

W. D. Ex.

**KERNFORSCHUNGSZENTRUM
KARLSRUHE**

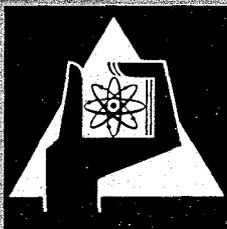
Januar 1967

KFK 512

Institut für Neutronenphysik und Reaktortechnik

Experimentelle Untersuchungen an Natrium-gefüllten Heat-Pipes

S. Dorner, F. Reiß, K. Schretzmann



GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG M. B. H.

KARLSRUHE

Als Manuskript vervielfältigt.

Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor.

Gesellschaft für Kernforschung m. b. H.

Karlsruhe

KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

Januar 1967

KFK 512

Institut für Neutronenphysik und Reaktortechnik

Experimentelle Untersuchungen an Natrium-gefüllten Heat Pipes

von

S. Dorner, F. Reiß, K. Schretzmann

Gesellschaft für Kernforschung m.b.H., Karlsruhe

A b s t r a c t

The possibilities of producing heat pipes and, especially, the necessary capillary structures are listed. Several types of heat pipes are made from stainless steel and tested at temperatures between 400°C and 1055°C . The thermal power was determined by a calorimeter. Bubble-free evaporation of sodium from rectangular open channels is possible with a heat flux of more than $1,940\text{ W/cm}^2$ at 1055°C . The temperature drop along the tube could be measured only at low temperatures. A subdivided heat pipe worked against the gravitational field. A heat pipe with a capillary structure made of a rolled screen supported by rings and bars operated at 250 W/cm^2 heat flux in the evaporating region.

I n h a l t

1. Einleitung	Seite 2
2. Überblick über die Herstellungsmöglichkeiten von Kapillarstrukturen	3
3. Ausgeführte Heat Pipes	4
3.1 Heat Pipes mit Netzen	4
3.2 Heat Pipes mit Rillen	5
3.3 Heat Pipes mit Netzen und Stützkäfigen	6
3.4 Unterteilte Heat Pipes	6
3.5 Einfüllen von Natrium	7
3.6 Entgasen	7
3.7 Verschließen	7
4. Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen	8
4.1 Allgemeiner Versuchsaufbau	8
4.2 Heat Pipes mit Netzen	9
4.3 Heat Pipes mit Innenrillen	9
4.4 Heat Pipes mit Stützkäfig	12
4.5 Unterteilte Heat Pipes	13
5. Schlußbemerkungen	13
6. Literatur	14
Abbildungen	15 bis 21

1. Einleitung

In letzter Zeit ist unter der Bezeichnung Heat Pipe eine spezielle Vorrichtung zum Wärmetransport bei höheren Temperaturen bekannt geworden, die einige interessante technische und physikalische Eigenschaften aufweist [1,2,3]. Heat Pipes sind abgeschlossene Rohre, die mit geringen Mengen von verdampfbaren Stoffen gefüllt sind. Diese Stoffe können durch Ausbildung eines Dampf-Flüssigkeitskreislaufs Wärme in latenter Form von Stellen, an denen Wärme zugeführt wird (Verdampferregion), zu Stellen, wo die Wärme abgegeben werden soll (Kondensatorregion) transportieren. Die Flüssigkeit fließt dabei nach dem Vorschlag von GAUGLER [4] aus dem Jahre 1942 in einer Kapillarstruktur von der Kondensatorregion zum Verdampfer zurück. Dieser Gedanke ist erst 1964 wieder aufgegriffen und im Zusammenhang mit Arbeiten an thermionischen Konvertern und an Kernreaktoren für Raumfahrtanwendungen [3,5,6] verfolgt worden. Schon bei den ersten experimentellen Untersuchungen wurde festgestellt, daß das Wärmetransportvermögen von Heat Pipes im Vergleich zum Wärmeleitvermögen fester Stoffe sehr hoch ist [1]. Der zu einem bestimmten Wärmestrom gehörende Temperaturabfall in der Wärmetransportrichtung ist extrem niedrig. Das liegt daran, daß bei der Verdampfung und bei der Kondensation ohne Temperaturänderung relativ viel Wärme pro Masseneinheit in latenter Form aufgenommen bzw. abgegeben werden kann. Zudem ist der relativ niedrige Temperaturabfall aber auch auf die Tatsache zurückzuführen, daß zu einem bestimmten Druckabfall, der notwendigerweise in der Strömungsrichtung des Dampfes vorliegen muß, wegen der starken Abhängigkeit des Dampfdruckes von der Temperatur nur ein relativ kleiner Temperaturabfall gehört. An verschiedenen Stellen wurden Rechnungen und Versuche über den Dampf-, Flüssigkeits- und Wärmestrom [2,6,7,8,9] sowie über die günstigsten Abmessungen angestellt. Die Berechnungen beziehen sich auf den Fall, daß Verdampfer und Kondensator durch eine ohne Wärmeabgabe von Dampf und Flüssigkeit durchströmte Röhre verbunden sind. Bei vielen experimentellen Untersuchungen, speziell bei den in dieser Arbeit geschilderten, wird jedoch Wärme durch Strahlung auf der gesamten Oberfläche abgegeben. Wegen der kontinuierlichen Belegung der Wand mit Senken für den Dampf ist die mathematische Behandlung dieses Arbeitsmodus schwieriger, da die bekannten Strömungsformeln (etwa Hagen-Poiseuille'sches Gesetz) immer davon ausgehen, daß die Divergenz des Massenstromes auf den Rändern des Strömungsweges verschwindet oder nur an einzelnen Punkten von Null verschieden ist.

Da Heat Pipes bei großer Wärmeleistung ein relativ geringes Gewicht haben, sind sie für Raumfahrzeuge und Satelliten besonders interessant. In diesem Zusammenhang ist vorgeschlagen worden, die Wärme mit Heat Pipes aus Isotopenwärmeequellen [3,5] oder aus den Cores von Kernreaktoren [6,8] herauszuholen und sie Anordnungen zur Direktumwandlung in elektrische Energie oder anderen Wärmeverbrauchern zuzuführen. Auch der Transport der Abwärme aus den Energiewandlern zu den Abstrahlern mit Hilfe von Heat Pipes wurde vorgesehen [3,6,8]. Dazu gibt es einige theoretische und experimentelle Untersuchungen [10,11,12].

Außerdem gibt es den Vorschlag, die Spaltwärme aus stationären Hochleistungs- und Hochtemperaturreaktorkernen über Heat Pipes auf das eigentliche, flüssige oder gasförmige Kühlmedium zu übertragen. Dabei könnte der Wärmeübergang in das Kühlmedium bei einer kleineren Wärmeleistungsdichte stattfinden als bei direkter Kühlung, ohne daß ein größerer Temperaturabfall in Kauf genommen werden muß. Außerdem können dabei größere Querschnitte für den Kühlmittelstrom vorgesehen werden. Beide Maßnahmen würden eine Reduzierung der Pumpleistung für die Umwälzung des Kühlmittels ermöglichen [13].

Die in den Heat Pipes verwendeten Verdampfer mit Kapillarstruktur können mit einer sehr viel größeren Wärmestromdichte belastet werden als alle anderen Verdampferflächen, bevor der bekannte Übergang der Verdampfung von der Oberflächenverdampfung in das Blasen- und Filmsieden und die damit verbundene plötzliche Überhitzung (burn out) auftritt. Nicht zuletzt im Hinblick auf diese interessante Eigenheit wurden experimentelle Arbeiten über Heat Pipes begonnen. Zunächst bestand dabei die Aufgabe, Heat Pipes mit den gewünschten Kapillarstrukturen herzustellen. Hierüber sowie über die mit ihnen durchgeführten Untersuchungen und die gewonnenen Ergebnisse wird berichtet.

2. Überblick über die Herstellungsmöglichkeiten von Kapillarstrukturen

Die Kapillarstrukturen können mit der Innenwand der Heat Pipe-Gefäße fest verbunden oder lose in sie eingelegt sein.

Mit der Innenwand fest verbundene Kapillarstrukturen können durch spanlose oder spanabhebende Verformung der Wand sowie durch Materialauftrag hergestellt werden. Gezogene Rohre aus Tantal, Niob und Niob-1%-Zirkon werden mit verschiedenen Längsrillen industriell gefertigt.⁺ Versuche, Längsrillen

⁺ W.C. Heraeus GmbH., Hanau

in Rohren durch Räumen anzubringen, sind erfolgreich verlaufen. Ebenso sind Versuche, Rohre mit Längsrillen durch Fräsen ebener Bleche und anschließendes Rollen und Schweißen herzustellen, gelungen. Auch durch Elektroerosion sollten sich geeignete Kapillarstrukturen darstellen lassen. Besonders interessant dürfte die Anwendung der Elektroerosion zum Feinschlachten von Rillen sein, die durch andere Verfahren im Groben ausgearbeitet wurden. Ohne Verformung kann man mit der Wand fest verbundene Kapillarstrukturen dadurch erhalten, daß das Material über geeigneten Kernen auf elektrolytischem Wege aus wässrigen Lösungen oder Salzschnmelzen oder durch thermische Zersetzung aus der Gasphase [14] abgeschieden wird. Unter Umständen kann auch auf der Innenseite von Hohlkörpern nach geeigneter Maskierung Material aufgebracht werden, das die Stege der Kapillarstrukturen bildet. Schließlich kann auch elektroerosive Materialübertragung erwogen werden. Lose an der Wand angebrachte Kapillarstrukturen können durch Einlegen von Netzen [1], durch Einschieben von kapillarentragenden Körpern [8], durch Einlegen von Sinterkörpern [8] und durch Flamspritzen von porösen Schichten hergestellt werden. Sie können auch durch Pulverschüttungen, die von geeigneten Netzen gehalten werden, gebildet werden.

Bei den Experimenten, über die hier berichtet werden soll, wurden wegen der einfachen Herstellungsmöglichkeit zuerst Kapillarstrukturen durch eingelegte Netze verwirklicht. Als es gelungen war, ein geeignetes Räumwerkzeug zu bauen, wurden Rohre mit Längsrillen versehen. Als dritte Variante wurden Heat Pipes mit durch starre Käfige gestützten Netzen gebaut, die eine Verbesserung der ersten Ausführungsform darstellen. Bei der vierten Ausführungsform war der Innenraum unterteilt. Dabei bestand die Kapillarstruktur wieder aus einfachen Netzen.

3. Ausgeführte Heat Pipes

3.1 Heat Pipes mit Netzen

Für diese Heat Pipes wurden zwei Lagen Netz aus rostfreiem Stahldraht von 150 μm \varnothing mit 250 μm Maschenweite (60 Mesh) auf einen passenden Dorn gewickelt und in die vorgesehenen Hüllrohre eingeschoben. Die Hüllrohre bestanden aus verschiedenen Sorten rostfreien Stahls und aus Vacon 70 mit Außendurchmessern zwischen 10 und 23 mm sowie Wandstärken zwischen 0,16 mm und 1,5 mm. Die Längen betragen bis zu 1 m. Auf die entsprechenden Innendurchmesser zusammengebogen, hat das Drahtnetz eine beträchtliche Federkraft, die zumindest vor dem ersten Ausglühen ein Andrücken des Netzes an die Wand bewirkt.

Röntgenaufnahmen von solchen Rohren, siehe z.B. Abb.1, zeigten, daß sich im Netz Falten und Wülste bilden, an denen kein Kontakt mit der Wand besteht.

3.2 Heat Pipes mit Rillen

Im Unterschied zu Netzen liefern achsenparallele Innenrillen in Heat Pipe-Rohren eine definierte und sehr leistungsfähige Kapillarstruktur, deren Eigenschaften man durch Wahl der Abmessungen variieren kann. Zu den vorgesehenen Versuchen sollten die Rohre auf ihrer ganzen inneren Oberfläche Längsrillen haben. Daher kam das Rollen und Schweißen ebener Bleche nicht in Frage. Ein Fräsen, Sägen oder Stoßen der nur wenige zehntel Millimeter breiten und tiefen Rillen ist bei den hier erforderlichen Längen von 0,5 bis 1 m auf der Innenseite der Rohre nicht möglich. Daher mußten die Rohre geräumt werden.

Das Herstellen eines Räumdorns mit dem Negativ der Kapillarstruktur als Schneidprofil wirft Härteprobleme auf, da die die Rillen räumenden Stege formbedingt zu einem bruchgefährdeten Härteverlauf am Steggrund neigen. Dieses Problem wurde durch ein zerlegbares Räumwerkzeug umgangen, bei dem vorgefertigte, gehärtete Einzelmesser in den nicht gehärteten Aufnahmeteil des Räumwerkzeuges eingesetzt wurden.

Damit konnten Rillen in nahtlosen Präzisionsrohren aus hochwarmfestem, rostfreiem Stahl - X 15 CrNiSi 2520 - von 20 mm Außendurchmesser, 0,8 mm Wandstärke und 20_μm Durchmessertoleranz angebracht werden. In einem Arbeitsgang entstanden dabei 36 Rillen von 0,2 mm Breite und 0,4 mm Tiefe. Die Abbildung 2 zeigt einen Schnitt durch ein Rohr, durch das das Werkzeug mehrmals versetzt hindurchgezogen worden war. Dadurch ergaben sich etwa 91 Rillen.

Die in den Rillen zurückgebliebenen Späne konnten wegen der geringen Rillenbreite nicht mehr durch Bürsten oder ähnliche Verfahren entfernt werden. Die Rohre wurden daher in einem heißen Salpeter-Flußsäure-Gemisch mit Ultraschall gereinigt.

3.3 Heat Pipes mit Netzen und Stützkäfigen

DEVERALL und KEMME [5] hatten versucht, das Ablösen der Netze von der Innenwand der Rohre durch zusätzliches Anpressen des Netzes mittels einer eingelegten Zugfeder aus Wolframdraht zu beheben. Das Ablösen des Netzes kann aber nur durch formschlüssig anliegende, starre Käfige verhindert werden, da die Federwirkung aller Materialien mit steigender Temperatur rasch sinkt. Die Abbildung 3 zeigt ein Stück eines ausgeführten Käfigs. Er wurde aus Ringen, in die außen axiale Schlitze eingefräst waren, und Stäben aufgebaut. Ringe und Stäbe sind durch Punktschweißung verbunden. Die Käfige wurden so bemessen, daß sie zusammen mit den aufgewickelten ein bis zwei Lagen von Netz gerade noch in das Außenrohr eingerüttelt werden konnten. Das Netz wurde nach dem Einrütteln optisch kontrolliert.

3.4 Unterteilte Heat Pipes

Auf die Schwierigkeit, Heat Pipes gegen äußere Kräfte auf größere Längen zu betreiben, wurde in vielen Literaturstellen hingewiesen. Diese Schwierigkeit kann man umgehen, indem man die Heat Pipe quer zur Wärmetransportrichtung in Abteile unterteilt, deren Länge höchstens so groß ist, wie die Steighöhe der Arbeitsflüssigkeit in der verwendeten Kapillarstruktur. An den Trennwänden zwischen den einzelnen Abteilen, die ebenfalls mit Kapillarstruktur versehen sind, heizt dann ein Abteil alle in Wärmestromrichtung nach ihm liegenden. Dabei ergibt sich wegen der endlichen Wärmeleitfähigkeit der Zwischenwände ein Temperatursprung zwischen den Abteilen.

Eine Heat Pipe nach diesem Prinzip wurde aus 4 Einzelementen aus rostfreiem Stahl hergestellt. Abbildung 4 zeigt hiervon eine Röntgenaufnahme. Die Kapillarstruktur wurde durch Einlegen von Drahtnetz aus rostfreiem Stahl von 200 mesh (50/μ Drahtstärke, 75/μ Maschenweite) erzeugt. Der gesamte Innenraum einschließlich der Wärmeübergangsflächen wurde dazu mit 2 Lagen Netz bedeckt und dieses durch Punktschweißen an der Wand festgehalten. Der Aufbau erfolgte in der Weise, daß das erste Abteil am Boden verschlossen wurde. Dann wurde durch das verjüngte Ende eine abgemessene Menge Natrium gefüllt und nach Aufsetzen einer Verschlusskappe mit Pumpstutzen die Röhre unter Vakuum kurz in Betrieb genommen und dann mittels Hochfrequenz zugeschweißt. Nun wurde die Außenseite der Wärmeübergangsfläche mit Netz versehen, die mit Netz ausgekleidete Hülle der zweiten Stufe aufgesetzt und mit dem schon gefüllten ersten Abteil argonarcverschweißt. Das Füllen der zweiten Stufe und der weitere Aufbau schließen sich sinngemäß an.

3.5 Das Einfüllen von Natrium

Das Natrium wurde bei manchen Heat Pipes fest, bei anderen flüssig eingefüllt.

Zum Füllen mit flüssigem Natrium wurde auf den Einfüllstutzen der Rohre ein Trichter aus rostfreiem Stahl aufgeschweißt, in dessen Auslauf eine Fritte eingepreßt war. Zunächst wurde das Natrium im Trichter im Vakuum durch induktive Heizung geschmolzen und anschließend mit Schutzgas durch die Fritte hindurchgepreßt. Die im Natrium enthaltenen Oxide und Hydroxyde wurden von der Fritte zurückgehalten. Einfacher ist das Einfüllen des Natriums in fester Form. Das geschah in einer Schutzgasbox. Das Natrium wurde dabei sorgfältig gereinigt. Auf das gefüllte Rohr wurde dann der Deckel aufgesetzt und das Rohr in ein Gefäß gebracht, das unmittelbar anschließend evakuiert wurde.

Beim Betrieb fielen keine Unterschiede zwischen den Heat Pipes, in die das Natrium flüssig, und denen, in die das Natrium fest eingefüllt worden war, auf.

3.6 Entgasen

In der Literatur [1,3,8,15] wird auf die Bedeutung einer guten Entgasung der Rohre und der Treibmittel hingewiesen. Bei den beschriebenen Arbeiten wurde nur in einigen Fällen auf Sauberkeit geachtet und rigoros entgast. Bei den weniger sorgfältig gefertigten Heat Pipes zeigten sich in Einzelfällen anfänglich Gaspolster an den kalten Enden, die jedoch bei den von uns verwendeten Werkstoffen beim Betrieb bei Rotglut regelmäßig im Verlauf der ersten Betriebsstunden verschwanden und der erwarteten Isothermie über die ganze Länge Platz machten. Es wird vermutet, daß die Gase, soweit sie nicht vom Treibmittel gegettert wurden, durch die Wand in das die Heat Pipes umgebende Vakuum diffundierten. Um die Zeit bis zur Erreichung des idealen Betriebszustandes zu verkürzen, hat es sich jedoch als zweckmäßig erwiesen, die noch offene Heat Pipe unter Vakuum im Innenraum in Betrieb zu nehmen und zu verschließen, wenn sie isotherm bis zum Füllstutzen arbeitet.

3.7 Verschließen

Bei den ersten Versuchen wurden die aus Nickel gefertigten Füll- und Pumpstutzen nach dem Evakuieren durch Abquetschen verschlossen. Neben der geringen mechanischen Widerstandskraft der Kaltpreßschweißstelle stört an diesem Verfahren, daß sich nur bestimmte Stoffe kalt preßschweißen lassen und daß eine Benetzung der zu verschweißenden Teile mindestens bei Natrium und Cäsium ein dichtes Verschließen verhindert. Die in der Literatur oft

genannte Schließung mittels Elektronenstrahlschweißens wäre aus innerbetrieblichen Gründen umständlich gewesen. Die Heat Pipes wurden deshalb unter Vakuum durch Erhitzen des Füllstutzens mit Hochfrequenz zugeschweißt. Dies kann in demselben evakuierten Quarzrohr geschehen, in dem die Heat Pipe vorher gefüllt und entgast worden war und in dem sie später nach dem Verschließen betrieben werden soll. Das Verfahren ist einfach und liefert reproduzierbare Ergebnisse. Näheres hierzu siehe in [16].

4. Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen

4.1 Allgemeiner Versuchsaufbau

Die Heat Pipes wurden in der Regel induktiv mit Hochfrequenz beheizt. Dazu war um die Röhren eine ein- oder mehrwindige Spule herumgelegt. Diese wurde von einem 15 kW-Generator, der mit Frequenzen von 330 - 500 kHz arbeitete, gespeist.

Von der Generatorleistung wurde nur ein kleiner Bruchteil den Heat Pipes als Wärmeleistung zugeführt, da der Spalt zwischen Heat Pipe und Spule wegen der dazwischen angeordneten Quarz- bzw. Glasrohre relativ groß sein mußte. Hierdurch ergab sich ein schlechter Kopplungs-Wirkungsgrad. Bei Einführung der Hochfrequenz ins Vakuum kann man zwar den Spalt zwischen Spule und Heat Pipe sehr klein halten. Die verwendete Vakuum-HF-Durchführung hatte jedoch eine so hohe Selbstinduktion, daß die dabei in die Heat Pipe eingekoppelte Gesamtleistung noch kleiner war.

Bei der induktiven Hochfrequenzheizung erhält man im Wandmaterial der Heat Pipe eine sehr hohe Wärmeleistungsdichte. Die Wärmeerzeugung ist an den der Spule am nächsten liegenden Stellen (in der Spulenebene) am größten und nimmt von dort nach beiden Seiten hin ab. Die Abbildung 5 zeigt den Verlauf der Wärmeleistung pro Rohrlängeneinheit N' in Abhängigkeit vom Abstand z von der Spulenebene bei typischen Rohr- und Spulenabmessungen. Die Ordinate ist bezüglich der Leistung normiert und hat daher die Dimension cm^{-1} . Die in einem ringförmigen Rohrstück mit der Höhe dz erzeugte Wärmeleistung hat den Betrag

$$dQ = Q_0 \cdot N'(z) \cdot dz ,$$

wobei Q_0 die Gesamtleistung bedeutet. Man sieht, daß unter den drei aufgeführten Spulen mit der Spule Sp 1 die schärfste räumliche Konzentrierung der Wärmeleistung und dadurch bei gleicher Gesamtleistung auch die höchste Leistungsdichte erreicht werden kann.

In vielen Fällen wurden als Umhüllung der Heat Pipes zwei konzentrische Glasrohre verwendet, deren Zwischenraum von Kühlwasser durchflossen war. Dadurch erreichte man, daß die Heat Pipes sich in einer Umgebung von konstanter und genau bekannter Temperatur befanden. Durch Messung der Stromstärke und der Temperaturerhöhung des Kühlwassers konnte die von der Heat Pipe abgestrahlte Wärmeleistung bestimmt werden. Die bei dem Kalorimeter vorliegende Dicke der Wasserschicht von etwas über 1 mm reichte aus, um die von der Heat Pipe abgestrahlte Wärme zu absorbieren.

Die Temperatur der Heat Pipes wurde anfänglich mit Pyrometern bestimmt. Die erhaltenen Temperaturwerte konnten aber wegen der Unkenntnis der Strahlungskonstanten und der allmählichen Bedampfung der Quarz- bzw. Glasrohre aus den abgelesenen Werten nicht genau berechnet werden. Deswegen wurden auf die Heat Pipes Thermoelemente aus Nickel-Chrom-Nickeldraht von 0,2 mm \emptyset aufgeschweißt.

4.2 Heat Pipes mit Netzen

Heat Pipes mit Kapillarnetzen konnten ohne Schwierigkeiten in Betrieb genommen werden. Bei ihnen war aber nur selten ein Betrieb über längere Zeit ohne heiße Flecken möglich. Wegen der geringen Wärmekapazität der Wand war aber gerade bei dünnwandigen Rohren die Bewegung des Natriums und der Stand des Natriumspiegels sowie die Ausbreitung des Natriumdampfes in der Röhre an Helligkeitsschwankungen sehr gut zu erkennen.

4.3 Heat Pipes mit Innenrillen

Bei den mit Innenrillen ausgerüsteten Heat Pipes traten bei hohen Temperaturen keine heißen Stellen auf, und es wurden an ihnen ausführliche Messungen über den Zusammenhang von Temperatur und Wärmeleistung angestellt. Sie sind in Abbildung 6 wiedergegeben und beziehen sich auf eine Röhre von 48 cm Länge. Man sieht, daß sich im stationären Betrieb mit den verschiedenen Spulen Temperaturen zwischen 600°C und 1055°C bei Leistungen von 500 bis 3050 W ergeben. Die höchste Leistung, 3050 W, wird dabei mit der zweiwindigen Spule Sp 2 erreicht. Mit der einwindigen Spule Sp 1 konnte mit dem Generator zwar nur eine Leistung von 2080 W in die Röhre eingekoppelt werden. Hierbei ergibt sich aber an der Stelle höchster Leistungsdichte eine Leistung pro Längeneinheit von 1400 W/cm. Das ist die höchste bei diesen Experimenten im stationären Zustand erreichte Leistung pro Längeneinheit. Auf die innere Oberfläche bezogen entspricht ihr eine Leistungsdichte von 233 W/cm².

An den Stellen mit hoher Wärmestromdichte besteht eine große, einwärts gerichtete Wärmestromdichte im Wandmaterial. Deswegen tritt eine Temperaturdifferenz bis zu 80°C zwischen Außen- und Innenseite der Wand auf. Ihre genauere Berechnung ist in [17] dargestellt. Da die Heat Pipes im Innern nahezu isotherm sind, ist ihre Außenseite an den Stellen mit der höchsten Heizleistungsdichte um diese Temperaturdifferenz heißer als in den ungeheizten Bereichen.

Bei großer Wärmestromdichte erkennt man außerdem mit bloßem Auge, daß die Temperatur auf der Außenseite der Heat Pipe in der Heizzone an Stellen mit gleichem Abstand von der Mittelebene, jedoch mit verschiedenem Azimut unterschiedliche Werte hat. Man sieht achsenparallele, helle und dunkle Streifen. Die Temperaturunterschiede sind so gering, daß sie mit einem Pyrometer nicht bestimmt werden können. Die Zahl der hellen bzw. dunklen Streifen entspricht der Zahl der Rillen im Rohr. Die azimutale Temperaturvariation wird auf die Rillenstruktur an der inneren Oberfläche zurückgeführt. Zwei Erklärungen sind denkbar: Die azimutale Temperaturvariation kommt durch die unterschiedliche Wärmeleistungsdichte zwischen den Stegen und den Stellen, wo die Rillen in die Wand eingeschnitten sind und wo sich die elektrischen Stromlinien zusammendrängen müssen, zustande. Oder sie entsteht dadurch, daß die Verdampfungskühlung im Innern des Rohres nicht überall sondern entweder nur an den Stegen oder nur an den Rillen wirkt. Der erste Grund kann für den beobachteten Effekt nicht maßgebend sein. Wenn man nämlich während des Betriebes die Heizspule langsam hoch zieht, setzt die Verdampfungskühlung, sobald der Abstand der Spule von der Unterkante der Heat Pipe die Steighöhe des Natriums in den Kapillaren überschreitet (ca. 6 cm), plötzlich aus. In diesem Augenblick verschwinden die hellen und dunklen Streifen. Dieser Betriebszustand darf bei voller Senderleistung nur kurze Zeit bestehen, da das Stahlrohr sonst schmilzt. Für eine einwandfreie Beobachtung des Phänomens genügt diese Zeitspanne aber. Daraus folgt, daß die Verdampfungskühlung im Innern des Rohres nicht überall wirkt. Es liegt an sich nahe, daß, wenn die Verdampfung nicht überall stattfindet, sie dann in den Rillen auftritt. Dies bestätigt die Beobachtung, daß bis zur Steighöhe des Natriums in den Rillen die Heat Pipe in ihrem unteren Teil gegen die Schwerkraft gearbeitet hat. Dabei muß die Flüssigkeit im unteren Teil der Rohre von unten nach oben strömen. Sie kann nur in den Rillen geflossen sein. Dort würden also die dunklen Streifen den Rillen entsprechen. Da mit zunehmender Höhe die Streifen ihren Helligkeitswert nicht wechseln, entsprechen auch im oberen Teil der Heizzone die dunklen Streifen den Rillen.

Daraus folgt, daß die ganze Wärmeabfuhr auf der Innenseite auf die Rillenoberfläche beschränkt ist. Die Gesamtbreite aller 36 Rillen beträgt 7,2 mm. Bezieht man die Wärmestromdichte auf diese Oberfläche, dann sieht man, daß die höchste, stationär erreichte Leistungsdichte (ML) (mit Spule 1) bei 930°C 1945 W/cm^2 betrug. Dabei neigte die Verdampfungszone noch nicht zum Austrocknen. Auch ein Filmsieden, das am Auftreten von noch höheren Über-temperaturen (ca. 230°C) erkennbar gewesen wäre, trat nicht auf. Die Wärmestromdichten im stationären Betrieb, die sich mit der Spule Sp 1 in der Mittelebene so errechnen, sind in der Abbildung 7 über der Temperatur als Kurve ML aufgetragen.

Da der Verdampfer bei diesen Wärmestromdichten nicht austrocknete, müssen die maximal möglichen Leistungsdichten (MML) noch größer sein. Zu ihrer genauen Bestimmung wurde folgendermaßen vorgegangen:

Der Sender wurde auf eine bestimmte Leistungsstufe eingestellt und dann intermittierend eingeschaltet. Einschalt- und Pausenzeit lagen zwischen 0,1 und 2 Sekunden. Das Verhältnis der Pausen- zur Heizzeit wurde immer so gewählt, daß gerade keine heißen Stellen auftraten. Die Temperatur stieg dabei stetig an. Sie wurde registriert. Die Einschaltdauer mußte im Verhältnis zur Pausenzeit ständig erhöht werden. Das Erreichen der 100%igen Einschaltdauer wurde auf dem Registrierstreifen vermerkt. Da die zu ihr gehörige Gesamtleistung bekannt ist, war damit ein Wertepaar von Temperatur und maximal möglicher Leistung (bzw. Wärmestromdichte) gewonnen. Entsprechend wurde bei anderen Leistungsstufen verfahren.

Die so ermittelten Werte sind in der Abbildung 7 als Kurve MML eingetragen. Sie beginnen bei 530°C mit 160 W/cm^2 . Die MML von 1940 W/cm^2 wird danach schon bei 815°C erreicht, und man sieht, daß die Werte der MML bei gleicher Temperatur etwa doppelt so groß sind wie die Werte der ML, die im stationären Betrieb auftraten.

Ausführliche Versuche wurden angestellt, um den Temperaturabfall in Längsrichtung zu messen. Sichere Werte für den wahren Temperaturabfall konnten aus verschiedenen Gründen nicht gewonnen werden.

Die Thermolemente liefern, selbst wenn sie auf dem gleichen Umfang angebracht sind, unterschiedliche Temperaturwerte. Das wird einmal darauf zurückgeführt, daß die Thermolement-Schweißstellen verschieden dick ausfallen. Dickere Schweißperlen stellen für die Wärme, die durch sie hindurchgeleitet und an ihrer Oberfläche abgestrahlt werden muß, einen größeren Widerstand dar, der den gesamten Wärmestrom an dieser Stelle, auf einem sehr kleinen Querschnitt allerdings, reduziert. Hierdurch sinkt der Temperaturabfall an dieser Stelle in der Rohrwand von der Innenseite bis zur eigentlich thermoelektrisch wirksamen Fläche ab. Ein zweiter Grund, der zu unterschiedlicher Temperaturanzeige von Thermolementen auf demselben Umfang führen kann, kann in einer unterschiedlichen Bedampfung des umgebenden

Glas- bzw. Quarzrohres gesehen werden. Wenn das Glas- oder Quarzrohr an einer Stelle etwas bedampft ist und die Wärme reflektiert, wird die Wärmestromdichte an dieser Stelle wiederum niedriger als an anderen Stellen. Dies hat wiederum einen kleineren Temperaturabfall in der Wand zur Folge. Der Temperaturabfall in der HP-Wand liegt in der Größenordnung von 4°C . Eine Reduktion des Wärmestroms, etwa durch Reflexion um $1/10$, zieht ohne weiteres eine Temperaturänderung in der Anzeige des Thermoelements um $0,4^{\circ}\text{C}$ nach sich. In derselben Weise wirken kleine Veränderungen des Emissionsvermögens. Weiterhin wurde die experimentelle Bestimmung des Temperaturabfalls dadurch erheblich erschwert, daß die Speisespannung des Hochfrequenzgenerators nicht stabilisiert werden konnte. Mit schwankender Speisespannung änderte sich die der Röhre zugeführte Wärmeleistung und damit auch ihre Temperatur.

Es kann nach den Ergebnissen der Versuche nur vermutet werden, daß der Temperaturabfall bei einer Betriebstemperatur um 950°C , einem Wärmestrom in der Größenordnung von $2,5\text{ kW}$ und der mittleren Transportlänge von 25 cm (Strahlungskühlung auf der gesamten Oberfläche) zwischen $1/100$ und $1/10^{\circ}\text{C}$ liegt.

Auf eine Heat Pipe wurde ein Heizleiter aus Tantaldraht aufgewickelt und mit flammgespritztem Al_2O_3 isoliert und fixiert. Mit dieser Anordnung konnten wegen des großen Wärmewiderstandes zwischen Heizleiter und Röhre nur Temperaturen bis etwa 500°C erreicht werden. Dabei ergaben sich längs der Röhre größere Temperaturgradienten. Entsprechende Profile wurden mit vier Thermoelementen aufgenommen. Sie sind in Abbildung 3 für den stationären Zustand wiedergegeben. Unter 400°C beträgt der Temperaturabfall 50°C und mehr, er nimmt mit steigender Temperatur rasch ab. Bei 474°C Anfangstemperatur beträgt er z.B. nur noch 1°C . Es soll erwähnt werden, daß die verwendete Röhre kein Gaspolster hatte.

4.4 Heat Pipe mit Stützkäfig

Diese Röhren konnten stationär bis zu Heizleistungsdichten von 250 W/cm^2 , bezogen auf die innere Netzoberfläche, ohne Komplikationen betrieben werden. Dabei war die Gesamtleistung 2080 W . Höhere Leistungen konnten mit dem vorhandenen Generator nicht erreicht werden. Beim Betrieb im Temperaturbereich um 950°C bildeten sich die Ringe des Käfigs als helle azimutale Zonen an der Rohraußenwand ab. Es wird vermutet, daß dies von zusätzlicher Wärmeerzeugung in den massiven Stützringen herrührt (Rohrwandstärke $0,8\text{ mm}$, Eindringtiefe des HF-Feldes $0,7\text{ mm}$). Die Steighöhe des Natriums in dem gestützten 200 mesh -Netz war 22 cm . In einem nicht fixierten Netzbelag gleicher Maschenweite hatte sie nur 16 cm betragen.

4.5 Unterteilte Heat Pipe

Die aus vier Stufen bestehende, unterteilte Heat Pipe hat befriedigend gearbeitet. In senkrechter Stellung ließ sie sich von Raumtemperatur an ohne Vorwärmen der einzelnen Abteilungen mit einer konstanten Leistung von ca. 250 W anfahren. Die Heizspule konnte dabei wahlweise auf der Höhe des untersten Abteils (Betrieb mit Schwerkraft) oder auf Höhe des obersten Elements (Betrieb gegen Schwerkraft) angebracht werden. Gegen die Schwerkraft hat die Röhre über ihre ganze Länge einwandfrei gearbeitet. Dabei betrug der größte Abstand zwischen der Spulenmittelebene und dem Ende des untersten Abteils 40 cm. Die Steighöhe des Natriums in dem verwendeten Netz war an einer Kontroll-Heat Pipe mit derselben Netzeinlage aus dem Verschwinden der Isothermie bei langsamem Hochziehen der Heizspule zu 16 cm bestimmt worden. Die größte Leistung, bei der die Röhre ohne das Auftreten heißer Flecken betrieben werden konnte, war 530 W. Das geheizte Abteil nahm dabei eine Temperatur von 690°C an. An den Zwischenböden ergab sich eine Leistungsdichte von 48 W cm^{-2} . Die mit Thermoelementen gemessenen Temperatursprünge zwischen den einzelnen Abteilen waren 1,5 bis 50 mal größer als sie der reinen Wärmeleitung entsprächen. Die hohen Faktoren traten nach Überlastung der Übergangsf lächen auf und konnten durch Zurückfließenlassen des Natriums wieder ausgeheilt werden.

5. Schlußbemerkung

Die durchgeführten Versuche haben gezeigt, daß Heat Pipes Wärmeübertragungseinrichtungen darstellen, die leicht gebaut werden können und zuverlässig arbeiten. Sie haben außerdem ergeben, daß es bei der Verdampfung von Metallen aus Kapillarstrukturen, insbesondere aus einseitig offenen Rillen, möglich ist, Wärmeflüsse in einer bisher nicht beherrschten Höhe abzuführen. Dies läßt einen Einsatz von Heat Pipes oder Heat Pipe-ähnlichen Anordnungen auch in größeren, technischen Anlagen zum Wärmetransport möglich erscheinen. Genauere Aussagen hierüber werden nach dem Abschluß von weiteren Untersuchungen gemacht werden können.

6. Literatur

- [1] GROVER, G.M., T.P. COTTER und G.F. ERICKSON: Structures of Very High Thermal Conductance, Journ. Appl. Phys. 35, 1990 (1964)
- [2] COTTER, T.P.: Theory of Heat Pipes, LA-3246-MS (1965)
- [3] DEVERALL, J.E. und J.E. KEMME: High Thermal Conductance Devices Utilizing the Boiling of Lithium or Silver, LA-3211 (1965)
- [4] GAUGLER, R.S.: Heat Transfer Device, U.S.-Patent 2, 350, 348 (1942)
- [5] DEVERALL, J.E. und J.E. KEMME: Satellite Heat Pipe, LA-3278-MS (1965)
- [6] GROVER, G.M., J. BOHDANSKY, C.A. BUSSE: The Use of a New Heat Removal System in Space Thermionic Power Supplies, EUR 2229e (1965)
- [7] BOHDANSKY, J. und H.E.J. SCHINS: Heat Transfer of a Heat Pipe Operating at Emitter Temperatures, Int. Conf. Thermionic Electrical Power Generation, (ICTEPG), London (1965)
- [8] BUSSE, C.A., R. CARON, F. GEIGER und M. PÖTSCHKE: Performance Studies on Heat Pipes, ICTEPG, London (1965)
- [9] SCHINDLER, M. und G. WÖSSNER: Theoretisches Modell zum Wärmetransport in Wärmeübertragungsrohren, Atomkernenergie 10, 395 (1965)
- [10] BUSSE, C.A., R. CARON und C. CAPPELLETTI: Prototypes of Heat Pipe Thermionic Converters for Space Reactors, ICTEPG, London (1965)
- [11] BUSSE, C.A.: Optimization of Heat Pipe Thermionic Converters for Space Power Supplies, EUR 2534e (1965)
- [12] RÜHLE, R., D. STEINER, R. FRITZ und S. DAGBJARTSSON: Verwendung von Wärmeübertragungsrohren in Thermionikreaktoren, Atomkernenergie 10, 399 (1965)
- [13] WIRTZ, K., persönliche Mitteilung
- [14] NEU, H.: Heat Pipes und ihre Anwendung in nuklearen Energieversorgungseinheiten für die Raumfahrt, Atompraxis 12, 220 (1966)
- [15] GAMMEL, G.: Heat Pipes zur Wärmeübertragung in Hochtemperatursystemen, BBC-Nachrichten 48, 206 (1966)
- [16] DORNER, S., F. REISS und K. SCHRETZMANN: Das induktive Schweißen von Metallen im Vakuum, Z. f. Elektrowärme H.12 (1966)
- [17] SCHRETZMANN, K.: Induktive Wärmeerzeugung und Wärmeleitung in kreiszylindrischen Stäben und Rohren, Z. f. Elektrowärme H.12 (1966).

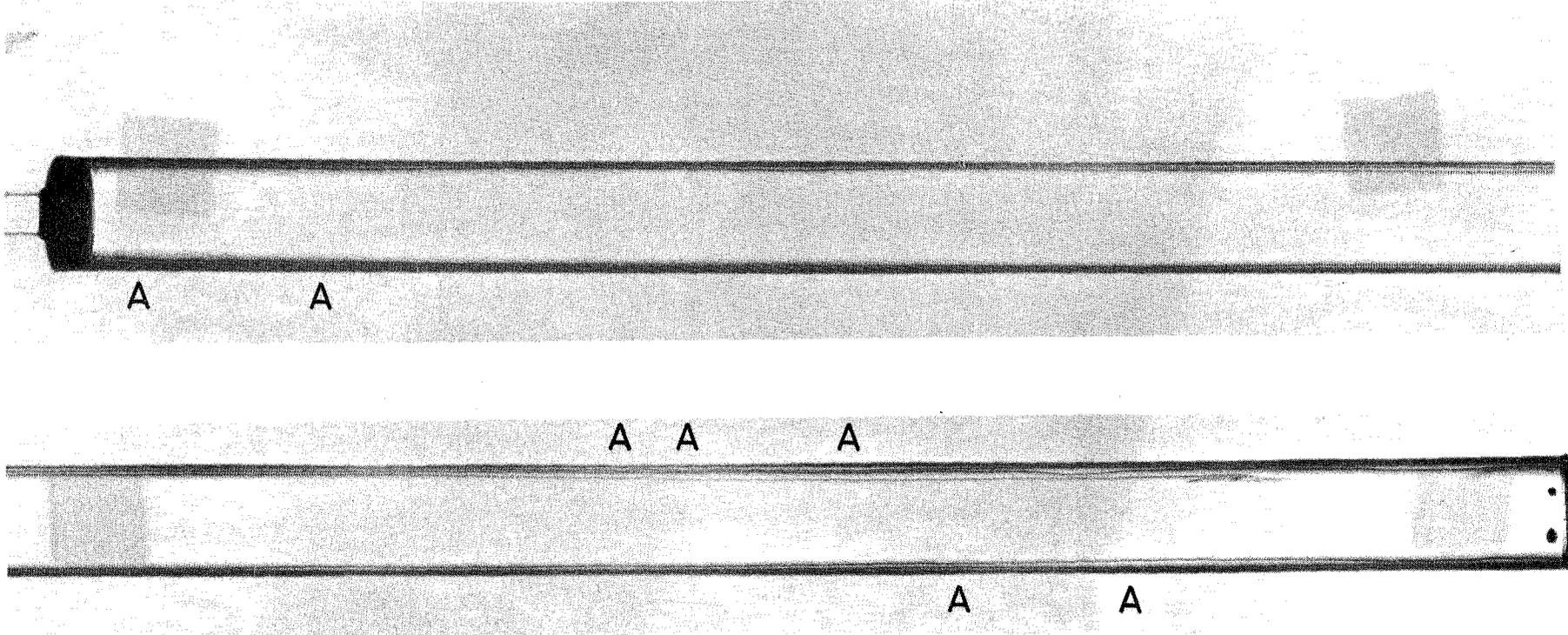


Abb.1 Röntgenaufnahme einer Heat Pipe mit Netz. Rohrdurchmesser 19 mm, Maschenweite des Netzes 250_{um}, Drahtstärke 150_{um}. Bei A liegt das Netz an der Rohrwand nicht an.

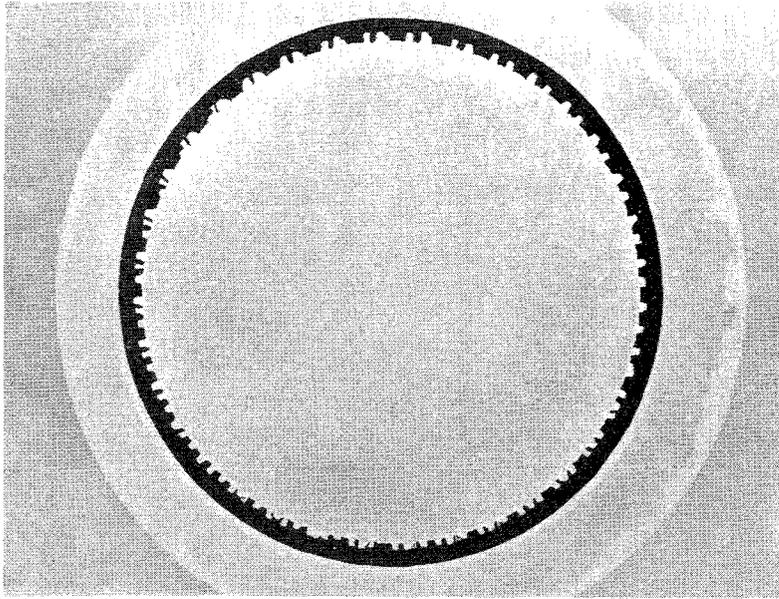


Abb.2 Schnitt durch ein Heat Pipe-Rohr mit Innenrillen. Rohrdurchmesser 20,5 mm, Rillenbreite 0,2 mm, Tiefe 0,4 mm.

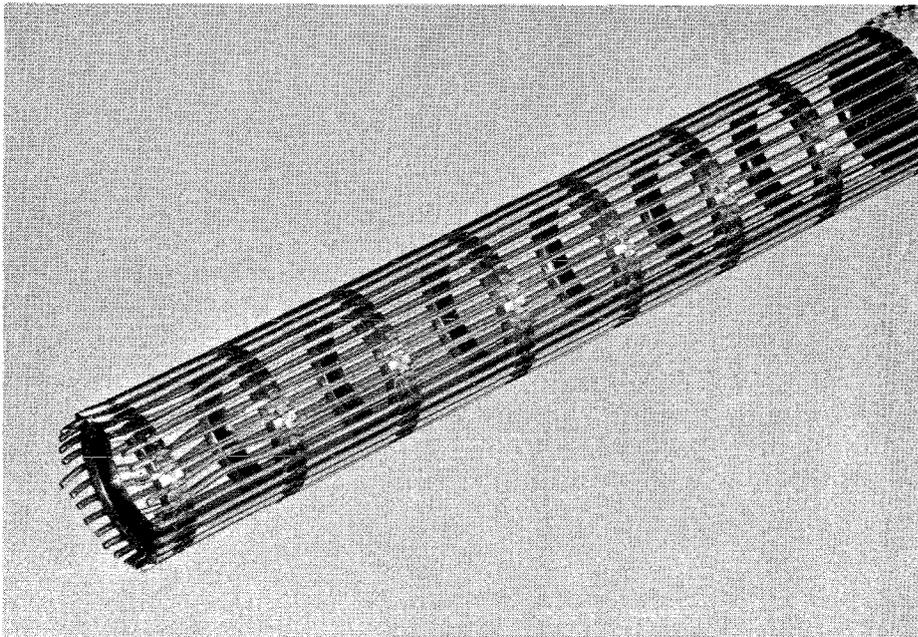


Abb.3 Stützkäfig aus Ringen und Stäben. Außendurchmesser 19 mm.

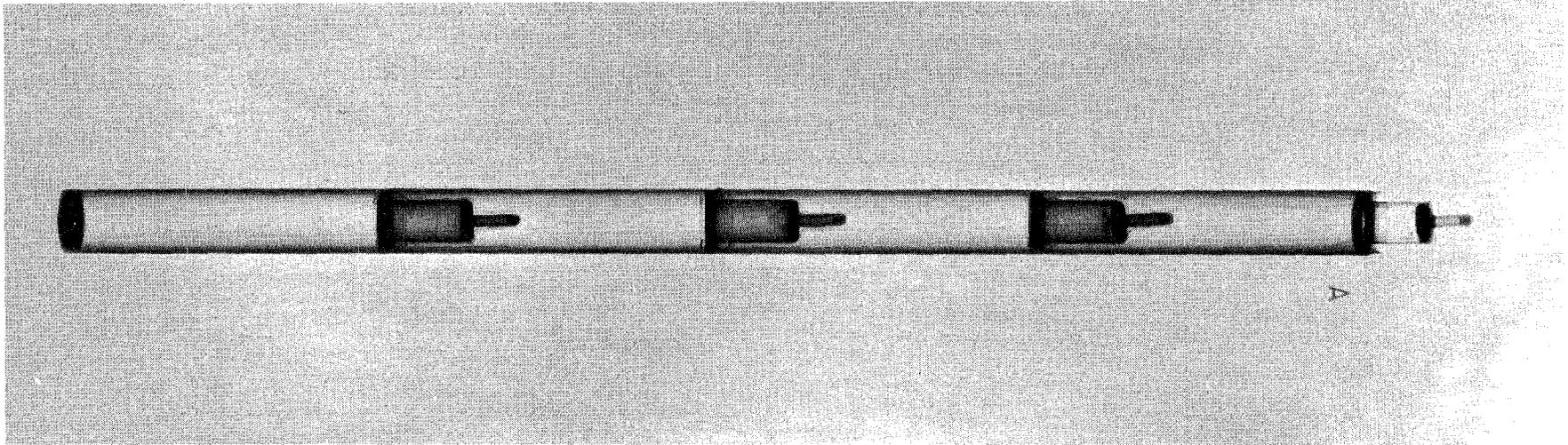


Abb.4 Röntgenaufnahme einer unterteilten Heat Pipe mit vier Kammern.
Gesamtlänge 42 cm.

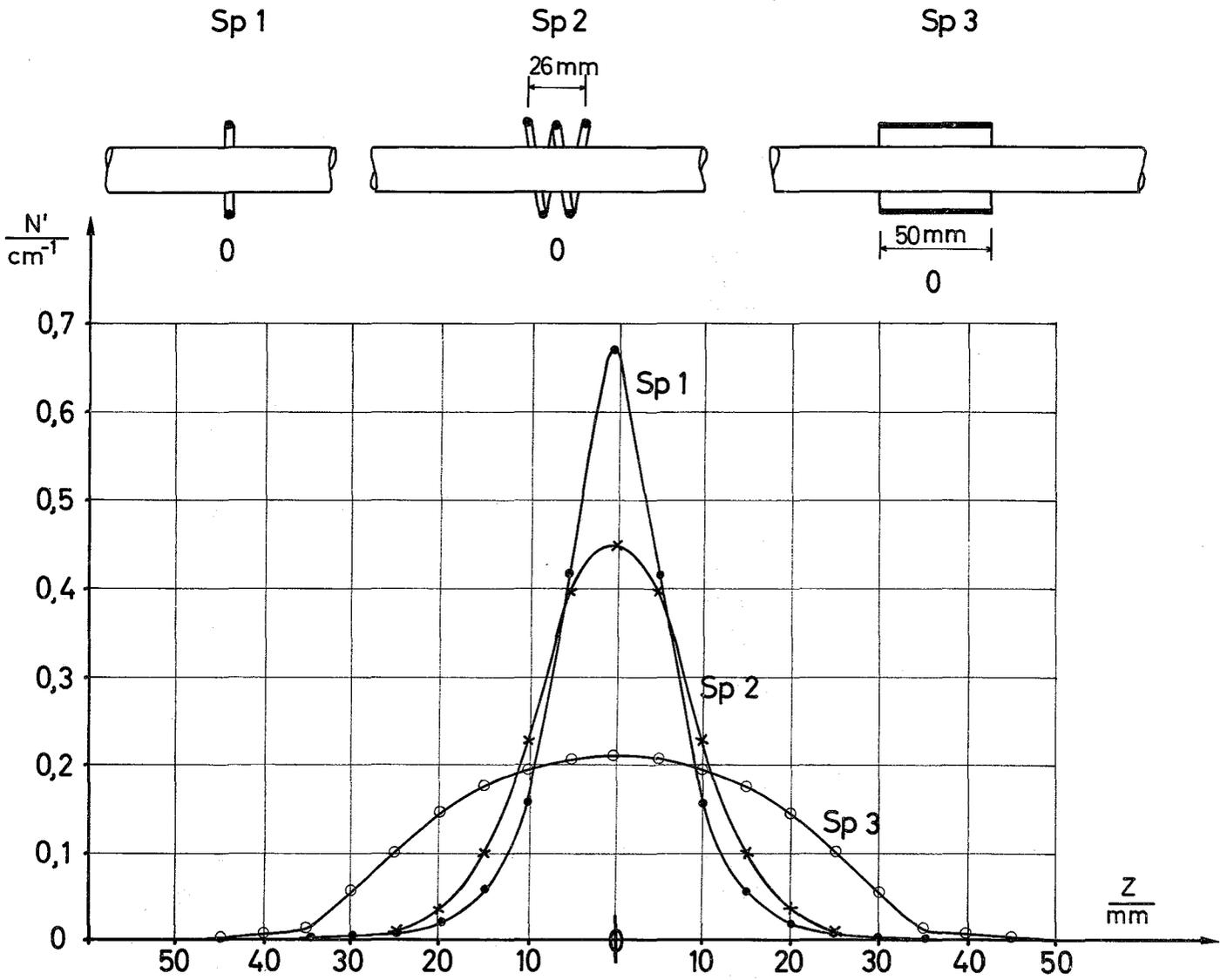


Abb.5 Normierte Wärmeleistung pro Längeneinheit N' in induktiv geheizten Rohren mit drei verschiedenen Spulen in Abhängigkeit vom Abstand z von der Spulenebene. Rohrdurchmesser 20,5 mm, Wandstärke 0,8 mm, Material rostfreier Stahl X 15 CrNiTi 2520.

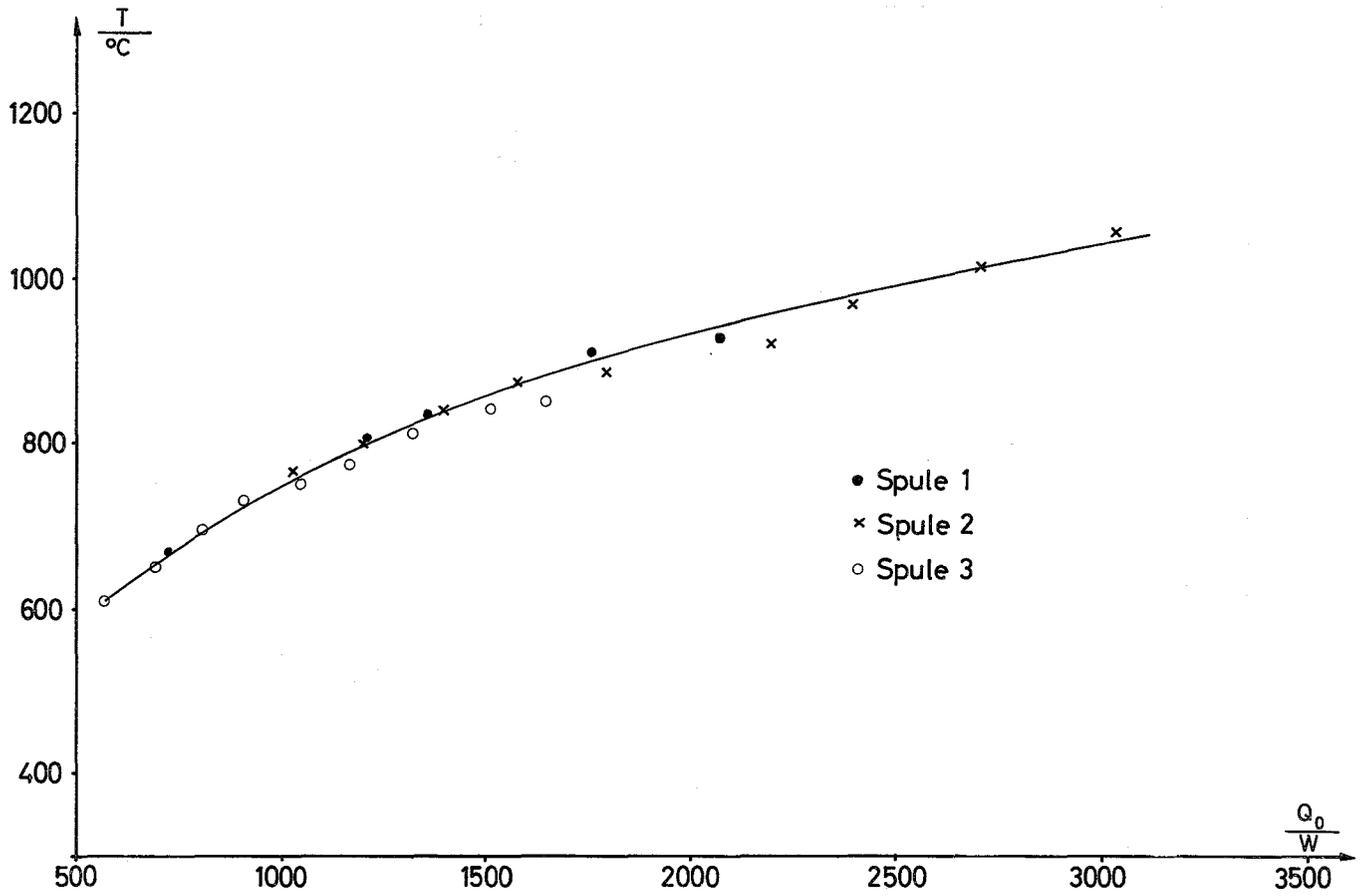


Abb.6 Temperatur und Wärmeleistung einer Rillen-Heat Pipe beim Betrieb im Vakuum. Wärmeabgabe durch Strahlung auf der ganzen Oberfläche. Rohrdurchmesser 20,5 mm, Rohrlänge 48 cm.

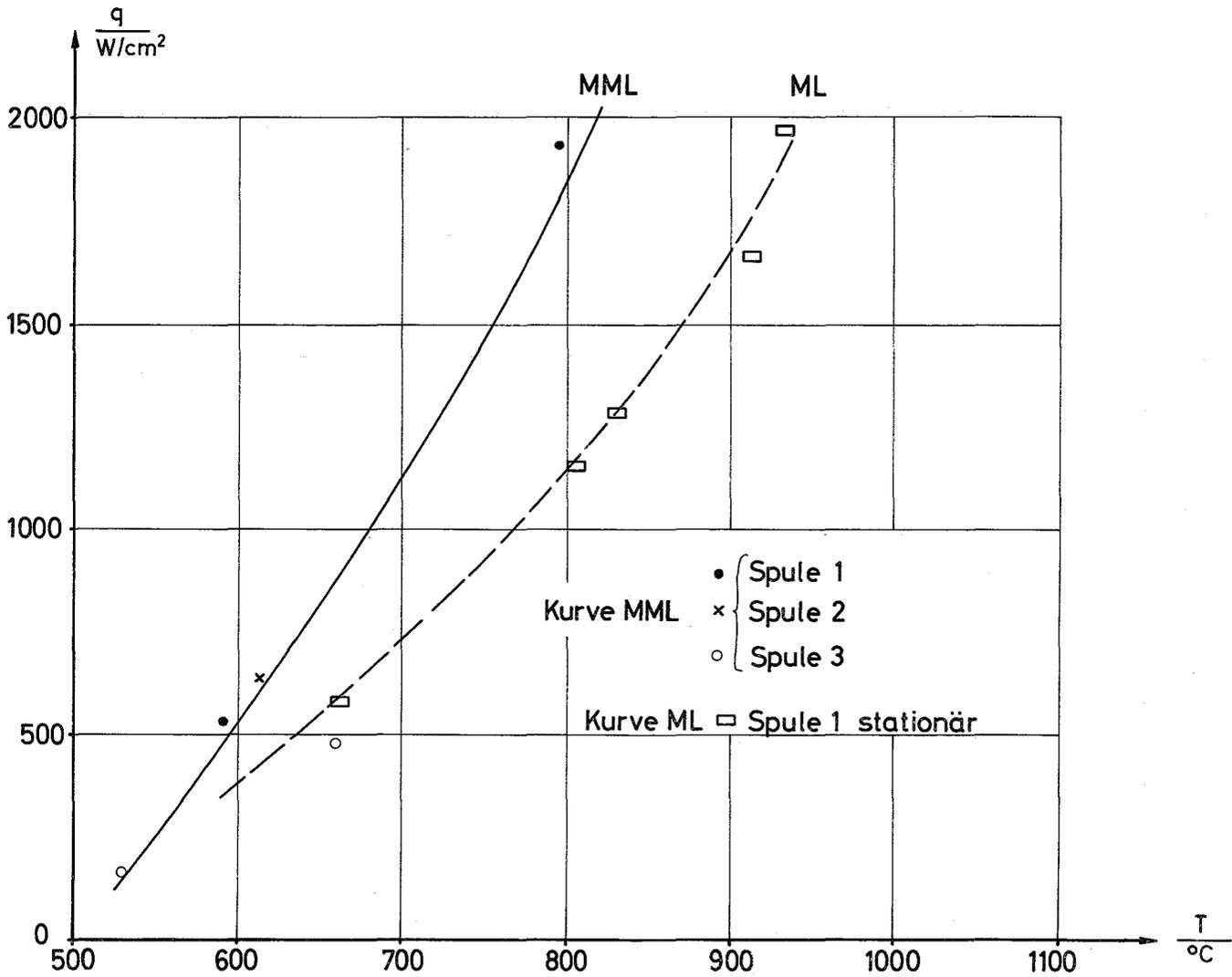


Abb.7 Maximal mögliche Leistungsdichte bei nichtstationärem Betrieb (MML) der Kapillaren der Heat Pipe von Abb.6 in Abhängigkeit von der Temperatur sowie Leistungsdichte in der Mittelebene der Spule (ML).

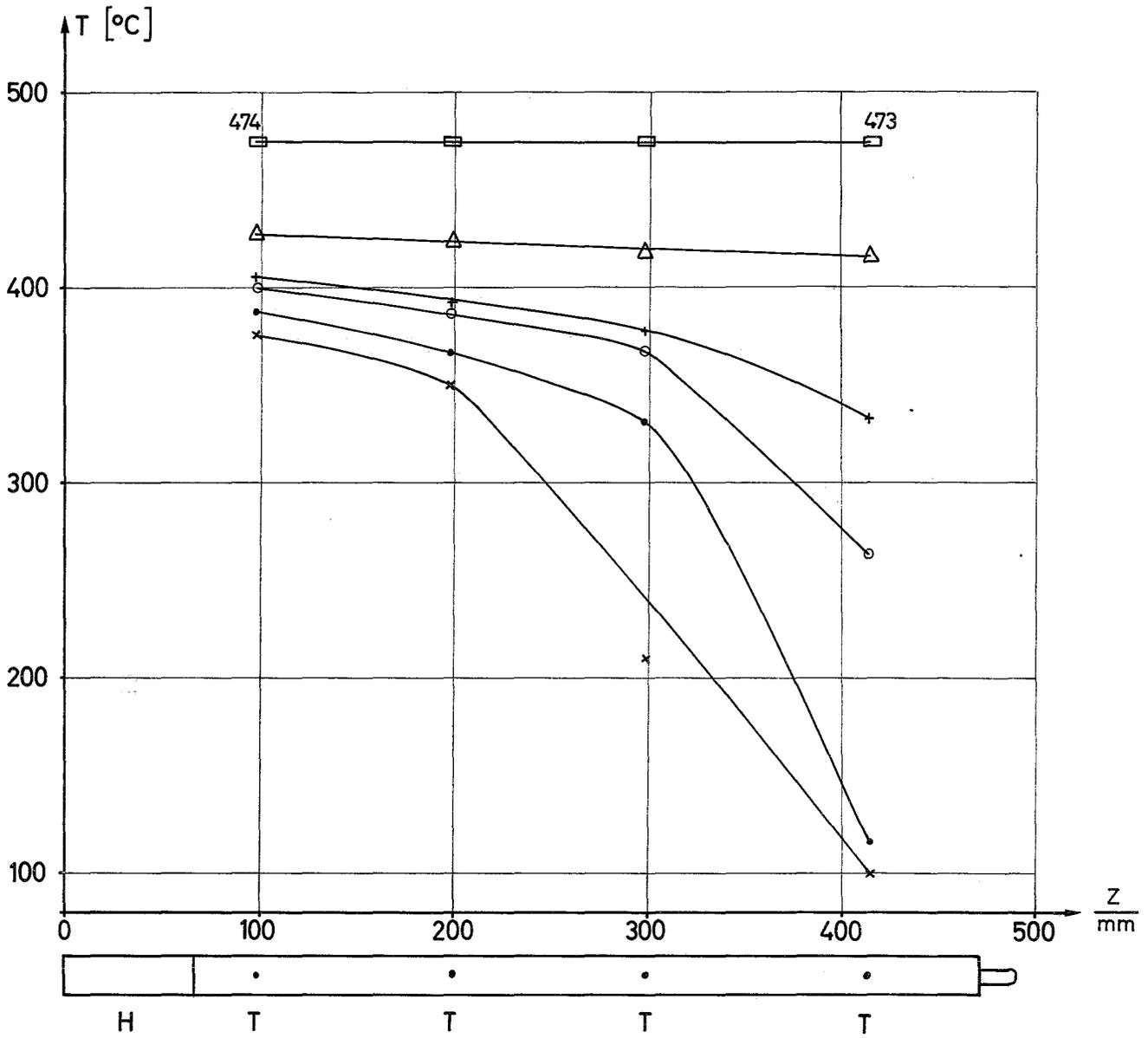


Abb.8 Temperaturprofile einer Heat Pipe bei niedrigen Betriebstemperaturen. Abmessungen der Röhre wie bei Abb.6. H - Heizstelle, T - Thermoelemente.