe von Hebeln eine Drehbewegung zu bewirken (**Abb. 4**). Solche Antriebe konnten bislang wegen der Drehwinkelbegrenzung bei Heliostaten nur in einer Achse (Elevation) eingesetzt werden. Der von sbp entwickelte Slope Drive ermöglicht jedoch durch eine optimierte Kinematik und dadurch reduzierte Drehwinkel die Verwendung in beiden Achsen.*

*Insbesondere bei hohen Kräften werden solche Linearantriebe als hydraulische Hubzylinder ausgebildet. Neben Kostenvorteilen bieten hydraulische Antriebe auch einige spezielle Funktionen, wie die einfache Synchronisation mehrerer Antriebe, Kraftbegrenzung bei Überlast oder auch den speichergetriebenen Notfahrbetrieb (**Abb. 5**).*

*Bei den meisten Solarkonzentratoren werden weitere antriebstechnische Bauteile eingesetzt, wie Gleit- und Wälzlager. Große, drehbare Strukturen werden mit Rädern ausgestattet, die auf Betonoberflächen oder Stahlschienen laufen (**Abb. 6**).*



7



8

Control technology For exact tracking, various safety-related and additional functions, all concentrators are equipped with an electronic control unit. This unit controls and monitors the motors and sensors. The controllers of these decentralised systems are able to work autonomously. Depending on the type of plant, the entire operating control process might be based on this control system.

In most cases, the position of the sun is calculated based on the geographic location and time of day. At the same time, wind speed and various other signals are monitored and functions are made available for special operating modes and manual operation.

Most controllers are designed as specially developed microcontroller boards (Fig. 8). This customised type of controller is far superior to industry-standard solutions (programmable logic controllers, PLCs) due to their efficiency and cost.

In most cases, remote supervision and intervention in the control process are possible via internet.

The field control in central receiver systems must also ensure that the distribution of the solar radiation intensity on the heliostats corresponds to the requirements. This does not mean all heliostats pointing directly at the centre of the receiver; instead suitable points are calculated for each heliostat which provides optimum solar radiation intensity at all times (APS/Aim Point Strategy).

Steuerungstechnik Für die exakte Nachführung und verschiedene Zusatz- und Sicherheitsfunktionen sind alle Konzentratoren mit einer elektronischen Steuerungseinheit ausgestattet. Sie regelt und überwacht die Motoren und Sensoren. Die Steuerungen sind dezentral ausgeführt und können autonom arbeiten. Je nach Art der Anlage kann die gesamte Betriebsführung in dieser Steuerung erfolgen. Meist wird die Sonnenposition anhand von bekannter geografischer Lage und Uhrzeit berechnet, Windgeschwindigkeit und weitere Signale werden überwacht und Funktionen für spezielle Betriebszustände und manuellen Betrieb zur Verfügung gestellt.

Die Steuerungen werden meist als speziell entwickelte Mikrocontroller ausgeführt (Abb. 8). Solche auf die Anwendung zugeschnittene Steuerungen sind den in der Industrie vielfach verwendeten Standardlösungen (speicherprogrammierbare Steuerungen, SPS) bezüglich Effizienz und Kosten überlegen.

In den meisten Fällen ist eine Fernüberwachung mit der Möglichkeit des Eingriffs in die Steuerung per Internet möglich.

Die Feldsteuerung von Turm-Solarkraftwerken muss auch dafür sorgen dass die Verteilung der Strahlungsleistung aller Heliostaten auf dem Receiver den Anforderungen entspricht. Das ist nicht zu erreichen, wenn alle Heliostaten auf die Receiver-Mitte zielen, daher werden geeignete Zielpunkte für jeden Heliostaten bestimmt und damit die Verteilung der Strahlungsleistung zu jedem Zeitpunkt maßgeschneidert (APS/Aim Point Strategy).

7 Heliostat local controller
Lokale Steuerungseinheit
eines Heliostats

8 Microcontroller for
the drive control system
Mikrocontroller für die
Antriebssteuerung

In heliostats of central receiver solar power stations, the control system also has an additional essential role to fulfil: due to the extreme tracking accuracy required, the heliostats must all be calibrated individually in order to compensate for minor construction and focus deviations. To do this, each heliostat is faced towards a white surface underneath the receiver and the focal point is recorded by cameras. Any deviation from the target position can then be measured and corrected.

In order for the corrections to be completely accurate, recordings must be made for each heliostat across different days and seasons, meaning that the calibration phase can last many months. This has led to the development of further approaches such as drone recordings in which the image of a flying target is reflected on the heliostat. By analysing the images recorded, the precise locations of the camera and the target can be used to fine-tune the tracking on the heliostat.

In larger plants such as parabolic trough and central receiver power stations, some of the functions are performed by the central field control which communicates with the individual local control units via cables or wirelessly. In addition, such plants provide comprehensive options for visualisation and supervision, so operating personnel have access to all important functions at any time and are able to intervene in the operation of the plant whenever required.

Bei den Heliostaten von Turm-Solarkraftwerken hat die Steuerung eine weitere wichtige Aufgabe zu erfüllen: Wegen der enorm hohen geforderten Nachführgenauigkeit müssen die Heliostaten individuell kalibriert werden, um kleine bauliche sowie Ausrichtungsabweichungen zu kompensieren. Hierzu wird jeder Heliostat wiederholt auf eine weiße Fläche unterhalb des Receivers ausgerichtet und der Brennfleck von Kameras aufgenommen. Aus der Positionsabweichung vom theoretischen Wert können dann notwendige Korrekturen ermittelt werden.

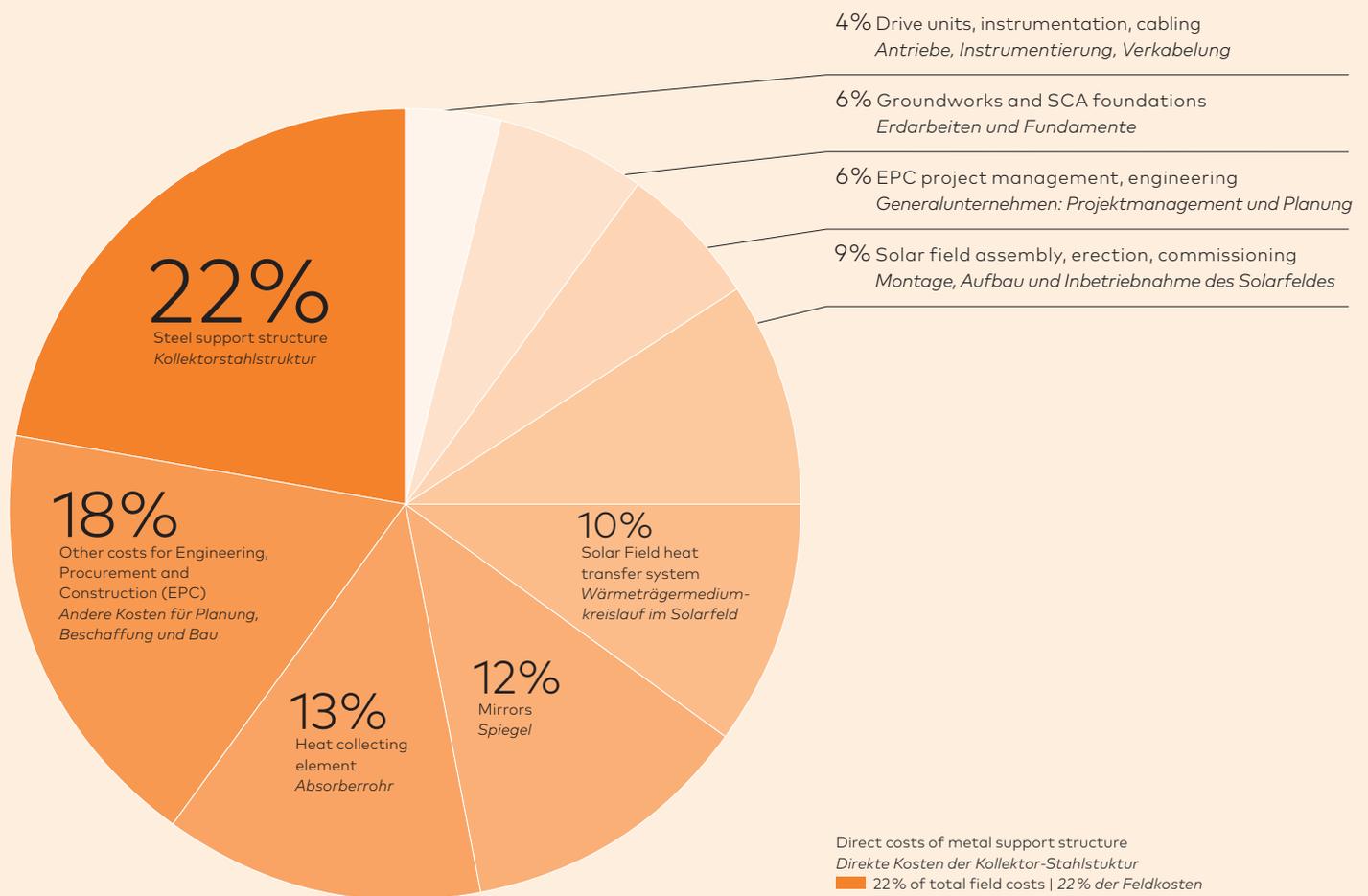
Für eine vollständige Korrektur müssen von jedem Heliostaten Aufnahmen zu vielen verschiedenen Tages- und Jahreszeiten ausgewertet werden, wodurch sich die Kalibrierphase über viele Monate erstreckt. Daher werden andere Verfahren entwickelt, wobei z.B. drohnengestützt Aufnahmen erstellt werden, bei denen das Bild eines ebenfalls fliegenden Ziels im Spiegel des Heliostaten zu sehen ist. Bei der Bildauswertung können anhand präzise bestimmter Positionen von Kamera und Ziel Korrekturen für die Nachführung errechnet werden.

Bei größeren Anlagen, wie den Parabolrinnen- und Turm-Solarkraftwerken, wird ein Teil der Funktionen von der zentralen Feldsteuerung übernommen, die kabelgebunden oder drahtlos mit den einzelnen lokalen Steuerungseinheiten kommuniziert. Solche Anlagen sind zudem mit umfangreichen Möglichkeiten zur Visualisierung und Überwachung ausgestattet, sodass das Betriebspersonal jederzeit Einblick in alle wichtigen Funktionen hat und bei Bedarf in den Anlagenbetrieb eingreifen kann.



7 Techno-economic Analysis and Optimisation

Techno-ökonomische Analyse und Optimierung



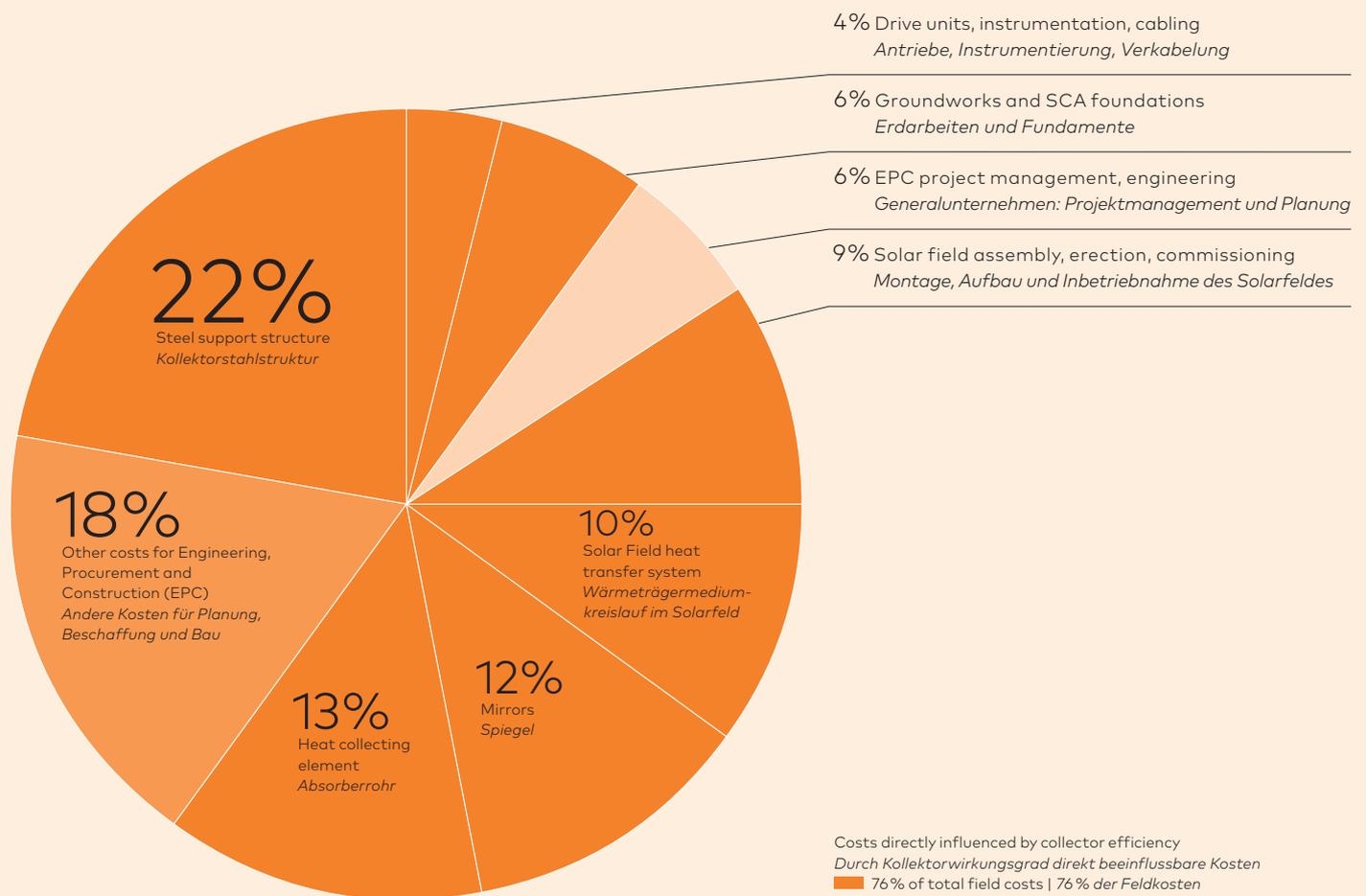
Perhaps as a result of their differing training, whereas engineers traditionally try to increase the efficiency of a system such as the amount of generated electricity of a solar power station, economists aim to reduce costs (Fig. 1). The actual objective, however, must be to minimise the cost per kilowatt-hour of the provided electric energy.

Although this sounds trivial at first, it is actually not: it can be thoroughly reasonable to accept higher investment costs if, in return, the performance rises significantly or operating expenses decrease. It is important to look at the overall picture: to develop an optimal product, technology and costs always have to be taken into consideration together. For us, the implementation of a techno-economic analysis therefore represents an important component of any successful development and improvement of a particular product¹.

Bedingt durch ihre unterschiedliche Ausbildung, versuchen Ingenieure gewöhnlich, den Wirkungsgrad eines Systems zu erhöhen, beispielsweise den Stromertrag eines Solarkraftwerks, während Betriebswirte danach streben, die Kosten zu senken (Abb. 1). Das eigentliche Ziel muss es aber sein, die Kosten pro Kilowattstunde bereitgestellter Energie zu minimieren.

Dies klingt zunächst einmal trivial, ist es aber nicht: So kann es sinnvoll sein, höhere Investitionskosten in Kauf zu nehmen, wenn dafür der Energieertrag deutlich steigt oder die Betriebskosten sinken. Wichtig ist der Blick auf das Ganze. Um ein optimales Produkt zu entwickeln, müssen Technik und Kosten immer gemeinsam betrachtet werden. Das Durchführen der techno-ökonomischen Analyse ist deshalb für uns ein wichtiger Baustein für jede erfolgreiche Produktentwicklung und -verbesserung¹.

1 Cost structure for the solar field of a parabolic trough power station (example)
 Kostenstruktur für das Solarfeld eines 50 MW Parabolrinnenkraftwerks (exemplarisch)



Principle The principle is always the same: A parameter—in the energy sector, this is usually the cost of electricity or heat generation, averaged over the useful life—is to be minimised:

$$\frac{\text{Annuity on Investment Cost} + \text{Annual O\&M Cost}}{\text{Annual Electricity Generation}} = \text{Min}$$

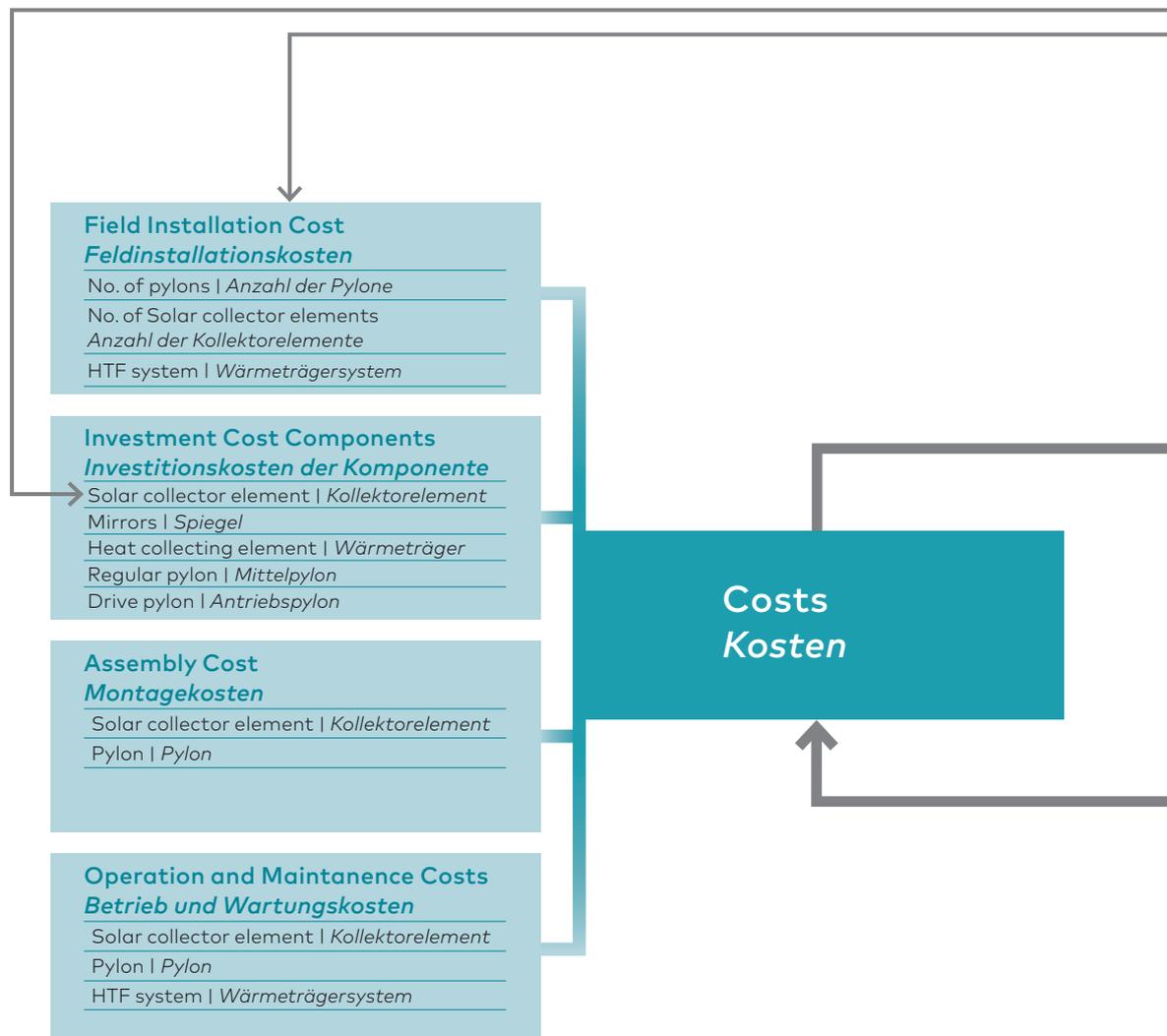
For different variants considered, the corresponding costs and electricity generation are to be calculated. In consideration of the financial parameters, maintenance and operational expenses, the specific costs are then calculated and the most favourable option is selected.

Prinzip Das Prinzip ist immer dasselbe: Eine Kenngröße, im Energiesektor üblicherweise die über die Lebensdauer gemittelten Strom- oder Wärmege-stehungskosten, soll minimiert werden:

$$\frac{\text{Annuität der Investitionskosten} + \text{jährliche Betriebs- und Wartungskosten}}{\text{jährliche Stromerzeugung}} = \text{Min}$$

Um verschiedene in Frage kommende Varianten vergleichen zu können, sind die Kosten und der Energieertrag zu ermitteln. Unter Berücksichtigung der Finanzparameter und der Wartungs- und Betriebskosten werden dann die spezifischen Kosten berechnet und die günstigste Variante ausgewählt.

2 Correlation between the cost and the performance of parabolic trough collectors (schematic)⁴
Zusammenhang zwischen Kosten und Leistung bei Parabolrinnenkollektoren (schematisch)⁴

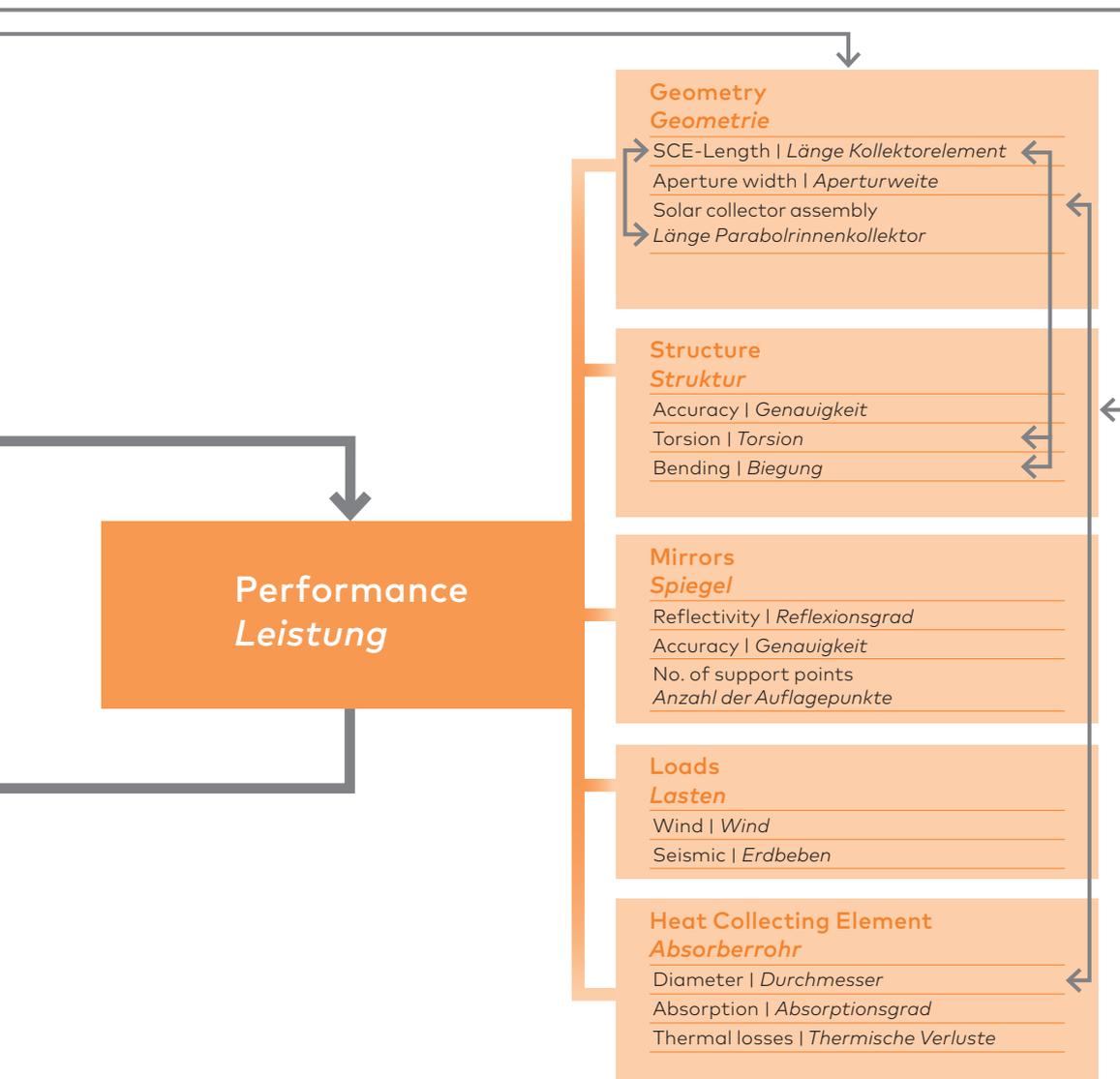


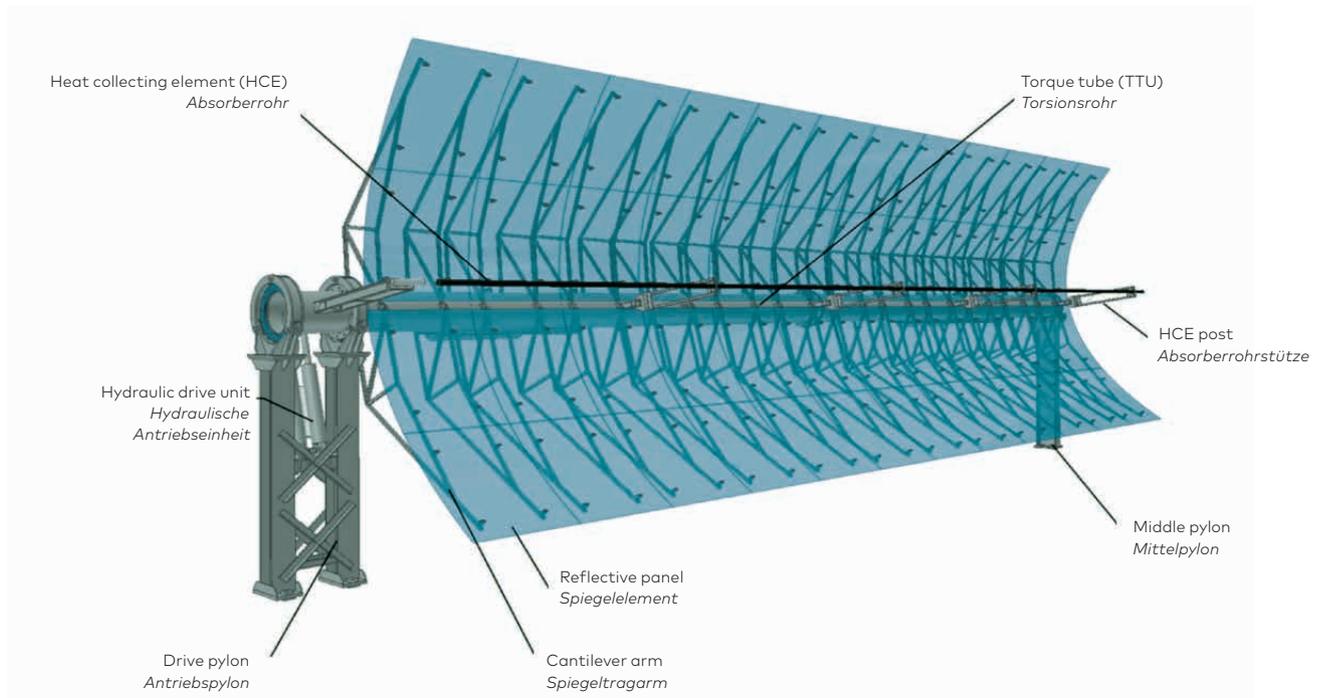
Example The mutual interdependence of technical and economic parameters is shown in Fig. 2 for parabolic trough collectors. On the one hand, requirements, such as precision, flexural and torsional rigidity influence the investment costs. On the other hand, these mechanical properties have a direct impact on the efficiency; here, the task is to find the optimal combination. For this purpose, different designs can be analyzed in technological terms and their costs can be calculated; with these 'nodes', curves can then be found that point towards the optimal solution.

A second possibility is substantially more elegant: whenever sufficiently accurate, it makes sense to prepare mathematical models predicting costs and energy performance, and to merge them into one overall model in order to analytically determine the optimal solution.

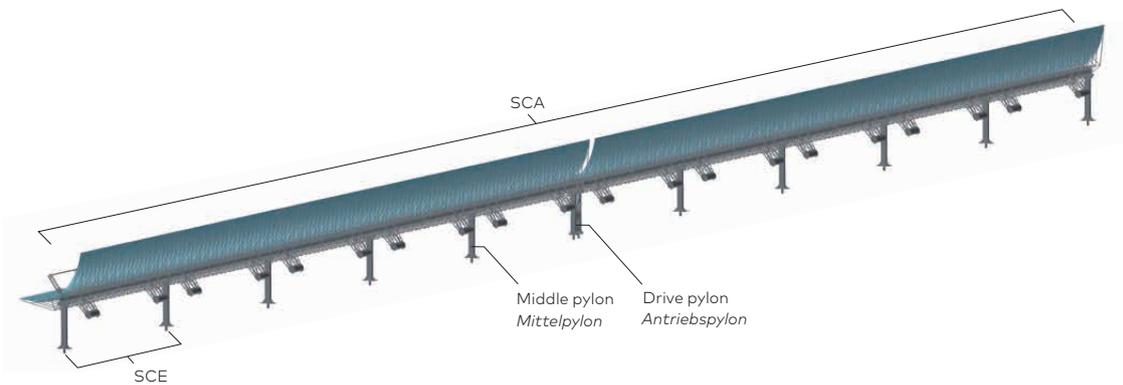
Beispiel Wie ausgewählte technische und ökonomische Kenngrößen miteinander wechselwirken, ist in Abb. 2 am Beispiel von Parabolrinnenkollektoren dargestellt. So beeinflussen einerseits beispielweise die Anforderungen bzgl. Präzision und Biege- und Torsionssteifigkeit die Investitionskosten, andererseits haben diese mechanischen Eigenschaften einen direkten Einfluss auf die Leistungsfähigkeit: Hier gilt es, die optimale Kombination zu finden. Dazu können verschiedene Varianten technisch ausgelegt und kalkuliert werden. Hiermit lassen sich dann Kurven finden, die Hinweise auf das Optimum geben.

Wesentlich eleganter ist eine zweite Möglichkeit: Wo immer es mit hinreichender Genauigkeit möglich ist, bietet es sich an, für Kosten und Energieertrag Rechenmodelle zu erstellen und diese zu einem Gesamtmodell zu kombinieren, um so das Optimum analytisch zu bestimmen.

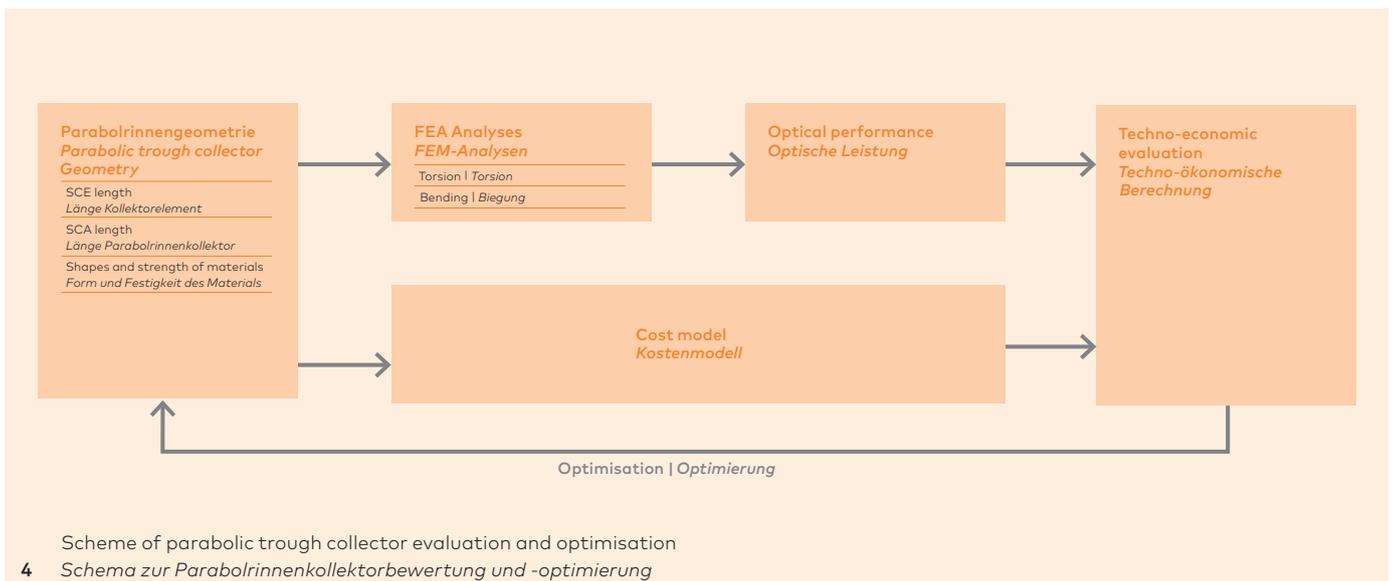




3a



3b



To illustrate this approach, let us look at the following simple example: solar collector assemblies (SCA) consist of a central support with a drive unit (drive pylon) and several solar collector elements (SCE), mechanically connected to the drive pylon and supported by additional regular pylons. The entire SCA can be rotated (**Fig. 3a, b**). To optimise the costs of the solar field, the total cost of drive pylons and solar collector elements needs to be minimised. To achieve this, the number of pylons should be kept as low as possible to minimise the associated costs of foundations, logistics, assembly and, in case of the drive pylon, of cabling and wiring. From this perspective, both the individual SCEs and the entire SCAs should be as long as possible.

However, the requirements on the collector structure and hence the costs increase with length, as deformations must remain as low as possible to achieve high optical quality. Insufficient torsional rigidity leads to a situation in which only the central part of the collector in the area of the drive pylon points correctly towards the sun, whereas the end parts experience major tracking deficiencies as a result of bearing friction and wind, which drastically reduces performance. To avoid this, either a short SCA length can be chosen or the torsional rigidity increased. In addition to an intelligent design, the latter requires more material and thus leads to increased costs.

Optimisation is therefore required and realised as follows: first, the collector structure is analysed using FEA with respect to behaviour under bending and torsion. Afterwards, economic analysis is performed using a cost model¹ whereas the collector efficiency is determined analytically² or through raytracing³. Considering the new results, an improved prototype is designed and the analysis starts over (**Fig. 4**).

This example shows that a techno-economic analysis can be productively used for the development of solar systems; it also became clear, however, that there are a large number of dependencies and not everything can be determined precisely. In the hands of an experienced solar engineer, this method is of great help in the process of development and optimisation.

*Zur Veranschaulichung der Vorgehensweise soll das folgende einfache Beispiel dienen: Parabolrinnenkollektoren (SCA) bestehen aus einer zentralen Stütze mit Antriebseinheit und mehreren, damit mechanisch verbundenen Kollektorelementen (SCE), die auf weiteren Stützen drehbar gelagert sind (**Abb. 3a, b**). Um die Kosten des Solarfeldes zu optimieren, muss also die Summe der Kosten für Stützen und Kollektorelemente minimiert werden. Dafür ist eine möglichst kleine Stützzahl vorteilhaft, um die verbundenen Kosten für Fundamente, Logistik, Montage, und im Fall der Antriebsstütze zusätzlich für Verkabelung, zu minimieren. Unter diesem Gesichtspunkt sollten sowohl die einzelnen SCEs als auch die gesamten SCAs möglichst lang sein.*

Mit der Länge steigen auch die Anforderungen an die Tragstruktur und damit die Kosten. Die Verformungen müssen möglichst klein bleiben, um eine hohe optische Qualität zu erzielen. Eine zu geringe Torsionssteifigkeit bewirkt, dass nur der zentrale Teil des Kollektors im Bereich der Antriebsstütze korrekt zur Sonne zeigt, während die Enden durch Lagerreibung und Wind unter deutlichen Nachführfehlern leiden, wodurch der Ertrag drastisch reduziert wird. Um dies zu verhindern, kann entweder eine kurze SCA-Länge gewählt oder die Torsionssteifigkeit erhöht werden. Letzteres erfordert – neben einem intelligenten Entwurf – mehr Material und erhöht damit die Kosten.

*Hier ist also eine Optimierung erforderlich: Zunächst wird die Kollektorstruktur mittels FEM-Analyse bzgl. Biegung und Torsion analysiert. Dann erfolgt die wirtschaftliche Analyse unter Verwendung eines Kostenmodells¹. Der Kollektorwirkungsgrad wird analytisch² oder mittels Strahlverfolgung³ bestimmt. Unter Berücksichtigung der neuen Ergebnisse wird eine verbesserte Variante entworfen und die Analyse beginnt von vorne (**Abb. 4**), bis ein zufriedenstellendes Ergebnis erreicht wird.*

Das Beispiel zeigt, dass das Werkzeug der techno-ökonomischen Analyse gewinnbringend für das Entwickeln von Solarsystemen eingesetzt werden kann; es macht aber auch deutlich, dass es eine Vielzahl von Abhängigkeiten gibt und nicht alles präzise erfasst werden kann. Für erfahrene Solar-Ingenieure stellt diese Methode eine große Hilfe beim Entwickeln und Optimieren dar.

3 Parabolic trough collectors
Parabolrinnenkollektoren

a SCE – Solar Collector Element
SCE – Solar Collector Element

b SCA – Solar Collector Assembly, consisting of individual collector elements (not true to scale)
SCA – Solar Collector Assembly bestehend aus einzelnen Kollektorelementen (nicht maßstäblich)

4 Schematic representation of the evaluation and optimisation process for parabolic troughs
Schematische Darstellung des Bewertungs- und Optimierungsprozesses für Parabolrinnen

8 Thermodynamics

Thermodynamik

Basic principle The process of generating solar thermal power can essentially be divided into the following steps:

- Collection of solar radiation by means of a collector system,
- Concentration of the radiation onto a heat exchanger/receiver
- Transformation of the radiation energy into heat through absorption of the radiation at the receiver,
- Transportation of the thermal energy to the power conversion unit by means of a heat transfer medium,
- Conversion of the thermal energy into mechanical energy by means of a thermal engine (e.g. steam turbine or Stirling engine),
- Conversion of the mechanical energy into electrical energy by means of a generator.

Figure 2 illustrates the described basic energy conversion sequence of the solar thermal power generation process.

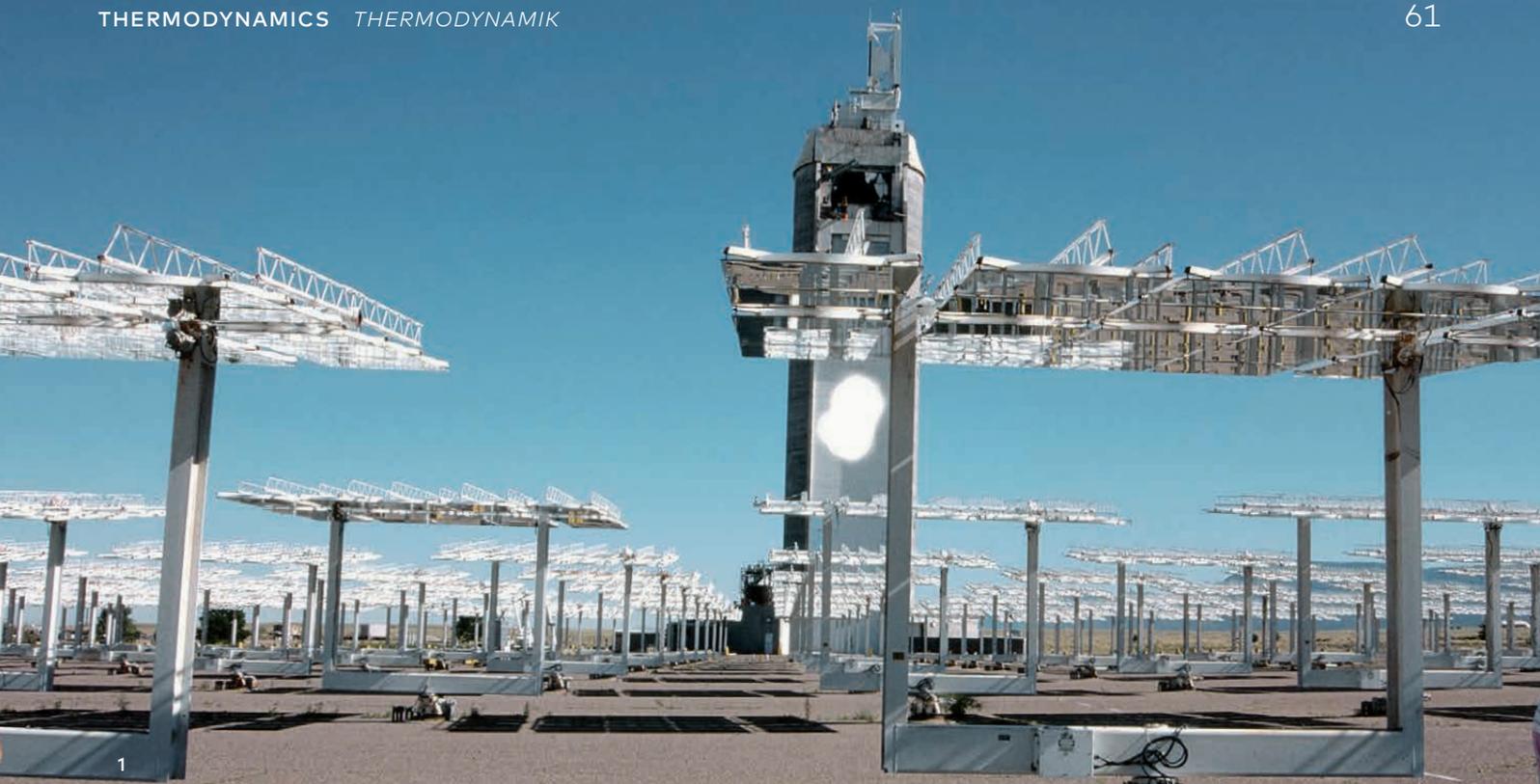
These very different steps require seamless cooperation between specialists from the most various technical fields and areas of expertise. For instance, in the area of designing the power block with turbines, generators and cooling units, it is possible to make use of specialists from conventional power plant construction, as the tasks are very similar. In other areas, however, solar energy specialists are required. The next section describes a few of these:

Grundprinzip Der Prozess der solarthermischen Stromerzeugung lässt sich im Wesentlichen in die folgenden Schritte unterteilen:

- Sammeln der solaren Strahlung mit Hilfe eines Kollektorsystems,
- ggf. Konzentrieren der Strahlung auf einen Strahlungsempfänger (Receiver),
- Umwandeln der Strahlungsenergie in Wärme durch Absorption der Strahlung am Receiver,
- Transport der thermischen Energie mit einem Wärmeträgermedium zur Energiewandlereinheit,
- Umsetzen der thermischen Energie in mechanische Energie mit Hilfe einer Wärme-Kraft-Maschine (z. B. Dampfturbine oder Stirlingmotor),
- Umwandeln der mechanischen Energie in elektrische Energie durch einen Generator.

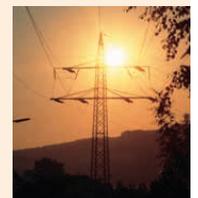
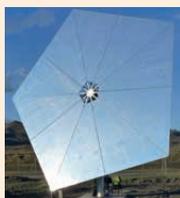
In **Abb. 2** ist die beschriebene grundsätzliche Energie-wandlungskette der solarthermischen Stromerzeugung dargestellt.

Diese sehr unterschiedlichen Schritte erfordern das nahtlose Zusammenarbeiten von Spezialisten der unterschiedlichsten Fachrichtungen und Fachgebiete. Teilweise, wie im Bereich der Auslegung des Kraftwerksblocks mit Turbinen, Generatoren und Kühlern, kann auf Fachleute aus dem konventionellen Kraftwerksbau zurückgegriffen werden, weil sich die Aufgaben hier stark ähneln. In anderen Bereichen sind aber Solar-Spezialisten gefordert. Einige Beispiele dafür sollen im Folgenden umrissen werden:



1 Central Receiver Test Facility (CRTF), Sandia National Laboratories, Albuquerque, New Mexico, USA, 1996
Solarturm Testanlage, Sandia National Laboratories, Albuquerque, New Mexico, USA, 1996

2 Energy conversion chain of the solar thermal power generation process
Energiewandlungskette bei der solarthermischen Stromerzeugung



Energy conversion chain of the solar thermal power generation
Energiewandlungskette bei der solarthermischen Stromerzeugung

1. Collecting and, if necessary, concentrating the radiant energy in the collector
1. Sammeln und ggf. Konzentrieren der Strahlungsenergie im Kollektor

2. Conversion of solar energy into heat in the receiver and transfer to a heat carrier medium
2. Umwandeln der Solarenergie in Wärme im Receiver und Übertragung an ein Wärmeträgermedium

3. Conversion of thermal energy in the heat transfer medium into mechanical energy
3. Wandeln der thermischen Energie im Wärmeträgermedium in mechanische Energie

4. Conversion of mechanical energy into electrical energy
4. Umwandeln der mechanischen Energie in elektrische Energie

Process temperature The temperatures involved in converting thermal energy into mechanical energy are the most important variable affecting the efficiency of this critical process step.

The higher the temperature reached, the greater the achievable efficiency and therefore the higher the amount of electrical energy generated for a specific collector surface area. In addition, the temperature of the cold sink side of the process is also key: the lower the temperature on the cold side, the higher the efficiency coefficient.

The maximum achievable efficiency for a specific combination of hot source and cold sink process temperatures is given by the formula for Carnot's theorem:

$$\eta_c = 1 - T_L / T_H$$

where:

η_c = Carnot efficiency

T_L = temperature of cold sink

T_H = temperature of hot source

The Carnot efficiency is the theoretical maximum achievable efficiency when operating between two temperatures and is always lower than 1. In practice, each conversion process involves a series of losses and imperfections, meaning that the actual achievable efficiency is much lower than this.

The difference in temperatures between the heat removal (cold sink) and heat supply (heat source) needs to be kept as large as possible. To best achieve these differences, both conventional and solar power stations aim for the best cooling: where stream water is available, its excellent heat transfer characteristics mean that a very low cold sink temperature can be reached with relatively little expense or effort (cooling tower). In cases where only air is available, considerably greater efforts are required to achieve atmospheric temperatures using dry cooling towers.

Whereas the cooling in solar power stations is managed with the help of familiar and well-established processes, the challenge still remains in getting the heat source to provide sufficiently high temperatures for the transformation process while still maintaining high efficiency and low costs.

With this in mind, it should be clearer why efforts to reduce the costs of energy produced by solar have led to the need for higher process temperatures. For example, the synthetic oil (which reached temperatures of up to 400°C) used in parabolic trough power plants has gradually been replaced by molten salt (temp. up to 550°C).

Prozesstemperatur Die bei der Wandlung von thermischer in mechanische Energie verwendete Temperatur ist die wichtigste Größe, wenn es um die Effizienz dieses entscheidenden Prozessschrittes geht.

Je höher die erreichte Temperatur, desto höher ist der erzielbare Wirkungsgrad und damit desto höher auch die erzeugte Menge bereitgestellter elektrischer Energie für eine bestimmte Kollektorgroße. Des Weiteren geht hier auch die Temperatur auf der Kühlungsseite des Prozesses ein; Sie muss wiederum so niedrig sein wie möglich. Je niedriger diese ist, desto höher ist der Wirkungsgrad.

Der maximale Wirkungsgrad, der für eine bestimmte Kombination von oberer und unterer Prozesstemperatur erreicht werden kann, wird durch die Carnot'sche Formel beschrieben:

$$\eta_c = 1 - T_L / T_H$$

mit:

η_c = Carnot Wirkungsgrad

T_u = untere Prozesstemperatur

T_o = obere Prozesstemperatur

Der Carnot-Wirkungsgrad ist das theoretisch erreichbare Optimum für gegebene Temperaturen und ist stets kleiner als 1. Tatsächlich gibt es bei jedem realen Wandlungsprozess eine Reihe von Verlusten und Imperfektionen, sodass real erzielbare Wirkungsgrade weitaus geringer sind.

Das Verhältnis der Temperaturen bei der Wärmeabfuhr (Kühlung) und der Wärmezufuhr (Heizung) muss also möglichst groß werden. Dazu wird einerseits im konventionellen wie auch im Solarkraftwerk eine möglichst gute Kühlung angestrebt: wenn z.B. Flusswasser als Kühlmittel verfügbar, ist kann dank der sehr günstigen Wärmeübertragungseigenschaften von Wasser in der Regel mit relativ geringem Aufwand (Kühlturm) eine sehr niedrige untere Prozesstemperatur erreicht werden. Steht nur Umgebungsluft zur Verfügung, muss deutlich mehr Aufwand betrieben werden um mit Hilfe großer Trockenkühltürme möglichst nahe an die Lufttemperatur heranzukommen.

Während die Kühlung im Solarkraftwerk mit bekannten und etablierten Verfahren bewerkstelligt wird, bestehen die Herausforderungen vor allem darin, dem Wandlungsprozess Wärme auf hohem Temperaturniveau zuzuführen, dennoch bereits in diesem ersten Prozessschritt einen hohen Wirkungsgrad zu halten und zugleich die Kosten zu minimieren.

Aus den beschriebenen Zusammenhängen wird klar, warum die Bemühungen, die Kosten solar erzeugter elektrischer Energie weiter zu senken auch zum Ziel höherer Prozesstemperaturen geführt haben. So wird das bei Parabolrinnenkraftwerken bis ca. 2015 durchweg verwendete synthetische Öl (max. 400°C) zunehmend durch Flüssigsalz (max. 550°C) ersetzt.

Current developments also seem to be heading towards higher temperatures in the case of solar tower power plants. In comparison to parabolic trough collectors (which can achieve radiation concentrations of around $100\times$), solar towers achieve considerably higher concentrations (over $1,000\times$), meaning they can reach higher temperatures without heat losses resulting in reduced efficiencies. Molten salts and temperatures of around 550°C – 570°C are already standard, and technologies are currently under development which should enable even higher temperatures of up to $1,000^{\circ}\text{C}$. So-called particle receivers, which have been under study for some time now, involve the use of a temperature-resistant 'sand' as heat-transfer medium. These small particles can be heated and circulated in different processes and can even be used as temporary heat storage.

However, such high to very high temperatures need appropriate conversion methods: whereas the classic steam cycle (Rankine process) is suitable for temperatures of up to around 565°C , others such as the supercritical CO_2 power cycle can see up to 650°C (with a potential for up to 700°C – 750°C) being achieved. Gas turbine and combined processes reach up to $1,000^{\circ}\text{C}$ (and potentially up to $1,300^{\circ}\text{C}$), meaning the current possible conversion efficiency levels of around 40% can be increased to over 50%.

The thermal energy storage which will be needed in most future solar thermal power stations will naturally also have to keep up with the increasing process temperatures. As molten salt energy storage has been used right from the beginning, parabolic trough and solar tower power stations working with salt as a heat-transfer medium can be fitted with this tried and tested technology. The changeover from synthetic oils to salts basically means that the temperature differences between the hot and cold tanks can be increased from approx. 100°C to 150°C , resulting in a corresponding reduction in the required size of the tanks of around a third. Research is currently focussed on the development of solid-state storage media for these future high-temperature processes.

Auch bei den Turm-Solkraftwerken geht die Entwicklung zu höheren Temperaturen. Wegen der im Vergleich zu Parabolrinnenkollektoren (ca. 100-fach) deutlich höheren Strahlungskonzentration (über 1000-fach) können auch höhere Temperaturen erreicht werden, ohne dass die Wärmeverluste zu unzureichenden Wirkungsgraden führen. Hier sind Flüssigsalze und Temperaturen von 550 – 570°C bereits Standard, es werden Technologien entwickelt, die noch deutlich höhere Temperaturen bis zu 1000°C ermöglichen sollen. Die bereits seit langem untersuchten sogenannten Partikel-Receiver verwenden körnige temperaturbeständige Materialien als Wärmeträger die nach verschiedenen Verfahren erhitzt und umgewälzt und teils auch zur kurzfristigen Wärmespeicherung verwendet werden.

Für solch hohe bis sehr hohe Temperaturen müssen entsprechende Wandlungsprozesse eingesetzt werden. Während sich der klassische Dampfkraftprozess (Rankineprozess) bis ca. 565°C eignet, können andere, wie das superkritische CO_2 Verfahren, bis zu 650°C (Potenzial bis 700 – 750°C) eingesetzt werden. Gasturbinen- und kombinierte Prozesse erreichen bis zu 1000°C (Potenzial bis 1300°C). Damit kann der Wandlungswirkungsgrad von bislang ca. 40% bis auf über 50% angehoben werden.

Die für die meisten künftigen solarthermischen Kraftwerke unabdingbare thermische Energiespeicherung muss den steigenden Prozesstemperaturen natürlich ebenfalls folgen. Da hier Flüssigsalzspeicher von Anfang an verwendet wurden, können mit Salz als Wärmeträger arbeitende Parabolrinnen- und Solarturmkraftwerke mit dieser erprobten Technologie ausgestattet werden. Der Übergang von synthetischem Öl zu Salz wirkt sich hier vor allem dahingehend aus, dass die Temperaturspreizung zwischen heißem und kaltem Tank von ca. 100 auf ca. 150°C erhöht werden kann, was zu einer Verringerung der Tankvolumina im entsprechenden Verhältnis auf ca. $\frac{1}{3}$ führt. Für die kommenden Hochtemperaturprozesse wird vor allem an der Entwicklung von Festkörperspeichern gearbeitet.

Example of a central receiver system

The receiver is the plant component which forms the interface between the solar field and the power plant unit, i.e. between the solar-specific and the otherwise conventional part of the solar power plant. The receiver must fulfil a range of different requirements and so needs to be both designed and constructed with the highest of care.

The receiver is 'bombed' with the concentrated beams coming from the heliostats, and needs to absorb them as much as possible. In most cases, absorber ducts are used consisting of parallel tubes made of heat-resistant material. A black coating ensures that as little as possible is reflected. The high surface temperatures, however, cause unavoidable losses due to heat dissipation to the surrounding air (convection) and thermal radiation. The latter increases with T^4 (surface temperature in Kelvin) and is generally the dominant factor in heat losses. Similar to what we have seen in parabolic trough plants, the technical and economic optimisation will depend greatly on the number and quality of the heliostats.

The remaining thermal capacity (typically around 90% of the absorbed heat) passes to the medium flowing through the pipes—mainly molten salt. This salt acts as a coolant in the receiver pipes. As it heats when flowing through the receiver, the material temperature of the pipes themselves also increases, and in the areas where very high temperatures are reached, the material can often get close to its limits. To prevent this from happening, the amount of flow (the flow density) needs to be reduced—this can be achieved by adapting the focal points of the individual heliostats (focal point strategy or APS/Aim Point Strategy—see **chapter 6**).

Beispiel Receiver beim Turm-Solkraftwerk

Der Receiver ist die Anlagenkomponente an der Schnittstelle zwischen Solarfeld und Kraftwerksblock, und damit auch zwischen dem solarspezifischen und dem weitgehend konventionellen Teil des Solarkraftwerks. Der Receiver muss vielfältigen Anforderungen genügen und erfordert daher einen sorgfältig ausgewogenen Entwurf und eine ebensolche Konstruktion.

Der Receiver wird von außen mit der konzentrierten Strahlung des Heliostatenfeldes beaufschlagt, die er möglichst vollständig absorbieren soll. In den meisten Fällen werden RohrabSORber verwendet, bestehend aus parallelen Rohren aus hochtemperaturbeständigem Material. Eine schwarze Beschichtung sorgt für einen geringen Anteil reflektierter Strahlung. Die hohe Oberflächentemperatur verursacht allerdings unvermeidbare Verluste durch Wärmeabgabe an die Umgebungsluft (Konvektion) sowie durch Wärmestrahlung. Letztere steigt mit T^4 (Oberflächentemperatur in Kelvin) und ist in der Regel der dominierende Verlustfaktor. Hier stellt sich ähnlich den bereits beschriebenen Verhältnissen beim Parabolrinnenkollektor die Aufgabe der technisch-ökonomischen Optimierung von Receiver-Größe sowie Anzahl und Qualität der Heliostaten.

Die verbleibende Wärmeleistung (typischerweise ca. 90% der absorbierten Leistung) wird an das in den Rohren zirkulierende Medium abgegeben, in den meisten Fällen flüssiges Salz. Für die Receiver-Rohre wirkt das Salz als Kühlmittel. Da es sich beim Durchströmen des Receivers erwärmt, steigt auch die Materialtemperatur der Rohre entsprechend an. In Bereichen mit hohen Rohrtemperaturen nähert sich das Material den Grenzen der Belastbarkeit. Daher muss hier die auftreffende Strahlungsmenge (Flussdichte) reduziert werden. Dies wird erreicht, indem die Zielpunkte der einzelnen Heliostaten entsprechend gewählt werden (Zielpunktstrategie oder APS/Aim Point Strategy, siehe **Kap. 6**).

Most of the time, solar power stations operate constantly with the solar radiation and therefore the temperatures on the receiver only change very slowly. By adapting the flow of molten salt pumped through the receiver, it is simple to achieve constant temperatures.

There are, however, operating conditions which can result in very quick changes such as start up in the mornings, shutdown in the evenings and when clouds pass overhead. These conditions all cause intensity hitting the receiver to change drastically within the space of just a few moments. In order to prevent unwanted stress on the receiver and to reduce the number of temperature cycles (which have a highly negative effect on the lifespan of the receiver), the flow of the salt.

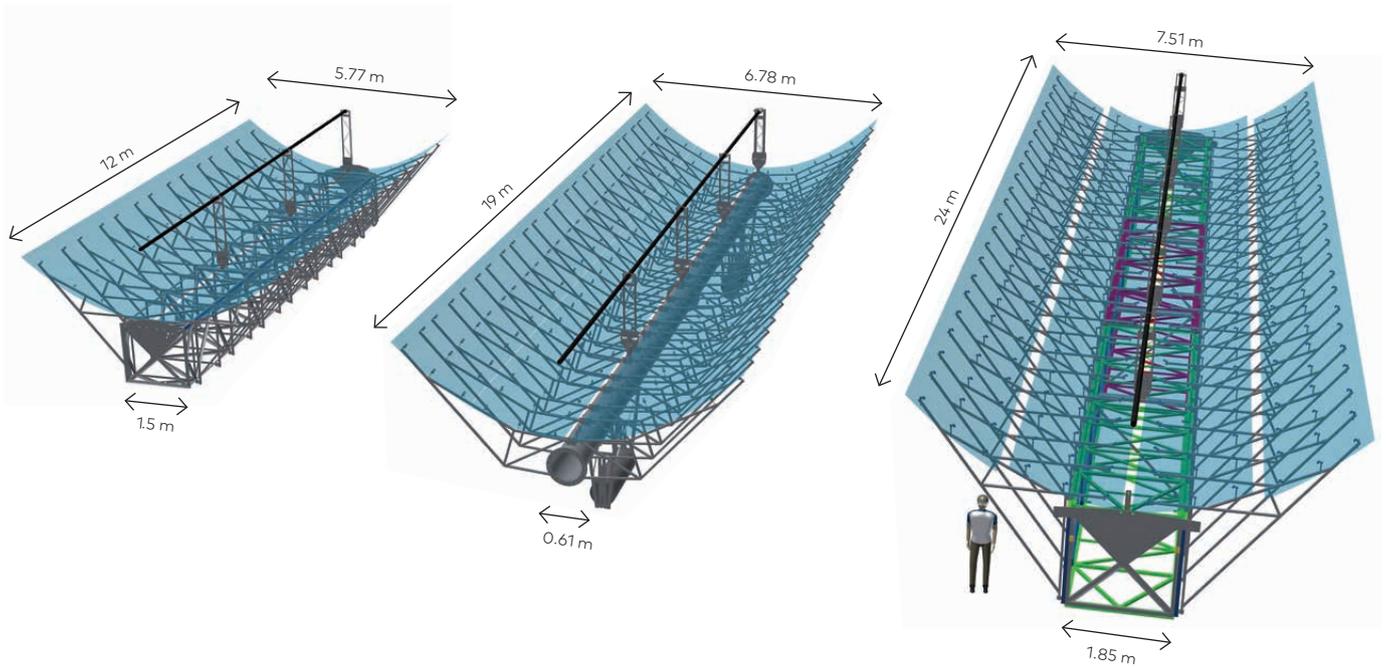
Die meiste Zeit befindet sich das Solarkraftwerk in einem konstanten Betrieb, indem sich die Solarstrahlung und entsprechend die Temperaturen am Receiver nur langsam verändern. Durch Anpassung der durch den Receiver gepumpten Salzmenge lassen sich leicht konstante Temperaturverhältnisse einstellen.

Es gibt allerdings auch Betriebszustände mit schnelleren Änderungen, so z.B. beim morgendlichen Anfahren, dem abendlichen Herunterfahren und mehr noch bei Wolkendurchgängen. Hier kann sich die auftreffende Strahlungsleistung binnen Minuten stark verändern. Um unzulässige Receiverbelastungen zu verhindern und die Anzahl der Temperaturzyklen zu reduzieren (die sich negativ auf die Lebensdauer des Receivers auswirken), muss einerseits der Salzmassenstrom entsprechend geregelt werden, andererseits muss jeweils eine geeignete APS verwendet werden. Die sich einstellenden Temperaturen werden auch durch die thermische Trägheit (Wärmekapazität) von Rohren und Salz beeinflusst.

Diese Vorgänge müssen für die Auslegung des Receivers und des Heliostatenfeldes simuliert werden. Die genannten und noch eine Reihe weiterer Anforderungen machen dies zu einer sehr komplexen Aufgabe, die eine enge und interdisziplinäre Zusammenarbeit der Planer für Receiver, Kraftwerksblock, Solarfeld und Steuerungstechnik erfordert.



3 Central receiver system tower
Receiver eines Turm-Solarkraftwerks



4

4 Three parabolic trough collectors with different focal lengths and aperture widths. Another difference is the length of the individual collector elements (SCE) and of the entire collector (SCA), which is not displayed here. *Drei Parabolrinnenkollektoren mit unterschiedlicher Brennweite und Aperturbreite. Weitere Unterschiede bestehen in der Länge der einzelnen Kollektorelemente (SCE) und des gesamten Kollektors (SCA); hier nicht dargestellt*

Collector design As far as the design and optimisation of collectors are concerned, closely interrelated questions from optics and thermodynamics need to be answered and, of course, costs have to be kept in mind continuously. First of all, suitable form needs to be found, that is, the parabola's focal distance and aperture width need to be established (**Fig. 4**). These core parameters have to be adjusted to the diameter of the absorber tube (parabolic trough) or the receiver size (dish, central receiver system), respectively. To achieve this, all reflected rays should reach their target. Large absorber tube diameters or receiver surfaces are advantageous. On the other hand, thermal losses through radiation and convection are also proportional to the surface, favoring small absorber tube diameters or receivers, which in turn require highly precise reflecting surfaces. In practice though, geometric forms are never ideal, as deviations are always present due to inaccuracies in the manufacturing and assembly process, as well as due to dead weight and wind (**chapters 4+5**). Part of the technical and economic optimisation process must establish which deviations are admissible depending on which costs can be saved or will need to be added (**chapter 7**).

Kollektorentwurf Während des Entwurfs und der Optimierung von Kollektoren sind miteinander eng verzahnte Fragen aus Optik und Wärmelehre zu beantworten und auch die Kosten müssen stets im Auge behalten werden. Zunächst ist eine geeignete Form zu finden, d.h. Brennweite und Aperturbreite der Parabel müssen definiert werden (**Abb. 4**). Diese Kenngrößen werden mit dem Absorberrohrdurchmesser (Parabolrinne) bzw. der Receiver-Größe (Turmanlage, Dish) abgestimmt. Möglichst alle reflektierten Strahlen sollen ihr Ziel erreichen; hier wirken sich große Absorberrohrdurchmesser bzw. Receiver-Flächen günstig aus. Andererseits sind die thermischen Verluste durch Strahlung und Konvektion auch proportional zur Fläche – unter diesem Aspekt sollten also kleine Absorberrohrdurchmesser bzw. Receiver gewählt werden. Das erfordert hochpräzise Reflektorflächen. In der Praxis gibt es jedoch immer Abweichungen durch Ungenauigkeiten bei Fertigung und Montage sowie durch Verformung infolge von Eigengewicht und Wind (**Kap. 4+5**). Im Laufe der technisch-ökonomischen Optimierung muss schließlich herausgefunden werden, welche Abweichungen unter Berücksichtigung der entstehenden bzw. vermiedenen Kosten zulässig sind (**Kap. 7**).

Further topics An important task at the interface between the solar concentrator and the power conversion unit is the design and planning of receivers, for instance for Dish/Stirling systems and central receiver systems. In addition, there are special tasks such as the calculation of condensation effects through convection and the exchange of radiation with the sky in (seawater) greenhouses. In the future, such greenhouses could be used as cooling systems for solar thermal power stations. For such tasks, a thermodynamic model of the system needs to be set up first, which can then be used for analysis and optimisation. For instance, the greenhouse temperature is to be optimised in terms of power plant efficiency (favoring temperatures as low as possible) and water production (favouring temperatures as high as possible).

Weitere Themen Eine wichtige Aufgabenstellung an der Schnittstelle zwischen Solarkonzentrator und Energiewandler sind der Entwurf und die Planung von Receivern wie beispielsweise für Dish/Stirling-Systeme und Solarturm-Kraftwerke. Hinzu kommen Sonderaufgaben wie die Berechnung von Kondensationseffekten durch Konvektion und Strahlungsaustausch mit dem Himmel in (Meerwasser) Gewächshäusern. Solche Gewächshäuser könnten zukünftig als Kühlsystem für solarthermische Kraftwerke dienen. Bei derartigen Aufgaben muss zunächst ein thermo-dynamisches Modell des Systems erstellt werden, das für Analyse- und Optimierungsaufgaben verwendet werden kann. So muss beispielsweise die Gewächshaustemperatur hinsichtlich Kraftwerkswirkungsgrad (möglichst niedrige Temperatur erforderlich) und Wassergewinnung (möglichst hohe Temperatur gewünscht) optimiert werden.

5 Collector turntable in Spain
Kollektordrehstand in Spanien



9 Power Station

Kraftwerk

Principle Solar thermal power stations transform solar radiation first into heat, then into mechanical energy by means of a thermal engine such as a turbine or a Stirling engine, and finally into electric energy by means of a generator. Today, steam turbines are almost exclusively used as thermal engines in solar thermal power stations: The steam produced using solar radiation and expanded within the turbine is condensed again in a cooler and then pressurised using a feedwater pump (**Fig. 1**).

In times of an excess supply of solar energy a storage can be charged with heat from the solar field. This energy is then used to operate the turbine in the event of insufficient solar radiation and at night; alternatively, heat can also be provided through the combustion of fossil or biogenic fuel. This type of plant is known as a hybrid power plant, as it uses multiple different sources of energy.

Types The most important types of solar thermal power plants are displayed in **Fig. 2**. A distinction is made between line-focus plants (parabolic trough and linear Fresnel power stations) and point focusing systems (central receiver systems and Dish/Stirling systems). The solar updraft tower is a special case, as it works without concentration of solar radiation.

Prinzip Als solarthermische Kraftwerke werden Anlagen bezeichnet, die Solarstrahlung zunächst in Wärme und dann mittels einer Wärme-Kraft-Maschine, beispielsweise mit einer Turbine oder einem Stirlingmotor, in mechanische Energie und schließlich mit einem Generator in elektrische Energie umwandeln. Heute werden in solarthermischen Kraftwerken fast ausschließlich Dampfturbinen als Wärme-Kraft-Maschine verwendet: Der solar erzeugte und in der Turbine expandierende Dampf kondensiert in einem Kühler und wird dann mit einer Speisepumpe unter Druck gesetzt (**Abb. 1**).

In Zeiten eines solaren Energieüberangebots kann mit der Wärme aus dem Solarfeld ein Speicher geladen werden. Damit wird in den Zeiten mit nicht ausreichender Solarstrahlung oder in den Nachtstunden die Turbine betrieben. Alternativ kann Wärme auch durch das Verbrennen eines fossilen oder biogenen Brennstoffs bereitgestellt werden. Man spricht dann von Hybrid-Kraftwerken, weil sie mehrere Energiequellen nutzen.

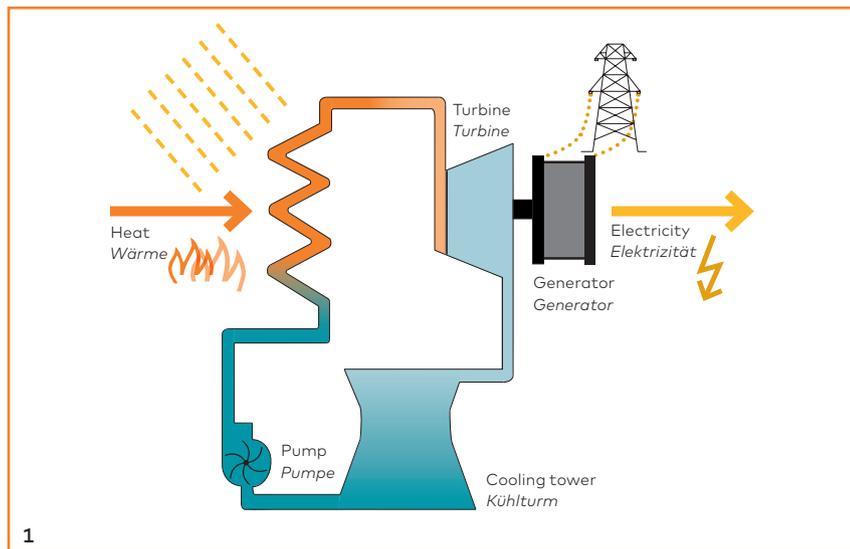
Varianten Die wichtigsten Varianten solar-thermischer Kraftwerke sind in **Abb. 2** dargestellt. Demnach wird zwischen linienfokussierenden Anlagen (Parabolrinnen- und Linear-Fresnelkraftwerke) und punktfokussierenden Systemen (Turm-Solarkraftwerk und Dish/Stirling) unterschieden. Ein Sonderfall ist das Aufwindkraftwerk, bei dem die Solarstrahlung nicht konzentriert wird.

Parabolic trough station Andasol 1 in Southern Spain is a typical modern 50 MW parabolic trough station with storage (Fig. 3) and serves as an example for this power station type. The power stations Andasol 2 and 3, built in immediate proximity are almost identical in design with the first power plants Shagaya in Kuwait and Delingha in Spain. For all power stations, we planned the collector field and supervised the process of manufacturing and assembly.

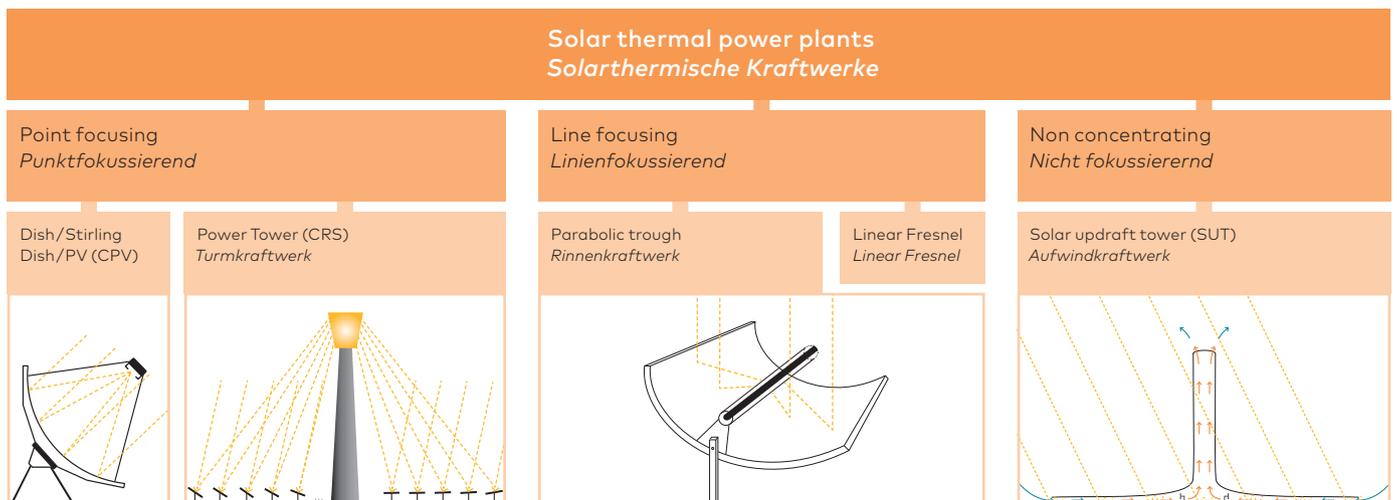
For Andasol 1, a total of 7,488 individual collector elements, each with 12m in length and 5.8 m in width, were installed on an area of 1.3 × 1.5km. 12 collector elements are combined into a solar collector assembly (SCA) of approx. 150 m in length, which follows the sun via a hydraulic drive mechanism installed at the centre of the SCA. The collectors are arranged in the north-south direction, four of which form a collector loop. The resulting collector field has a total of 156 loops and an overall reflecting surface of approx. 510,000 m².

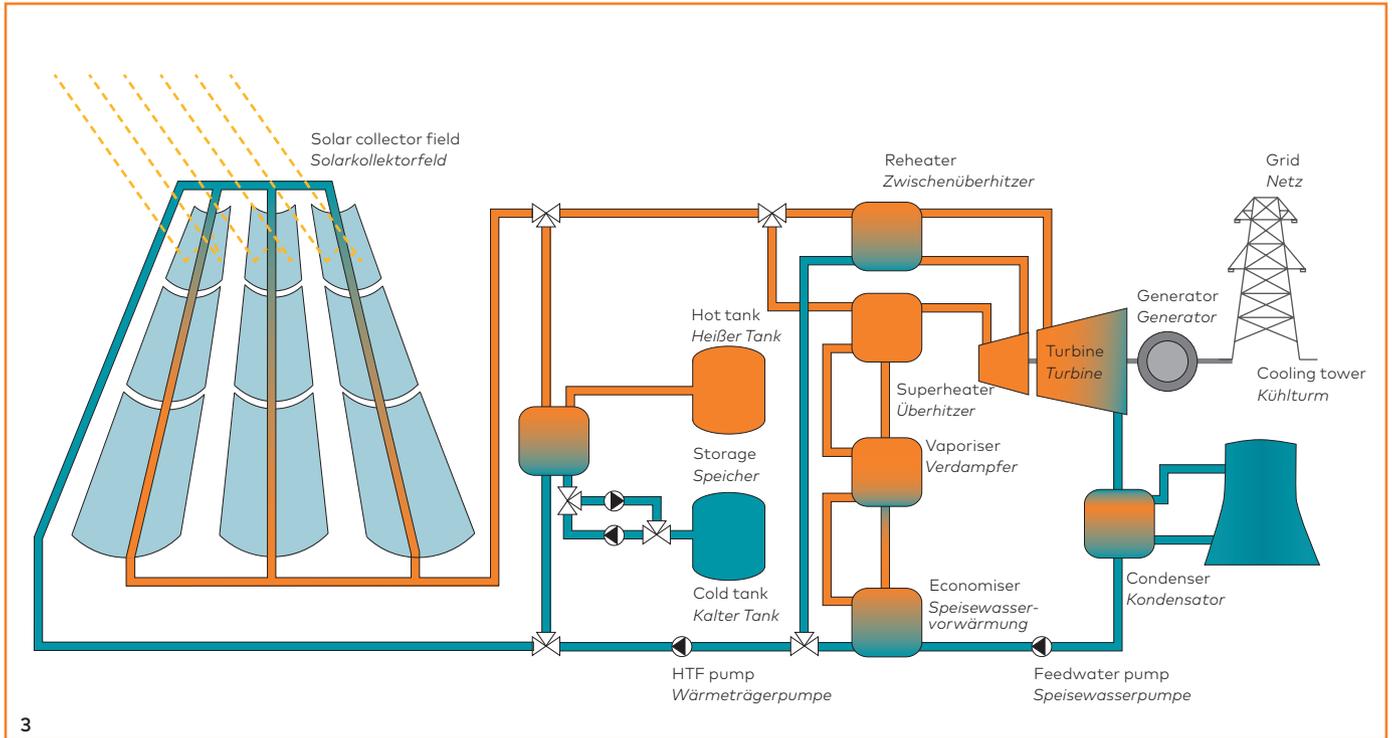
Parabolrinnenkraftwerk Andasol 1 in Süds Spanien ist ein typisches modernes 50 MW Parabolrinnenkraftwerk mit Speicher (Abb. 3), das hier als Beispiel dienen soll. Die in direkter Nachbarschaft errichteten Kraftwerke Andasol 2 und 3 sind nahezu baugleich; Andasol sehr ähnlich sind auch die Anlagen Shagaya in Kuwait und Delingha in Spanien. Für all diese Kraftwerke haben wir das Kollektorfeld geplant und die Fertigung und Montage überwacht.

Für Andasol 1 wurden auf einer Fläche von 1,3 mal 1,5 Kilometer insgesamt 7488 einzelne Kollektorelemente mit je 12 Metern Länge und ca. 5,8 Metern Breite installiert. Jeweils 12 Kollektorelemente sind zu einer ca. 150 Metern langen Kollektoreinheit zusammengefügt, die von einem in der Kollektormitte installierten hydraulischen Antrieb der Sonne nachgeführt wird. Die Kollektoren sind in Nord-Süd-Richtung angeordnet. Jeweils vier Kollektoreinheiten bilden eine Kollektorschleife (engl.: loop). Somit entsteht ein Kollektorfeld mit insgesamt 156 Loops und einer gesamten Spiegelfläche von ca. 510 000 m².

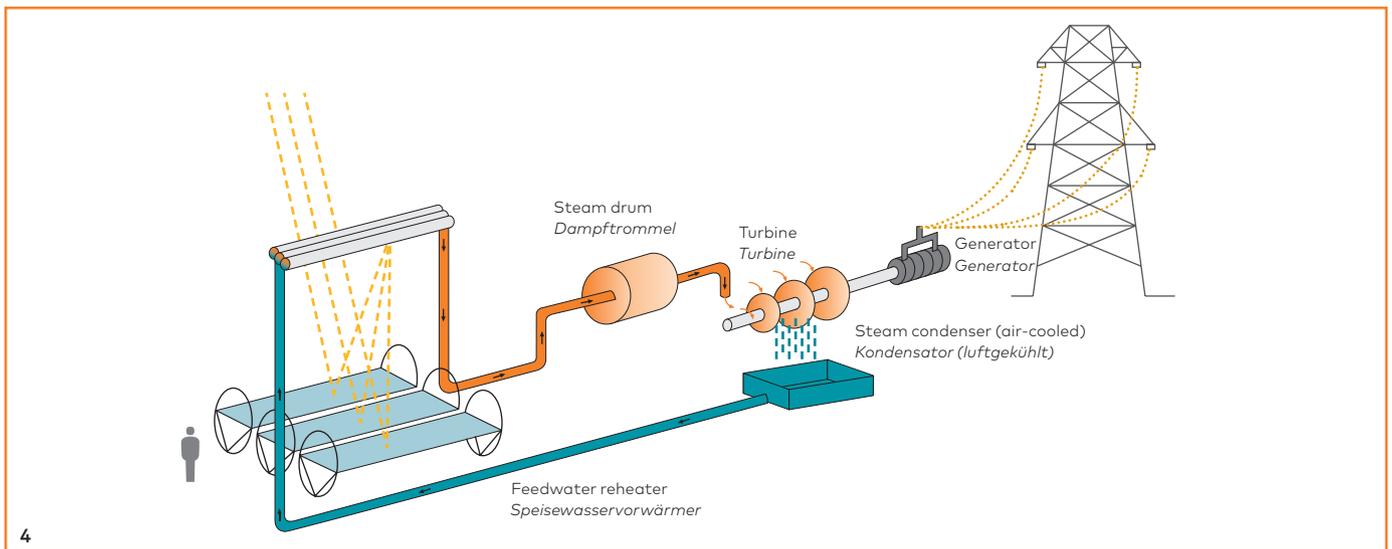


- 1 Typical structure of solar thermal power plants
Typischer Aufbau solarthermischer Kraftwerke
- 2 Classification of solar thermal power plants
Einteilung solarthermischer Kraftwerke

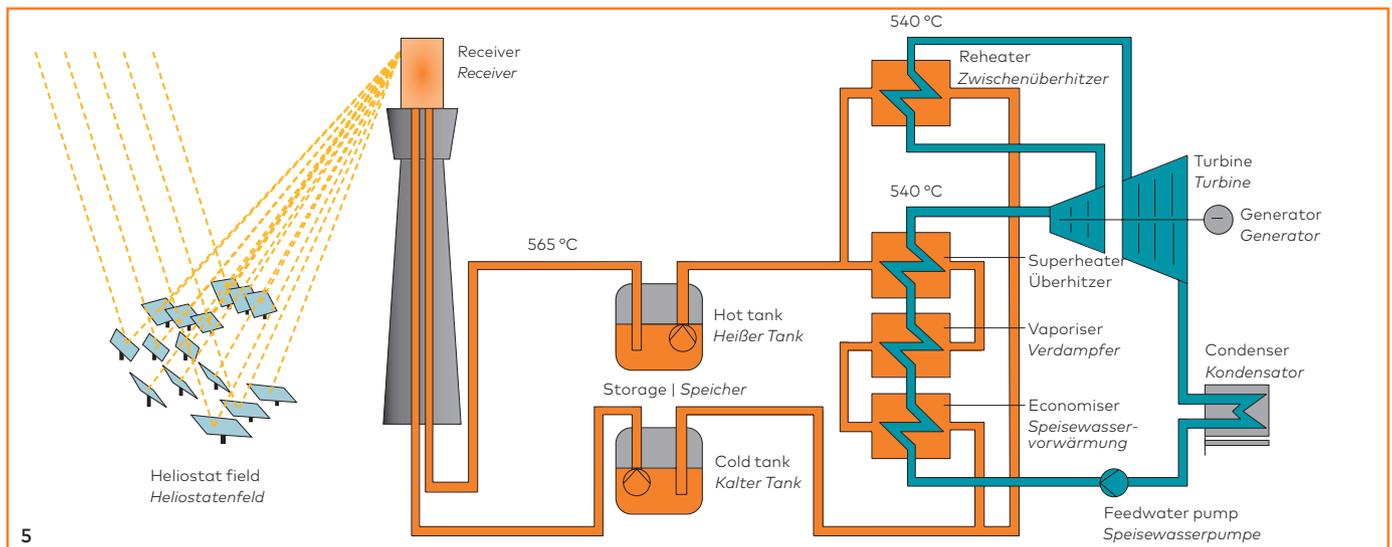




3



4



5

The heat transfer medium (up to now synthetic oil, but also molten salt in the future) is pumped into the individual loops at a temperature of around 300°C, heated up to just under 400°C (or over 500°C in the case of molten salts) as it passes through the loops and then led to the power block through header pipes. Heat exchangers then transfer the heat to the steam cycle.

Like all thermal power stations, whether operated on a fossil or a solar basis, parabolic trough plants also require a cooling system. In case of Andasol, these cooling systems are wet coolers working with water that partially evaporates. In regions with water shortage, dry coolers working essentially like motorcar cooling devices are the most suitable solution. Though power plant efficiency slightly decreases in this case, the advantage is that no cooling water is consumed.

The Andasol power stations are equipped with heat storage (steel storage tanks filled with molten salt), which intermediately store the heat generated by the solar field. The collector field is dimensioned in such a way that, over the course of the day, it not only makes sufficient thermal energy available for the operation of the turbines, but also charges the storage so that the turbine can be operated at full load for up to seven hours after sunset. As a result, the power stations make reliable power plant capacity available to the public grid (**chapter 2**).

Linear Fresnel power stations are also classified as line-focus solar thermal power plants, but differ primarily in their collector field (**Fig. 4**). The reflectors consist of relatively narrow, slightly curved strips arranged on a horizontal plane. The individual reflector strips are pivoted to face the course of the sun and reflect the radiation onto the linear receiver, which is installed and kept fixed several meters above the reflectors in the focal line. At present only saturated steam is generated in commercial facilities. In the future, however, superheated steam will also be generated.

Central receiver system In case of central receiver systems, mirrors made to follow the sun by means of a two-axis tracking system (so-called heliostats) reflect the solar radiation onto a receiver installed at the top of a tower (**Fig. 5**). There, the radiation energy is converted into heat and transferred to a heat transfer medium (molten salt, water/steam, air). The heat is then used to drive a turbine. Storage and/or an additional fossil burner can likewise be integrated. In principle, they work

Das Wärmeträgermedium – bisher ein synthetisches Öl, zukünftig auch eine Salzschnmelze – wird mit etwa 300 °C in die einzelnen Loops gepumpt, beim Durchströmen der Loops auf knapp 400 °C erwärmt (bzw. auf über 500 °C bei Salzschnmelzen) und dann über Sammelleitungen zum Kraftwerksblock geführt. Durch Wärmetauscher wird die Wärme dann an den Dampfkreislauf übertragen.

Wie alle thermischen Kraftwerke, ob fossil oder solar betrieben, benötigen auch Parabolrinnen-Kraftwerke ein Kühlsystem. Bei Andasol sind dies Nasskühler, die mit Wasser arbeiten, das zum Teil verdunstet. In Gegenden mit Wasserknappheit bieten sich Trockenkühler an, die im Prinzip wie Autokühler funktionieren. Der Kraftwerkswirkungsgrad sinkt dann zwar leicht, dafür wird aber kein Kühlwasser verbraucht.

*Die Andasol-Kraftwerke sind mit Wärmespeichern (mit Salzschnmelze gefüllte Stahltanks) ausgestattet, die die vom Solarfeld erzeugte Wärme zwischenspeichern. Das Kollektorfeld ist so dimensioniert, dass es tagsüber nicht nur ausreichend thermische Energie für den Turbinenbetrieb zur Verfügung stellt, sondern auch den Speicher so weit belädt, dass die Turbine noch bis zu sieben Stunden nach Sonnenuntergang mit Vollast betrieben werden kann. Damit stellen die Kraftwerke dem Netz der öffentlichen Versorgung planbare Kraftwerkskapazität zur Verfügung (**Kap. 2**).*

***Linear-Fresnel-Kraftwerke** zählen ebenfalls zu den linienfokussierenden solarthermischen Kraftwerken, unterscheiden sich aber vor allem im Kollektorfeld (**Abb. 4**). Die Reflektoren bestehen aus relativ schmalen, schwach gekrümmten Streifen, die in einer horizontalen Ebene angeordnet sind. Die einzelnen Reflektorstreifen werden jeweils entsprechend dem Lauf der Sonne im Tagesverlauf geschwenkt und reflektieren die Strahlung auf das mehrere Meter über den Spiegeln in der Fokuslinie ortsfest installierte Absorberrohr. Als Wärmeträger wird heute Wasser eingesetzt, das in den Absorberrohren direkt verdampft wird. Derzeit wird in den kommerziellen Anlagen nur Satteldampf erzeugt, zukünftig soll es auch überhitzter Dampf sein.*

***Turm-Solarkraftwerk** Bei Turm-Solarkraftwerken reflektieren zweiachsig dem Lauf der Sonne nachgeführte Spiegel, sogenannte Heliostaten, die direkte Solarstrahlung auf einen zentral auf einem Turm angebrachten Receiver (**Abb. 5**). Dort wird die Strahlungsenergie in Wärme umgewandelt und an ein Wärmeträgermedium (Salzschnmelze, Wasser/Dampf, Luft) übertragen. Mit der Wärme wird dann eine Turbine angetrieben. Speicher und/oder fossile Zuführung lassen sich ebenfalls integrieren. Im Prinzip funktionieren sie wie Parabolrinnenkraftwerke, nur ersetzen die Heliostaten und der Receiver auf dem Turm die Parabolrinnenkollektoren mit ihren Absorberrohren.*

3 Layout of a parabolic trough power plant with storage facility
Aufbau eines Parabolrinnenkraftwerks mit Speicher

4 Linear Fresnel plant (Ausra)
Linear-Fresnel-Anlage (Ausra)

5 Central receiver system with molten salt as heat storage medium
Turm-Solarkraftwerk mit Salzschnmelze als Wärmeträger

6 Heliostat Heliostaten

a ASM 150, 150 m² mirror surface
ASM 150, 150 m² Spiegelfläche

b Stellio, 48.5 m² mirror surface
Stellio, 48,5 m² Spiegelfläche

7 Dish/Stirling Dish/Stirling-Anlage

8 Solar updraft tower (principle)
Aufwindkraftwerk (Prinzip)

like parabolic trough power plants, with the only exception that heliostats and a receiver on the tower replace the parabolic trough collectors with their absorber tubes.

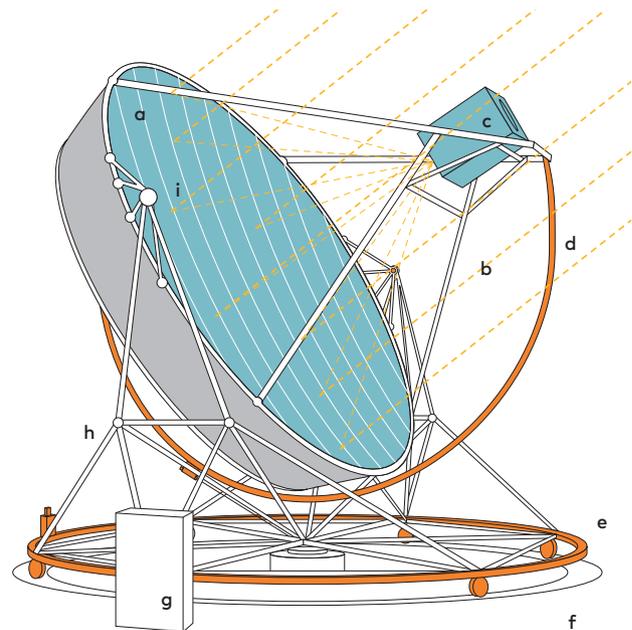
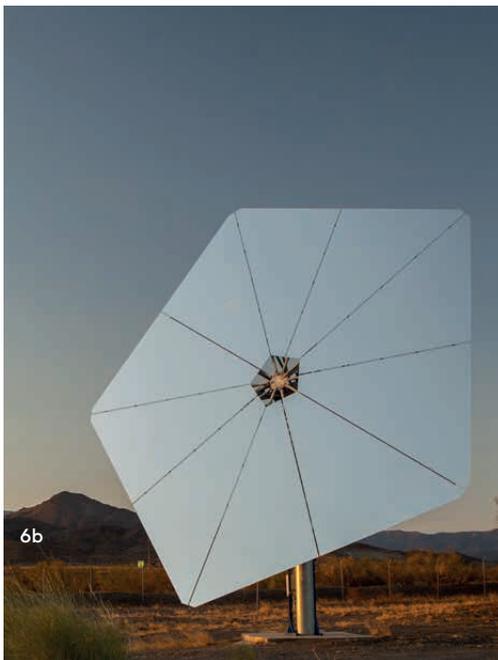
From a technical as well as from an economic point of view, heliostats are the most important components of central receiver systems. Here at sbp we have been making progress in the development of precise, small or large, durable and at the same time favourably priced heliostats since the 1990s (**Fig. 6**). Moreover the design and dimensioning of the towers, as well as their influence on the layout of the heliostat fields, as well as the optimisation of the field, are areas of activity which are increasingly important for us.

Dish/Stirling System Dish/Stirling systems consist of a parabolically curved, 'dish-shaped' concentrator, a solar receiver and a Stirling engine, a thermal engine with a coupled generator (**Fig. 7**). The parabolic concentrator follows the sun by means of a two-axis tracking system, such that it reflects the direct solar radiation onto the receiver which is placed at the focus. From the receiver, the heat is transferred to the Stirling engine, which converts it into mechanical energy (usually via rotation of a cranked shaft).

Die Heliostaten stellen sowohl unter technischen als auch unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten die wichtigste Komponente von Turm-Solarkraftwerken dar.

Die Entwicklung präziser, kleiner oder großer, langlebiger und gleichzeitig kostengünstiger Heliostaten wurde deshalb schon seit den 1990er-Jahren von sbp vorangetrieben (**Abb. 6**). Darüber hinaus sind der Entwurf und die Bemessung der Türme, ihr Einfluss auf die Auslegung des Heliostatfeldes und dessen Optimierung ein Betätigungsfeld von wachsender Bedeutung.

Dish/Stirling-System Dish/Stirling-Systeme bestehen aus einem parabolisch gekrümmten, schüssel-förmigen Konzentrator (engl. dish für Schüssel), einem Solarreceiver sowie einem Stirlingmotor als Wärme-Kraft-Maschine mit angeschlossenem Generator (**Abb. 7**). Der Parabolkonzentrator wird zweiachsig der Sonne nachgeführt, sodass er die direkte Solarstrahlung auf den im Fokus angeordneten Receiver reflektiert. Vom Receiver wird die Wärme dem Stirlingmotor zugeführt, der diese in mechanische Energie (in der Regel die Rotation einer Kurbelwelle) umwandelt. Ein angekoppelter Generator setzt schließlich die mechanische in elektrische Energie um.

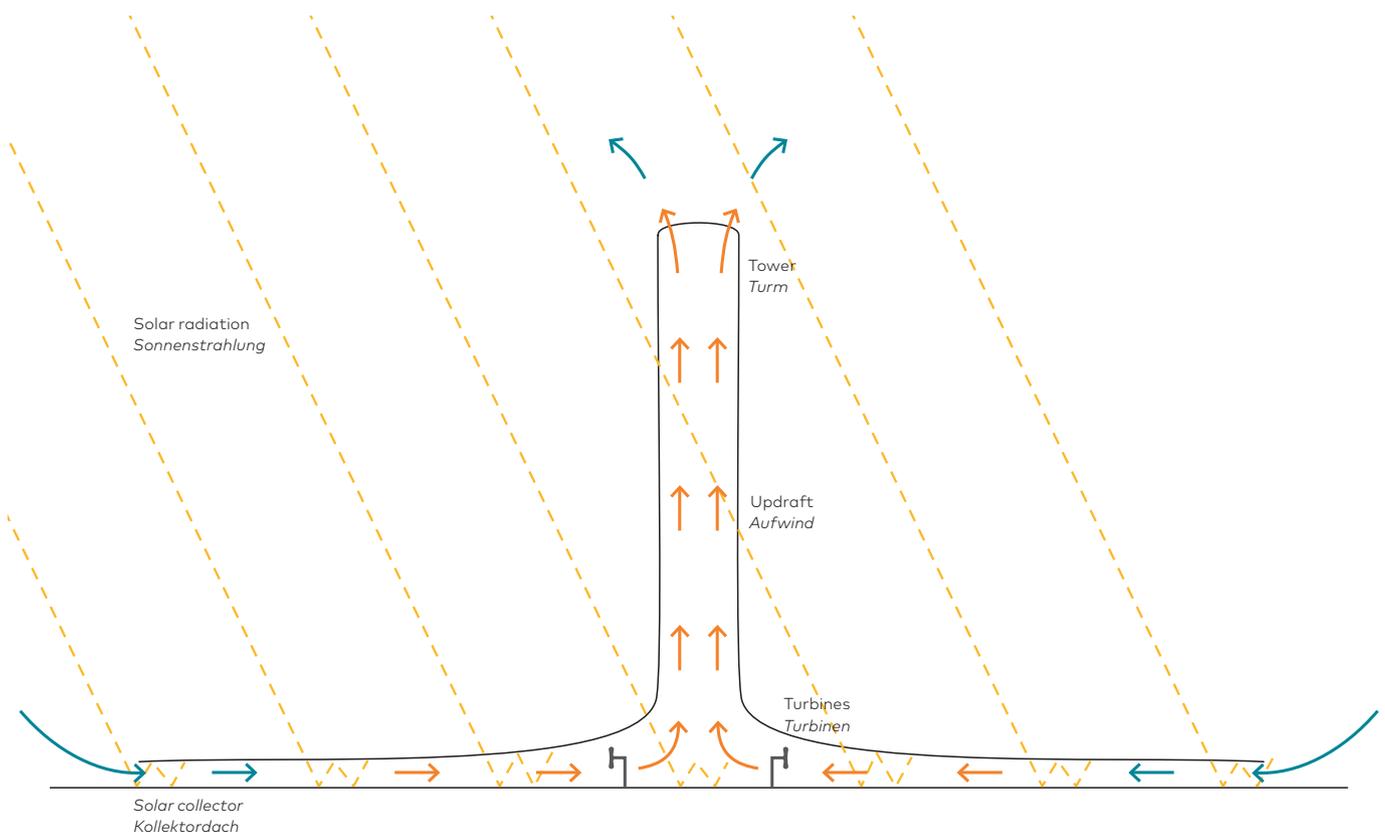


- a** Concentrator | Konzentrator
- b** Stirling support | Stirling-Tragwerk
- c** Stirling engine | Stirling-Einheit
- d** Elevation drive arch | Antrieb für die Elevationsachse
- e** Azimuth drive arch | Antrieb für die Azimutachse
- f** Foundation | Fundament
- g** Control cabinet | Schaltschrank
- h** Turntable | Drehstand
- i** Elevation bearing | Elevationslager

Finally, a coupled generator transforms the mechanical energy into electrical energy.

Solar updraft tower In the solar updraft tower, the three well-known elements, the greenhouse, the chimney and the turbine, are combined in a new way. The principle is shown in **Fig. 8**. Air is heated by solar radiation under a low transparent circular roof open at the periphery; this roof and the natural ground below it form a hot air collector. In the middle of the roof there is a vertical chimney with large air inlets at its base. The joint between the roof and the chimney base is airtight. As hot air is lighter than cold air, it rises up the chimney. Suction from the chimney then draws in more hot air from the collector, and cold air comes in from the outer perimeter. Through this mechanism, solar radiation creates a continuous updraft in the chimney. The energy contained in the air current is converted by the turbines installed at the base of the chimney.

Aufwindkraftwerk Beim Aufwindkraftwerk werden die drei bekannten Bauteile Treibhaus, Kamin und Turbine in neuartiger Weise kombiniert. Das Prinzip ist in **Abb. 8** dargestellt: Unter einem flachen, kreisförmigen, am Umfang offenen Glasdach, das zusammen mit dem darunter liegenden natürlichen Boden einen Warmluftkollektor bildet, wird Luft durch die Sonnenstrahlung erwärmt. In der Mitte des Daches steht eine Kaminröhre mit großen Zuluftöffnungen am Fuß. Das Dach ist luftdicht an den Kaminfuß angeschlossen. Da warme Luft eine geringere Dichte als kalte Luft hat, steigt sie im Kamin auf. Durch den Kaminzug wird gleichzeitig warme Luft aus dem Kollektor nachgesaugt und von außen strömt kalte Luft zu. So bewirkt die Sonnenstrahlung einen kontinuierlichen Aufwind im Kamin. Die in der Luftströmung enthaltene Energie wird mit Hilfe von Turbinen genutzt, die sich am Fuße des Kamins befinden.



10 Prospects

Ausblick

Undisputedly, solar energy is the only source of energy that will continue to be available in abundance in the future. For this reason, the switchover to solar energy is sensible in the medium term, and actually inevitable in the long term.

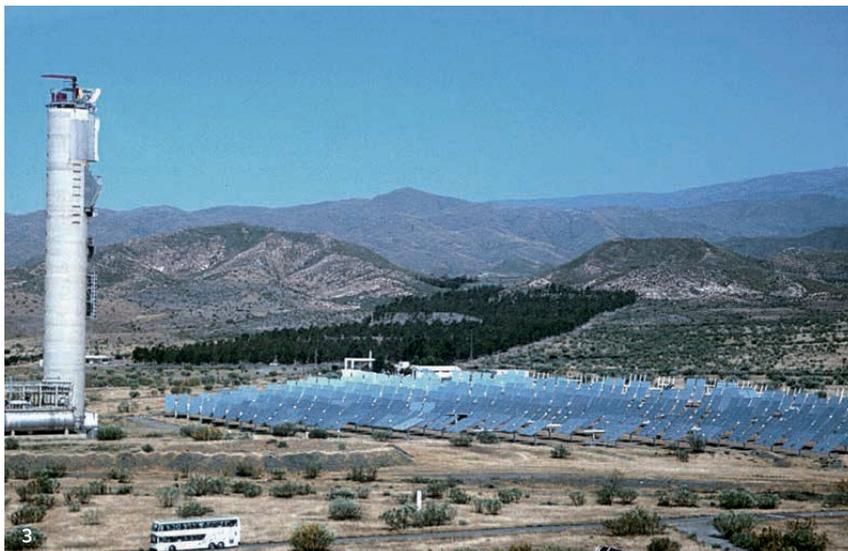
Over the past years, technical solutions to "harvest" solar energy have been promoted thanks to the help from supportive political framework conditions around the world. As a result, an ever-increasing number of technologies are available today. However, it should not be overlooked that solar energy supply fluctuates heavily from one location to another, over the course of the day and depending on the season, often barely correlating with demand. At present, this is not adequately taken into consideration when it comes to assessing the economics of solar plants.

Photovoltaics, the currently most common technology for solar power generation, already undercuts the power generation costs of some conventional power plants at favourable locations—though only at noon and in good weather conditions. Therefore, many of today's systems are no more than "fuel savers" which help reduce the consumption of fossil fuels, but are still incapable of reducing the necessary fossil power plant capacities. To ensure that solar energy becomes a full substitute in the future, solar systems with storage facilities will be required. These are already available today in the form of solar thermal power stations, but are currently being developed for photovoltaic facilities.

Solarenergie ist unumstritten die einzige auch in Zukunft im Überfluss vorhandene Energiequelle der Erde, weshalb der Trend zur solaren Energieversorgung mittelfristig richtig und langfristig sogar unabweichlich ist.

Technische Lösungen, das solare Angebot zu nutzen, wurden in den letzten Jahren durch weltweit geeignete politische Rahmenbedingungen gefördert, sodass heute glücklicherweise eine immer größer werdende Anzahl verschiedener Technologien zur Verfügung steht. Fakt ist auch, dass das solare Angebot örtlich sowie tages- und jahreszeitlich stark schwankt und dabei oft nur wenig mit der Nachfrage korreliert. Dieser Umstand wird derzeit bei der wirtschaftlichen Bewertung noch nicht ausreichend berücksichtigt.

Die heute am weitesten verbreitete Technologie zur solaren Stromerzeugung, die Photovoltaik, unterbietet an günstigen Standorten bereits jetzt die Stromgestehungskosten mancher konventioneller Kraftwerke – mittags bei gutem Wetter. Viele der heutigen Systeme sind nur sogenannte „Fuel Saver“, die zwar helfen, fossile Brennstoffe einzusparen, aber die nötigen Kapazitäten fossiler Kraftwerke nicht reduzieren. Damit Solarenergie ein vollwertiger Ersatz für unsere fossilen Energielieferanten werden kann, sind Solarsysteme mit Speichern erforderlich, wie sie in der Form von CSP-Kraftwerken schon heute zur Verfügung stehen und für PV-Anlagen aktuell entwickelt werden.



1-4 Solar thermal power plants—
An important integral element
of our future energy supply
*Solarthermische Kraftwerke –
Ein wichtiger Bestandteil unserer
zukünftigen Energieversorgung*

It will not be possible to cover the enormous energy requirements of the future with one single technology.

The first hybrid plants, combining photovoltaics and concentrating solar power (CSP) with storage facilities, are already under construction and are set to make up the majority of the market in the future.

Although CSP plants have traditionally shown low market penetration (making up worldwide currently just approx. 5 GW) and their complexity have meant they have only been financeable with feed-in tariffs, there are plants currently under construction which will have electricity generation costs way below €0.10/kWh and so will be able to compete directly with fossil fuels.

The reduction in electricity generation costs will be thanks to a combination of larger power plants and—more importantly—increased efficiency from technological progress (Fig. 5).

The downward trend in costs will also come about due to the switchover from fossil fuel plants, especially in China. This will result in Chinese power plant constructors will operate and cooperate both on the huge Chinese CSP market and also on the international market. As the financial framework for renewables is also likely to improve generally, we expect a doubling in CSP plant capacity by 2022.

In the medium term, we will probably look back on some of the work taking place today with some amusement. But what could be more exiting and stimulating for an engineer than the opportunity to reshape the future based on well thought-out current insights?

Der enorme zukünftige Energiebedarf kann nicht mittels einer einzelnen Technologie gedeckt werden.

Die ersten Hybridkraftwerke, die Photovoltaik und solarthermische Kraftwerke (CSP) mit Speichern kombinieren, sind derzeit im Bau und werden in Zukunft den größten Teil des Markts ausmachen.

Obwohl solarthermische Kraftwerke aufgrund der geringen Marktdurchdringung von derzeit weltweit nur ca. 5 GW und ihrer Komplexität bisher nur mit geförderten Einspeisetarifen finanzierbar waren, sind heute schon die ersten CSP-Kraftwerke im Bau, die Stromgestehungskosten von weit unter 10 Eurocent/kWh ermöglichen und somit direkt mit fossilen Kraftwerken konkurrieren.

Die Verringerung der Stromgestehungskosten wird durch größere Kraftwerke, aber vor allem durch technologischen Fortschritt mittels erhöhter Effizienz bei gleichzeitiger Kostenreduktion (Abb. 5) ermöglicht.

Der Kostenreduktionstrend wird auch durch den Ausstieg aus dem Bau fossiler Kraftwerke, vor allem in China, vorangetrieben. Dieser Ausstieg bewirkt, dass chinesische Kraftwerksbauer sowohl im großen chinesischen CSP-Markt als auch international agieren und kooperieren. Da gleichzeitig die finanziellen Randbedingungen für Erneuerbare Energien generell verbessert wurden, wird eine Verdoppelung der CSP-Kraftwerkskapazität bis 2022 erwartet.

Mittelfristig werden wir vielleicht über manche der heutigen Zukunftstechnologien schmunzeln. Aber was ist für den Ingenieur erquicklicher, als die Chance, die Zukunft mittels gut abgewägter Erkenntnisse neu zu gestalten?



Location | Ort

Plataforma Solar de Almería,
Spain

Plataforma Solar de Almería,
Spanien

Client | Bauherr

Stellio Consortium
(sbp sonne gmbh, Ingemetal
Solar, Masermic)

Completed | Fertigstellung

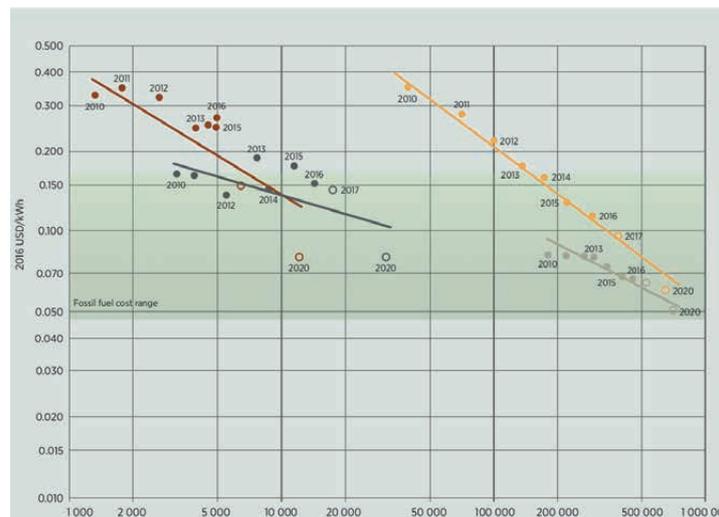
2007

Scope of our work conceptual
design, detail engineering,
checking

Unser Auftrag Entwurf,
Ausführungsplanung, Prüfung

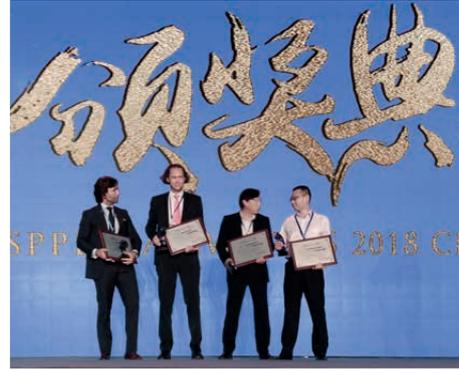
Cooperation |

Zusammenarbeit Ingemetal
Solar, Masermic



5 Source: IRENA Renewable Cost Database; IRENA Auctions Database; GWEC, 2017; WindEurope, 2017; MAKE Consulting, 2017; and SPE, 2017. Quelle: IRENA Renewable Cost Database; IRENA Auctions Database; GWEC, 2017; WindEurope, 2017; MAKE Consulting, 2017; and SPE, 2017.





schlaich bergemann partner, sbp sonne gmbh, 2019: Melanie Bagi, Markus Balz, Rudolf Bergemann, Evgeniya Borovleva, Martin Frank, Verena Göcke, Fabian Gross, Thomas Keck, Andreas Keil, Willem Landman, Dongyuan Liu, Ludwig Meese, Daniel Nieffer, Klaus-Jürgen Riffelmann, Nicholas Rumsey-Hill, Wolfgang Schiel, Jörg Schlaich, Vanessa Schönfelder, Axel Schweitzer, Gerhard Weinrebe, Minya Xu, Bernd Zwingmann

References

Quellenangaben

Chapter 1 | Kapitel 1

1 P. Moriarty, D. Honnery:

What is the global potential for renewable energy?,
Renewable and Sustainable
Energy Reviews 16 (2012) 244–252
Irena Renewable Energy Statistics 2018

Prof. em. Dr.-Ing., Drs. h. c. Jörg Schlaich:

„Neue und Erneuerbare Energiequellen“, Beton- und
Stahlbetonbau, April 1982 und Festschrift '75 Jahre
Deutscher Ausschuss für Stahlbeton

„Wieviel Wüste braucht ein Auto?“ Eigenverlag,
Festschrift Bulling, August 1989

„How much desert does a car need?“, IABSE Proceed-
ings P-144/90, May 1990

„Erneuerbare Energien nutzen“, Werner Verlag
Düsseldorf, April 1991 (mit Sibylle Schlaich)

„World energy demand, population explosion and
pollution“, The Structural Engineer, London, May 1991

Chapter 2 | Kapitel 2

1 „PV Leistung in Deutschland. SMA Solar Technology
AG“. [Online]. Available | Verfügbar unter: <http://www.sma.de/de/news-infos/pv-leistung-in-deutschland.html>. [Zugriff erfolgte am 24.06.2019].

2 J. Schlaich, R. Bergermann, W. Schiel, und
G. Weinrebe, „The Solar Updraft Tower – An Affordable
and Inexhaustible Global Source of Energy“.
Berlin: Bauwerk Verlag, 2004.

3 https://www.energy-charts.de/power_de.htm?source=all-sources&year=2018&week=32

Chapter 7 | Kapitel 7

1 G. Weinrebe, A. Haufe, und W. Schiel,
S. 79 © Thorsten Denk „Techno-economic Optimisation
Model for Parabolic Trough Collector Design“, in
Electricity, fuels and clean water from concentrated
solar energy, Perpignan, France, 2010, Bd. 1, S. 8.

2 P. Bendt, A. Rabl, H. W. Gaul, und K. A. Reed,
„Optical analysis and optimisation of line focus
solar collectors“, Solar Energy Research Institute,
Golden, CO (USA), SERI/TR-34-092, Sep. 1979.

3 <https://www.sbp.de/themenwelt/sbpray-for-heliostat-field-optimisation/>

4 G. Weinrebe, Z. Abul-Ella, und W. Schiel, „On the
Influence of Parabolic Trough Collector Stiffness and
Length on Performance“, in Concentrating Solar Power
and Chemical Energy Systems – SolarPACES 2011,
Granada, Spain, 2011.

Photographic Credits

Abbildungsnachweis

Cover | Titel

© Filmfabrik Schwaben

Chapter 1 | Kapitel 1

2 © Vanessa Schönfelder

Chapter 3 | Kapitel 3

1 © Infinia Corporation

Chapter 4 | Kapitel 4

1a+b © DLR

2 © Wacker Ingenieure, Birkenfeld

3a+b © *Ultimate Trough*®, *Flabeg/sbp*

Chapter 5 | Kapitel 5

3 top | oben © iStockphoto.com / Michiel de Boer

3 bottom | unten © iStockphoto.com / Tom Grundy

Chapter 6 | Kapitel 6

3 © Wacker Ingenieure

Chapter 8 | Kapitel 8

1, 3 © Gerhard Weinrebe

2d © Hywit Dimyadi/Shutterstock.com

2e © Roman Korotkov/Shutterstock.com

Chapter 9 | Kapitel 9

6a © Gerhard Weinrebe

6b © Filmfabrik Schwaben

Chapter 10 | Kapitel 10

1 © schlaich bergermann solar

2 © Gerhard Weinrebe

3 © Thorsten Denk

Appendix | Anhang

Bottom left | Unten links © Marcus Bredt

Grafics and pictures not marked with copyright
originate from schlaich bergermann partner
*Nicht genannte Abbildungen und Zeichnungen
stammen von schlaich bergermann partner*

Imprint***Impressum***

Publisher | *Herausgeber*

schlaich bergermann partner, sbp sonne gmbh

Authors | *Autoren*

Markus Balz, Thomas Keck,
Wolfgang Schiel, Gerhard Weinrebe

Additional Authors 2nd edition | *Ergänzende Autoren 2. Auflage*

Fabian Gross, Willem Landman, Bernd Zwingmann

Editors | *Redaktion und Lektorat*

Melanie Bagi, Johanna Niescken

Translation | *Übersetzung*

Übersetzungsnetzwerk Sarah Schneider, Berlin

Layout | *Gestaltung*

Sibylle Schlaich, Beatriz Rebbig
Moniteurs, Berlin

2nd edition © 2019, schlaich bergermann partner

2. Auflage © 2019, schlaich bergermann partner

www.sbp.de

For further information

Weiterführende Informationen

