

NARVA Lichtquellen GmbH + Co. KG

**Entwicklung einer hocheffektiven und flexiblen
Technologie zur Herstellung von Heatpipe-
Vakuurröhren-Kollektoren für die Massenproduktion**

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt
Gefördert unter dem Az: 27218 von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Dr.-Ing. Gerhard Mientkewitz & Dr.-Ing. Wilfried Schaffrath

Brand-Erbisdorf,

März 2010

Projektkennblatt
der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt



Az	27218	Referat	24/2	Fördersumme	125.000,00
Antragstitel	Entwicklung einer hocheffektiven und flexiblen Technologie zur Herstellung von Heatpipe-Vakuumröhrenkollektoren für die Massenproduktion				
Stichworte	Vakuumabsorberrohr, Heatpipe, Kosten, Rationalisierung				
Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)		
01.10.09-01.10.10	01.10.09	01.10.10	1		
Zwischenberichte	11.06.2010	12.08.2010			
Bewilligungsempfänger	NARVA Lichtquelle GmbH + Co. KG			Tel	03732217200
	Erzstraße 22			Fax	03732217203
	09618 Brand-Erbisdorf			Projektleitung	
				Dr. Mientkewitz	
				Bearbeiter	
				Sebastian Hesse	
Kooperationspartner	Fa. Akotec Fa. S-Power				

Zielsetzung und Anlaß des Vorhabens

Solarwärme ist eine der günstigsten Möglichkeiten, die Umwelt von Kohlendioxidemissionen zu entlasten. Dies betrifft sowohl die Größe des nutzbaren Potentials - 47% der Primärenergie werden für Wärmeerzeugung im entsprechenden Temperaturbereich eingesetzt- als auch von der Effektivität und Kostensituation. Derzeitig liegen die Kosten der Energieerzeugung bei der Solarthermie nur noch 10-15 % über den Kosten fossiler Energieträger. NARVA hat ein hocheffektives Vakuumrohr entwickelt und produziert dies in Massenproduktion, wobei solche Kollektorrohre ihre besonderen Vorteile in höheren Temperaturanwendungen besitzen

Wegen der einfacheren effektiven Hydraulik und besseres Betriebsverhalten wurde im zweiten Schritt eine Heatpipelösung für die Wärmeausleitung erarbeitet. Ziel von NARVA in diesem Projekt war es, Wege aufzuzeigen und Lösungselemente zu finden, die Heatpipe-Produktion effektiver zu gestalten, um dem Ziel einer Kostenäquivalenz zu fossilen Wärmeträgern näher zu kommen.

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Wegen der angewendeten Plattform-Technologie unterscheidet sich bei NARVA ein Heatpipe-Basisrohr nicht von einem direkt durchströmten Vakuum-Absorberrohr. Zur Herstellung der Heatpipelösung sind deshalb nur folgende Arbeitsschritte erforderlich:

- Bereitstellen des Kondensators
- Fügen von Kondensator und Basisrohr
- Evakuieren der Heatpipe über ein am Kondensator befindlichen Pumprohr
- Dosieren einer exakten Menge des Verdampfungsfluides
- Vakuumdichter Verschluss des Pumprohres durch Verquetschen, Abschneiden und Verschweißen
- Prüfung der Heatpipe

Die teilweise recht komplizierten Prozesse wurden detailliert untersucht, um geeignete, zuverlässige Verfahren für die Gestaltung der einzelnen Prozess-Elemente zu finden. Eine wesentliche Rolle spielten speziell bei den Evakuierungs- und Dosieruntersuchungen experimentelle Arbeiten.

Ergebnisse und Diskussion

Im Ergebnis der Entwicklungsarbeiten konnten Wege für eine deutliche Minderung und damit Kostensenkung der erforderlichen menschlichen Arbeitszeit für die Herstellung von Heatpipe-Vakuumrohren gefunden werden. Die erforderliche Arbeitszeit von direkt durchströmtem Rohr oder Heatpipelösung wurde angeglichen und dabei deutlich gesenkt. Teilweise musste zur Erreichung der Ziele die Aufgabenstellung erweitert werden. Im Einzelnen wurden Lösungen für folgende Probleme gefunden:

- Gestaltung von Kondensator und Anschluss
Die massenproduktionsgerechte Ausführung des Kondensators wird über ein Tiefziehverfahren realisiert. Dabei wurden die Wärmetransport-Mechanismen besonders betrachtet, um die erforderliche Zeit für das Fügen zu minimieren.
- Entwicklung eines vakuumdichten Schnellanschlusses für das Pumprohr. Die Vakuumdichtheit wird durch Verpressen des Pumpgummis mit Druckluft erreicht.
- Als problematisch erwies sich die Dosierung des Verdampferfluides unter Vakuum, da sich das Fluid verteilte und die Wände der Evakuierungskammer bzw. das Pumprohr benetzte. Dies führte zu nichttolerierbaren ungenauen Dosiermengen und zu langen Evakuierungszeiten. Gelöst wurde die Problematik durch Einführung einer Kapillare, die die Strecke zwischen Dosierventil und Kondensator überbrückt und bei Dosieren bis in den Kondensatorraum reicht.
- Zur Erzielung von kurzen Evakuierungszeiten war es erforderlich den Pumpkopf durch Heizbandagen auf eine Mindesttemperatur zu stabilisieren. Darüber hinaus wurde die Vakuumverbindung Pump- und Dosierkopf – Vakuumpumpe als „Kessel“ ausgebildet.
- Der vakuumdichte Verschluss des Pumprohres wird in drei Stufen erreicht:
 1. Verquetschen des Pumprohres
Dazu wird eine speziell ausgebildete Handzange genutzt. Wichtig war nicht die Lötung des Pumprohres durch den Quetschvorgang zu beschädigen, was durch die Form des Quetschwerkzeuges und die Lage der Quetschung erreicht wird. In der Massen Produktion kommt hier eine hydraulisch angetriebene Quetschzange zum Einsatz.
 2. Abtrennen des Pumprohres
Löst man die Quetschzange kommt es zu Leckströmen, die die Qualität der Heatpipe beeinträchtigen. Es ist also erforderlich, dass die Quetschzange bis zum endgültigen Verschluss der Quetschstelle verbleibt. Die Abtrennung des Pumprohres erfolgt mit einer Schere.
Der endgültige vakuumdichte Verschluss wird mit einem WIG-Schweißverfahren hergestellt.
- Prüfung der Heatpipe
Man kann einem Vakuum-Kollektorrohr nicht ansehen, ob dessen Heatpipe funktionsfähig ist. Es ist deshalb außerordentlich wichtig, dass prozessnah eine Prüfung erfolgt. Als brauchbare Lösung erwies sich eine Aufheizung des Absorberrohres mit künstlichen Sonnen direkt im Prozess. Durch Messung der Temperatur nach einer bestimmten Besonnungszeit am Kondensator kann die Qualität und Funktionsfähigkeit der Heatpipe ermittelt werden.
- Für eine Investition wurde ein Rundtisch konzipiert, auf dem alle dargestellten Prozesselemente realisiert werden.

Das Ziel der Erreichung einer Automatisierungsfähigkeit für die Herstellung der Heatpipes wurde erreicht. Zuverlässige Prozesselemente konnten gestaltet werden. Nach einer entsprechenden Investition bei angemessenen Stückzahlen ist mit deutlichen Kostensenkungen zu rechnen.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Im Rahmen einer DBU- Bildungsveranstaltung im Kloster Marienthal wurden von NARVA wesentliche Elemente der Arbeit an umweltrelevanten Technologien von NARVA auch im Rahmen des vorliegenden Projektes dargestellt.

Es deuten sich Entwicklungswege über das bestehende Niveau hinaus an, die Nutzung von Solarwärme weiter fördern werden.

Fazit

NARVA dankt der DBU ausdrücklich, dass die DBU im Gegensatz zu dem allgemeinen Trend die Solarthermie fördert. Sie ist eine der wenigen Institutionen, die die Zukunft nicht nur in Fotovoltaik oder Bioenergie sehen, Wirtschaftszweigen, die mit den Geldern ihrer großen Industrien entsprechende Lobbyarbeit betreiben können.

Die Solarthermie ist zwar dezentral in ihrer Anwendung und darüber hinaus kleinteilig, sie hat aber von allen nachhaltigen Energieformen das größte Potential. Die Solarthermie führt zu den geringsten negativen Auswirkungen auf Flächen- und Lebensmittelverbrauch. Darüber hinaus erreicht sie den höchsten Wirkungsgrad bezogen auf die pro Flächeneinheit eingestrahlte Sonnenenergie. Ihre besondere Stärke liegt darüber hinaus in der extrem kurzen energetischen Rückflussdauer.

NARVA wird den Weg der Arbeit an der konsequenten Kostensenkung im Bereich der Solarthermie weitergehen, denn das Entwicklungspotential der Solarthermie ist bei weitem noch nicht ausgereizt und bietet trotz der Rückschläge der Solarthermie in den letzten zwei Jahren wirtschaftliche Chancen.

x
x
x
x
x
x
x
x
x

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung

2. Projektdarstellung

2.1. Technisch ökonomische Zielstellung, Situationsbeschreibung

2.2. Ökonomische Betrachtung von direktdurchströmten zu Heatpipe-Systemen

2.3. Analyse des Herstellprozesses

2.3.1. Die Prozesszeiten

2.3.2. Der Kondensator

2.4. Technologische Elemente der Heatpipeherstellung und Wege zur Automatisierung

2.4.1. Der Rundtisch

2.4.2. Arbeitstakte des Rundtisches

2.4.2.1. Pos 1 Eingabe

2.4.2.2. Pos 2 Reinigung des Lötbereiches des Wärmeträgerrohres

2.4.2.3. Pos 3 Reinigung des Kondensators, Vereinigung

2.4.2.4. Pos 4 Lötung

2.4.2.5. Pos 5 Evakuierung, Füllung, Verschluss

2.4.2.6. Pos 6, 7, 8 Prüfung der Heatpipe

2.4.2.7. Pos 9, 10 Entnahme, Leerposition

2.5. Charakterisierung der Eigenschaften der Produkte

2.5.1. Der Einfluss der Dosiergenauigkeit

2.5.2. Alterungsverhalten

2.5.2.1. Langzeitverhalten des Verdampferfluids

2.5.2.2. Korrosionstests

1. Verzeichnis von Bildern, Zeichnungen, Grafiken, Tabellen

2. Verzeichnis von Begriffen und Definitionen

3. Zusammenfassung

Verzeichnis von Bildern, Zeichnungen, Grafiken, Tabellen

Diagramm 1	Relative Kosten von PV und Thermie
Diagramm 2	Evakuierungskennlinie einer Heatpipe
Diagramm 3	Aufheizung des Kondensators unter verschiedenen Bedingungen
Bild 1	Basis-Vakuumrohre für die Weiterverarbeitung zu direkt durchströmten oder Heatpipe-Rohren
Bild 2	Vakuumrohre, direkt durchströmt, Schraubanschluss
Bild 4	Überarbeiteter Kondensator
Bild 5	Pump- und Dosiereinrichtung

Verzeichnis von Begriffen und Definitionen

Wärmerohr, Heatpipe	Wärmetransportvorrichtung unter Ausnutzung der Verdampfungsenergie
Vakuum-Solarkollektor-Rohr	Das die Sonnenenergie absorbierende Material befindet sich in einem evakuiertem Raum
Kollektor	Kompletteinheit zum Sammeln solarer Wärme
Stagnation	Zustand des Kollektors, wenn keine Energie entnommen wird
evakuieren	einen Raum von Luft befreien
Wärmeträger	Flüssigkeit zum Transport der Wärme
direkt durchströmt	Der Wärmeträger durchströmt den Kollektor im Finnenbereich
Prozesselemente	technologischer Einzelschritt
Absorber	Material, welches die Sonnenenergie aufnimmt
Exergieausbeute	Energieinhalt oberhalb der Arbeitstemperatur
Verdampfungsfluid	verdampfende und wieder kondensierende Flüssigkeit, die den Energietransport übernimmt
Hydraulik	Verschaltung des Rohrleitungssystems
Plattformtechnologie	auf Basis eines Grundproduktes werden verschiedene Varianten hergestellt.
Kondensator	Teil des Wärmerohres, in dem die im Dampf enthaltene Energie nach außen abgegeben wird und der Dampf dabei kondensiert
Fügeprozess	Verfahren, bei dem Teile verbunden werden
Rundtisch	Transport- und ggf. Arbeitseinrichtung, bei dem das zu bearbeitende Werkstück auf einer Kreisbahn transportiert wird
Schüsselvibrator	Fördereinrichtung zum Speichern und Zuliefern von Teilen

verzundern	Oxidation von Metalloberfläche bei hohen Temperaturen
WIG-Schweißen	spezielles Lichtbogenschweißverfahren unter Inertgas
Leckrate	in ein evakuiertes Gefäß eindringende Luftmenge pro Zeiteinheit
Getter	Materialien, die geeignet sind Restgase in einem evakuierten Gefäß zu binden

Zusammenfassung

Die Entwicklungen von Wärmerohr- bzw. Heatpipe –Vakuum –Solarkollektor - Rohren in den letzten Jahren lassen den Schluss zu, dass der Anteil an diesem Kollektortyp in Zukunft deutlich steigen wird.

Die Gründe liegen in der Möglichkeit der Schaffung wartungsarmer, kostengünstiger Systeme auf der Basis von Heatpipes. Die Lücke zwischen Energiekosten auf fossiler Basis und den Kosten zur Energiegewinnung durch Solarkollektoren wird deutlich verringert werden.

Es darf deshalb erwartet werden, dass nach der Stagnation in der Mengenentwicklung der Solarthermie in den Jahren 2009 und 2010 in der Zukunft wieder ein Mengenwachstum erreicht werden wird.

Im vorliegenden Thema wurden Möglichkeiten erarbeitet, die Kosten menschlicher Arbeit zur Herstellung von Heatpipe-Vakuumrohren deutlich zu senken und damit Heatpipelösungen an die Kosten direktdurchströmter Systeme heranzuführen. Methodisch wurden die einzelnen Prozesselemente analysiert und in Richtung Automatisierungsfähigkeit verändert.

Dabei standen vor allem die Prozesselemente:

- **Löten,**
- **Evakuieren, Füllen**
- **Verschließen des Pumprohres** und
- **automatisches Prüfen der Heatpipe**
- **Lebensdauerverhalten der heatpipe**

im Mittelpunkt der Untersuchungen.

Für alle wichtigen Prozesselemente mussten Lösungen gefunden werden, um technologische Schwierigkeiten zu überwinden und eine Automatisierungsfähigkeit zu erreichen. Die Ergebnisse des Projektes lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- **Die menschliche Arbeitszeit zur Herstellung von Vakuumrohren konnte erheblich gesenkt werden. Heatpipe und direkt durchströmtes Rohr erfordern damit die gleiche Arbeitszeit.:**

	direkt durchströmt	Heatpipe
vor Rationalisierung	180 s	301 s
mit Rundtisch	120 s	118 s

- **Die Materialkosten von ventilfreien Heatpipes und von direkt durchströmten Rohren unterscheiden sich schon heute nicht wesentlich, da etwa gleicher Materialeinsatz erforderlich ist.**
- **Da die Kosten von Heatpipe-Systemen und von direkt durchströmten Systemen praktisch gleich gestaltet werden können, werden die Vorteile einer einfacheren Hydraulik von Heatpipe- gegenüber direkt durchströmten Systemen wirksam. Eine robustere Betriebsweise und ein geringerer Druckabfall im Arbeitsfluidkreis sind besonders in der industriellen Anwendung von Bedeutung.**
- **Die Schaffung von Heatpipe-Systemen, die Temperaturen im Sammler eigensicher auch bei Abschalten oder Ausfall der Speisepumpe so begrenzen, dass Cracken des Frostschutzmittels bzw. Dampferzeugung sicher vermieden wird, führt auch zu kostengünstigerer Gestaltung der kompletten Solaranlage.**

Mit den Ergebnissen des Projektes wird ein nicht zu unterschätzender Schritt zur ökologischen Entlastung der Umwelt durch Durchbrechung der Kostenstagnation auf dem Gebiet der Solarthermie ermöglicht, was zur Verbesserung der Konkurrenzfähigkeit gegenüber fossilen Energieträgern führt. Man darf davon ausgehen, dass bei konsequenter weiterführender Entwicklungsarbeit in wenigen Jahren die volle ökonomische Konkurrenzfähigkeit auch ohne staatliche Förderung erreicht werden kann.

1. Einleitung

Der Niedertemperaturwärmeverbrauch für Heizung und Klimatisierung, Prozesswärme wie Lebensmittelbereitung, Reinigungsprozesse im privaten Umfeld und in der Industrie bei Trocknungsprozessen, Galvanik usw. stellt den höchsten Einzelposten mit ca. 50% des gesamten Primärenergieverbrauches dar /Pir04/. Zum Vergleich sei genannt, dass die gesamte Stromerzeugung mit nur etwa 20% des Primärenergieverbrauches beteiligt ist.

Es ist deshalb von großer Bedeutung, dass sich die Deutsche Bundesstiftung Umwelt diesem Thema zuwendet, auch wenn diese Art der Energiegewinnung derzeit nicht im Focus der Öffentlichkeit steht. Es besteht kein Zweifel daran, dass die solare bereitgestellte Wärme aus Kostengründen und aus ihrer unschlagbar niedrigen Kohlendioxidbelastung pro Energieeinheit ihren gebührenden Platz einnehmen wird.



Diagramm1 Relative Kostenentwicklung von PV und Thermie

Durch die leider eingetretene Stagnation der pro Jahr realisierte Absorberfläche sind auch in der Wirtschaft die Anstrengungen erlahmt, die Kosten (siehe Diagramm1) durch entsprechende Investitionen zu senken.

Die unmittelbare Nutzung der Sonnenenergie über Sonnenwärme-Kollektoren für die Bereitstellung von Niedertemperaturwärme im Temperaturbereich zwischen 30°C

und 180°C weist erstaunliche Wirkungsgrade von 40%-70% auf. Solche hohen Wirkungsgrade werden von keiner anderen nachhaltigen Technologie erreicht. Nach einer Veröffentlichung der ESTIF, /ES09/, könnte über solare Wärmeversorgung 47% des Niedertemperaturbedarfs abgedeckt werden. Ein weiterer Vorteil der Sonnenwärme ist, dass sie in vielen Bereichen dicht vor der Konkurrenzfähigkeit zu fossilen Energieträgern steht. Die Differenz liegt derzeit bei ca. 10% -15%. Es wird allgemein erwartet, dass die volle Konkurrenzfähigkeit zu fossilen Energien ohne zusätzliche Förderung auf Grund deren Preisentwicklung in 5 bis 10 Jahren erreicht ist. Allerdings sind dazu auch Kostensenkungen bei solarthermischen Anlagen erforderlich. Wie aus dem Diagramm in /Be11/ erkennbar ist, weist die Fotovoltaik einen deutlich günstigeren Verlauf der Kosten-Entwicklung gegenüber der Solarthermie auf. Problematisch bei der Solarthermie ist nach /Be11/ vor allem der sehr hohe Materialanteil (90%!), durch den Automatisierungseffekte vergleichsweise gering ausfallen. Die Branche orientiert sich deshalb auf kostengünstige Materialien zur Erreichung von Kostensenkungen.

Sonnenwärme-Kollektoren wurden in den letzten Jahrzehnt deutlich in ihrer Effizienz verbessert. Neben der Entwicklung von neuen Absorbermaterialien, welche die Sonnenenergie mit immer besseren Wirkungsgraden in Wärme umwandeln, wurde und wird intensiv daran gearbeitet, Wärmeverluste zu minimieren. So gibt es breite Bemühungen, die konvektiven Wärmeverluste der Kollektoren zu senken, da dies eine entscheidende Voraussetzung für die Nutzung der Sonnenwärme-Kollektoren im höheren Temperaturbereich (70- 180°C) ist.

Im Bereich der Flachkollektoren verbesserte man die Isolierungen der Rückwand erheblich. Problematisch blieb allerdings die Absorberseite, die der Sonne zugewandt ist. Hier ist eine Isolierung mit einem Isolierstoff nicht möglich, da diese die solare Energie von dem Absorber fernhalten würde.

Versuche die Isolierqualität mit Vakuum zu verbessern, waren im Flachkollektorbereich bisher nicht erfolgreich, da entweder das Vakuum nicht langzeitstabil war oder die erheblichen auf die Abdeckscheibe wirkenden Kräfte zu Zerstörungen der Kollektoren führten oder teure Konstruktionen erforderten. Als gangbare aber relativ teure Wege erwiesen sich einerseits Doppelverglasungen und andererseits die Anwendung isolierender Gase mit großen Molekular- bzw. Atomgewicht.

Eine dritte Möglichkeit ist die Anwendung infrarotreflektierender Schichten /Fö10/. Die Bemühungen, Flachkollektoren auch für höhere Temperaturdifferenzen effizienter zu machen, führen derzeit zu tendenziellen Verteuerungen, da die erforderlichen Maßnahmen kostenintensiv sind.

Vakuum-Rohr-Kollektoren sind pro Absorberfläche derzeit häufig teurer als Flachkollektoren und machen in Deutschland im Gegensatz zu vielen anderen Ländern deshalb nur etwa 10% der Kollektorflächen aus.

Der Vorteil der Vakuumrohr-Kollektoren liegt aber darin, dass sie die beste und billigste thermische Isolierung – das Vakuum - nutzen. Ihre Exergieausbeute ist wegen der idealen Isolierung deutlich höher als bei Flachkollektoren, so dass sie im Bereich oberhalb von Arbeitstemperaturen von 50- 60°C, auch bezogen auf die Bruttofläche, einen deutlich höheren Ertrag als Flachkollektoren aufweisen. So erreichen sie auch bei höheren Temperaturdifferenzen, wie sie beispielsweise in der Prozesswärme und für die Klimatisierung benötigt werden, gute Wirkungsgrade. Darüber hinaus sind Vakuumrohre in der Lage, diffuse solare Energie von nur 250 W/m² zu sammeln und einer Nutzung zuzuführen. Dies ist bei Flachkollektoren nicht möglich.

Da Vakuum-Rohr-Kollektoren zwar einen aufwendigen Prozess erfordern, aber sehr materialsparend und langlebig sind, darf erwartet werden, dass die Kostenvorteile der Flachkollektoren sich verringern bzw. aufheben werden. Dies ist vor allem dann zu erwarten, wenn durch solare Erzeugung von Prozesswärme relativ hohe Arbeitstemperaturen benötigt werden und deshalb der Bedarf an Kollektoren für höhere Temperaturen steigt.

Ein großes Problem bei Sonnenwärme-Kollektoren, das besonders bei Kollektoren hoher Qualität auftritt, ist die Stagnation.

Wenn die Energieentnahme geringer als die Sammlung ist, erhöht sich die Temperatur der Absorberflächen der Kollektoren bis das Fluid verdampft. Dieser Dampf dringt in die Leitungen vor und führt zu erheblichen Problemen. In einer Fülle von Untersuchungen und technischen Lösungen versucht man das Problem zu lösen. Als Beispiel sei die Veröffentlichung /Rei10/ genannt.

Verwendet man allerdings Kollektoren, bei denen Wärmerohre (Heatpipes) zur Wärmeausleitung aus den Absorberbereichen dienen, reduzieren sich die Probleme

erheblich. Heatpipes besitzen die grundsätzliche Möglichkeit diese Überhitzungen und auch die Dampfbildung zu vermeiden. So bietet die Firma Kingspan, UK, ein mit einer Heatpipe versehenes Absorberrohr an, das über ein Ventil den Kondensatrückfluss der Heatpipe verhindert, wenn eine Grenztemperatur erreicht wird. Auf diese Weise begrenzt das Ventil die Energieübertagung und verhindert dadurch weitere Temperaturerhöhungen.

Eine Abschaltung, die auf einer anderen physikalisch-technischen Lösung basiert, wurde von der Firma NARVA /NA08/ entwickelt. NARVA gelang es, durch Wahl eines entsprechenden Verdampfer - Fluides in Art und Menge eine ohne Ventil bei relativ niedrigen, frei wählbaren Temperaturen abschaltende Heatpipe zu entwickeln. Mit solchen Heatpipes können die oben angesprochenen Temperaturprobleme vollkommen beseitigt werden und es ergeben sich Möglichkeiten, sichere und einfach zu handhabende Solarkollektoranlagen zu gestalten. Im besonderem Maße ist dies für größere Anlagen, wie sie für die Prozesswärme benötigt werden, von Bedeutung.

Mit solchen abschaltbaren Heatpipe-Vakuumrohren werden Übertemperaturen, Stagnationen von Teilbereichen und eine komplizierte, kaum beherrschbare Hydraulik vermieden.

An den bestehenden Nachteilen von Vakuumrohren mit Heatpipes wie die zur Zeit noch etwas höheren Kosten und ein durch innere Temperaturabfälle bedingter etwas schlechterer Wirkungsgrad wird intensiv gearbeitet /Pa10/.

Unter diesen Aspekten darf erwartet werden, dass der Einsatz von Heatpipe-Systemen in Zukunft deutlich zunehmen wird. Unter anderem erkennt man das auch daran, dass z.Z. versucht wird, das Heatpipe - Prinzip auch bei Flachkollektoren anzuwenden, so, dass es zunehmend wichtiger wird, die Kosten der Heatpipes zu senken, was das Ziel des vorliegenden Projektes ist.

2. Projektdarstellung

2.1. Technisch-ökonomische Zielstellung, Situationsbeschreibung

Die technisch-ökonomische Zielstellung des vorliegenden Vorhabens war es vordergründig, die Herstellkosten für die Wärmerohre für die Vakuum-Solarkollektor-

Rohre zu senken, um die Wettbewerbsfähigkeit der Heatpipe-Vakuumrohr-Ausführung gegenüber den direkt durchströmten Systemen zu verbessern. Die eigentliche Zielstellung greift aber deutlich weiter:

Es geht letztlich um das Ziel, einfach zu installierende und anzuwendende Solar-Wärme-Systeme zu entwickeln und auf dem Markt anzubieten, die Niedertemperaturwärme liefern und bei denen die spezifischen Kosten pro Nutzwärmeeinheit gegenüber fossilen Energieträgern wettbewerbsfähig sind.

In diesem Zusammenhang muss unbedingt betont werden, dass der Wärmeinhalt von Kohle, Öl, oder Gas nicht direkt mit der gelieferten Wärme einer Solaranlage verglichen werden darf.

Man sollte unbedingt beachten, dass eine Heizanlage einen Wirkungsgrad besitzt, der speziell im Niederlastbereich (Frühjahr-, Sommer- Herbstbetrieb) bei Gebäudeversorgung im privaten Bereich oder bei öffentlichen Gebäuden sehr niedrig sein kann.

Diese Wert kann bei Ölheizungen im Schwachlastbetrieb bei 50% liegen.

Wichtig ist neben der ökonomischen Seite eine einfache Installation der Anlage und ein einfacher robuster Betrieb, wobei Standards unbedingt erforderlich sind.

So ist es von großem Vorteil, wenn die Kollektorfläche einer Solaranlage problemlos überdimensioniert werden kann, um einen hohen solaren Deckungsgrad zu erreichen. Von Vorteil ist auch, wenn die Anlage in Urlaubszeiten problemlos abgeschaltet werden kann.

Im gewerblichen Bereich z. B. für Lebensmittelbereitung (Großküchen, Fleischereien, Brauereien), Trocknungsanlagen (Lackierungen, Papierindustrie, Wäschereien) Galvanik, Betonhärtung, Hotels, Pflegeheime, Krankenhäuser usw. wird ganzjährig Heizenergie benötigt. Hier legt man die Anlage aus ökonomischen Gründen so aus, dass auch im Frühjahr bzw. im Sommer bei maximaler solarer Einstrahlung die gesamte gesammelte Energie für das Gewerbe bzw. die Produktion genutzt werden kann.

Wie Untersuchungen /Mie10/ ergeben haben, ist es vergleichsweise einfach möglich, Systeme zu entwickeln, die bei Überschreiten einer Grenztemperatur „abschalten“.

Das heißt, die Energiezufuhr vom Kollektor wird, falls die gesammelte Energie nicht benötigt oder der Speicher voll ist, gestoppt.

Diese Systeme bieten die Chance, dass die benötigten einfachen und robusten Anlagen entwickelt und hergestellt werden können.

2.2. Ökonomische Betrachtung von direktdurchströmten und Heatpipe-Systemen

Ein wesentliches Argument gegen Anwendung von Heatpipe-Kollektoren ist die Situation, dass solche Kollektoren oft deutlich teurer als direkt durchströmte Kollektoren sind. Mittels der nachstehenden Analyse soll unabhängig von der heute erreichten Kostensituation bei den beiden Vakuumrohr-Varianten, den direkt durchströmten Vakuumrohren und Rohren mit Heatpipe-Wärmeausleitung, ermittelt werden, ob dies zwingend ist.

Geht man davon aus, dass die Menge an Kupfer für ein direkt durchströmtes Absorberrohr und für ein Absorberrohr mit einer Heatpipe nahezu gleich sind, unterscheiden sich direkt durchströmtes Absorberrohr und Absorberrohr mit Heatpipe ökonomisch nur durch die benötigte menschliche Arbeitszeit ihrer Herstellung. Gelingt es demzufolge, den erforderlichen menschlichen Arbeitsaufwand durch Automatisierung entsprechend zu senken, sollten sich die Kosten zwischen Heatpipe und direkt durchströmten Rohr einander annähern.

Die Firma NARVA stellt die verschiedenen Ausführungen der Vakuumrohre in einer „Plattformtechnologie“ her. Das heißt, es werden Basis-Vakuum-Rohre hergestellt, die dann je nach Kunden-Auftrag zu direktdurchströmten oder zu Vakuumrohren mit Heatpipes weiterverarbeitet werden.

In Bild 1 sind die Basis-Vakuumrohre dargestellt. Sie weisen nur das die Glas-Metall-Verbindung durchdringende Wärmeträgerrohr auf.

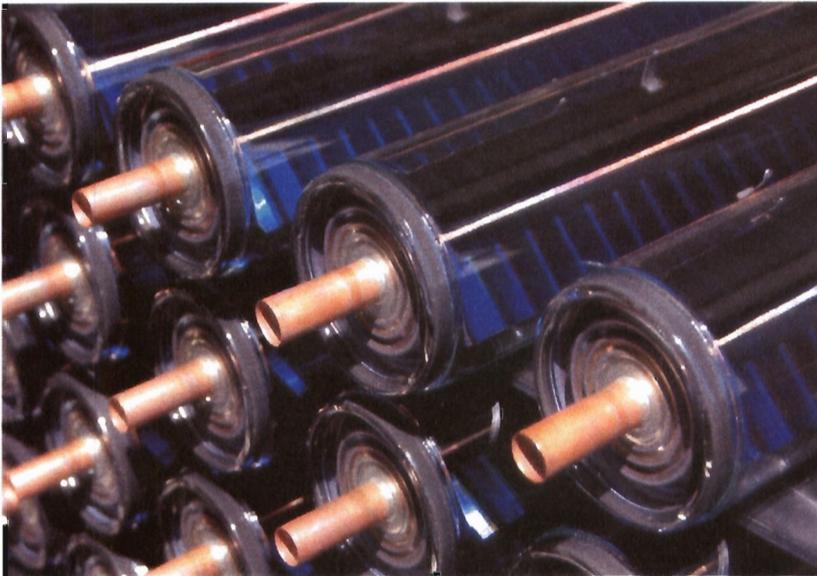


Bild 1 Basis-Vakuumrohre für die Weiterverarbeitung zu direktdurchströmten oder HP-Vakuumrohren



Bild 2 Vakuumrohre, direktdurchströmt, Schraubanschluss

Im Bild 2 ist eine direktdurchströmte Vakuumrohrvariante mit einer Schraubverbindung dargestellt. Das Ende des Wärmeträgerrohres wurde nach dem Aufstecken der Mutter so aufgeweitet, dass eine Dichtfläche ausgebildet wurde.



Bild 3 Heatpipe-Vakuumrohre

Im Bild 3 sind Heatpipe-Vakuumrohre dargestellt. Charakteristisch für diese Ausführung der Vakuumrohre ist der vakuumdichte Verschluss des Pumprohres.

2.3. Analyse des Herstellungsprozesses

2.3.1. Die Prozesszeiten

Der Ausgangsarbeitsstand des Effektivitätsniveaus zeigt sich in den nachstehend aufgeführten Arbeitszeiten und weist die unten aufgeführten Unterschiede zwischen direkt durchströmten Rohren und Vakuumrohren mit Heatpipe bei ihrer Herstellung auf. Dabei sind beim Herstellen der Heatpipe drei Arbeitsabschnitte zu leisten. Für das direkt durchströmte Rohr ist nur der erste und der zweite Arbeitsabschnitt zu leisten.

1. Vorbereitung	dir.-durchströmt	Heatpipe
Sägen, Entgraten	48 s	48 s
Werkzeugwechsel	5 s	5 s
Arbeitstakt, „Vorbereitung“	53 s	53 s

2. Löten	dir.-durchströmt	Heatpipe
Löten Anschluss oder Kondensator	114 s	114 s
Nachgasen	13 s	13 s
Tätigkeit der Ak beim Löten:		
Reinigen des Anschlussrohres	20 s	20 s
Reinigen Kondensator, Anschluss	20 s	20 s
Bestückung mit Lötring	10 s	10 s
Arbeitstakt „Löten“	127 s	127 s

3. Heatpipeherstellung		Heatpipe
Pumprohr Polieren		15 s
Bestückung Halbautomat		15 s
Auffahren Pumpkopf, vakuumdichter Anschluss		10 s
Evakuieren		24 s
Dosieren des Fluides		4 s
Verpressen des Pumprohres		8 s
Abschneiden des Pumprohres		5 s
Öffnen, Hochfahren des Kopfes		2 s
Verschweißen		10 s
Quetschzange öffnen, Prüfung der Schweißung		15 s
Entnahme des Pumprohrrestes		3 s
Entnahme, Ablegen des Vakuumrohres		10 s
Transport, Qualitätsprüfung		15 s
Arbeitstakt „Heatpipe-Herstellung“		121 s

	dir.-durchströmt	Heatpipe
Gesamttaktzeiten	180 s	301 s

Der Arbeitsaufwand bei NARVA liegt für ein Vakuum-Rohr mit Heatpipe-Wärmeausleitung bei ca. 300 s gegenüber einem direkt durchströmten System mit 180 s. Damit sind die Arbeitskosten einer Heatpipe-Ausführung erheblich höher als

beim direktdurchströmte Vakuumrohr. Allerdings ist derzeit der Kondensator etwas teurer als ein Anschluss für ein direktdurchströmtes Vakuum-Absorberrohr.

Es ist zu erkennen, dass die wesentlichen Kostenunterschiede nicht durch die Materialien bewirkt werden, sondern durch den Anteil menschlicher Arbeit. Eine Kostensenkung eines Heatpipe-Systems kann also durch entsprechende Minderung der benötigten Arbeitszeit durch Automatisierung erreicht werden. Dazu sind der Produktionsstückzahl angemessene Investitionen für Rationalisierungen erforderlich.

Es gilt bei der Automatisierung zu beachten, dass bei einem automatisierten Herstellungsverfahren die Arbeitstakte zeitlich gleich lang sind und deshalb die einzelnen Technologieschritte zeitlich so aufgeteilt werden müssen, dass sie dieser Bedingung entsprechen. Der längste, nicht aufteilbare Technologieschritt bestimmt die zeitliche Länge des Arbeitstaktes.

Im vorliegenden Fall erfordert das Löten durch die notwendigen Gasspülungen, die relativ hohe Masse des Kondensators und die gute Wärmeleitfähigkeit des verwendeten Kupfers fast zwei Minuten.

Durch Übergang auf ein Edelstahl-Anschlussrohr – die Wärmeleitfähigkeit von Edelstahl liegt bei nur 4% der von Kupfer - und Verringerung der Kupfermasse durch konstruktive Veränderung des Kondensators im Anschlussbereich sowie Verbesserungen des Spül- und Kühlprozesses konnte der erforderliche Arbeitstakt auf 80 s (70%) gesenkt werden.

2.3.2. Der Kondensator

Die Ausführung des Kondensators beeinflusst in starkem Maße die Gesamtkosten eines Vakuumrohres mit Heatpipe.

Bei den Erprobungen zeigten sich am bisherigen Kondensator konstruktive und technologische Mängel:

- Er ist für ein automatisiertes Aufschieben auf den Anschluss des Vakuumrohres ungeeignet.
- Das eingelötete Pumprohr erwies sich als nicht ausreichend zuverlässig, da die Lötung häufig nicht vakuumdicht war.
- Es musste eine Möglichkeit gefunden werden, den Löttring so einzubringen, dass der Kondensator, bestückt mit einem Löttring, von oben zugeführt werden konnte.
- Für das bei der NARVA Heatpipe verwendete organische Verdampferfluid ist die innere Oberfläche des Kondensators für eine effiziente Wärmeübertragung mit geringem Temperaturabfall nicht ausreichend groß genug.
- Die Masse des Kondensators ist im Anschlussbereich zu hoch, was eine lange Lötzeit bewirkt.

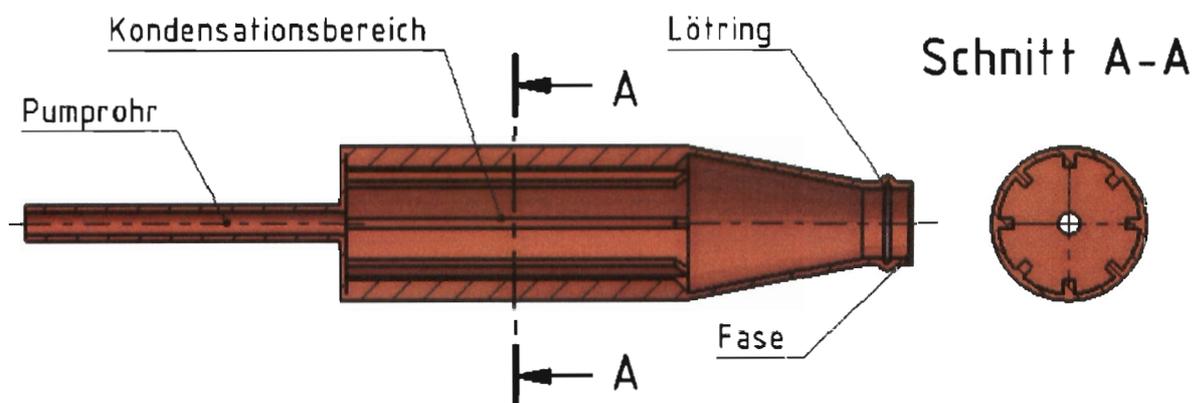


Bild 4 Überarbeiteter Kondensator

Der Kondensator wurde deshalb technologisch und konstruktiv überarbeitet. Hervorzuheben an der neuen Konstruktion ist das tiefgezogene Pumprohr, die Vergrößerung der inneren Oberfläche des Kondensators durch Einbringen von Rippen, Schaffung der Möglichkeit, die Lötung „über Kopf“ durchzuführen, Optimierung der Länge und der Wandstärke des Kondensators im Lötbereich zur Verringerung der Masse des Kondensators und der Bearbeitungszeit.

Als Herstellverfahren wurde Tiefziehen bzw. Fließpressen des Kondensationskörpers einschließlich Pumprohr mit anschließenden Anrollen des Kegelansatzes und des

Anschlusssteiles gewählt. Der Lotring wird in den Anschlussbereich eingebracht. An einer Automatisierung der Lotringbestückung wird gearbeitet.

Der Anschlussbereich, der mit dem Wärmeträgerrohr vakuumdicht verbunden werden muss, erhält eine Fase um das Zusammenstecken zu erleichtern. Darüber hinaus wurde der Anschlussbereich gekürzt, um Kupfer einzusparen und das Löten zu beschleunigen.

Wegen der erreichten Temperaturabsenkung durch die spezifische NARVA-Heatpipe-Entwicklung auf 140°C, kann ein kostengünstigeres Lot mit geringerem Silberanteil zum Einsatz gelangen.

2.4. Prozesselemente der Heatpipe Herstellung und Wege zur deren Automatisierung

2.4.1. Der Rundtisch

Ein Rundtisch im hier betrachteten Sinne ist eine Transportmaschine, die das zu bearbeitende Werkstück in definierten Takten von einer Arbeitsstation zur Folgestation fördert. Die Takte sind gleich lang und teilen sich in 2 Abschnitte.

1. Zeitabschnitt: Steht für die Bearbeitung des Werkstückes zur Verfügung. In diesem Zeitabschnitt bewegt sich der Rundtisch nicht und die Werkzeuge können eingreifen.
2. Zeitabschnitt: In diesem wird das Werkstück zur nächsten Arbeitsposition transportiert.

Für eine Qualitätsüberwachung der Prozesse ist eine Arbeitskraft bei der Heatpipe Herstellung ständig erforderlich. Kritisch sind hier vor allem die beiden Fügeprozesse: das Anlöten des Kondensators und das Verschweißen des Pumprohres.

Da diese Überwachungen die Arbeitskraft nicht vollkommen auslastet, können ihr weitere Tätigkeiten zugeordnet werden.

Die Bestückung des Rundtisches mit den Absorberrohren und deren Entnahme kann deshalb von der Arbeitskraft durchgeführt werden.

Der Prozess, der die längste Zeit erfordert, bestimmt die Taktgeschwindigkeit. Das Anlöten des Kondensators ist das längste nicht teilbare Prozesselement und dauert 80 s.

Die Vorrichtungen und Werkzeuge stehen radial um den Rundtisch herum und bearbeiten auf das jeweilige Teil in der Schaltungspause.

In den Rundtisch werden die Vakuumrohre so eingesetzt und gehalten, dass das Verbindungsrohr Absorber- Kondensator nach oben gerichtet ist. Auch die Bestückung eines Schüsselvibrators für die Sortierung und Bereitstellung der Kondensatoren wird von Hand vorgenommen. Alle anderen Verrichtungen laufen automatisch ab:

Maschinentakt	85s
Schaltung	5 s
Werkzeugzugriff	5 s
Technologische Bearbeitungszeit	80 s

Setzt man nach Abzug von Rüstzeiten eine maximale effektive Arbeitszeit von täglich maximal 14 h an, so ergibt sich eine Produktionsmenge von ca. 600 Heatpipe-Vakuumrohre / Tag. Bei 230 Arbeitstagen, erhält man damit eine Kapazität von 138 000 Heatpipe-Vakuumrohren pro Jahr.

Die menschliche Arbeitszeit verkürzt sich bei diese Automatisierung von 301 s auf 85 s bzw. 98 s mit Nebenzeiten. Allerdings muss noch die Vorbereitungszeit (53 s) hinzugefügt werden (Gesamtzeit 151 s).

Es kann aber eingeschätzt werden, dass die Vorbereitungszeit durch eine geänderte Arbeitsorganisation und stärkere Nutzung schon vorhandener Automatisierungseinrichtungen von 53 s auf 20 s gesenkt werden kann. Damit ergibt sich eine Arbeitszeit von 118 s pro Heatpipe-Vakuumrohr.

Für das direkt durchströmte Rohr ergeben sich bei Nutzung des Rundtisches für die Lötung und Verbesserung der Vorbereitung 105 s. Da aber auch das Innenrohr bearbeitet werden muss (15 s) werden in Summe 120 s benötigt. Damit unterscheiden sich die Bearbeitungszeiten und auch die Kosten von Heatpipe Ausführung und direkt durchströmter Ausführung praktisch nicht mehr.

Durch die Automatisierung werden 183 s menschlicher Arbeitszeit pro Heatpipe-Vakuumrohr und 60 s pro direkt durchströmten Rohr eingespart.

Zusammenfassung der Arbeitszeiten:

	direkt durchströmt	Heatpipe
heutiger Stand	180 s	301 s
mit Rundtisch	120 s	118 s
Senkung auf	66,6%	39,2%

Damit unterscheiden sich die menschlichen Bearbeitungszeiten und damit die Lohnkosten für direktdurchströmte und für Heatpipes praktisch nicht mehr.

2.4.2. Funktionen der Arbeitstakte des Rundtisches

2.4.2.1. Pos 1 Eingabe

- Die Bestückung der Eingabeposition mit einem Vakuumrohr erfolgt von Hand.
- Von Hand werden auch die Kondensatoren in den Schüsselvibrator eingelegt.

2.4.2.2. Pos 2 Reinigung des Lötbereiches des Wärmeträgerrohres

- Zur Reinigung des zu verlötenden Wärmeträgerrohr wird das Vakuumrohr mit einem Arbeitszylinder bis zu einem Anschlag nach oben geschoben. Eine Zange umfasst das Wärmeträgerrohr, um die Kräfte aufzunehmen, die beim Reinigen wirken. Eine metallische Hohlrundbürste fährt von oben ca. 10 mm über das Ende des Wärmeträgerrohres und reinigt dadurch das zu verlötende Ende.

2.4.2.3. Pos 3 Reinigen des Kondensators, Vereinigung

- Aus dem Schüsselvibrator wird ein Kondensator so gefördert, dass er quer zur Förderrichtung steht. Nun wird er mittels einer Zange fixiert und eine metallische Rundbürste reinigt die innere zu verlötende Oberfläche des Kondensators. Anschließend wird der Kondensator zum Vakuumrohr transportiert und dort in Höhe und Achslage gerichtet und mit einer Kühlzange fixiert. Danach wird das Vakuumrohr von unten nach oben so geschoben, dass das Wärmeträgerrohr in die Öffnung des Kondensators eingeführt wird. Die Einschubtiefe wird durch Anschläge definiert.

2.4.2.4. Pos 4 Lötung

- Es folgt der Verschluss der Lötammer und eine Flutung der Lötammer mit Schutzgas, einem Wasserstoff-Stickstoff-Gemisch. Anschließend wird die Lötung durchgeführt.
- Über den Abschluss des Lötvorganges hinaus erfolgt weiterhin die Flutung der Lötammer so lange, bis die Temperatur 150°C unterschritten hat und keine Verzunderung des Kondensators mehr erfolgen kann.

2.4.2.5. Pos 5 Evakuierung, Füllung, Verschluss

Der prinzipielle Aufbau der Pump- und Dosiereinrichtung ist in Bild 5 dargestellt.

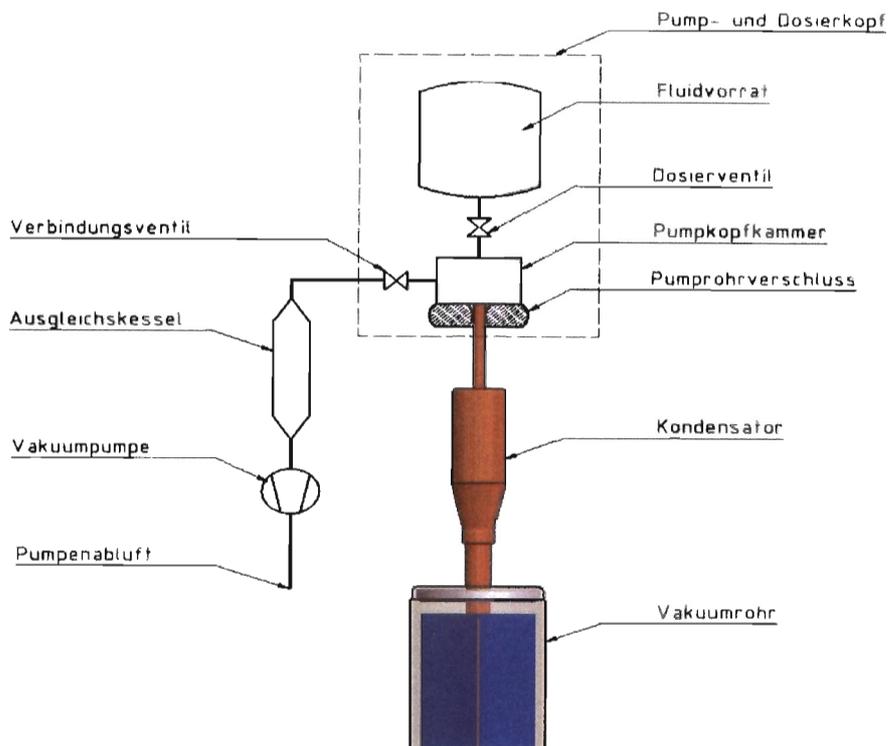


Bild 5 Pump und Dosiereinrichtung

Auf der Arbeitsposition wird das Pumprohr von einer Zange so umfasst, dass die Aufnahme des Pump- und Dosierkopfes auf das Pumprohr auffahren kann. Dabei umschließt der sogenannte Pumpgummi das Pumprohr. Der vakuumdichte Verschluss wird mittels Druckluft erreicht, in dem die Druckluft den Gummi dicht um das Pumprohr presst.

A. Evakuierung

Nach dem Anschließen des Pumprohres wird das an der Pumpkopfkammer befindliche Verbindungsventil zur Vakuumpumpe geöffnet und der Evakuierungsvorgang beginnt. Problematisch ist dabei, dass an den inneren Oberflächen der Pumpkopfkammer bei der Dosierung kleine Mengen des Verdampfer-Fluides kondensieren. Dieses Fluid verzögert die Evakuierung der Heatpipe, da das Kondensat erst vollkommen verdampft sein muss, bevor der eigentliche Evakuierungsprozess beginnt. Um wenig Kondensat verdampfen zu müssen und damit eine kurze Evakuierungszeit zu erreichen wird die Pumpkopfkammer und damit deren Oberflächen so klein wie möglich ausgeführt.

Die innere Kontur wird so gestaltet, dass es nicht zu Absätzen kommt, an denen sich Kondensat sammeln kann.

Unterstützt wird die Beseitigung des Kondensates auch dadurch, dass mittels einer elektrischer Heizbandage die Pumpkopfkammer auf 25°C erwärmt wird, da dann der Kondensationsvorgang weitgehend unterdrückt wird. Darüber hinaus wird die Verbindungskammer durch Evakuieren nach vakuumdichten Verschluss des Pumprohres von Kondensat befreit:

Nachdem das Pumprohr vakuumdicht verquetscht wurde, wird das Verbindungsventil geöffnet, so dass in der Pumpkopf-Kammer kondensiertes Fluid verdampft und abgesaugt wird.

Das Verbindungsventil wird nach 10 s geschlossen, da erfahrungsgemäß dann die Oberflächen der Pumpkopfkammer frei von Kondensat sind.

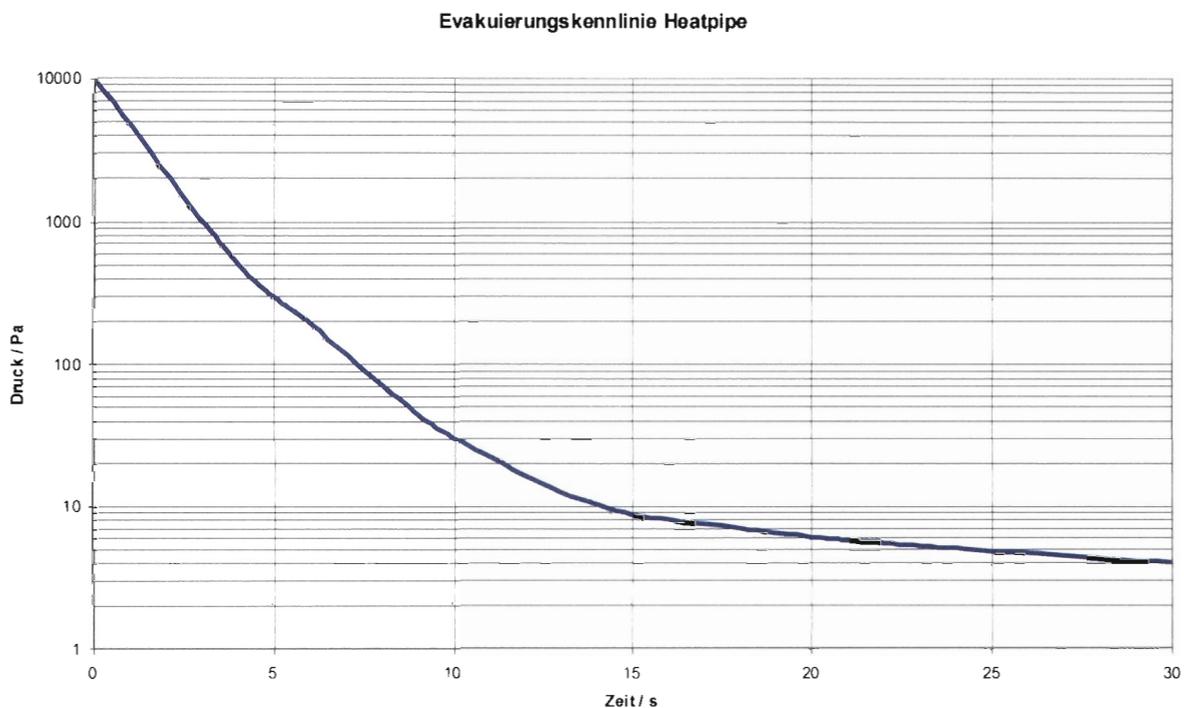


Diagramm 2 Evakuierungskennlinie der Heatpipe

Die Evakuierung zwischen 100 000 Pa und 10 000 Pa dauert weniger als eine Sekunde und wurde deshalb nicht dargestellt.

Es ist erkennbar, dass ca. 5 Pa Luft in der Heatpipe verbleiben. Die Luftmenge ist jedoch so gering, dass keine nachweisbaren Nachteile erkennbar sind.

Für die Evakuierung wird eine Vakuumpumpe vom Typ Trivac B mit einer Leistung von 16m³/h benutzt. Für das Anschlussrohr, dass zur Vakuumpumpe führt, wurde ein vergleichsweise großer Querschnitt gewählt. In Verbindung mit dem Weg bis zur Vakuumpumpe stellt diese überdimensionierte Rohr einen „Kessel“ dar, der Druckstöße minimiert und damit die Pumpe schont.

Eine typische Evakuierungskennlinie der Heatpipe ist im Bild 3.6. dargestellt.

B. Dosierung des Verdampfungsfluides

Zur Dosiereinheit gehört das Speichergefäß und eine zeitgesteuerte Dosiereinrichtung. Die Dosierung erfolgt über ein zeitgesteuertes Ventil (siehe Bild 5) und eine Kanüle, die etwas in das Pumprohr hineinreicht, um Fluidverluste zu vermeiden.

Die Genauigkeit der Dosierung mit $\pm 0,1$ ml ist für eine Heatpipe ausreichend.

Unmittelbar nach dem Dosieren erfolgt das Verquetschen des Pumprohres als vorläufiger Verschluss. Dazu dient eine hydraulisch angetriebene Quetschzange. Relativ problematisch ist das Abtrennen des Pumprohres, dass über eine Schere, eine Säge oder eine Trennschleifanlage erfolgen kann. NARVA nutzt eine Schere. Nun fährt der Pumpkopf in seine Ausgangslage nach oben und gibt damit das Ende des durch Schweißen zu verschließende Pumprohr frei .

Der Pumprohrrest wird durch Abschaltung der Druckluft am Pumpkopf freigegeben und über eine eingeklappte Rutsche aus dem Arbeitsbereich entfernt.

C. Pumprohrverschluss

Der letzte Arbeitsschritt ist der endgültige, vakuumdichte Verschluss des Pumprohres durch ein WIG-Schweißverfahren.

Um ein Aufheizen des Kondensators beim WIG-Schweißen zu vermeiden und damit die Lötstelle zwischen Kondensator und Wärmeträgerrohr des Vakuumrohres nicht

zu schädigen, wird der Kondensator mit einer wassergekühlten Kühlzange umfasst. Erst nach dem Schweißen wird als letzter Arbeitsschritt die Quetschzange geöffnet. Diese Reihenfolge ist vor allem deshalb wichtig, da trotz Quetschens nach Öffnen der Zange Leckraten unvermeidbar wären.

Diese Leckraten führen zu mangelhaften Heatpipes, was man am Aufheizvorgang der Heatpipe erkennen kann.

2.4.2.6. Pos 6, 7, 8 Prüfen der Heatpipes

Lecks an Heatpipes sind schwer zu erkennen. So kann z.B. der Glaskörper des Absorberrohr vakuumdicht und auch der metallische Spiegel des Getters vorhanden sein und trotzdem arbeitet das Absorberrohr nicht ordnungsgemäß, da die Heatpipe ein Leck hat und sich deshalb in der Heatpipe Luft ansammelt, die den Wärmetransport verhindert. Dieser kritische Qualitätsmangel muss unbedingt erkannt und verhindert werden, um fehlerhafte Rohre so schnell wie möglich im Prozess zu aufzufinden und um Maßnahmen einzuleiten zu können, die den Prozess wieder stabilisieren.

Deshalb ist es aus Gründen der Zuverlässigkeit der Produkte erforderlich, dass die Qualität der Heatpipe-Vakuumrohre unmittelbar im Produktionsprozesses geprüft wird, um Verschleppungen von Fehlern zu vermeiden.

Dies erfolgt auf den Arbeitspositionen 6, 7, 8 in nachstehender Weise:

Auf das Vakuumrohr wird mit künstlichen Sonnen eine hohe solare Leistung von ca. 2000 W/m^2 gerichtet. Das Vakuumrohr absorbiert diese Strahlungsenergie und erwärmt das Verdampfungsfluid. Dieses verdampft, der Dampf steigt auf und kondensiert im Kondensator unter Abgabe der Umwandlungsenthalpie an den Kondensatorwänden. Der Kondensator heizt sich dadurch auf. Die Qualität des Absorberrohres kann nun dadurch überprüft werden, in dem die Temperatur des Kondensators in einer bestimmten Zeit einen Mindestwert erreichen muss. Hat die Heatpipe ein Leck oder ist vollkommen undicht, kommt es zu Verzögerungen in der Aufheizung (siehe Diagramm 3).

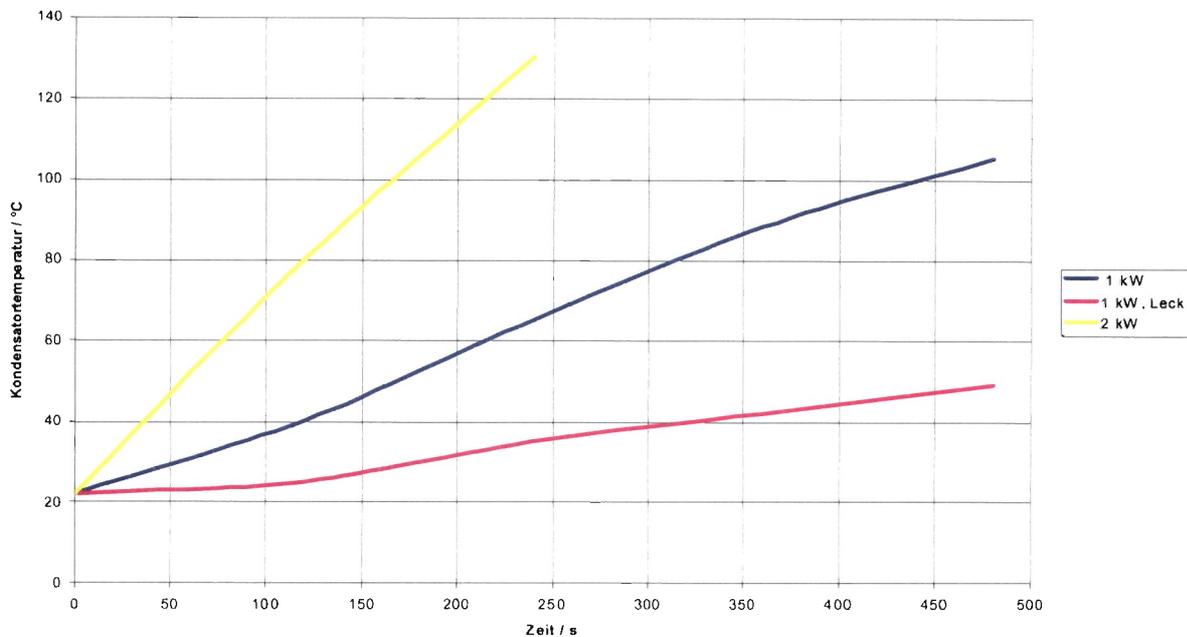


Diagramm 3 Aufheizung des Kondensators unter verschiedenen Bedingungen

Die Messung der Kondensator-Temperatur erfolgt über ein Thermoelement, dass von oben federnd auf den Boden des Kondensators aufgesetzt wird. Es ist sehr wichtig, dass die Messung soweit wie möglich am oberen Ende des Kondensators erfolgt, da oben sich evt. eingedrungene Luft sammelt und eine Wärmeübertragung verhindert

Sollte ein Kondensator die vorgeschriebene Temperatur (110 °C) in einer Zeit von 240 s nicht erreichen, wird das Rohr mit einem Arbeitszylinder heruntergeschoben und dadurch gekennzeichnet. Die Arbeitskraft erkennt bei der Entnahme das fehlerhaft Rohr und sortiert es aus.

Wegen der Gefahr, dass kleinere Lecks übersehen werden, erfolgt eine zweite Prüfung der Heatpipe-Vakuumrohre nach einer Lagerzeit von einer Woche vor der Verpackung in analoger Weise.

2.4.2.7 Pos 9, 10 Entnahme, Leerpositionen

Die Positionen 9 und 10 dienen der Entnahme der bearbeiteten Heatpipe-Vakuumrohre. Da eine Freiposition existiert, wird eine zu starke Bindung der Arbeitskraft an den Arbeitstakt verhindert.

Zusammenfassung der Arbeitstakte

- Pos 1 Eingabe Vakuumrohr
- Pos 2 Reinigung der Lötfläche des Wärmeträgerrohres
- Pos 3 Reinigung der Lötflächen der Kondensators, Aufstecken des Kondensators auf das Verbindungsrohr
- Pos 4 Löten des Kondensators
- Pos 5 Auffahren und vakuumdichter Verschluss des Pumpkopfes
Evakuierung, Füllung
Verquetschen, Schneiden, Lösen und Verfahren des Pumpkopfes
Verschluss durch WIG-Schweißen, Entfernung des Pumprohrrestes
- Pos 6 Aufheizen mit künstlicher Sonne
- Pos 7 Aufheizen mit künstliche Sonne
- Pos.8 Aufheizen mit künstliche Sonne, automatischer Qualitätstest und Sortierung durch Herabschieben
- Pos 9 Entnahme
- Pos 10 frei

Leistung

- Schichtleistung (7,0 h) 300 Stück
- Tagesleistung 600 Stück
- Jahresleistung 138 000 Stück

Diese Leistung des Rundtisches ist beim heutigen Bedarf von NARVA ausreichend. Nachteilig ist vor allem, dass Füllen, Evakuieren und Verschließen auf einer Position erfolgen müssen (Platzbedarf der Vorrichtungen und Werkzeuge). Zur Kompensation von Lagefehlern der Vakuumrohre werden die Vakuumrohre durch Richtzangen in die Arbeitsposition gezwungen.

Der Rundtisch wird von einer Arbeitskraft bedient, welche die Bestückung und Entnahme der Rohre vornimmt und die Funktionen überwacht.

Da der Takt 90 s beträgt, ist nur eine Arbeitskraft erforderlich

2.5. Charakterisierung der Eigenschaften der Produkte

2.5.1. Der Einfluss der Dosiergenauigkeit

NARVA hat in /Mie10/ die Voraussetzungen für ventilfreie, die Stagnationstemperatur begrenzende Heatpipes dargelegt. Entscheidende Größe für das Einhalten eines maximalen Temperaturfeldes ist bei definiertem Verdampfungsfluid ist die dosierte Fluidmenge.

Die erforderliche Fluidmenge für eine bestimmte Abschalttemperatur wird ermittelt, in dem man davon ausgeht, dass zum Zeitpunkt des Abschaltens gerade das gesamte Fluid in der Heatpipe verdampft ist. Somit steht auch kein flüssiger Phasenanteil zur Kühlung der Heatpipe mehr zur Verfügung und ein Wärmetransport vom Verdampferbereich (mit Absorberflächen) zum Kondensator überkondensierenden Dampf kann nicht mehr erfolgen. Die Heatpipe „schaltet“ ab.

Zur Gewährleistung einer definierten Abschaltungstemperatur müssen weitere Bedingungen erfüllt werden, die aber nicht Gegenstand der vorliegenden Untersuchung waren.

Die Berechnung der erforderlichen Menge des Fluids geht von der Partialdruck-Beziehung des Fluids aus:

$$P = \exp\left(\frac{(T_a - T_s) * H}{R * T_a * T_s}\right) \quad (2.1)$$

mit: P Partialdruck / bar
Ta Abschalttemperatur / K
Ts Siedetemperatur des Fluides / K
R Gaskonstante / Ws/(mol*K)
H Enthalpie / Ws/mol

Mit der Molmasse, m_0 , und dem Molvolumen lassen sich die zu dosierende Masse und das Dosiervolumen bestimmen. Dabei ist:

V Innenvolumen der Heatpipe

$$md = \frac{273 * m_o * P * V}{22,4 * T_a} \quad (2.2)$$

Aus der zu dosierenden Masse lässt sich nun leicht das Dosiervolumen über die Dichte des Fluids ermitteln.

Mit den dargestellten Berechnungen wird nun der Effekt einer Dosiermengen-Variation auf die Streuung der Abschalttemperatur bestimmt. Wie in Punkt 2.4.2.5.B ermittelt, liegt die Dosiergenauigkeit der Dosiereinrichtung bei ± 0.1 ml. Die Steigung der Abschalttemperatur kann unter Zugrundelegung von n-Hexan als Verdampfungsfluid bei Verwendung der Beziehungen (2.1) und (2.2) zu 12,9 K/ml berechnet werden, wodurch sich ein Abschalttemperaturband von $\pm 1,29$ K ergibt, was für die zu lösende technische Zielstellung völlig ausreichend ist.

2.5.2. Alterungsverhalten

2.5.2.1. Langzeitverhalten des Verdampfungsfluids

Es ist bekannt, dass es in der Vergangenheit erhebliche Probleme mit der Lebensdauer von Heatpipes speziell bei Einsatz organischer Verdampfungsfluide gegeben hat. In solchen ausgefallenen Heatpipes wurden häufig teerähnliche Produkte gefunden. Andererseits gab es auch nicht arbeitende Heatpipes, die auf Grund von Lecks kein Fluid mehr enthielten.

Mit der Zielsetzung von NARVA abschaltbare Heatpipes zu realisieren, mussten organische Fluide eingesetzt werden, da Wasser zu große Oberflächenspannung aufweist, das bei kleinen Dosiermengen zu ungenügenden Kühlungen der Verdampferzone führt.

Die organischen Fluide mussten deshalb auf ihre Langzeitstabilität hin überprüft werden. Die Vorauswahl hatte zur chemisch sehr stabilen Gruppe der Alkane /Ro11/ geführt, wobei n-Hexan die besten Gesamteigenschaften aufwies. In /Ro11/ wurden bis 750°C bei n-Hexan keine Veränderungen festgestellt.

In Verbindung mit Vakuumsolarkollektoren erreicht der Absorberbereich im Falle einer Stagnation bei voller Besonnung ohne Energieentnahme Temperaturen bis über 300°C.

Offenbar kann man nach/Ro11/ bei solchen Temperaturen die Gefahr einer Pyrolyse ausschließen.

Es bestand aber die Möglichkeit, dass bei Anwesenheit eines geeigneten Reaktionspartners bzw. beim Anwesenheit eines Materials mit katalytischen Eigenschaften länger-kettige Verbindungen entstehen könnten und somit das n-Hexan verbraucht würde.

Zur Überprüfung dieser Möglichkeit wurden drei Langzeittests ausgeführt:

Test 1, **Versuchsplan**

In einem Versuchsplan sollte die prinzipielle Möglichkeit der chemischen Veränderung von n-Hexan untersucht werden. Der Versuchsplan wies folgende Parameter auf:

Eingangsparameter Reinigungsverfahren der Einsatzmaterialien
Vakuumqualität vor Verschluss der Heatpipe
diverse Kontaktmaterialien

Ergebnisparameter Anteil umgesetztes n-Hexan

Für jeden Versuchspunkt wurden 5 Heatpipes hergestellt und 400h einer Temperatur von 350°C ausgesetzt. Nach dieser thermischen Alterung wurden die Heatpipes geöffnet, das Fluid entnommen und dieses einer gaschromatographischen Analyse unterworfen.

Es wurde festgestellt, dass unterschiedliche Anteile des n-Hexan in Abhängigkeit von den Eingangsparametern reagiert hatten und neue, länger-kettige Reaktionsprodukte gebildet hatten (gefunden wurden z.B.: 3-Hexanon, 4-Methyl-Oktan, 5- Methyl-Nonan). Alle Flüssigkeiten waren klar geblieben.

Im Test gab es Hinweise, dass die Evakuierungsqualität einen Einfluss besitzt. Durch iterative Lösung der Gleichung (2.3) konnte die Aktivierungsenergie die zur Bildung dieser neuen Stoffe im Mittel erforderlich war bestimmt werden. Sie ergab sich zu 230mkJ/mol.

$$Q = 100\% * \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) , \quad \tau = \nu_0 * \exp\left(\frac{E}{R * T}\right) \quad (2.3)$$

Mit der ermittelten Aktivierungsenergie war es nun möglich, über Gleichung (2.3) nachzuweisen, dass die bei NARVA entwickelten Heatpipes auch bei einem 20 – jährigen Einsatz und einer Stagnationszeit von 200 h/a nicht versagen.

Test 2 Einfluss des Evakuierungsniveaus

Bei der Herstellung der Heatpipes wird zwar beim Evakuieren ein gutes Niveau erreicht aber beim Verschluss des metallischen Pumprohres sind Leckraten unvermeidlich. Die mittleren Leckraten wurden durch entsprechende vakuumtechnische Untersuchungen (Druckanstiegsverfahren) ermittelt und betragen unter NARVA Bedingungen ca. **0,4 Pa/s** .

Es wurde ein Hexanverlust nach einer Alterung von 400h bei einer Temperatur von 300°C bis 350°C festgestellt der in Abhängigkeit vom Luftdruck in der Heatpipe steht. Dieser Hexanverlust lässt sich recht gut als lineare Verlust-Kennlinie für n-Hexan in Abhängigkeit vom Luftdruck in der Heatpipe darstellen. Der partielle Luftdruck wird vor allem durch die Leckrate zwischen Abquetschen und endgültigem Verschluss der Heatpipe bestimmt (siehe Gleichung (2.4)).

$$V_V = 1ml + 5 * E - 4ml / Pa * P \quad (2.4.)$$

P/Pa partieller Luftdruck nach Verschluss der Heatpipe

Das konstante Glied des Verlustes nach (2.4.) von n-Hexan entsteht unabhängig von Leckrate und Alterung und ist teilweise physikalisch bedingt. Der physikalische Verlust entsteht durch den Verluste im Dampfraum der Heatpipe (schon bei Raumtemperatur, 25°C, sind 0,12 ml n-Hexan dampfförmig und füllen den Heatpiperaum). Weitere Verluste treten beim Dosieren und auch beim Entnehmen des Fluides zur Messung auf. Dennoch ist anzunehmen, dass mehr als 0,5ml Verlust unabhängig von dem Luftanteil in der Heatpipe durch Alterungsprozesse bewirkt werden.

Test 3 Untersuchungen von n-Hexanverlusten in Heatpipe-Vakuumrohren

Im Test 3 wurden komplette Heatpipe-Vakuumsolar-Kollektorrohre getestet. Der Test wurde auf einem Teststand mit einer künstlichen Sonne bei NARVA durchgeführt.

Bedingungen:

- Füllung der Heatpipes mit jeweils 6,3 ml n-Hexan
- 2 stündige Bestrahlung der Vakuumkollektorrohre bei 1000 W/m^2 ohne Energieentnahme
- 15 min Abkühlung
- 500 Zyklen

Dieser Test bewirkt, dass sich die Kollektoren ca. 1000 h in Stagnation befinden, was mit 20 Jahren Lebensdauer gleichgesetzt werden kann. Bei diesem Test wurden Heatpipe-Vakuumrohre zufällig der Produktion entnommen, d.h. es wurde nicht bewusst ein hoher Luftanteil in die Heatpipes, wie in Test 2, eingebracht.

Die Ergebnisse bestätigten die Aussagen von Test 2 und führten dazu, dass nach Ablauf des Testes noch 80% n-Hexan in den heatpipes verfügbar war.

2.5.2.2. Freiluft-Korrosionstests

Diese Tests wurden im Zusammenhang mit dem Tests der Vsakuumrohre durchgeführt.

Die wohl wichtigsten Tests wurden unter freiem Himmel durchgeführt. Dabei wurden die Vakuumrohre so gedreht, dass eine maximale Besonnung eintrat. Die Rohre waren in keiner Weise vor der Witterung geschützt.

Wichtig in diesem Zusammenhang ist, dass die Teile der Heatpipe, die sich im evakuierten Rohr befanden keinerlei korrosiven Angriff ausgesetzt waren und somit auch nach einem Jahr keine Veränderungen zeigten.

Der Kondensator zeigte leichte korrosive Verfärbungen. Die möglicherweise gefährdete Lötstelle zwischen Kondensator und Wärmeausleitrohr zeigte keine Korrosionserscheinungen

Im Großen und Ganzen erwies sich der Kondensatorbereich als langzeitstabil. Zumal die beteiligten Reaktionspartner mit Kupfer und Silberlot mit hohem Silberanteil sehr reaktionsträge sind.

Da die NARVA Heatpipes bei ca. 160°C abschalten, kam es auch nicht zum Verzunderungen.

3. Fazit

Durch die unbürokratische Förderung des relativ kleinen Projektes durch die Deutsche Bundestiftung Umwelt konnte die Firma NARVA konsequent weiter an ihrem Weg der Minderung der Kosten solarthermischer Energieerzeugung arbeiten und damit wieder einen Schritt zur Erreichung der Kostenparität zu fossilen Energieträgern gehen.

Es wurden Wege aufgezeigt und erprobt, wie der Lohnkostenanteil bei der Solarthermie weiter gesenkt werden kann. Die Kostenlücke zu fossilen Energieträgern konnte weiter gesenkt werden.

Auch wenn die Solarthermie aus nicht verständlichen Gründen in Politik und Medien aktuell keine wesentliche Rolle spielt, ist sie einer der effektivsten Wege die Kohlendioxidbelastung der Umwelt senken zu helfen. Man sollte nicht vergessen, dass die Kostenlücke zu fossilen Energieträgern nur noch 10%-20% beträgt und dass es deshalb aller Anstrengung wert ist, an der weiteren Verbesserung solarthermischer Systeme zu arbeiten.

Wo liegen die Aufgaben der Zukunft im Bereich der Solarthermie? Für die Zukunft scheinen folgende Arbeitsrichtungen erfolgsversprechend zu sein:

1. Da der Materialanteil bei solarthermischen Anlagen sehr hoch ist, muss künftig zielgerichtet auf den Einsatz kostengünstiger Materialien orientiert werden.
2. Die Qualität der Speicher muss deutlich verbessert werden. Hier geht es vor allem um die Minderung des z.Z. nicht zu vernachlässigenden, erheblichen Wärmeverlust.
3. Die Solaranlagen müssen vereinfacht und standardisiert werden, um Kosten für Projektierung und Installation zu verringern und Installationsfehler zu vermeiden. Hier geht es nicht um einzelne Nullenergiehäuser, sondern darum, den Energieverbrauch für die Masse des Gebäudebestandes zu senken.

4. Literaturverzeichnis

- /Be11/ Berner, Joachim.: Solarwärme günstig produzieren
Sonne Wind & Wärme 1/20011
- /Pir04/ Piria,R.: Marktentwicklung in Europa und aktuelle Herausforderung, %.
Forum Solarpraxis, Tagungsband 2004
- /ES09/ ESTIF: Potential of Solar Thermal in Europe, 2009
- /Fö10/ Föste at al: Wärmeverluste in Hochleistungsflachkollektoren mit selektiv
beschichteten und gasgefüllten Isolierverglasungen, ISFH 2010
- /Rei10/ Reiter at al: Überschutzmaßnahmen für solarthermische Kollektoren,
HAW-Ingolstadt, 2010
- /NA08/ Heatpipe zur Wärmeübertragung in der Solarthermie, Gebrauchsmuster
Nr.: DE 20 2008 007 U1
- /Pa10/ Pape, J.: Experimentelle Untersuchung zum Nutzwärmestrom in
Sonnenkollektoren mit Wärmerohr, Bachelorarbeit 2010, ISFH
- /Mie10/ Mientkewitz, G., Zabel, J. „Möglichkeiten eines Heatpipekollektors ohne
Stagnationsprobleme“, 20. Symposium Solarthermie, Banz 2010
- /Ro11/ Rothenwöhrer, Markus, „Einfluss thermodynamisch metastabiler
Zustände auf den Zerfall und das Mischverhalten von
Flüssigkeitsstrahlen“, Dissrtation,2003, Technische Universität
München“