

# Direkte Dampferzeugung in Parabolrinnen-Solarkraftwerken

von Olaf Goebel,  
Peter Geskes, Michael Geyer,  
Klaus Hennecke und  
Ulf Herrmann

## Überblick

Die direkte solare Dampferzeugung kann einen erheblichen Beitrag dazu liefern, die Stromgestehungskosten in Parabolrinnen Solarkraftwerken, der derzeit erfolgreichsten Technik zur solaren Stromerzeugung, weiter zu senken. In den vergangenen Jahren sind in Deutschland und Spanien verschiedene Projekte zu deren Erforschung durchgeführt worden. Aufbauend auf den dabei gewonnenen Erkenntnissen wird derzeit in Almería, Spanien eine Demonstrationsanlage für die solare Direktverdampfung errichtet.

Direct solar steam generation can contribute significantly towards decreasing the electricity generation cost in parabolic trough solar power plants, the most successful technology in solar electricity generation. Different projects have been conducted in Germany and Spain in recent years. Based on the experience gained in these projects, a demonstration plant for solar direct steam is now under construction in Almería, Spain.

etwa 30% höher als die Kosten bei rein fossiler Stromerzeugung (Bezug: deutscher Kraftwerksmix).

Im solaren Kraftwerksteil wird ein Thermalöl in Absorberrohren durch Parabolspiegel auf etwa 400°C erhitzt. Die solare Wärme wird über einen Wärmetauscher in den Wasserdampf-Kreislauf eines konventionellen Dampfkraftwerks eingekoppelt. [Abbildung 2](#) zeigt das Prinzipschaubild einer solchen Anlage. Ein erhebliches Potential, die Stromerzeugungskosten weiter zu senken und sich damit dem Bereich der Wirtschaftlichkeit weiter anzunähern, besteht darin, vom derzeit verwendeten Zweikreisystem mit Öl und Wasser als Wärmeträgern zu einem System überzugehen, in dem nur noch ein einziger Wärmeträger, und zwar Wasser, eingesetzt wird. Ein solches System, in dem in einem einzigen Prozessschritt mit konzentrierter Solarstrahlung Hochdruckdampf direkt erzeugt wird, bringt folgende Vorteile:

## 1. Einführung

Solarthermische Kraftwerke werden seit 10 Jahren in den USA zur Stromerzeugung kommerziell eingesetzt. Die gesamte installierte elektrische Leistung ist 354 MW<sub>el</sub> und entspricht damit der Versorgungsleistung einer deutschen Großstadt (Stuttgart). [Abbildung 1](#) zeigt einen 30 MW Block in Kramer Junction, Kalifornien.

Die bis zu einer Leistung von 80 MW gebauten Kraftwerksblöcke arbeiten im solar-fossilen Hybridbetrieb, so daß elektrische Leistung auch bei verringerter Solarstrahlung bereitgestellt werden kann. Die Anlagen erwirtschaften den Großteil der Erlöse durch Spitzenlastdeckung im Sommer. Die Erlöse beruhen nur zu etwa einem Viertel auf der fossilen Gaszusatzfeuerung.

Die Anlagen arbeiten heute, nach Überwindung der technischen Anfangsschwierigkeiten, im Routinebetrieb und sind technisch laufend verbessert worden. Durch Weiterentwicklung von Einzelkomponenten im solaren und fossilen Kraftwerksteil und durch Entwicklung von effizienten Betriebsstrategien ist es gelungen, die Stromerzeugungskosten deutlich zu senken. Diese liegen heute bei etwa 0,1 US-\$/kWh und sind damit nur

- Verringerung des Anlagenaufwandes durch Wegfall sämtlicher mit dem Ölkreislauf zusammenhängender Komponenten wie Wärmetauscher, Ölspeicher und Umwälzpumpen;
- Steigerung der oberen Prozeßtemperatur durch Wegfall des nur bis 400°C verwendbaren Thermoöls;
- Verringerung des Eigenleistungsbedarfs durch Wegfall der Ölumwälzung;
- Keine Grundwasserunreinigung im Falle von Öllecks.

## 2. Vorteile der Direktverdampfung

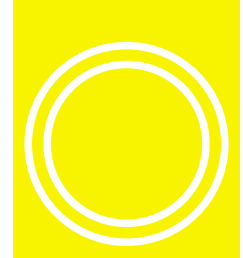
Anhebung der bisher durch das Thermoöl begrenzten Prozeßtemperatur und damit des Prozeßwirkungsgrads.

Um diese Vorteile der solaren Direktverdampfung in einem realen System auszunutzen, haben Mitglieder des FORSCHUNGSVERBUND SONNENENERGIE zusammen mit Industriefirmen und europäischen Forschungsinstitutionen Forschungs- und Entwicklungsprojekte initiiert, in denen die technische Umsetzung der Vorteile im prototypischen Maßstab realisiert werden soll.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Die Projekte werden vom BMBF und der EU gefördert.

Dipl.-Ing. Olaf Goebel ist Fachgruppenleiter und Dipl.-Ing. Peter Geskes ist wissenschaftlicher Mitarbeiter im Institut für Technische Thermodynamik in Stuttgart, und Dipl.-Ing. Klaus Hennecke ist wissenschaftlicher Mitarbeiter der Hauptabteilung Energietechnik in Köln der Deutschen Forschungsanstalt für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR).

Dipl.-Ing. Ulf Herrmann ist wissenschaftlicher Mitarbeiter im Geschäftsbereich Solarthermische Energietechnik im Zentrum für Solarenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW), Stuttgart



Im Zentrum steht dabei das europäische Großprojekt DISS, in dem auf dem europäischen solaren Testzentrum in Almería (Spanien) eine 3,5 MW Versuchsanlage errichtet wird. Ziel des Projektes ist es, die konstruktiven und betriebstechnischen Grundlagen zu erarbeiten, mit denen die solare Direktverdampfung in Parabolrinnen in die Praxis eingeführt werden kann.

Das Projekt DISS baut auf den Ergebnissen von verschiedenen, in den letzten Jahren durchgeführten Projekten auf. In diesen Projekten wurden Fragestellungen der Zwei-Phasenströmung in horizontalen Verdampferrohren behandelt, eine Problematik, die in der konventionellen Verdampfertechnik nicht vorhanden ist und daher neue Untersuchungen und Lösungen erforderlich machte.

Die Projekte werden mit Förderung durch das BMBF und die EU durchgeführt. Über Ergebnisse und Stand wird im folgenden berichtet.

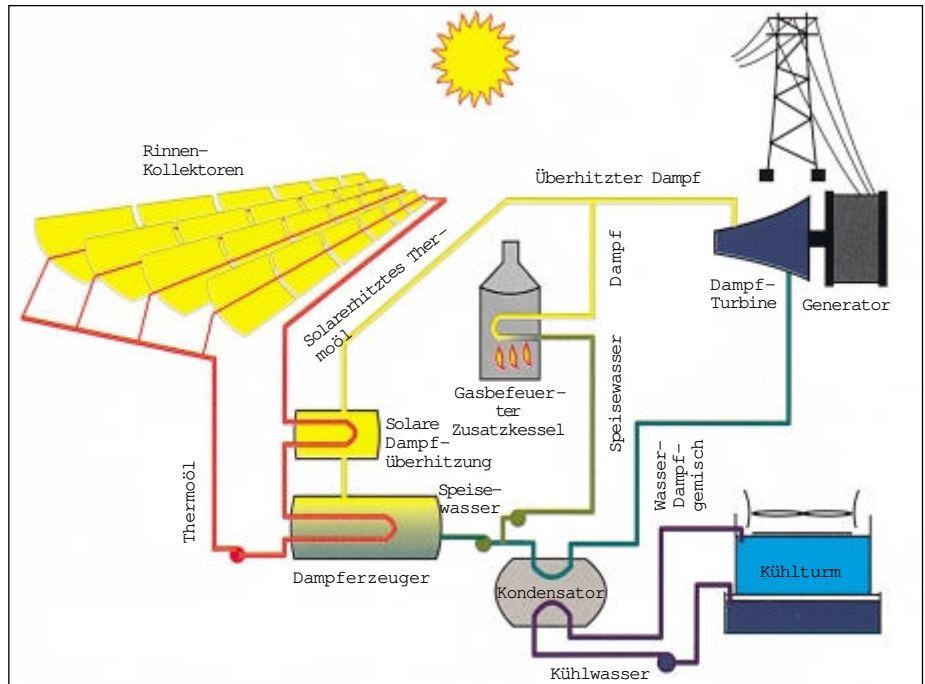
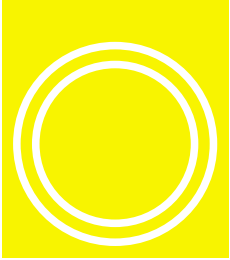


Abbildung 2: Schematischer Aufbau eines SEGS Parabolrinnen-Solkraftwerkes

Abbildung 1: Ein 30 MW Block der Parabolrinnen-Solkraftwerke in Kramer Junction, Kalifornien





### 3. Konzepte der Direktverdampfung

Ebenso wie bei konventionell, fossil beheizten Dampferzeugern sind auch bei der solaren Dampferzeugung in Parabolrinnenkollektoren unterschiedliche Betriebsweisen möglich. Die Schaltbilder dieser Betriebsweisen sind in den [Abbildung 3 bis 5](#) dargestellt.

Beim Zwangsumlauf wird dem Absorberrohr mehr Wasser zugeführt, als durch die Solarstrahlung verdampft wird. Am Ende der Verdampferstrecke wird der Dampf in einem Separator getrennt und in den Überhitzer geleitet, das übrige Wasser wird mit einer Rezirkulationspumpe unter Beimischung von „frischem“ Wasser aus dem Vorwärmer in den Verdampfer zurückgeführt.

Der Zwangsumlauf ist grundsätzlich eine sehr robuste Betriebsweise und gewährleistet einen guten Wärmeübergang. Nachteilig ist der Eigenenergieverbrauch durch die Umwälzpumpe und die im Vergleich zu den anderen Betriebsweisen größere Neigung zur potentiell schädigenden Schwall- und Pfropfenströmung.

Diese Nachteile werden bei den beiden anderen Betriebsweisen vermieden, es sind dies das Durchlauf- und das Einspritzkonzept. In beiden Fällen wird dem Absorberrohr nur soviel Wasser zugeführt, wie solar verdampft werden kann. Dadurch entfällt die Wassermwälzpumpe. Aufgrund des viel geringeren Wassergehalts werden Schwall- und Pfropfenströmungen weitgehend vermieden. Beim Durchlaufkonzept wird dem Absorberrohr (typische Länge 500 m) die gesamte zu verdampfende Wassermenge am Anfang zugeführt. Beim Einspritzkonzept wird das Wasser abschnittsweise eingespritzt, um lokale und zeitliche Einstrahlungsschwankungen besser ausregeln zu können.

### 4. Thermodynamik der Direktverdampfung – Projekt GUDE

#### 4.1 Übersicht

Zur Realisierung der direkten solaren Verdampfung sind grundlegende Arbeiten zur Thermodynamik Wasser-Dampf-Gemischen in horizontalen Rohren erforderlich. Im Vergleich zu

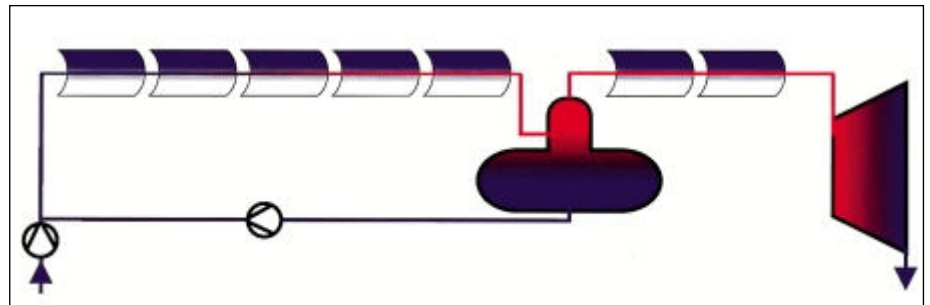


Abbildung 3: Direktverdampfung: Zwangsumlauf- oder Rezirkulationskonzept

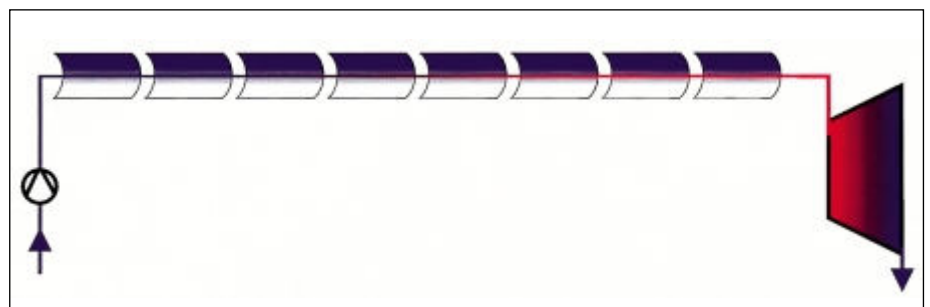


Abbildung 4: Direktverdampfung: Durchlaufkonzept

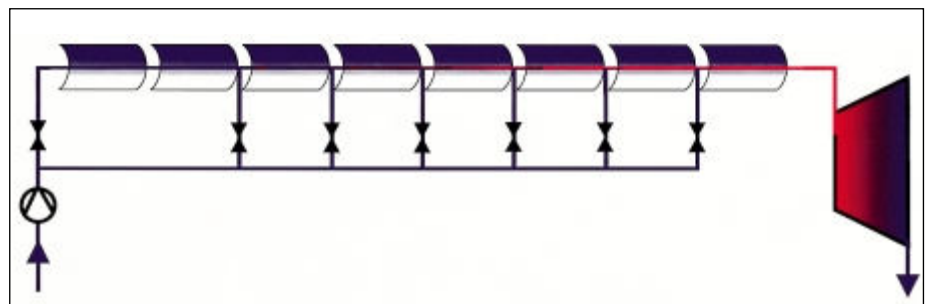


Abbildung 5: Direktverdampfung: Einspritzkonzept

konventionellen Dampferzeugern liegen wegen des großen Absorberrohrdurchmessers, geringer Massenstromdichte und azimuthal stark unterschiedlicher Wärme flußdichte ganz andere Bedingungen vor, die für belastbare Auslegungsg Grundlagen experimentelle und theoretische Arbeiten erforderlich machen. Dies ist die Voraussetzung dafür, daß die Absorberrohrkonstruktion und die Betriebsführung so gestaltet werden können, daß nur Strömungsformen mit sehr guter solarer Wärmeübertragung an das Wasser auftreten und betriebsgefährdende Zustände wie Druckstöße und hohe thermomechanische Spannungen vermieden werden.

In Deutschland sind seit 1992 zahlreiche Versuche zur Direktverdampfung durchgeführt worden. Das umfangreichste Projekt war das Projekt GUDE (Grundlegende Untersuchungen zur

Direktverdampfung nach dem Einspritzkonzept), das von März 1993 bis März 1996 durchgeführt wurde<sup>2</sup>. Die Experimente fanden an drei verschiedenen Versuchsanlagen statt:

- Benson Versuchsstrecke (BVS) bei Siemens KWU [1] mit einer Länge von 30 m und Absorberrohrdurchmesser von 50, 65 und 85 mm. Die Instrumentierung war sehr groß und umfaßte 192 Kanäle für Temperaturen, Drücke und Überwachung. Zur Messung der Fluidtemperaturen und des Staudruckes dienten Meßharfen ([Abbildung 7](#)). Die solare Beheizung wurde durch elektrische Beheizung nachgebildet, die Morgen- und Abendstellung durch seitliche Behei-

<sup>2</sup> Partner in diesem vom BMBF geförderten Projekt waren DLR, Siemens KWU, TU München und das ZSW

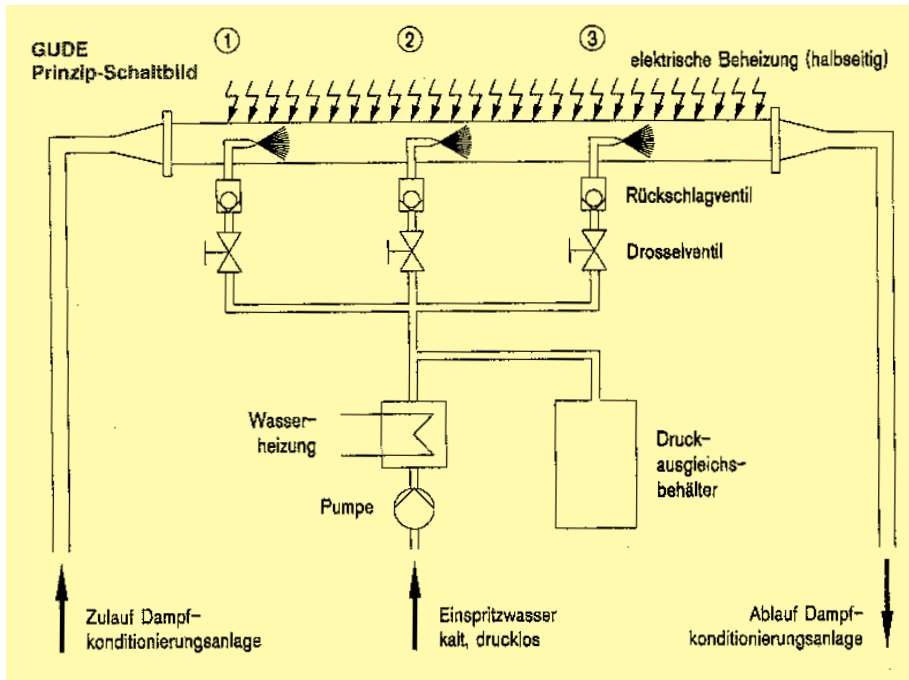
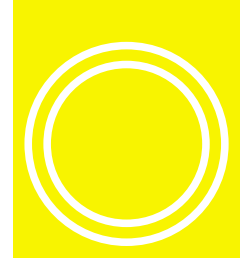


Abbildung 6: Prinzipschaltbild der GUDE Teststrecken an der Benson Versuchsstrecke bei Siemens KWU

zung, die Mittagsposition durch Beheizung von unten. Dampf konnte mit einer Leistung bis zu 1.300 kW in die solare Teststrecke eingespeist werden (Abbildung 6). Diese Leistung wird im Solarbetrieb durch ein 400 m langes Absorberrohr erzeugt.

- HIPRESS Versuchsanlage beim ZSW [2] mit einer 8–10 m lange Versuchsstrecke, die je nach Rohrdurchmes-

ser mit einem Wasser/Dampfemisch mit beliebig einstellbarem Dampfgehalt bei maximal 160 bar und einer Dampfleistung bis zu 200 kW versorgt werden kann. Die Wärmestromverteilung, wie sie durch einen realen Kollektorspiegel bei beliebiger Tagesstellung entsteht, wird durch elektrische Beheizung simuliert. Gemessen wurde die

Abbildung 7: Meßharfe der GUDE Teststrecke an der Benson Versuchsstrecke mit Thermoelementen und Pitotröhrchen

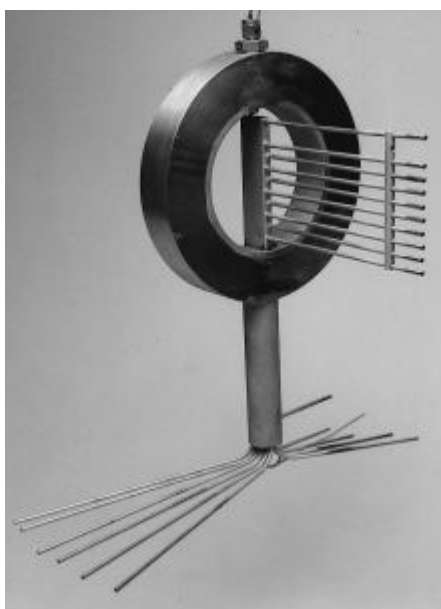
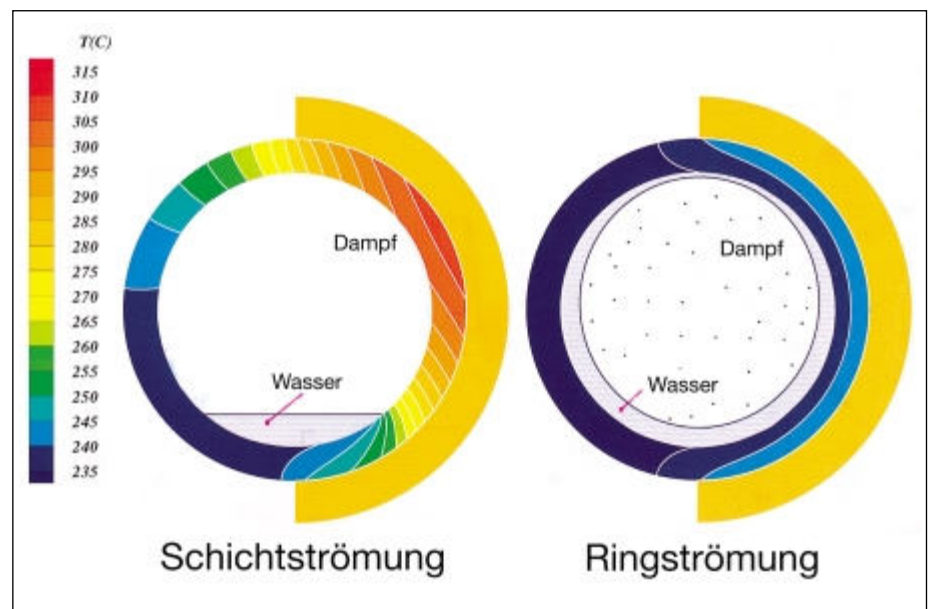


Abbildung 8: Die Strömungsformen Schicht- und Ringströmung mit den für sie charakteristischen Rohrwandtemperaturverteilungen



Rohrwandtemperatur; die Phasenverteilung wurde mit einer radiometrischen Dichtemeßanlage (RADIME) in Verbindung mit einem Mustererkennungsverfahren visualisiert.

- Versuchsstand des Lehrstuhls A für Thermodynamik an der TU München [3], der die Beobachtung von Siedephänomenen bereits bei niedrigen Temperaturen und Drücken durch die Verwendung eines Kältemittels als Fluid ermöglichte.

#### 4.2 Ergebnisse

##### Strömungsformen

Von zentraler Bedeutung ist es, die sich bei gegebener Einstrahlung und Massenstromdichte einstellende Strömungsform des Zwei-Phasengemisches Wasser-Dampf zu kennen. Die Versuche haben es ermöglicht, die Bedingungen zu bestimmen, unter denen die bei kleiner Dampfgeschwindigkeit herrschende geschichtete Strömung in die bei großer Dampfgeschwindigkeit auftretende Ringströmung übergeht, die wegen ihres guten Wärmeübergangs angestrebt wird.

Abbildung 8 zeigt als Beispiel die beiden Strömungsformen mit den für sie typischen Temperaturprofilen in der Rohrwand bei seitlicher Beheizung. In Tabelle 1 sind die Umschlagpunkte von

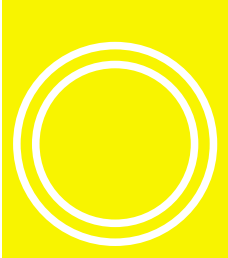


Tabelle 1: Umschlagspunkte (Massenstromdichte) zwischen Schicht- und Ringströmung für verschiedene Drücke mit unterer und seitlicher Beheizung ( $\dot{q}$ )

	$\dot{q} = 56 \text{ kW/m}^2$ unten	$\dot{q} = 56 \text{ kW/m}^2$ seitlich
30 bar	75 kg/m <sup>2</sup> s	175 kg/m <sup>2</sup> s
60 bar	125 kg/m <sup>2</sup> s	290 kg/m <sup>2</sup> s
100 bar	225 kg/m <sup>2</sup> s	525 kg/m <sup>2</sup> s

der Schicht- in die Ringströmung für verschiedene Drücke und Beheizungen aufgeführt. Man sieht, daß der Umschlag ganz erheblich von der Beheizung abhängt, in der späteren Praxis also von der Stärke und dem Einfallswinkel der Solarstrahlung. Das liegt daran, daß mit stärker werdender Beheizung die Absorberwand immer heißer wird, so daß sich die für die Ringströmung erforderliche Wasserbenetzung der Innenwand aufgrund stärker werdender Wasserverdampfung immer schlechter ausbilden kann.

Bei geschichteter Strömung treten in einem Rohrquerschnitt starke azimuthale Temperaturgradienten auf, da die Dampfphase einen wesentlich schlechteren Wärmeübergang (bis zu einem Faktor 20) aufweist als die flüssige. In der Dampfphase verteilte Flüssigkeitströpfchen (Entrainment) und die tangentielle Wärmeleitung wirken dem zwar entgegen, nicht tolerierbare Temperaturdifferenzen können jedoch bei geringen Dampfmassenstromdichten immer noch auftreten. Überschreitet die azimuthale Temperaturdifferenz ca. 60-80 K (abhängig von Rohrwandstärke und -werkstoff), so ist mit einer Schädigung des Rohrwandmaterials aufgrund zu hoher Thermospannungen zu rechnen.

Sind die Benetzungsgrenzen und die Wärmeübergangskoeffizienten für einen Rohrquerschnitt bekannt, kann mit einem Finite Differenzen Verfahren die Wärmeverteilung in einem Rohrquerschnitt berechnet werden (siehe Abbildung 8). Tabelle 2 zeigt auf diese Weise minimal erforderliche Dampfmassenstromdichten, um vorgegebene azimuthale Temperaturdifferenzen nicht zu überschreiten. Der Düsenabstand spielt eine Rolle, weil mit wachsendem Abstand von der letzten Einspritzdüse die Dampfüberhitzung und

Tabelle 2: Minimal erforderliche Massenstromdichten (MSD) für einen maximalen azimuthalen Temperaturgradienten von 50 K bei DN 50 und einem Düsenabstand von 30 m

Druck	MSD erforderlich	Rohrlänge
30 bar	120 kg/m <sup>2</sup> s	126 kg/m <sup>2</sup> s
60 bar	160 kg/m <sup>2</sup> s	147 kg/m <sup>2</sup> s
100 bar	200 kg/m <sup>2</sup> s	154 kg/m <sup>2</sup> s

damit auch die azimuthale Temperaturdifferenz wächst. Die dritte Spalte in Tabelle 2 zeigt die Absorberrohrlänge, bei der die betreffenden Dampfmassenstromdichten erreicht werden.

Die Bestimmung der minimalen Massenströme ist ein weiteres zentrales Resultat des Projektes GUDE. Unterhalb der ermittelten minimalen Dampfmassenstromdichten muß der Wärmeübergang durch geeignete zusätzliche Maßnahmen zur Vermeidung einer Schichtströmung verbessert werden. Dazu dienen die im folgenden beschriebenen Versuche.

Maßnahmen zur Vermeidung von Schichtströmung

#### Einbaukörper

Beim Einspritzkonzept treten im Anfangsbereich des Dampferzeugers sehr geringe Massenströme auf. Die Strömung liegt dann generell geschichtet

Abbildung 10: Rohrwandtemperaturverteilung für einen Versuchspunkt mit und ohne Einbaukörper ( $\dot{m}_A = 57 \text{ kg/m}^2\text{s}$ ,  $p = 30 \text{ bar}$ ,  $\dot{q} = 56 \text{ kW/m}^2$  seitlich)

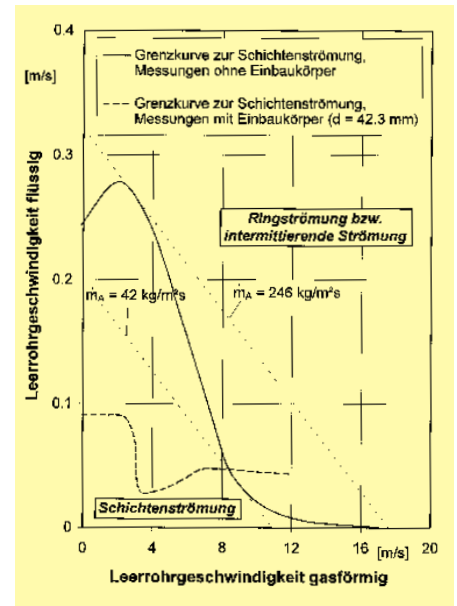
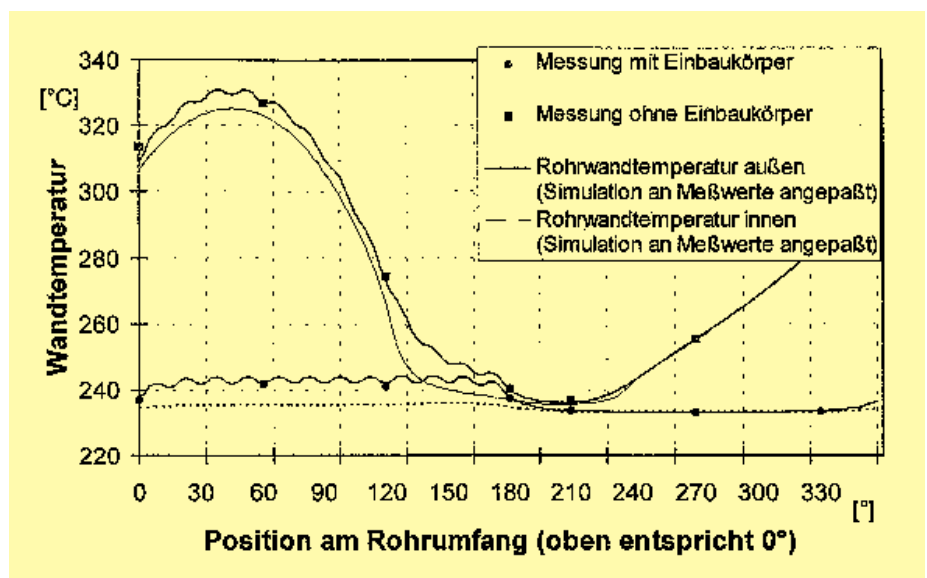
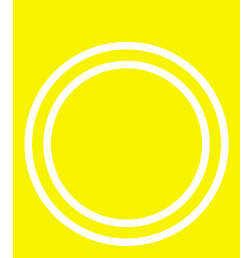


Abbildung 9: Gemessene Grenzkurve zur Schichtströmung mit und ohne Einbaukörper für ein horizontales Rohr mit  $d_i = 49.3 \text{ mm}$ ,  $p = 30 \text{ bar}$  und  $\dot{q} = 56 \text{ kW/m}^2$  seitlicher Beheizung. Der Einbaukörper nimmt 74% des Rohrquerschnitts ein.

vor. Werden Verdrängungskörper in den Strömungsquerschnitt eingeführt, erhöht sich die Strömungsgeschwindigkeit wegen des reduzierten Querschnitts. Die Ausbildung einer Ringströmung wird dadurch gefördert.

In Abbildung 9 sind die an einem Absorberrohr mit und ohne Einbaukörper ermittelten Grenzkurven zur Schicht-



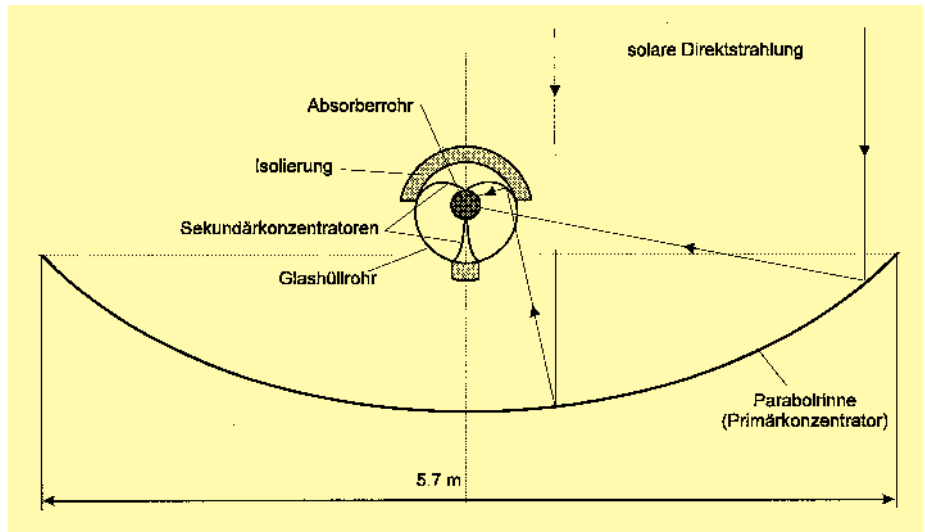
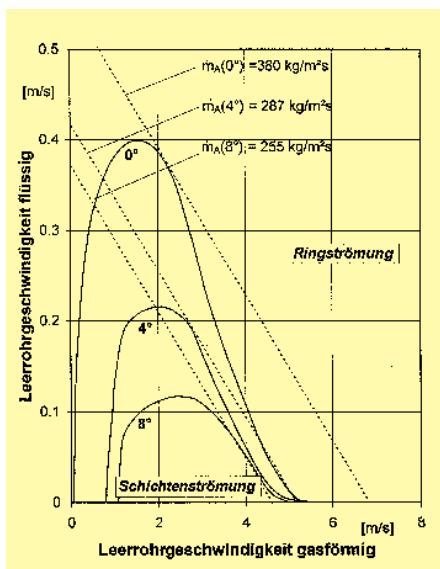
tenströmung dargestellt. Der Einbaukörper nimmt ca. 74% der Querschnittsfläche ein. Es zeigte sich eine deutliche Reduzierung des Schichtengebietes. Den Temperaturverlauf über den Umfang an einem Meßquerschnitt zeigt **Abbildung 10** für jeweils einen Versuchspunkt mit und ohne Einbaukörper. Deutlich ist eine Vergleichmäßigung der Temperaturverteilung durch Ringströmung zu erkennen. Während bei dem Versuch ohne Einbaukörper, bei dem Schichtenströmung vorliegt, die Temperaturdifferenz über dem Umfang ca. 95 K beträgt, ist sie bei Ringströmung nur noch ca. 10 K.

Das Einspritzkonzept ist nach diesen Versuchen also auch bei kleinen Massenströmen mit gutem Wärmeübergang realisierbar. Von Nachteil ist allerdings die Erhöhung des Druckverlustes.

Rohrneigung

Theoretische Studien [4] haben ergeben, daß eine leichte Neigung des Rohres den Parameterbereich, in dem Schichtenströmung auftritt, erheblich verkleinert. Experimente an der HI-PRESS, die mit einer im Neigungswinkel variablen Versuchsstrecke ausgerüstet ist, haben den erwarteten Einfluß bestätigt. **Abbildung 11** zeigt, daß be-

*Abbildung 11: Gemessene Grenzkurve zur Schichtenströmung für verschiedene Neigungswinkel des Absorberrohres mit  $d_i = 23.4 \text{ mm}$ , bei  $p = 100 \text{ bar}$  und einer rundum gleichmäßigen Beheizung mit  $\dot{q} = 30 \text{ kW/m}^2$*



*Abbildung 12: Parabolrinne mit Sekundärkonzentrator für die solare Direktverdampfung (nicht maßstäblich)*

reits durch eine Rohrneigung von 4° das Gebiet der Schichtenströmung erheblich reduziert wird. Die Massenstromdichte, die benötigt wird, um Schichtenströmung über den gesamten Verdampfungsvorgang zu vermeiden, verringert sich um ca. 25%. Die Anzahl der zur Verdampfung notwendigen Kollektoren verringert sich demnach um den selben Faktor. Die verkürzte Länge und die geringere Massenstromdichte tragen beide zu einer Verkleinerung des Druckverlustes bei Strömung bei und damit zu einer Reduzierung des Stromeigenverbrauchs der Umwälzpumpe. Eine weitere Vergrößerung des Neigungswinkels auf 8° bringt nur noch geringe Verbesserungen. Zusätzlich zu der Verbesserung der Strömungsbedingungen werden durch die Neigung der Kollektoren die Cosinusverluste reduziert, was zu einer weiteren Steigerung des Wirkungsgrads beiträgt.

Sekundärkonzentrator

Mit Hilfe eines Sekundärkonzentrators (**Abbildung 12**) wird eine Vergleichmäßigung des Einstrahlungsprofils in Umfangsrichtung erreicht. Dadurch können die thermomechanischen Belastungen der Rohrwand reduziert werden. Um dies experimentell zu überprüfen, wurden thermohydraulische Vorteile eines Sekundärkonzentrators untersucht, der bei der spanischen CIEMAT im Rahmen des EU-Projektes ARDISS [5] weiterentwickelt worden war. Die Untersuchungen haben die Vorteile bestätigt.

Sie zeigten darüber hinaus einen weiteren positiven Effekt, der durch die beim Einsatz eines Sekundärkonzentrators bedingte Verringerung des Absorberrohrdurchmessers verursacht wird: Bereits bei wesentlich kleineren Strömungsgeschwindigkeiten, verglichen mit einem größeren Rohr, wird eine voll ausgebildete Ringströmung erreicht. In Verbindung mit der Ringströmung sorgt die gleichmäßigere Einstrahlungsverteilung des Sekundärkonzentrators für sehr geringe Temperaturunterschiede über den Rohrquerschnitt und damit zu einer geringeren Rohrwandbelastung.

Sekundärkonzentratoren wurden in erster Linie für das Durchlaufkonzept entwickelt, dies ist mit einem Sekundärkonzentrator auch in horizontalen Kollektoren sicher durchführbar. Der praktische Einsatz eines Sekundärkonzentrators wird davon abhängen, ob sich dessen Zusatzkosten durch verringerte Betriebskosten und eventuell bessere Ausbeute rentieren.

5. Großversuchsanlage DISS in Almería

Im Rahmen des Projektes DISS (**D**irect **S**olar **S**tream)<sup>3</sup> wird auf der PSA (Plata-

<sup>3</sup> Das Projekt wird von der EU und dem BMBF gefördert; im Projekt arbeiten zusammen: DLR, ZSW, CIEMAT, Pilkington Solar, Siemens KWU, University of Manchester und eine Reihe spanischer Firmen und Energieversorger.

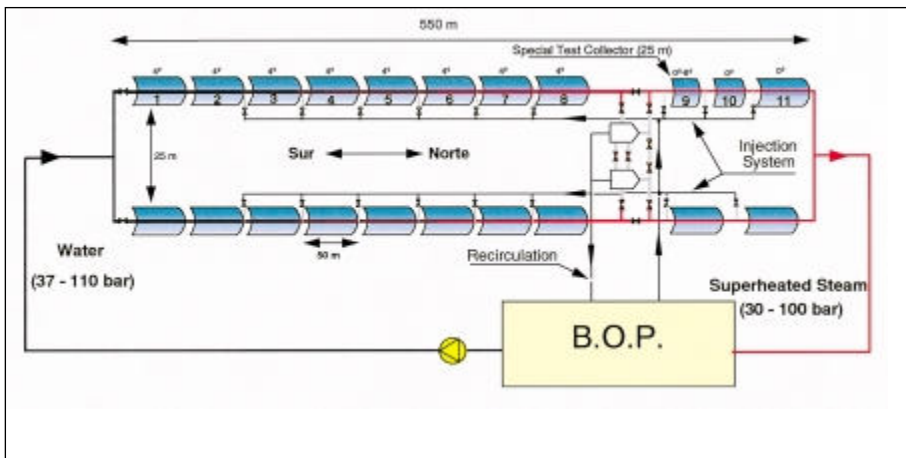
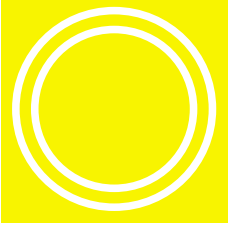


Abbildung 13: Schaltbild der DISS - Versuchsanlage in Almería. B.O.P. (balance of plant): Speisewasserversorgung, Pumpen, Kühlanlagen (Kondensator) für Dampf

forma Solar de Almería) eine Versuchsanlage aufgebaut (Abbildung 13), mit der das Verhalten von zwei kompletten Kollektorstränge mit je 500 m Länge untersucht werden kann. Nachdem auf den Versuchsanlagen die thermohydraulischen Vorgänge in den Absorberrohren untersucht und verstanden worden sind, soll mit der Anlage auf der PSA die Funktionstüchtigkeit der Direktverdampfung unter realen Bedingungen nachgewiesen werden. Konstruktion und Betriebstechnik sollen so weit entwickelt werden, daß die Direktverdampfung in Parabolrinnen in die Praxis eingeführt werden kann.

Da die bisher durchgeführten Versuche unter kontrollierbaren Bedingungen stattfanden (elektrische statt solare Beheizung), konnte der einzuspeisende Wassermassenstrom extern berechnet und eingestellt werden. In der DISS-Anlage wird der durch die Solarstrahlung verursachte Wärmestrom eine variable Größe sein, und die Anlagenregelung wird den Speisewassermassenstrom automatisch anpassen müssen. Die Anforderungen an die Regelung sind hoch, da bereits eine Überhitzung von weniger als einer Minute das Absorberrohr erheblich schädigen kann.

Um die für DISS vorgesehenen Regelkonzepte zu testen, werden im Rahmen des ebenfalls vom BMBF geförderten Projektes PRODISS Versuche in der ersten Jahreshälfte 1997 an der BVS bei Siemens KWU durch die DLR durchgeführt.

## 6. Zusammenfassung

Der zehnjährige kommerzielle Betrieb solarthermischer Kraftwerke hat die dazu eingesetzte Parabolrinnentechnik als zuverlässige und technisch etablierte Kraftwerkstechnologie ausgewiesen.

Der künftige Einsatz der Direktverdampfung anstelle des derzeitigen Zweikreisystems Öl/Wasser gibt die Möglichkeit, durch Senkung der Anlagen- und Betriebskosten sich dem Bereich der Wirtschaftlichkeit weiter zu nähern.

Die wissenschaftlichen und technischen Grundlagen für die praktische Realisierung der Direktverdampfung sind in mehreren Projekten erarbeitet worden. Eine breite Wissensbasis zur Thermohydraulik in horizontalen Rohren ist heute vorhanden.

Es konnte experimentell gezeigt werden, daß Probleme durch inhomogene, den Betrieb gefährdenden Zweiphasenströmungen mit dem Einsatz des Durchlauf- und Einspritzkonzeptes vermieden werden können, bei diesen Konzepten treten schädliche Schwall- und Pfropfenströmungen nicht auf.

Aufgrund der inhomogenen Erwärmung durch die Solarstrahlung und der bei Vorliegen einer Schichtströmung lokal stark variierenden Wärmeabfuhr können im Absorberrohr erhebliche Temperaturdifferenzen auftreten. Es konnten als wichtiges Resultat die minimal erforderlichen Dampfmassestromdichten ermittelt werden,

mit denen schädliche Thermospannungen vermieden werden können. Für den kritischen Bereich kleiner Massenströme wurden Maßnahmen zur Verbesserung des Wärmeübergangs identifiziert. Es sind dies der Aufbau der Absorberrohre mit geringfügiger Neigung und der Einsatz von Verdrängungskörpern innerhalb des Anfangsteils eines Absorberrohres.

Der Einsatz von Sekundärkonzentratoren ist bei allen Direktverdampfungskonzepten vorteilhaft, resultiert jedoch in einer höheren Komplexität und höheren Investitionskosten.

Diese Ergebnisse bildeten eine wesentliche Auslegunggrundlage für die 3,5 MW Versuchsanlage, die als nächster Schritt zur Realisierung der Direktverdampfung in Almería, Spanien als europäisches Großprojekt (DISS) errichtet wird. Wesentliche Aufgabe ist dabei die Entwicklung eines Meß- und Regelungssystems, mit dem erstmals die Hochdruckdirektverdampfung im Solarbetrieb und unter praxisnahen Bedingungen sicher und effizient demonstriert werden kann. Ziel ist es, die konstruktiven und betriebstechnischen Grundlagen zu gewinnen, mit denen die Direktverdampfung in den praktischen Betrieb eingeführt werden kann.

## Literatur

1. D. Hein, H. Keil, W. Köhler  
„The Benson Test Rig“ VGB Kraftwerkstechnik 57 (1977) 369-374
2. M. Müller, D. Hunold  
„Hochdruck – Wasser/Dampf – Versuchsanlage für Experimente mit Zweiphasenströmungen“, BWK 47, 6 (1995) 269-275
3. K. Laufs  
„Experimental Investigation of Thermo- and Fluid Dynamics in a Horizontal Evaporator Tube with Injection“, Proc. 9th Intl. Symp. on Transport Phenomena in Thermofluid Engineering, Singapur (1996) 1323
4. Y. Taitel  
„A Model for Predicting Flow Regime Transition in Horizontal and Near Horizontal Gas-Liquid Flow“, J. of the AIChE 22,1 (1976) 47-55
5. J. Ajona, U. Herrmann, F. Sperduto, J. Farhina Mendes  
Final Report of the ARDISS Project, EU Contract NO. J0U2-CT94-0311, in Vorbereitung