

DISSERTATION

Wärmestrom über Hertzsche Kon- takte bei tiefen Temperaturen

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der techni-
schen Wissenschaften unter der Leitung von

Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Walter Steiner

E138

Institut für Festkörperphysik

eingereicht an der Technischen Universität Wien

Technisch-Naturwissenschaftliche Fakultät

von

Dipl.-Ing. Harald Schulz

Matr.-Nr. 9826143

Weingartenfeld 3c

2440 Gramatneusiedl

Wien, im September 2008

Inhalt

| | |
|--|-----------|
| INHALT..... | 2 |
| KURZFASSUNG | 4 |
| ABSTRACT..... | 5 |
| DANKSAGUNG..... | 6 |
| 1 EINLEITUNG UND PROBLEMSTELLUNG | 7 |
| 2 LITERATURSTUDIE: WÄRMEÜBERTRAGUNG ÜBER KLEINE KONTAKTFLÄCHEN BEI TIEFEN TEMPERATUREN..... | 11 |
| 2.1 THEORETISCHE MODELLE..... | 11 |
| 2.1.1 <i>Hertzsche Theorie</i> | 11 |
| 2.1.2 <i>Acoustic Mismatch Model</i> | 12 |
| 2.1.3 <i>Dimensionsloser Rauheitsparameter</i> | 15 |
| 2.1.4 <i>Modell für den thermischen Einschnürungswiderstand</i> | 16 |
| 2.2 VORLIEGENDE EXPERIMENTELLE DATEN..... | 17 |
| 2.2.1 <i>Thermischer Kontaktwiderstand Transistor/Kühlkörper</i> | 17 |
| 2.2.2 <i>Thermische Leitfähigkeit von Kugellagern bei tiefen Temperaturen</i> | 19 |
| 3 MESSAUFBAU..... | 21 |
| 3.1 GRUNDKONZEPT | 21 |
| 3.2 BESTIMMUNG DES WÄRMESTROMS | 22 |
| 3.3 APPARATIVE AUSFÜHRUNG | 23 |
| 3.3.1 <i>Temperaturregelung</i> | 23 |
| 3.3.2 <i>Kühlung der unteren Regelplatte</i> | 24 |
| 3.3.3 <i>Kühlung der oberen Regelplatte</i> | 24 |
| 3.3.4 <i>Temperaturmessung</i> | 25 |
| 3.3.5 <i>Temperaturabbaustrecke und untere Gegenfläche</i> | 27 |
| 3.3.6 <i>Obere Gegenfläche</i> | 28 |
| 3.3.7 <i>Kryostat und Pumpstand</i> | 29 |
| 3.3.8 <i>Beladevorrichtung und Kraftmessung</i> | 30 |
| 3.4 MODIFIKATIONEN | 33 |
| 3.4.1 <i>Untere Regelplatte</i> | 33 |
| 3.4.2 <i>Obere Regelplatte</i> | 37 |
| 3.4.3 <i>Temperaturabbaustrecke</i> | 40 |
| 3.5 KALIBRATIONSMESSUNGEN MIT HDPE ZYLINDERN..... | 42 |
| 4 EXPERIMENTELLER TEIL | 47 |
| 4.1 WÄRMESTROMMESSUNGEN MIT KUGELN | 47 |
| 4.1.1 <i>Einfluss der Oberflächenrauheit der Gegenflächen</i> | 48 |
| 4.1.2 <i>Einfluss der Beschichtung der Kugeln</i> | 51 |
| 4.1.3 <i>Einfluss eines Vibrationstests</i> | 52 |
| 4.1.4 <i>Untersuchung des Konvektionseinflusses</i> | 52 |
| 4.1.5 <i>Einfluss des Materials der Gegenflächen</i> | 53 |
| 4.1.6 <i>Siliziumnitrid Kugeln auf AISI 440C Gegenflächen</i> | 54 |
| 4.1.7 <i>Abschätzung des Einflusses von Wärmestrahlung bei den Messungen mit Kugeln</i> | 56 |
| 4.2 BESTIMMUNG DER TEMPERATURABHÄNGIGKEIT EINES EINZELKONTAKTES..... | 58 |
| 4.2.1 <i>Messung mit Halbkugel</i> | 58 |
| 4.2.2 <i>Messung mit Thermoelementen</i> | 61 |
| 4.2.3 <i>Abschätzung des Wärmestroms über die Drähte der Thermoelemente</i> | 66 |
| 4.2.4 <i>Abschätzung des Einflusses von Wärmestrahlung bei der Thermoelementmessung</i> | 66 |
| 4.3 FEHLERRECHNUNG | 70 |
| 5 MODELLIERUNG DES SYSTEMS | 72 |
| 5.1 FINITE ELEMENTE MODELL | 72 |
| 5.1.1 <i>Vereinfachungen und Annahmen des Modells</i> | 72 |
| 5.1.2 <i>2-d Modell für Wärmestrommessungen mit Kugeln</i> | 72 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 5.1.3 | 3-d Modell für Wärmestrommessungen mit Kugeln | 74 |
| 5.1.4 | Ergebnisse der Simulation | 76 |
| 5.2 | ANALYTISCHES MODELL | 81 |
| 5.3 | ANWENDUNG DES ANALYTISCHEN MODELLS AUF STAHLKUGELN..... | 83 |
| 5.3.1 | Berechnung des materialabhängigen Faktors aus Messwerten | 83 |
| 5.3.2 | Berechnung des materialabhängigen Faktors aus Materialparametern und Anpassung der Werte von Si ₃ N ₄ -Kugeln..... | 84 |
| 5.3.3 | Berechnung des materialabhängigen Faktors aus der ANSYS Simulation | 84 |
| 5.3.4 | Anwendbarkeit des Modells auf Stahl und andere Materialien..... | 86 |
| 5.4 | VERGLEICH MIT MODELL FÜR THERMISCHEN EINSCHNÜRUNGSWIDERSTAND | 86 |
| 6 | DISKUSSION | 89 |
| | SCHRIFTTUM..... | 91 |
| | APPENDIX A: TABELLEN | 94 |
| | APPENDIX B1: INPUTFILE 3D-MODELL ANSYS..... | 100 |
| | APPENDIX B2: INPUTFILE 2D-MODELL ANSYS..... | 104 |

Kurzfassung

Aufgrund der parallel zur fortschreitenden Erschöpfung der globalen Ölvorkommen steigenden Nachfrage nach dieser Primärenergiequelle und den daraus resultierenden Preissteigerungen sowie der globalen Erwärmung durch Emission von Treibhausgasen ist die Entwicklung alternativer Kraftstoffe und Antriebe im Automotive-Bereich im letzten Jahrzehnt wirtschaftlich und (umwelt-)politisch attraktiv geworden. Eine mögliche Alternative zur Verwendung fossiler Kraftstoffe in Fahrzeugen ist der Einsatz von Wasserstoff-Verbrennungsmotoren. Der benötigte Wasserstoff muss dann entweder als Gas oder Flüssigkeit im Fahrzeug mitgeführt werden, wobei im flüssigen Zustand die höchste Energiedichte und somit der kleinste Platzbedarf erreicht wird.

Während die Speicherung von Gas derzeit noch mit einer beträchtlichen Gewichtserhöhung des Fahrzeugs verbunden ist, erfordert die Lagerung von verflüssigtem Wasserstoff tiefe Temperaturen. Um die Abdampftrate bei längeren Standzeiten zu minimieren, werden doppelwandige Behälter mit hohem thermischem Widerstand zwischen Innen- und Außenwand eingesetzt. Als Aufhängung für den Innenbehälter sind bei den heute verwendeten Tanks Stützen aus glasfaserverstärktem Kunststoff in Verwendung. Eine mögliche Alternative dazu wären Kugellager. Sie sind mechanisch belastbar und minimieren auch den Wärmeeintrag aufgrund der kleinen Kontaktflächen zwischen Kugel und Lauffläche.

Im Rahmen der vorliegenden Dissertation wurde ein Teststand aufgebaut, um die Wärmeströme über zwischen zwei Flächen eingespannte Kugeln zu untersuchen. Es wurden insbesondere der Einfluss von Auflagekraft, verwendeten Materialien, Temperaturen, Kugelradien, Oberflächenrauheiten und Oberflächenbeschichtungen untersucht.

Der thermische Widerstand der Anordnung hängt in erster Linie von der Makrogeometrie, den Materialien, den Temperaturen und der Auflagekraft ab. Die Kontaktflächen, die bei unterschiedlicher Belastung auftreten, wurden im Rahmen der Hertzschen Theorie ermittelt. Die Oberflächenrauheit ist bei hohen Hertzschen Pressungen vernachlässigbar. Oberflächenbeschichtungen aus trockenen Schmiermitteln verursachen jedoch eine Erhöhung der thermisch isolierenden Wirkung.

Ein zweites Ziel der Arbeit war die Entwicklung von zwei- und dreidimensionalen Modellen, die mittels der finite Elemente Software ANSYS die Simulation der Wärmeströme im Testaufbau erlauben. Die gewonnenen Ergebnisse stimmen mit den Experimenten sehr gut überein.

Aus der Vielzahl der erhaltenen experimentellen Daten ergab sich die Möglichkeit, parallel zur Modellbildung in ANSYS auch ein analytisches Modell zu formulieren, mit dem die Wärmeströme in Abhängigkeit einiger weniger Materialparameter vorhergesagt werden können.

Die Dissertation wurde von der Österr. Forschungsförderungsgesellschaft mbH (FFG) unterstützt und in Zusammenarbeit mit den Firmen Austrian Aerospace GmbH, A-1120 Wien, und BMW AG, D-80788 München, durchgeführt.

Abstract

The world's oil reserves are being depleted while at the same time the demand for this energy source is on the rise, causing a continuous increase of the prices for fossil fuels. Meanwhile, the worldwide emission of Greenhouse gases is accelerating the process of global warming. These factors have rendered the development of alternative fuels and drive-trains attractive for the automotive industry, both from an economical and an ecological perspective. One possible alternative to using fossil fuel in motor vehicles is the utilization of hydrogen internal combustion engines. The required fuel tanks can store hydrogen in either the liquid or the gaseous form, where liquid storage provides higher energy density.

Considering present technology, the storage of high-pressure gas requires massive tanks, causing a considerable increase of the vehicle's mass, whereas the storage of liquid hydrogen requires low temperatures. To minimize the rate of evaporation, vacuum insulated tanks with a high thermal resistance between inner and outer wall are used. The support structures for the inner tank are usually made of fiber reinforced plastics. A possible alternative are ball bearings. They are mechanically robust and minimize the heat input due to the small contact areas between races and balls.

In the course of this thesis, a calorimeter was constructed to measure the heat transfer over a bearing ball between two plane surfaces. The effects of variation of applied forces, used materials, temperatures, radii of the balls, surface roughnesses, and surface coatings of the balls were studied.

The thermal resistance of the assembly mainly depends on macro-geometry, materials, temperature and applied force. The contact areas for different load cases were calculated using the Hertzian theory. The effect of surface roughness was found to be negligible at high values of the Hertzian contact stress. Surface coatings with dry lubricants caused a higher total thermal resistance of the assembly.

Another goal was the development of two- and threedimensional finite element models for simulating the heat transfer through the assembly. The models were created using the finite element software ANSYS. The results of the subsequent simulations were in good agreement with the measurements.

The abundance of experimental data offered the possibility of formulating an analytical model, which also provides good predictions for the heat transfer using only a few material parameters.

This thesis was partly funded by the Austrian Research Promotion Agency (FFG) and done in cooperation with Austrian Aerospace GmbH, A-1120 Wien, and BMW AG, D-80788 München.

Danksagung

Ich möchte allen, die mir bei dieser Arbeit behilflich waren, meinen Dank aussprechen, insbesondere:

- meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr. Walter Steiner für die Bereitstellung des interessanten Themas, die wertvollen Anregungen und ausführlichen Diskussionen sowie die tatkräftige Unterstützung bei praktischen Arbeiten.
- Herrn Prof. Dr. Michael Reissner für die ausführlichen und fruchtbaren Diskussionen.
- Herrn Prof. Dr. Hans Kichmayr für die Anstellung in seiner Arbeitsgruppe in den letzten zwei Monaten der Dissertation.
- Herrn Prof. Dr. Ernst Bauer und Dipl.-Ing. Dr. Lackner für die Messungen der Wärmeleitfähigkeit von HDPE.
- Herrn Prof. Dr. Christoph Eisenmenger für die Messung von Oberflächenrauheiten.
- dem Team der Werkstatt für die Fertigung von Teilen des Teststands sowie die tatkräftige Unterstützung bei den Modifikationen desselben.
- dem Team des Instituts für Festkörperphysik für die freundschaftliche Atmosphäre am Institut sowie die Hilfsbereitschaft aller Kollegen.

1 Einleitung und Problemstellung

Die immer schneller foranschreitende Ausbeutung der weltweiten Reserven fossiler Energieträger und die parallel dazu laufende Steigerung der Nachfrage haben in den letzten Jahren zu empfindlichen Preissteigerungen geführt. Die Abhängigkeit Europas von Importen fossiler Brennstoffe stellt ein politisches Problem dar. Aufgrund der globalen Erwärmung ist die Reduktion des CO₂-Ausstoßes ein zentrales umweltpolitisches Anliegen der EU und auch vieler anderer Staaten geworden.

Eine mögliche Alternative zur Verwendung fossiler Kraftstoffe aus Erdöl oder Erdgas, insbesondere im mobilen Bereich, ist Wasserstoff.

In der Europäischen Union gibt es bereits seit Jahren positive Signale für die Förderung von Wasserstoff als Energieträger. So wurde zum Beispiel ein dem EU-Parlament 2005 vorgelegter Text mit der Forderung nach der Schaffung einer umweltfreundlichen Wasserstoffwirtschaft in Europa bis 2025 vom Parlament 2007 angenommen [Z. Gurmai et al., 2007]. Anfang September 2008 stimmten die Abgeordneten des EU-Parlaments für eine Vorlage der Kommission zu einem EU-weiten Zulassungsverfahren für wasserstoffbetriebene Fahrzeuge [prophysik.de, 2008]. Zahlreiche wasserstoffbezogene Forschungsprojekte werden mit EU-Mitteln gefördert, z.B. HyFLEET:CUTE, FUERO, HYSAFE, STORHY, etc.

Als sekundärer Energieträger kommt Wasserstoff in molekularer Form auf der Erde nicht vor, er muss erst aus wasserstoffhaltigen Verbindungen (z.B. Wasser, Methan, Biomasse) erzeugt werden. Wasserstoff ist nicht zwingenderweise ein sauberer Kraftstoff. Sowohl bei seiner Erzeugung als auch bei seiner Verbrennung mit Luft kann eine Emission von Schadstoffen auftreten, was im Folgenden näher behandelt wird. Für eine umweltpolitische Bewertung ist also die Gesamtbilanz von der Gewinnung bis zum Endprodukt (z.B. Bewegen eines KFZ) entscheidend.

Zur großtechnischen Gewinnung von Wasserstoff sind heute unter anderem folgende Methoden üblich:

- Die gängigste Methode ist die Dampfreformierung von leichten Kohlenwasserstoffen (Methan bis Naphta). Dieses Verfahren ist auch mit Biomasse als Ausgangsstoff möglich.

- Bei der partiellen Oxidation findet eine exotherme Reaktion von Kohlenwasserstoffen (z.B. schwere Kohlenwasserstoffe oder Erdgas) mit Wasser und Sauerstoff statt.
- Die Autotherme Reformierung ist eine Kombination der beiden genannten Verfahren, wobei die bei der partiellen Oxidation freiwerdende Wärme für die Dampfreformierung genutzt wird.

Bei diesen drei Verfahren entsteht als Nebenprodukt auch CO₂, das aus Klimaschutzgründen in irgendeiner Weise gebunden werden sollte.

Bei Abgabe des entstehenden CO₂ an die Atmosphäre ist die Wasserstoffgewinnung aus Biomasse im Gegensatz zur Gewinnung aus fossilen Kohlenwasserstoffen ein klimaneutraler Prozess, da das emittierte CO₂ zuvor von den verarbeiteten Pflanzen der Atmosphäre entzogen und in der Biomasse gebunden wurde [K. Tetzlaff, 2001].

- Die Möglichkeit der Elektrolyse von Wasser ist interessant, wenn billige und emissionsarm erzeugte elektrische Energie verfügbar ist, also z.B. in der Nähe von Wasserkraftwerken. Bei Wasserelektrolyse mit elektrischer Energie, die aus der Verbrennung fossiler Energieträger gewonnen wurde, muss der erfolgte CO₂-Ausstoß bei der Erzeugung dieser Energie für eine korrekte Einschätzung der Klimafreundlichkeit berücksichtigt werden.

Etliche neue Verfahren zur Wasserstoffherstellung befinden sich im Entwicklungsstadium.

Einige davon sind:

- Das Kvaerner-Verfahren, bei dem Kohlenwasserstoffe in einem Plasmapbrenner in reinen Kohlenstoff und Wasserstoff aufgespalten werden. Der Nachteil dieses Verfahrens ist der hohe Energie- und Kühlwasserbedarf.
- Die photochemische Gewinnung „solaren Wasserstoffs“, bei der mittels photokatalytischer Reaktion an halbleitenden Metalloxiden Wasser in Sauerstoff und Wasserstoff aufgespalten wird [J. Nowotny et al., 2005].
- Die photobiologische Wasserstoffherstellung z.B. durch Grünalgen, die in der Lage sind, mit Hilfe eines Enzyms und durch Photosynthese gewonnener Energie Wasser in Sauerstoff und Wasserstoff zu spalten.

Diesen in Entwicklung befindlichen Methoden ist der Vorteil gemein, dass bei der Wasserstoffherstellung keine Treibhausgase freigesetzt werden und dass sie (bei Verwendung von

aus Pyrolyse von Biomasse gewonnenen Kohlenwasserstoffen beim Kvaerner-Verfahren) ohne fossile Kraftstoffe auskommen. Allerdings sind diese Verfahren noch nicht marktreif.

Für den mobilen Einsatz wasserstoffbetriebener Antriebssysteme kommen zwei Möglichkeiten in Betracht: Der Verbrennungsmotor, in der Literatur oft H₂ICE (H₂ Internal Combustion Engine) genannt, oder über eine Brennstoffzelle betriebene Elektromotoren.

Der Verbrennungsmotor hat in einer Übergangsperiode zur reinen Wasserstoffwirtschaft bis zum Aufbau einer entsprechenden Infrastruktur Vorteile:

- Die vorhandene Fertigungsinfrastruktur kann genutzt werden [C.M. White et al., 2006].
- Bei entsprechender Konstruktionsweise besteht die Möglichkeit des bivalenten Betriebs, d.h. es kann sowohl Benzin als auch Wasserstoff als Kraftstoff genutzt werden [Der BMW Hydrogen 7, 2006].

Der H₂ICE bietet darüber hinaus ein dynamischeres Fahrverhalten als ein Elektromotor-Antrieb mit Brennstoffzelle. Als Nachteil ist der geringere Wirkungsgrad im Vergleich zur Brennstoffzelle zu nennen [L. Schlapbach and A. Züttel, 2001].

Wasserstoffbetriebene Autobusse mit Brennstoffzellen werden bereits seit den 1990er Jahren weltweit im Rahmen von Projekten (z.B. CUTE) getestet.

PKWs mit Brennstoffzellen wurden bis zur Serienreife entwickelt und werden bereits am privaten Markt angeboten.

Der Heizwert von Wasserstoff, bezogen auf die Masse, ist mit 33,3 kWh/m³ fast dreimal so hoch wie der von Benzin mit 12,4 kWh/m³ [L. Schlapbach and A. Züttel, 2001]. Allerdings ist aufgrund der höheren Dichte von Benzin (~ 750 kg/m³) die Energiedichte von Wasserstoff kleiner (Dichte von Gas bei 200 bar und Raumtemperatur ~18 kg/m³, Dichte von Flüssigkeit bei $T = 20\text{ K}$ ~70 kg/m³).

Aus Kapazitätsgründen ist es bei Fahrzeugen günstig, den benötigten Wasserstoff im flüssigen Zustand zu transportieren. Um zu verhindern, dass bei längeren Standzeiten des Fahrzeugs zu viel Wasserstoff abdampft, werden als Tank doppelwandige Behälter mit hohem thermischem Widerstand zwischen Innen- und Außenwand verwendet. Um den mechanischen

Belastungen bei Unfällen standzuhalten, muss die Aufhängung des Innentanks um ein vielfaches massiver ausgeführt sein als bei vergleichbaren Gefäßen zur Lagerung kryogener Flüssigkeiten im Laborbereich. In Folge entsteht auch ein höherer Wärmeeintrag. In den zur Zeit üblichen Tanks werden Aufhängungen aus glasfaserverstärkten Kunststoffen zur Positionierung des Innentanks verwendet, was zu einer Abdampfrate von 1 bis 3 % pro Tag bei abgestelltem Fahrzeug führt [G. Krainz et al., 2004].

Als Alternative zu Aufhängungen aus Kunststoff wären eventuell Kugellager möglich. Der Wärmeeintrag auf den Innenbehälter wird hier durch die kleinen Kontaktflächen zwischen Kugeln und Laufflächen gering gehalten, während die mechanische Stabilität gewährleistet bleibt.

Das Ziel dieser Arbeit war es, die Wärmeströme über Stahl- und Keramikugeln, die mit definierter Auflagekraft zwischen zwei ebenen Platten gelagert sind, im Temperaturbereich zwischen 30 K und 300 K in Abhängigkeit verschiedener Parameter zu messen und parallel zu den Experimenten eine Modellbildung mit der finite Elemente Software ANSYS zu ermöglichen.

Als zu variierende Parameter wurden Kugeldurchmesser, Auflagekraft, Temperatur und Material von Kugel und Gegenflächen, Oberflächenrauheit, Oberflächenbeschichtung der Kugel und Güte des Vakuums im Probenraum gewählt.

Aus der Vielzahl der erhaltenen experimentellen Daten ergab sich die Möglichkeit, parallel zur Modellbildung in ANSYS auch ein analytisches Modell zu formulieren, mit dem die Wärmeströme in Abhängigkeit einiger weniger Materialparameter vorhergesagt werden können.

Die Dissertation wurde im Rahmen der Projekte

- A3-WGLF: Messung der Hertz'schen Kontakte von LH2 Innentanklagerungen (Testprogramm LH2I / TLH2I)
- A3-T+K: Modellierung der Hertz'schen Kontakte von LH2 Innentanklagerungen (FE Modellierung LH2I / MLH2I)

von der Österr. Forschungsförderungsgesellschaft mbH (FFG) unterstützt und in Zusammenarbeit mit den Firmen Austrian Aerospace GmbH, A-1120 Wien, und BMW AG, D-80788 München, durchgeführt.

2 Literaturstudie: Wärmeübertragung über kleine Kontaktflächen bei tiefen Temperaturen

2.1 Theoretische Modelle

2.1.1 Hertzische Theorie

Mit Hilfe der Hertzischen Theorie [H. Hertz, 1881], [E. W. Roberts, 2002], [H. Dubbel, 2001] lässt sich die Kontaktfläche bei der Berührung zweier ideal elastischer Körper mit völlig glatter Oberfläche berechnen.

Dabei werden einige vereinfachende Annahmen getroffen:

- Die in Kontakt stehenden Körper verhalten sich ideal elastisch.
- Im Kontakt tritt keine Reibung auf.
- Die Druckverteilung ist gegeben durch $p(r) = \sigma_H \sqrt{1 - \frac{r^2}{a_H^2}}$.

Die Kontaktfläche zwischen einer Kugel und einer ebenen Fläche ist kreisförmig und hat den Radius

$$a_H = \left(\frac{3}{4} \frac{FR}{E'} \right)^{\frac{1}{3}}$$

mit dem effektiven Elastizitätsmodul E' , definiert durch

$$\frac{1}{E'} = \frac{(1-\nu_1^2)}{E_1} + \frac{(1-\nu_2^2)}{E_2}$$

wobei

E Elastizitätsmodul / Pa

F Kraft / N

R Kugelradius / m

ν dimensionslose Poissonzahl

bedeuten.

Die Hertzische Pressung, definiert als die maximale Spannung, die in der Mitte der Kontaktfläche auftritt, ist gegeben durch

$$\sigma_H = \frac{3F}{2\pi a_H^2} = \left(\frac{6}{\pi^3} \frac{FE'^2}{R^2} \right)^{\frac{1}{3}}$$

2.1.2 Acoustic Mismatch Model

Das Acoustic Mismatch Model (AMM) wurde 1952 von Khalatnikov entwickelt, um den Wärmeübergangswiderstand zwischen flüssigem Helium und Festkörpern (den sog. Kapitza-Widerstand) zu berechnen [O. V. Lounasmaa, 1974]. Das Modell geht davon aus, dass der Wärmetransport über den Kontakt durch die Schallgeschwindigkeiten und Dichten der beiden in Kontakt stehenden Medien bestimmt wird.

In [W. A. Little, 1959] wird dieses Modell adaptiert, um auch Festkörper-Festkörper-Kontakte beschreiben zu können. Die getroffenen Annahmen sind:

- Phononen werden als ebene Wellen behandelt.
- Die Grenzfläche wird als Ebene behandelt.
- Es findet keine Streuung an der Grenzfläche statt.

Werden als erste Näherung nur longitudinale Phononen berücksichtigt, ist der Wärmefluss an einer perfekten Grenzfläche gegeben durch:

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{2\pi k^4 \Gamma A}{h^3 c_1^2} \left(\frac{\pi^4}{15} \right) [T_1^4 - T_2^4]$$

mit

AKontaktfläche

k Boltzmannkonstante $k = 1,38065 \cdot 10^{-23}$ J/K

hPlanck'sches Wirkungsquantum $h = 6,62607 \cdot 10^{-34}$ Js

c_1Schallgeschwindigkeit im Medium 1

$T_{1,2}$ absolute Temperatur der Medien 1 und 2

$\Gamma = \int_0^{\pi/2} \alpha_1(\theta_1) \sin\theta_1 \cos\theta_1 d\theta_1 \dots$ Transmissionskoeffizient

θ_1Einfallswinkel der Phononen im Medium 1

α_1 Transmissionswahrscheinlichkeit der Grenzfläche für

Transmission der im Winkel θ_1 im Medium 1 einfallenden Phononen.

Der Transmissionskoeffizient Γ ist eine Funktion der Dichten und Schallgeschwindigkeiten der beiden Medien, sein Maximalwert bei exakt gleichen Dichten und Schallgeschwindigkeiten beträgt 0.5 (Abb. 2-2).

Für unebene und reale Kontaktflächen ergibt sich durch Ansetzen einer effektiven Fläche als Funktion der Phononenfrequenz eine Abweichung von der T^4 -Abhängigkeit [W.A. Little, 1959]:

$$A'(v) = A_0 v^n$$

mit:

v Phononenfrequenz

A_0 Fläche der makroskopischen, ebenen Grenzfläche

n Parameter

ergibt:

$$\frac{dQ}{dt} = B (T_1^{4+n} - T_2^{4+n})$$

mit:

B Ausdruck, der alle T -unabhängigen Terme enthält

$T_{1,2}$ absolute Temperatur der Medien 1 und 2

Wenn die beiden Flächen einander im realen Fall nun nur in einzelnen Punkten berühren (siehe Abb. 2-1), ergeben sich zwei Fälle:

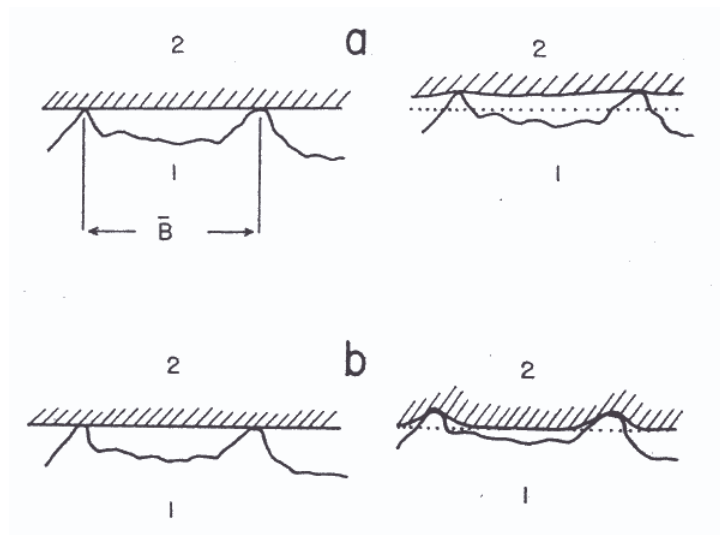


Abb. 2-1 (aus [W. A. Little 1959])

Im **Fall a** ist die Wellenlänge der einfallenden Phononen viel größer als \bar{B} , dem Abstand zwischen zwei benachbarten Kontaktpunkten. Die Punkte im Medium 2 bewegen sich daher in Phase, was zu einer nur leicht geringeren Energieübertragung als im idealen Fall führt.

Im **Fall b** ist die Wellenlänge der einfallenden Phononen viel kleiner als \bar{B} .

Benachbarte Punkte bewegen sich dann um einen Phasenfaktor verschoben, die Oberflächenwellen von allen in der Nähe liegenden Kontaktpunkten interferieren destruktiv. Die Bewegung der zweiten Oberfläche abseits der Kontaktpunkte bleibt dadurch gering, was eine wesentlich geringere Energieübertragung als im idealen Fall verursacht.

Es kann also erwartet werden, dass die effektive Fläche mit steigender Phononenenergie kleiner wird.

Das führt nach

$$A'(v) = A_0 v^n$$

zu einem negativen Wert für den Parameter n . Damit wird der Wärmetransport weniger temperaturabhängig als im idealen Fall:

$$\frac{dQ}{dt} = B (T_1^{4+n} - T_2^{4+n})$$

Wenn neben longitudinalen auch transversale Phononen zugelassen werden, kommt ein zweiter Transmissionskoeffizient Γ_t zur Formel für den Wärmeübertrag dazu.

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{2\pi k^4}{h^3} \left(\frac{\pi^4}{15} \right) A_n \left[\frac{\Gamma_l}{c_l^2} + \frac{2\Gamma_t}{c_t^2} \right] (T_1^{4+n} - T_2^{4+n})$$

Die Γ -Werte für Materialpaarungen Si_3N_4 auf Stahl sowie Stahl auf Stahl wurden durch Bildung der Verhältnisse der Schallgeschwindigkeiten und Dichten der Materialien und Einzeichnen in die Graphen in Abb. 2-2 ermittelt. Die Berechnung der Schallgeschwindigkeiten erfolgte mit der Formel

$$c = \sqrt{\frac{E(1-\mu)}{\rho(1-\mu-2\mu^2)}}.$$

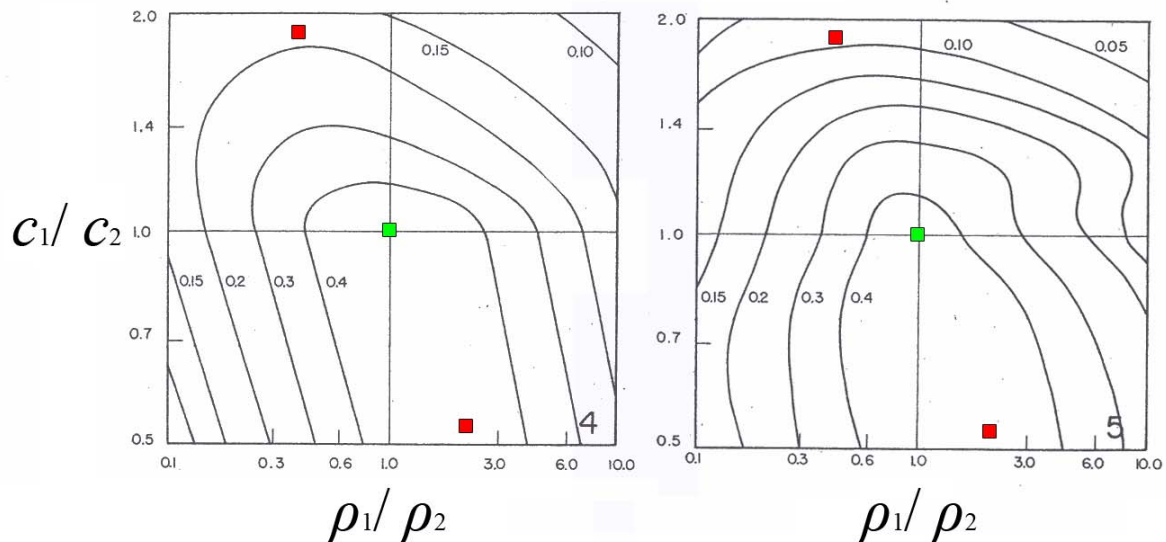


Abb. 2-2 Die Linien im linken Graphen sind Transmissionskoeffizienten Γ für longitudinale Phononen, jene im rechten für transversale. Die roten Punkte bezeichnen die Werte für Wärmeflüsse zwischen Stahl und Keramik, die grünen für Wärmeflüsse in Stahl-Stahl Kontakten (Graphen aus [Little 1959]) Für Wärmeflüsse von Stahl zu Si_3N_4 folgt $0.15 < \Gamma < 0.2$ für longitudinale Phononen und $0.05 < \Gamma < 0.1$ für transversale. In die Gegenrichtung ergibt sich $0.4 < \Gamma < 0.5$ für transversale und longitudinale Phononen. Aufgrund der ähnlichen Eigenschaften resultiert $\Gamma \sim 0.5$ für Stahl-Stahl Kontakte.

Wie in 4.1 gezeigt wird, ist bei den im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Messungen, die mit Auflagemassen von 4,7 bis 20,4 kg durchgeführt wurden, kein wesentlicher Einfluss der Oberflächenrauheit festzustellen. [E. T. Swartz and R. O. Pohl, 1989] zeigten, dass bei Temperaturen $T < 30$ K sowohl das Acoustic Mismatch Model als auch das von ihnen entwickelten Diffuse Mismatch Model relativ gut die thermischen Kontaktwiderstände für Festkörper-Festkörper Kontakte zwischen Substraten und aufgedampften Schichten beschreiben konnten. Ab Temperaturen $T > 30$ K weichen jedoch die gemessenen Werte von den Vorhersagen beider Modelle ab.

2.1.3 Dimensionsloser Rauheitsparameter

Um eine Skalierbarkeit des Einflusses der Oberflächenrauheit auf Hertzische Kontakte zwischen Kugelflächen zu ermöglichen, wurde von [J. A. Greenwood et al., 1984] ein dimensionsloser Rauheitsparameter definiert:

$$\alpha_{Greenwood} = \frac{R_{RMS} R}{a_H^2}$$

mit

R Kugelradius / m

$$R_{RMS} \dots \text{quadratische Rauheit } R_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n r_i^2} / \text{m}$$

r_i Rautiefe am Messpunkt i

n Anzahl der Messpunkte

a_H Radius der Hertzschen Kontaktfläche.

[J. A. Greenwood et al., 1984] fanden weiters, dass bei Werten von $\alpha_{Greenwood}$ kleiner als 0,05 die Hertzsche Theorie zur Beschreibung des Kontaktes angewandt werden kann, der Fehler bei der Benutzung der Hertzschen Theorie zur Berechnung von Kontaktradius und Hertzscher Pressung ist dann kleiner als 7%.

2.1.4 Modell für den thermischen Einschnürungswiderstand

Von [M. M. Yovanovich, 1971] wird ein Ausdruck für den thermischen Einschnürungswiderstand bei einer Kugel zwischen zwei Laufflächen angegeben:

$$R_{th} = \frac{\psi_o}{4\lambda_o a_o} + \frac{\psi_u}{4\lambda_u a_u} + \frac{1}{4\lambda_K} \left(\frac{\psi_o}{a_o} + \frac{\psi_u}{a_u} \right)$$

mit

$\lambda_{o,u}$ Wärmeleitfähigkeit des Materials der oberen, unteren Lauffläche

λ_K Wärmeleitfähigkeit des Materials der Kugel

$a_{o,u}$ Radius des Hertzschen Kontaktes zwischen Kugel und oberer, unterer Fläche

$\psi_{o,u}$ dimensionsloser Geometriefaktor

Der Geometriefaktor berücksichtigt die elliptische Form von Kontaktflächen zwischen Kugeln und gekrümmten Laufflächen in Kugellagern. Beim Kontakt zwischen einer Kugel und einer Ebene ist die Kontaktfläche ein Kreis. Dann ist $\psi_{o,u} = 1$ und die Formel für den thermischen Einschnürungswiderstand vereinfacht sich zu:

$$R_{th} = \frac{1}{4\lambda_o a_o} + \frac{1}{4\lambda_u a_u} + \frac{1}{4\lambda_K} \left(\frac{1}{a_o} + \frac{1}{a_u} \right)$$

Wenn beide Gegenflächen aus dem gleichen Material sind kann man schreiben:

$$R_{th} = \frac{1}{2a} \left(\frac{1}{\lambda_F} + \frac{1}{\lambda_K} \right) = \frac{1}{a} \frac{\lambda_K + \lambda_F}{2\lambda_F \lambda_K} = \frac{1}{a\lambda'}$$

mit

λ_FWärmeleitfähigkeit des Materials der Laufflächen

a Radius der Hertzchen Kontakte zwischen Kugel und Fläche

2.2 Vorliegende experimentelle Daten

Beispiele für die Kontaktwärmeleitfähigkeit zwischen verschiedenen Metallen mit und ohne Schmierung werden in der Literatur angegeben. Bedingt durch die unterschiedlichen Messaufbauten und Messbedingungen wurde jedoch eine Vielzahl an Werten gefunden, deren Unterschied sich über mehrere Größenordnungen erstreckt. Die Verwendung der Werte für numerische Abschätzungen ist daher äußerst problematisch.

Folgende Aussagen können jedoch insbesondere aus den Arbeiten [R. Berman, 1956], [L. S. Fletcher, 1990], [E. Gmelin et al., 1999], [R. B. Jacobs and C. Starr, 1939], [W. A. Little, 1959], [C. V. Madhusudana, 1995], [M. Marchetti et al., 1988], [L. J. Salerno et al., 1984], [R. Schaellig and A. Seidel, 1990], [S. M. S. Wahid and C. V. Madhusudana, 2003], [Y. R. Takeuchi et al., 2006] und [Y. Xiao et al., 2004], gewonnen werden:

- Die Proportionalität $\frac{dQ}{dt} \propto T^n$ wird auch durch Messergebnisse bestätigt

und

- durch Schmierung mit Silikonfett, Apiezon-N, Indium, und ähnlichen Schmiermitteln wird die Kontaktwärmeleitfähigkeit um 1-2 Größenordnungen verbessert.

[Y. R. Takeuchi et al., 2006] fanden darüber hinaus, dass das Modell von [M. M. Yovanovich, 1971] für ungeschmierte statische Lager bei Raumtemperatur anwendbar ist.

2.2.1 Thermischer Kontaktwiderstand Transistor/Kühlkörper

In [MIL-HDBK-251, 1978] ist der thermische Kontaktwiderstand von geschraubten und genieteten Verbindungen zwischen Transistoren und Metallkühlkörpern in Abhängigkeit vom Anpressdruck dargestellt (Abb. 2-3).

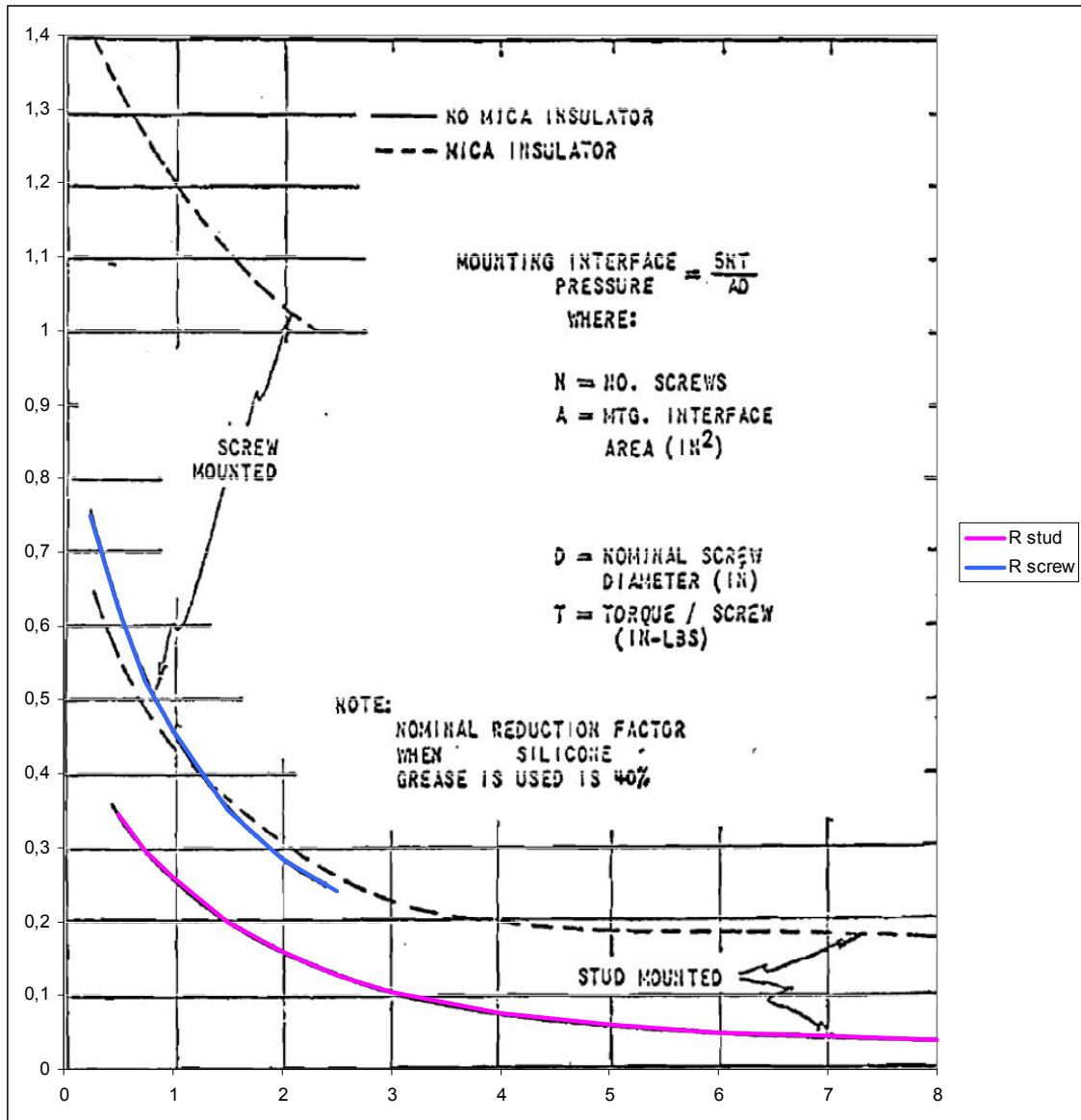


Abb. 2-3 Thermischer Kontaktwiderstand zwischen Transistoren und Kühlkörpern (x-Achse: Anpressdruck [$\text{psi} \cdot 10^{-3}$]; y-Achse: Kontaktwiderstand [$^{\circ}\text{C} \cdot \text{m}^2/\text{W}$])

Die Werte sind in Abb. 2-4 neu aufgetragen, mit dem Anpressdruck in MPa auf der x-Achse und der Kontaktwärmeleitfähigkeit in $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ auf der y-Achse. Mittels linearer Extrapolation können Werte für Kontaktleitfähigkeiten bei höheren Anpressdrücken abgeschätzt werden, die als Anhaltspunkt für Kontaktwiderstände dienen können, welche bei manchen Messungen im Rahmen dieser Arbeit auftraten.

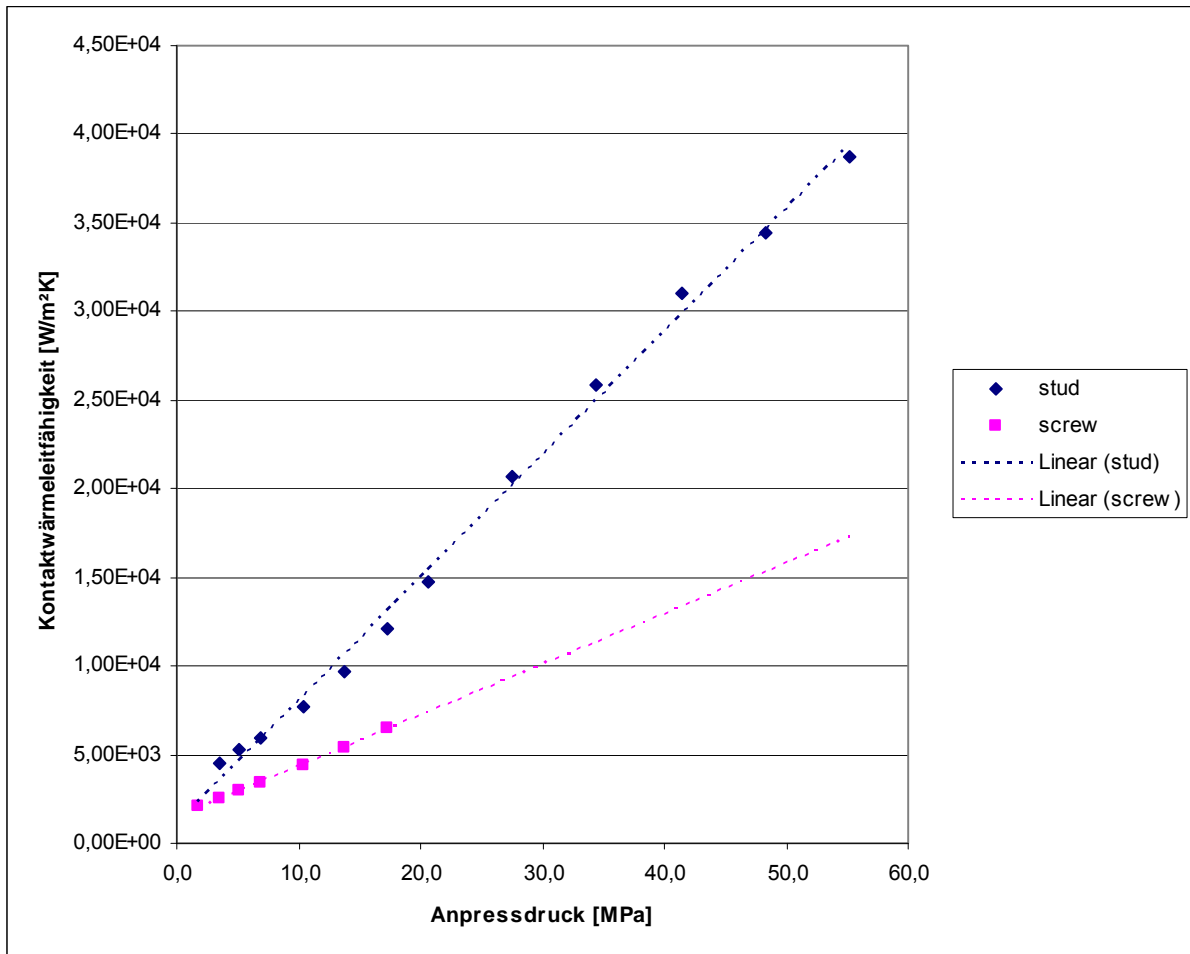


Abb. 2-4 Thermischer Kontaktwiderstand zwischen Transistoren und Kühlkörpern nach [MIL-HDBK-251, 1978], mit geänderten Achsen

2.2.2 Thermische Leitfähigkeit von Kugellagern bei tiefen Temperaturen

[M. J. Anderson, 1996] untersuchte stationäre Kugellager unter Vakuumatmosphäre bei tiefen Temperaturen. Die Eckdaten dieser Lager sind in Tabelle 2-1 angegeben.

| | |
|---------------------------------|----------|
| Durchmesser Lauffläche außen | 22 mm |
| Kugeldurchmesser | 3,969 mm |
| Material (Kugeln & Laufflächen) | 440C |
| Kraft | 80N |
| Anzahl Kugeln | 7 |

Tabelle 2-1 Eckdaten der in [M. J. Anderson, 1996] untersuchten Kugellager

Folgende für die vorliegende Arbeit interessante Ergebnisse wurden gewonnen:

- Die Wärmeleitfähigkeit des ungeschmierten Lagers kann mit im Rahmen dieser Arbeit gemessenen Werten verglichen werden (siehe 4.1.1.1).

- Schmierung mit MoS₂ auf Kugeln und Lauffläche verringert die Wärmeleitfähigkeit des Lagers um bis zu 35 %. Eine Abnahme wird ebenfalls im Rahmen der vorliegenden Arbeit gefunden (siehe 4.1.2).

3 Messaufbau

3.1 Grundkonzept

Das in dieser Arbeit angewandte Grundkonzept zur Messung des Wärmestroms basiert auf einem Kalorimeter, dessen schematischer Aufbau in Abb. 3-1 skizziert ist.

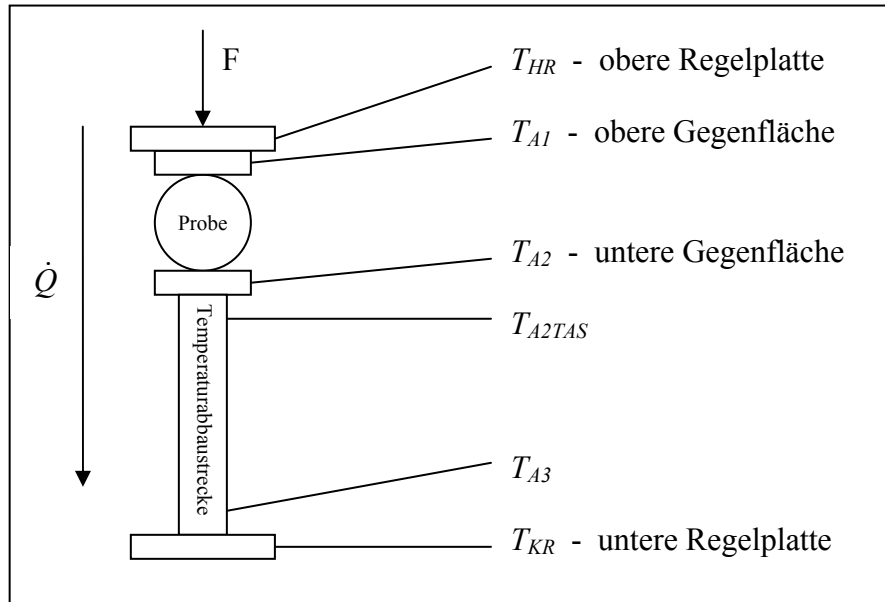


Abb. 3-1 Grundkonzept des Aufbaus zur Wärmestrommessung

Auf der Hochtemperaturseite der Kolonne befindet sich die obere Regelplatte (T_{HR}), deren Temperatur mittels Heizen und Kühlen stabil gehalten werden kann. Auf die Platte werden Gewichte gestellt, die eine Kraft F auf die Probe ausüben. Die obere Gegenfläche wird während der Wärmestrommessung durch die aufgelegten Gewichte bzw. das Eigengewicht der oberen Regelplatte auf die Probe gepresst und steht daher in gutem thermischem Kontakt mit der oberen Regelplatte.

Auf der Tieftemperaturseite des Kalorimeters ist die untere Regelplatte (T_{KR}) montiert, deren Temperatur ebenfalls durch Heizen und Kühlen eingestellt und gehalten werden kann.

Aufgrund der Temperaturdifferenz zwischen den beiden Regelplatten stellt sich ein Wärmestrom \dot{Q} über die Anordnung ein. Solange die Regelplatten auf konstanter Temperatur gehalten werden, ist dieser Wärmestrom konstant und abhängig von den Materialeigenschaften, der Geometrie der Probe, sowie der Auflagekraft. Die Temperaturen T_{A1} bis T_{A3} stellen sich bei Erreichen des Gleichgewichts auch auf einen konstanten Wert ein. Der Einfluss der Strahlung,

hervorgerufen durch Wandtemperaturunterschiede des Aufbaus, wird durch geeignet angeordnete Strahlungsschilde, die auf den Temperaturen der oberen bzw. unteren Regelplatte gehalten werden, minimiert.

Nach dem Einstellen des Temperaturgleichgewichts und Loggen der Temperaturwerte wird die Probe von der unteren Gegenfläche abgehoben. Die untere Regelplatte wird weiterhin auf der gleichen Temperatur gehalten und die bei der Messung beobachtete Temperaturdifferenz $\Delta T_{TAS} = T_{A2TAS} - T_{A3}$ wird mittels eines an der unteren Gegenfläche befestigten elektrischen Heizers wieder eingestellt. Der Spannungsabfall am Heizer sowie der Strom über den Heizer werden dabei gemessen. Die elektrische Leistung, die notwendig ist, um an der Temperaturabbaustrecke die gleichen Temperaturverhältnisse herzustellen wie bei der Messung, ist gleich dem Wärmefluss, der während der Messung durch das Kalorimeter und somit über die Probe floss. Die geringfügig geänderte Geometrie für die Wärmestrahlung wird dabei vernachlässigt.

Die Geometrie und das Material der Temperaturabbaustrecke richten sich nach dem zu messenden Wärmestrom und wurden für die entsprechenden Proben ausgewählt.

3.2 Bestimmung des Wärmestroms

Wie bereits in 3.1 kurz umrissen, erfolgt die Bestimmung des Wärmestroms mit Hilfe der Temperaturabbaustrecke. Zunächst wird mit aufgesetzter Probe die Temperaturdifferenz zwischen den beiden Sensoren der Temperaturabbaustrecke $\Delta T_{TAS} = T_{A2TAS} - T_{A3}$ gemessen. Der Wärmestrom über die Temperaturabbaustrecke und somit auch über die Probe ist gegeben durch

$$\dot{Q}^{Messung} = \lambda_{TAS}(\bar{T}_{TAS}) \cdot A_{TAS} \cdot \frac{\Delta T_{TAS}^{Messung}}{\Delta x_{TAS}}$$

mit

$$\bar{T}_{TAS} = \frac{T_{A2TAS} + T_{A3}}{2}$$

Nach der Messung wird die Probe abgehoben und mittels des Kalibrierheizers die Temperaturdifferenz ΔT_{TAS} wieder eingestellt. Der Wärmestrom über die Temperaturabbaustrecke ist nun

$$\dot{Q}^{Kalibrierung} = \lambda_{TAS}(\bar{T}_{TAS}) \cdot A_{TAS} \cdot \frac{\Delta T_{TAS}^{Kalibrierung}}{\Delta x_{TAS}}$$

Da sich ΔT_{TAS} nicht exakt auf den gleichen Wert wie bei der Messung einstellen lässt, wird $\dot{Q}^{Messung}$ aus folgender Überlegung gewonnen:

Bei der anschließend durchgeführten Kalibrierung der Temperaturabbaustrecke (ΔT_{TAS}), wird \bar{T}_{TAS} auf $\pm 5\%$ gleich dem Wert aus der Messung gehalten. Daher kann auch die temperaturabhängige Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{TAS}(\bar{T}_{TAS})$ des Materials der TAS sowohl für die Messung als auch für die Kalibrierung als gleich angenommen werden und man kann schreiben:

$$\lambda_{TAS}(\bar{T}_{TAS}) = \frac{\dot{Q}^{Kalibrierung} \cdot \Delta x_{TAS}}{\Delta T_{TAS}^{Kalibrierung} \cdot A_{TAS}} = \frac{\dot{Q}^{Messung} \cdot \Delta x_{TAS}}{\Delta T_{TAS}^{Messung} \cdot A_{TAS}}$$

Da sich der Querschnitt der Temperaturabbaustrecke A_{TAS} sowie der Abstand der auf der Temperaturabbaustrecke montierten Sensoren zur Messung von T_{A2TAS} und T_{A3} , Δx_{TAS} , nicht ändern, folgt

$$\frac{\dot{Q}^{Kalibrierung}}{\Delta T_{TAS}^{Kalibrierung}} = \frac{\dot{Q}^{Messung}}{\Delta T_{TAS}^{Messung}}$$

und somit

$$\dot{Q}^{Messung} = \dot{Q}^{Kalibrierung} \frac{\Delta T_{TAS}^{Messung}}{\Delta T_{TAS}^{Kalibrierung}}$$

3.3 Apparative Ausführung

Die Konstruktion des Messaufbaus wurde durch die Firma Austrian Aerospace GmbH, A-1120 Wien, durchgeführt. Der Zusammenbau und die erforderlichen Endadaptionen waren Teil der vorliegenden Arbeit.

3.3.1 Temperaturregelung

Zum Heizen der beiden Regelplatten aus Aluminium wurden jeweils sechs Regelheizer vom Typ Arcol HS10 10R mit Schrauben auf den Platten befestigt und mit teflonisolierten verzinn-ten Kupferlitzendrähten mit einem Gesamteinzelquerschnitt von $A = 0,31 \text{ mm}^2$ als Zuleitungen versehen.

Zum Regeln und Messen der Temperaturen der beiden Regelplatten, THR und TKR, wurde ein Lakeshore Model 332 Temperature Controller mit PID-Regelung eingesetzt. Als Sensor an der oberen Platte wurde ein Platin Widerstand, Lakeshore PT-111, an der untern Platte ein Cernox Widerstand, Lakeshore CX-1070-SD, verwendet.

3.3.2 Kühlung der unteren Regelplatte

Zur Kühlung der unteren Regelplatte dient ein Stahlbehälter, der mit gasförmigem oder flüssigem Helium durchströmt bzw. gefüllt werden kann. Die untere Temperaturregelplatte wurde zunächst mit Aluminiumplatten an den Heliumbehälter thermisch angekoppelt (Abb. 3-2).



Abb. 3-2 Thermische Kopplung zwischen Heliumbehälter und unterer Regelplatte mit Aluminiumstegen
Da mit den Aluminiumplatten kein ausreichend guter thermischer Kontakt zum Erreichen der gewünschten Temperaturen der unteren Gegenfläche hergestellt werden konnte, mussten Modifikationen durchgeführt werden, die in 3.4.1 näher beschrieben sind.

3.3.3 Kühlung der oberen Regelplatte

Die Kühlung der oberen Regelplatte erfolgte durch ein unten zu einem Ring gebogenes Kupferrohr, das auf einen Ring über der Regelplatte geklemmt wurde und mit dieser flexibel über Kupfergewebestreifen thermisch verbunden wurde (Abb. 3-3). Das Rohr wurde zur Kühlung mit gasförmigem bzw. flüssigem Stickstoff durchströmt.

Die Notwendigkeit für die mechanische Flexibilität des thermischen Kontakts ergibt sich daraus, dass bei einer starren Verbindung mit der oberen Regelplatte das Kupferrohr Kräfte auf die Regelplatte übertragen würde und somit ein undefinierter Beitrag zur Auflagerkraft die Folge wäre.

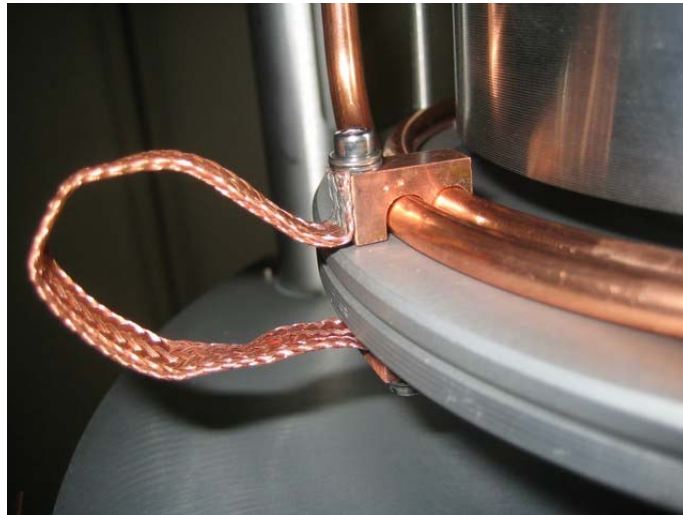


Abb. 3-3 Verbindung zwischen Kühlschlange und oberer Regelplatte aus Kupfergewebeband

Auch hier wurde während der ersten Messungen wie bei der unteren Regelplatte festgestellt, dass die Kühlleistung nicht ausreicht, um die gewünschten Temperaturniveaus einzustellen. Die Modifikationen zur Abhilfe sind in 3.4.2 näher beschrieben.

3.3.4 Temperaturmessung

Die Temperaturen im Versuchsaufbau wurden mit resistiven Temperatursensoren und im Fall der Messung der Kugeltemperatur mit Thermoelementen (siehe 4.2.2) gemessen.

An den Stellen im Aufbau, an denen oft Temperaturen $T < 50$ K zu erwarten waren, wurden Cernox-Sensoren vom Typ Lakeshore CX-1070-SD verwendet. Höhere Temperaturen wurden mit Platin-Widerständen vom Typ Lakeshore PT-111 gemessen.

Die Widerstands- bzw. Spannungswerte der Sensoren wurden mit einem Lakeshore Model 218 Temperature Monitor bzw. einem Keithley Model 2700 Multimeter erfasst und erst am Messrechner mit einem in LabVIEW geschriebenen Programm (Abb. 3-4), das zur Steuerung und Aufzeichnung aller Wärmestrommessungen diente, in Temperaturwerte konvertiert. Die Stromversorgung der Sensoren erfolgte direkt über den Model 218 Temperature Monitor bzw. im Fall des Keithley Model 2700 Multimeters über einen Knick Präzisions-Stromgeber Typ J41.

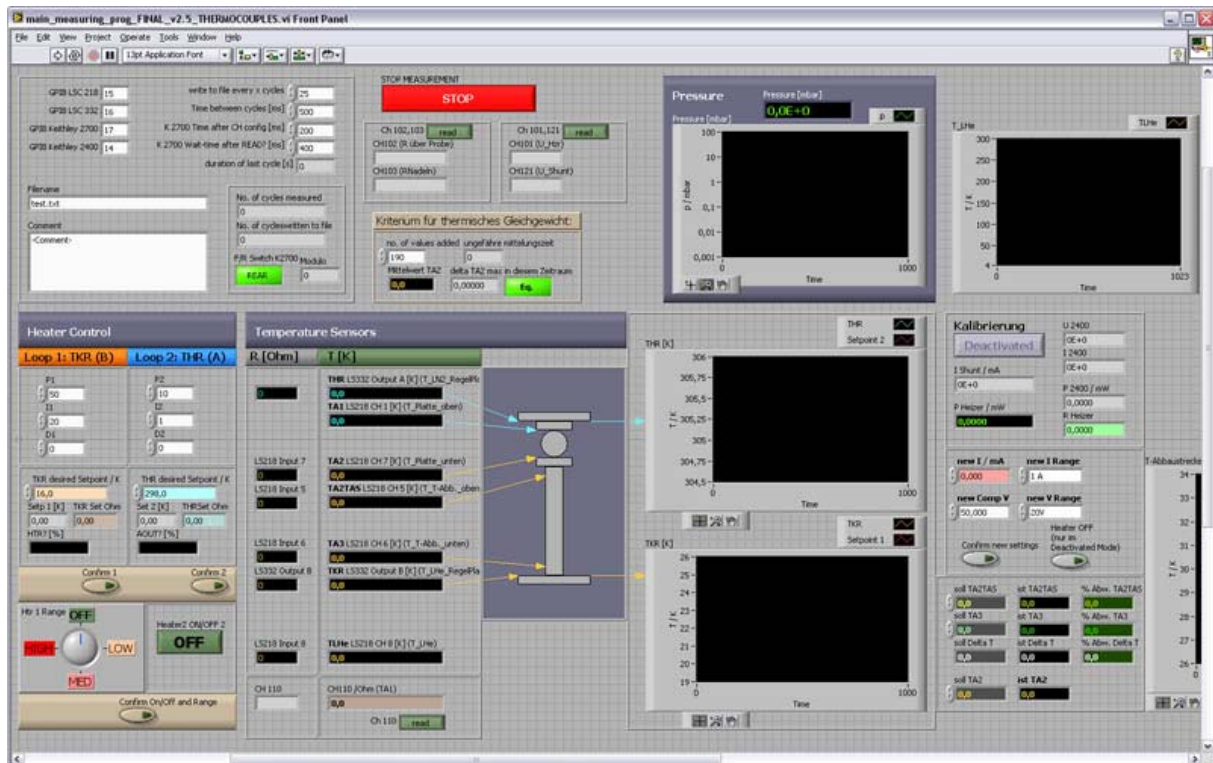


Abb. 3-4 Bedienoberfläche des LabVIEW Programms zur Steuerung und Aufzeichnung der Messwerte

Die Temperatureichung für vier Temperatursensoren vom Typ Lakeshore CX-1070-SD und zwei Temperatursensoren vom Typ Lakeshore PT-111 wurde unter Verwendung eines von Lakeshore geeichten CX-1070-SD durchgeführt.

Die Temperatursensoren wurden mit Teflonband und/oder Aluminiumtape befestigt oder in dafür vorgesehene Bohrungen gesteckt. Zur besseren thermischen Kopplung wurde vor der Montage Wacker „Hochvakuumfett mittel“ auf die Sensoren aufgebracht.

Die Verkabelung der Temperatursensoren an den Regelplatten erfolgte mit lackisolierten Kupferdrähten mit Durchmesser $d = 100 \mu\text{m}$. Die Temperatursensoren an der Temperaturabbaustrecke wurden mit Vakuumfett bestrichen und mit Teflonband jeweils 15 mm von der Ober- und Unterkante des Stahlrohres angepresst. Die Temperatursensoren an der unteren und oberen Auflagefläche wurden in den Halterungen der Auflageflächen in Bohrungen montiert. Dadurch konnten die Sensoren möglichst nahe an die Auflageflächen herangebracht werden (Abb. 3-5). Diese vier Temperatursensoren wurden mit Phosphor-Bronze Draht vom Typ Lakeshore WQL-32 kontaktiert.

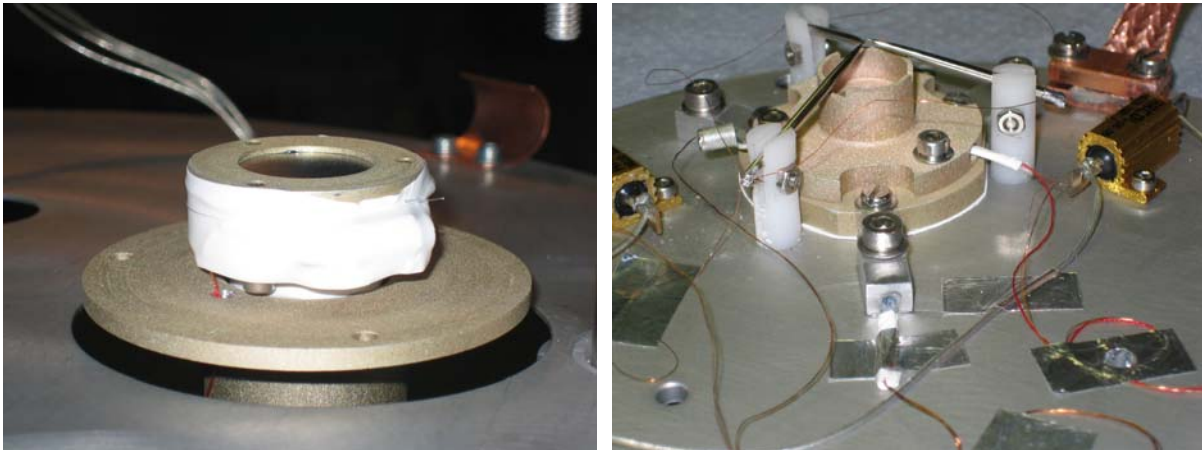


Abb. 3-5 Mit Teflonband umhüllter Temperatursensor an der unteren Auflagefläche (links); Temperatursensoren an der oberen Auflagefläche und der oberen Temperaturregelplatte (rechts)

3.3.5 Temperaturabbaustrecke und untere Gegenfläche

Die zur Wärmestrommessung benötigte Temperaturabbaustrecke ist an ihrem unteren Ende auf der unteren Regelplatte angebracht, an ihrem oberen Ende befindet sich die untere Gegenfläche.

Ein Heizer vom Typ Minco Model HK5537R26.1L12A wurde mit Stycast 2850 FT auf die Unterseite der unteren Gegenfläche geklebt (siehe Abb. 3-6). Als Zuleitung wurde ein Phosphor-Bronze Draht vom Typ Lakeshore WQL-32 verwendet. Ein Keithley Model 2400 Sourcemeter diente als Stromquelle.

Die elektrische Leistung des Heizers bei der Nachkalibrierung wird aus der Spannung und dem Strom am Heizer bestimmt, wobei die Spannung direkt, der Strom mittels eines Shuntwiderstands gemessen wird.

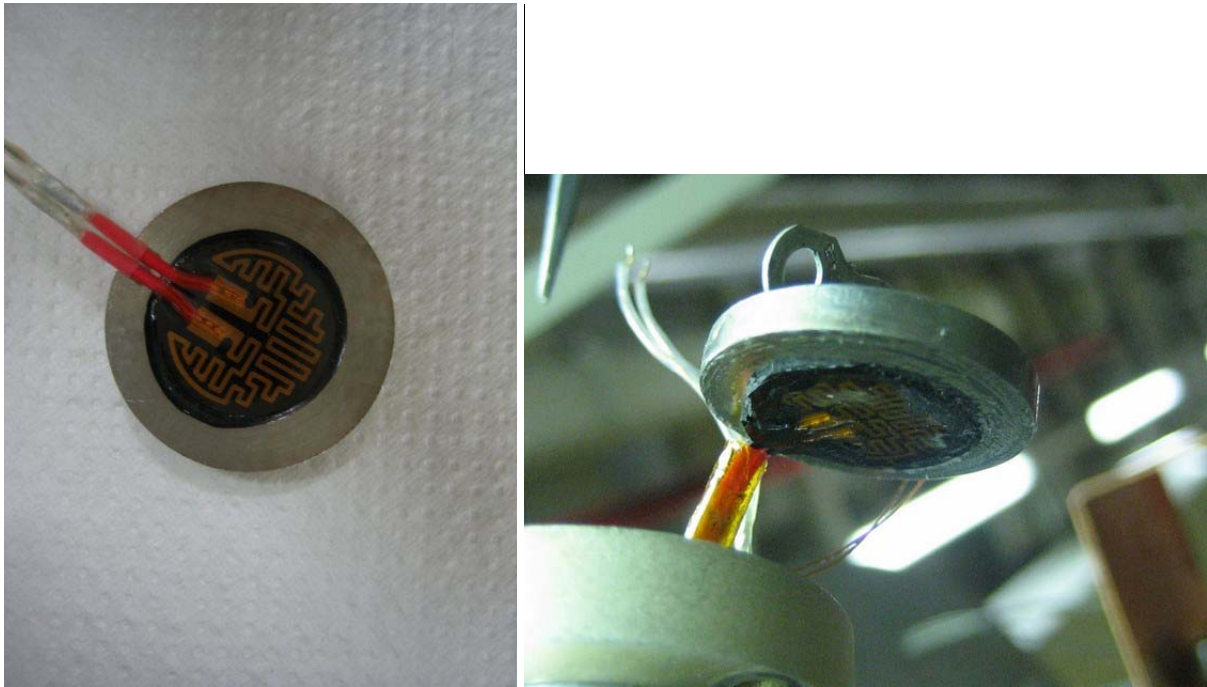


Abb. 3-6 Heizer auf der Unterseite der unteren Auflagefläche

Die Temperaturabbaustrecke ist von einem Strahlungsschild umgeben, dessen oberer Teil eine Öffnung für die Probe sowie für die Nadeln hat, die als Halterung für die Probe im abgehobenen Zustand dienen.

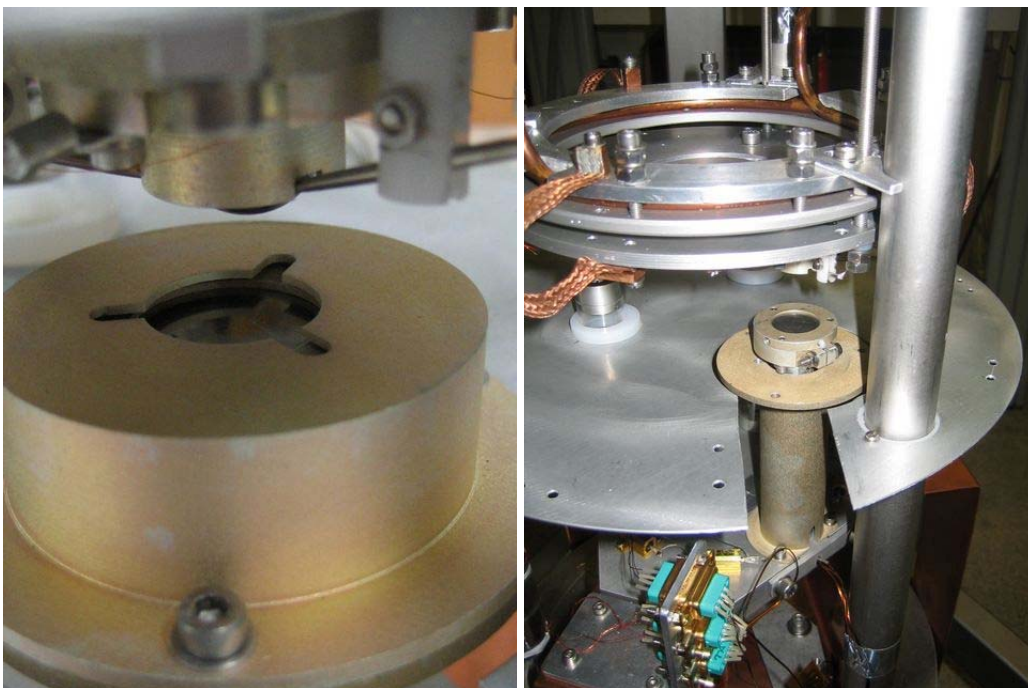


Abb. 3-7 Strahlungsschild um untere Auflagefläche (links) und Strahlungsschild um Temperaturabbaustrecke bei abmontiertem Schild der unteren Auflagefläche (rechts)

3.3.6 Obere Gegenfläche

Die obere Gegenfläche ist zwischen dem oberen Strahlungsschild und einer Platte eingeklemmt, die an Kunststofffolienstücken unter der oberen Regelplatte hängt (Abb. 3-8 links).

Beim Absenken der oberen Regelplatte zum Aufsetzen einer Probe wird die Unterseite der Baugruppe mit der oberen Gegenfläche an die obere Regelplatte gedrückt und ein thermischer Kontakt hergestellt.

Die Baugruppe mit der oberen Gegenfläche wurde deshalb nicht starr mit der oberen Regelplatte verbunden, damit die Kugelproben beim Aufsetzen immer fixiert sind. Mit einer starren oberen Gegenfläche wäre die Kugel zwischen dem Aufsetzen auf der unteren Kontaktfläche (Absenken der Nadeln) und dem Kontaktieren mit der oberen Kontaktfläche nicht geführt und könnte eventuell seitlich wegrollen. Das ist hier nicht möglich, da die Kugel immer in Kontakt mit der oberen Gegenfläche bleibt (Abb. 3-8 rechts).

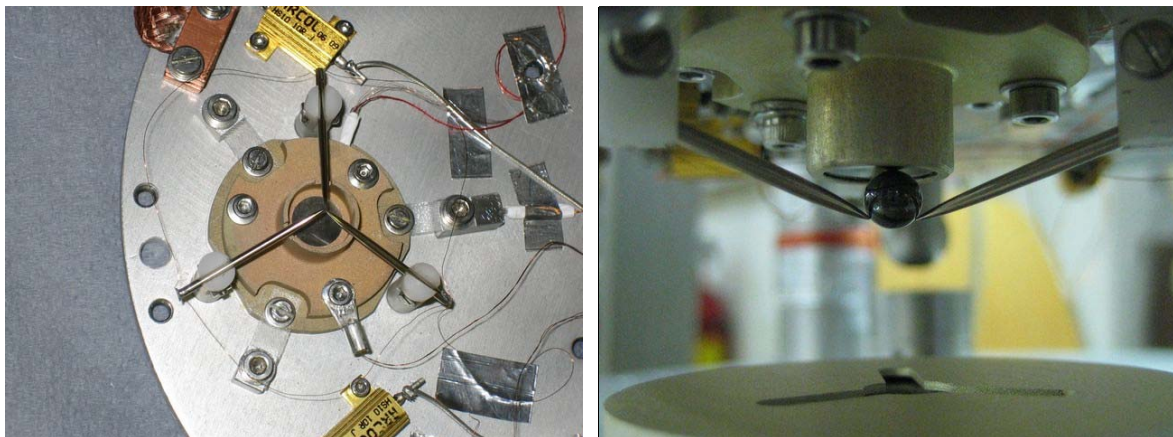


Abb. 3-8 Obere Gegenfläche in Halterung mit Strahlungsschild, von unten (links) und Kugel mit Durchmesser $d = 4,762$ mm in der Nadelhalterung

3.3.7 Kryostat und Pumpstand

Der Kryostat wurde auf einer fahrbaren Plattform befestigt, die den Transport der Messapparatur unter die vorhandene Hebevorrichtung ermöglicht (siehe Abb. 3-9 rechts). Eine Justiermöglichkeit für die Waagrechtstellung nach dem Einbau des Messeinsatzes ist vorhanden.



Abb. 3-9 Versuchsaufbau ohne Verkabelung auf Dreibein (links); Plattform für den Kryostaten (rechts)

Der Pumpstand für das Hauptvakuum besteht aus einer Drehschieberpumpe und einer Turbomolekularpumpe vom Typ Leybold Turbovac 361. An der Pumpe wurde in 15 Stunden bei Raumtemperatur ein Vakuum von $p = 5 \cdot 10^{-7}$ mbar erreicht.

Die besten während der Messungen erreichten Enddrücke wurden mithilfe der Kryopumpwirkung der Oberfläche des Heliumbehälters erzielt und lagen bei $p = 2 \cdot 10^{-7}$ mbar.

Der Kryostat hat einen Stickstoffmantel, der bei Messungen mit $T_{KR} < 100$ K benutzt wurde.

3.3.8 Beladevorrichtung und Kraftmessung

Die Kraft auf die Probe im Teststand wurde über die obere Regelplatte aufgebracht. In einer Ringnut an ihrer Oberseite konnten ein bis drei Massen (Abb. 3-10) aufgelegt werden, die nach dem Aufsetzen der Probe auf dieser sowie auf zwei Plexiglasrohren lasteten.



Abb. 3-10 Massen zum Aufbringen der Auflagekraft

Die Temperaturabbaustrecke mit der Probe und die zwei Plexiglasrohre waren dabei in einem gleichseitigen Dreieck angeordnet, dessen Schwerpunkt direkt unter dem der Auflagemassen lag. Somit lastete auf der Probe ein Drittel der durch die Massen der Stahlgewichte und der Regelplatte erzeugten Kraft, wenn Schwerpunktsverschiebungen infolge unterschiedlicher thermischer Ausdehnung der Auflagerohre vernachlässigt werden.

Da bei der Beladevorrichtung keine Möglichkeit zur Kraftmessung im Testaufbau vorgesehen ist, wurden die tatsächlichen Auflagekräfte mittels einer Hottinger Baldwin PW2GC3 Plattform-Wägezelle und einem Hottinger Baldwin Scout 55 Messverstärker gemessen. Die Wägezelle wurde bei ausgebautem Teststand mit einer Schelle an einem der drei Rohre des Heliumbehälters befestigt und die Kugel K04 (14,288 mm Durchmesser, Si_3N_4) wurde auf die vordere Fläche der Wägezelle aufgesetzt.

Zum Mitloggen der Werte während der Messung wurde ein LabVIEW Programm geschrieben (Abb. 3-11).

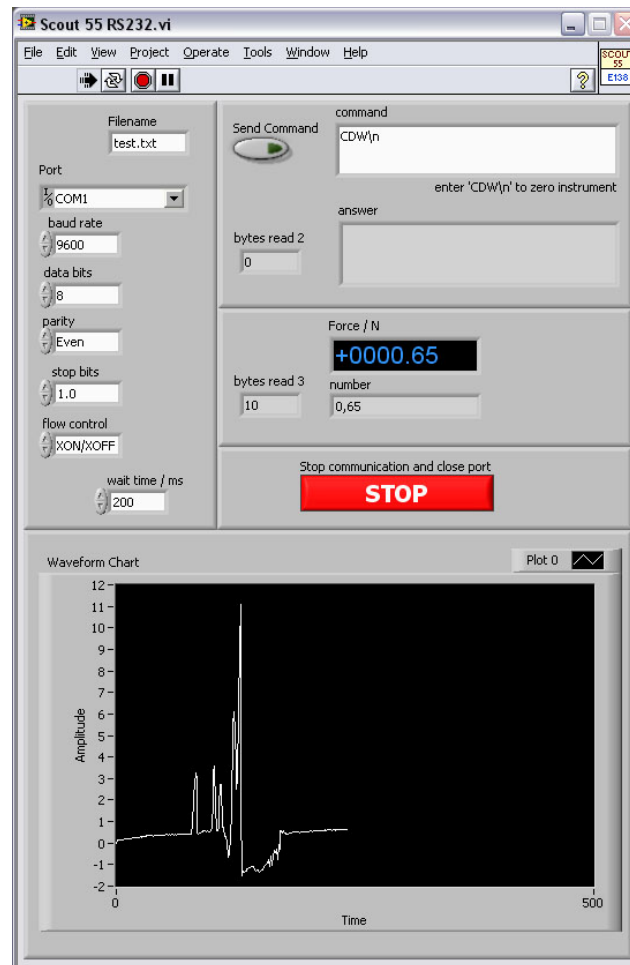


Abb. 3-11 LabVIEW Programm für die Messung der Auflagekraft

Für jede Messung der Auflagekraft wurde zunächst der Nullwert bestimmt, dann die Wägezelle belastet und für mindestens eine Minute gemessen. Der Mittelwert der dabei gemessenen Werte wurde als Messwert verwendet.

Zur Kalibrierung der Wägezelle wurden die Stahlgewichte auch einzeln direkt auf eine zu diesem Zweck vorne an der Wägezelle montierte Platte aufgesetzt und die Kräfte gemessen. Unabhängig davon wurden die Massen der Stahlgewichte mit einer geeichten Waage bestimmt und daraus ein Korrekturfaktor für die mit der Wägezelle gemessenen Werte ermittelt, welcher für jedes der drei Gewichte bei 1,028 lag. Durch diesen Wert wurden die bei den Messungen der Auflagekraft ermittelten Werte dividiert um die tatsächliche Auflagekraft zu erhalten. Die Ergebnisse sind in Tabelle 3-1 zusammengefasst.

| | <i>F / N</i> |
|----------|--------------|
| 0 Massen | 1,7 |
| 1 Masse | 17,9 |
| 2 Massen | 43,7 |
| 3 Massen | 71,1 |

Tabelle 3-1 Ermittelte Werte der Auflagekraft

3.4 Modifikationen

3.4.1 Untere Regelplatte

Zum Testen des Versuchsaufbaus wurde eine zylindrische Aluminium-Probe mit Höhe $h = 9,54$ mm und Durchmesser $d = 4,79$ mm benutzt (siehe Abb. 3-12). Als Auflageflächen dienten Flächen aus AISI 440C Stahl.

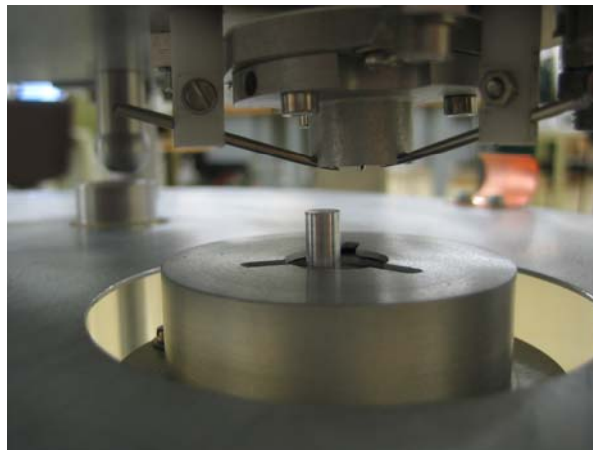


Abb. 3-12 Zylindrische Aluminiumprobe im Versuchsaufbau

Auf der unteren Temperaturregelplatte konnte die gewünschte Temperatur von $T = 15$ K zu Beginn nicht eingestellt werden (siehe Abb. 3-13, Quadrate in pink). Ein wesentlicher Grund dafür war der hohe Wärmeeintrag über die drei Stützrohre, die direkt mit der Stirnfläche des Heliumbehälters verbunden waren. Da diese Rohre die gesamten Auflagekräfte aufnehmen und auch für eine entsprechende mechanische Steifigkeit sorgen, mussten ihre Wandstärken relativ hoch ausgelegt werden. Eine thermische Kopplung mit dem Stickstoffmantel des Kryostaten war nicht möglich. Die Kühlung der unteren Regelplatte erfolgt über die Stirnfläche des Heliumbehälters.

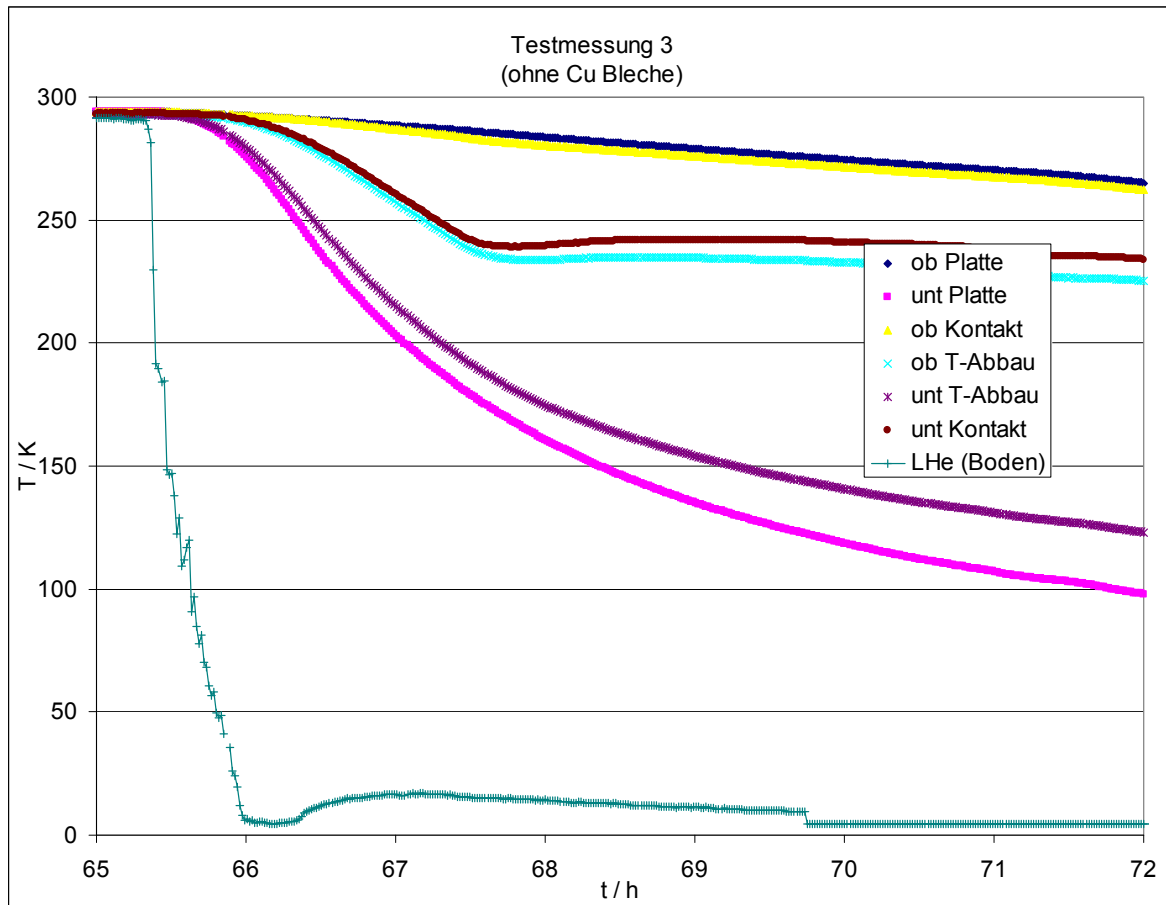


Abb. 3-13 Temperaturverlauf mit aufgesetztem Aluminiumzylinder (ohne Kupferbleche)

Zur Verbesserung der thermischen Kopplung der unteren Regelplatte wurden zusätzlich 1 mm starke Kupferbleche zwischen oberer Stirnfläche des Heliumbehälters und der Unterseite der Regelplatte eingebaut (siehe Abb. 3-14)

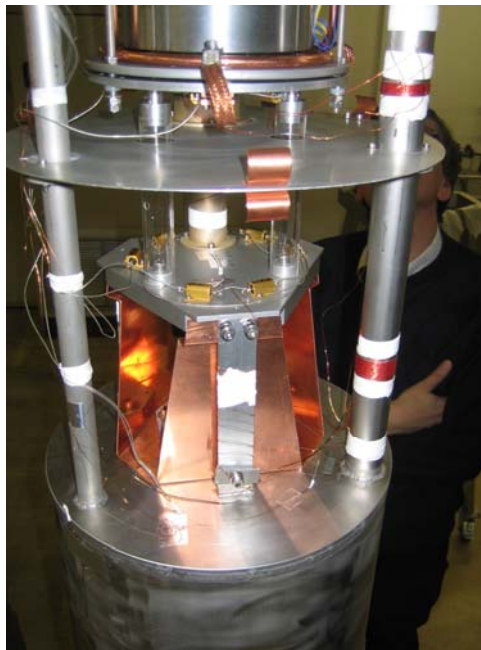


Abb. 3-14 Kupferbleche zur Verbesserung des thermischen Kontaktes zwischen unterer Temperaturregelplatte und Heliumbehälter

Weiters wurden 1 mm starke Kupferbleche zwischen dem Boden des Heliumbehälters und der unteren Temperaturregelplatte montiert (Abb. 3-15).



Abb. 3-15 Kupferbleche zur Vergrößerung der Kühlleistung (im Aufbau sind auch bereits die Distanzstücke aus Vespel zu sehen)

Da der Al-Zylinder einen viel höheren Wärmestrom als eine Kugel zwischen den beiden Gegenflächen ermöglicht, wurde bei den weiteren Testmessungen eine Kugel aus AISI 440C Stahl mit Durchmesser $d = 9,525$ mm verwendet (siehe Abb. 3-16).

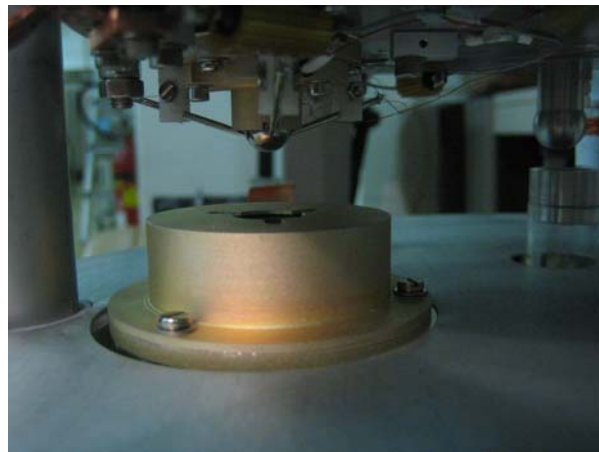


Abb. 3-16 Kugel im Versuchsaufbau

Als niedrigste Temperatur der unteren Regelplatte wurde im aufgesetzten Zustand $T_{KR} = 37$ K und im abgehobenen Zustand $T_{KR} = 30$ K erreicht.

Um die Möglichkeit eines direkten mechanischen Kontaktes zwischen dem Heliumbehälter und der Kryostatwand auszuschließen, wurden Distanzstücke aus Vespel SP1 (im linken Bild auf Abb. 3-15 unten zu sehen) unten am Heliumbehälter angebracht.

Vespel SP1 wurde wegen seiner kleinen thermischen Leitfähigkeit gewählt, damit der Wärmeeintrag in den Heliumbehälter über die entstehenden Kontakte möglichst gering bleibt. Eine Extrapolation von Tieftemperaturwerten zwischen $T = 0,1 - 1$ K [L. Risegari et al., 2003] ergab für die Wärmeleitfähigkeit bei 4,2 K von $\lambda \approx 0,01$ W / mK. Dieser extrapolierte Wert wurde vor kurzem durch [M.C. Runyan and W.C. Jones, 2008] bestätigt.

Die Testmessung mit einer Kugel aus Si_3N_4 mit Durchmesser $d = 9,525$ mm ergab als kleinstmögliche Temperatur im aufgesetzten Zustand $T_{KR} = 25$ K, im abgehobenen Zustand $T_{KR} = 20$ K.

Die Wand des Heliumbehälters steht mit ihrer relativ großen Fläche in Strahlungswechselwirkung mit der viel wärmeren Innenwand des Kryostaten. Um den Heliumbehälter sowie die untere Regelplatte von der Wärmestrahlung der Kryostatwand abzuschirmen wurde der Messaufbau mit mehrlagiger Superisolation umwickelt (Abb. 3-17).



Abb. 3-17 Mit Superisolation umwickelter Messaufbau

Durch diese Maßnahmen konnten schließlich mit einer Si_3N_4 -Kugel mit Durchmesser $d = 9,525$ mm Temperaturwerte von $T_{KR} = 12$ K im abgehobenen Zustand und $T_{KR} = 16$ K mit aufgesetzter Kugel erreicht werden (siehe Abb. 3-18).

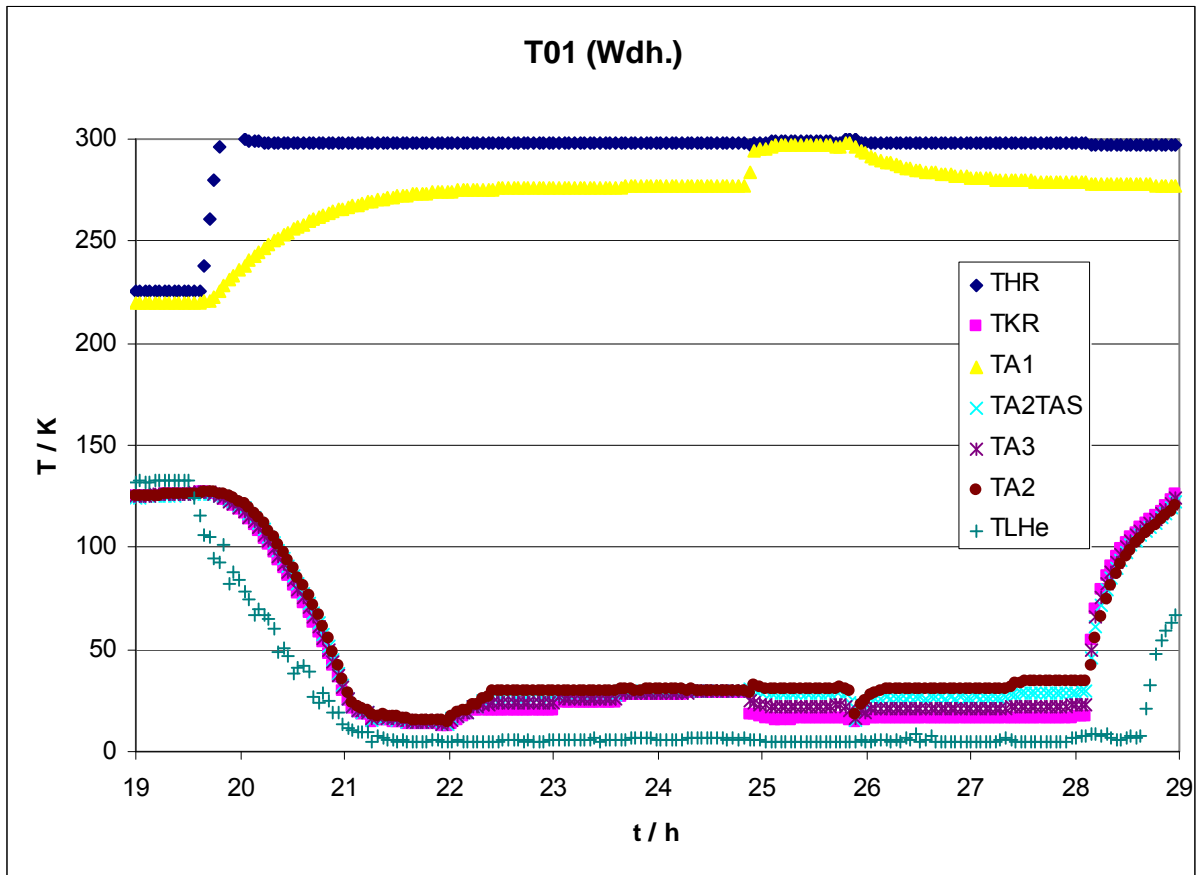


Abb. 3-18 Erreichte Temperaturwerte nach Fertigstellung aller Modifikationen an der Tieftemperaturseite des Messaufbaus

3.4.2 Obere Regelplatte

Mit der in 3.3.3 beschriebenen Konstruktion ließen sich aufgrund eines zu schlechten thermischen Kontaktes zwischen Kühlschlange und oberer Regelplatte nicht die gewünschten Temperaturen einstellen. An der oberen Gegenfläche konnte keine niedrigere Temperatur als $T_{HR} \sim 140$ K stabil geregelt werden (Abb. 3-19).

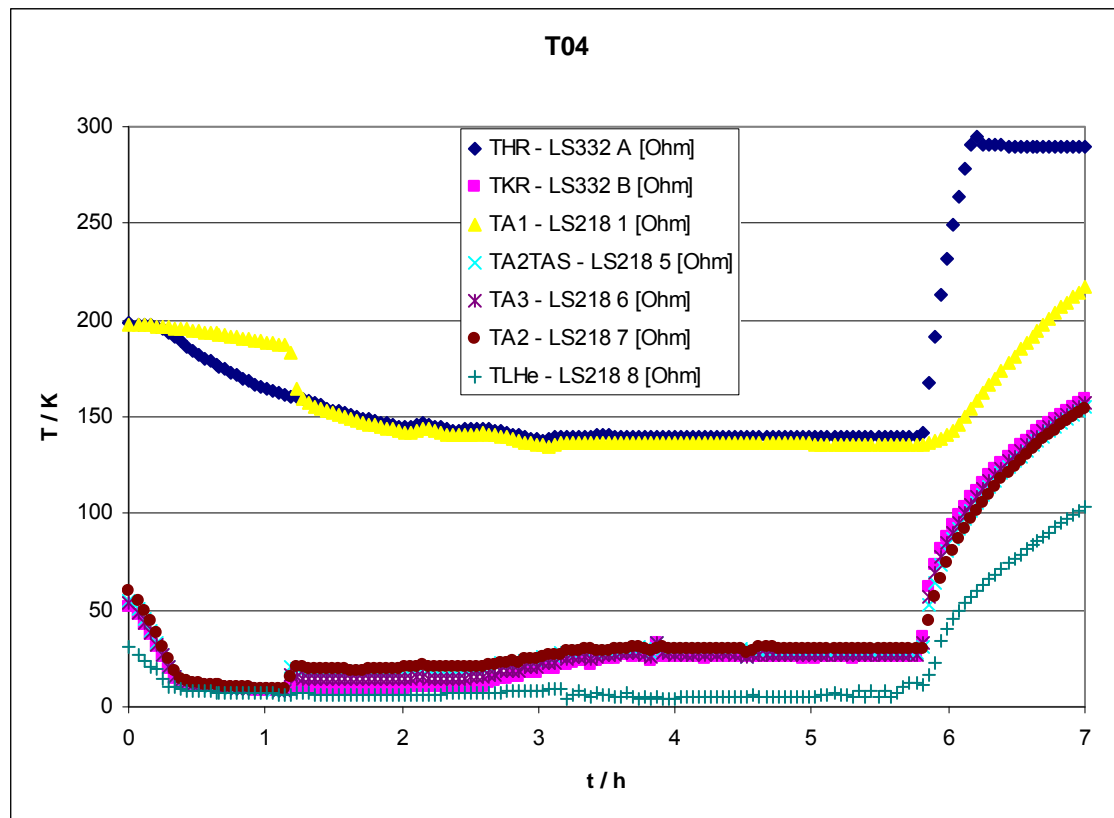


Abb. 3-19 Kühlen und Regeln der Temperaturen vor Umbau der Stickstoffschlange

Der zu einer Spirale gebogene Teil des Kupferrohres wurde daher auf einen Kupfering mit einer Ringnut weichgelötet und es wurde im Vergleich zur ursprünglichen Konstruktion die dreifache Menge an Kupferbändern eingebaut, um den thermischen Kontakt zwischen der Kupferplatte und der oberen Regelfläche herzustellen (Abb. 3-20).

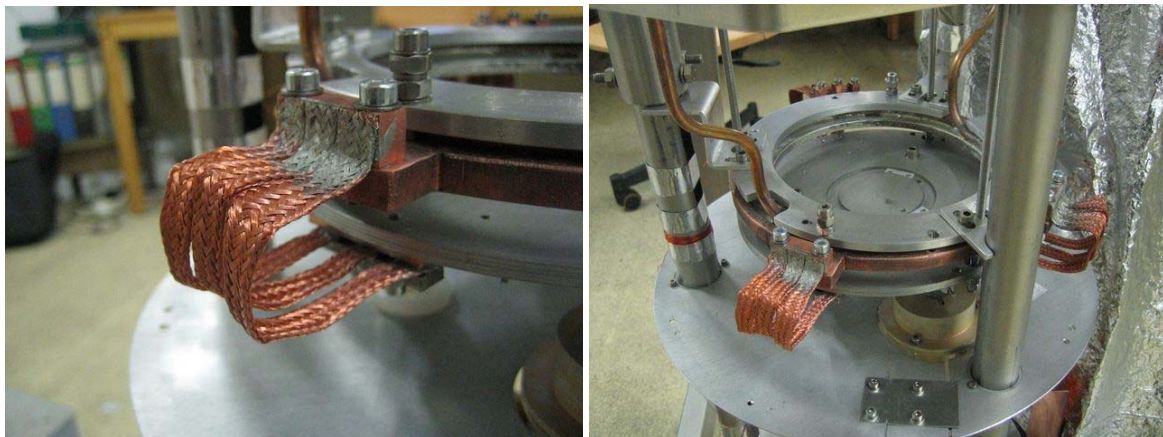


Abb. 3-20 Neue thermische Anbindung der Kühlschlange an die obere Regelplatte

Da die Auflagemassen eine hohe Wärmekapazität und schlechte thermische Kopplung an die obere Regelplatte haben, wurden sie mit Superisolation umwickelt (Abb. 3-21 links) und es wurde ein Distanzstück aus Kunststoff zwischen die Massen und die Regelplatte gesetzt (Abb. 3-21 rechts).



Abb. 3-21 Mit Superisolation umwickelte Auflagemassen (links); Distanzstück zwischen Massen und Regelplatte (rechts)

Mit diesen Modifikationen konnte erreicht werden, dass an der oberen Gegenfläche Temperaturen knapp unter $T_{HR} = 100$ K eingestellt werden konnten (Abb. 3-22). Die untere Platte wurde bei diesem Versuch auf $T_{KR} = 12$ K gehalten. Als Probe diente eine Si_3N_4 -Kugel mit dem Durchmesser $d = 14,288$ mm.

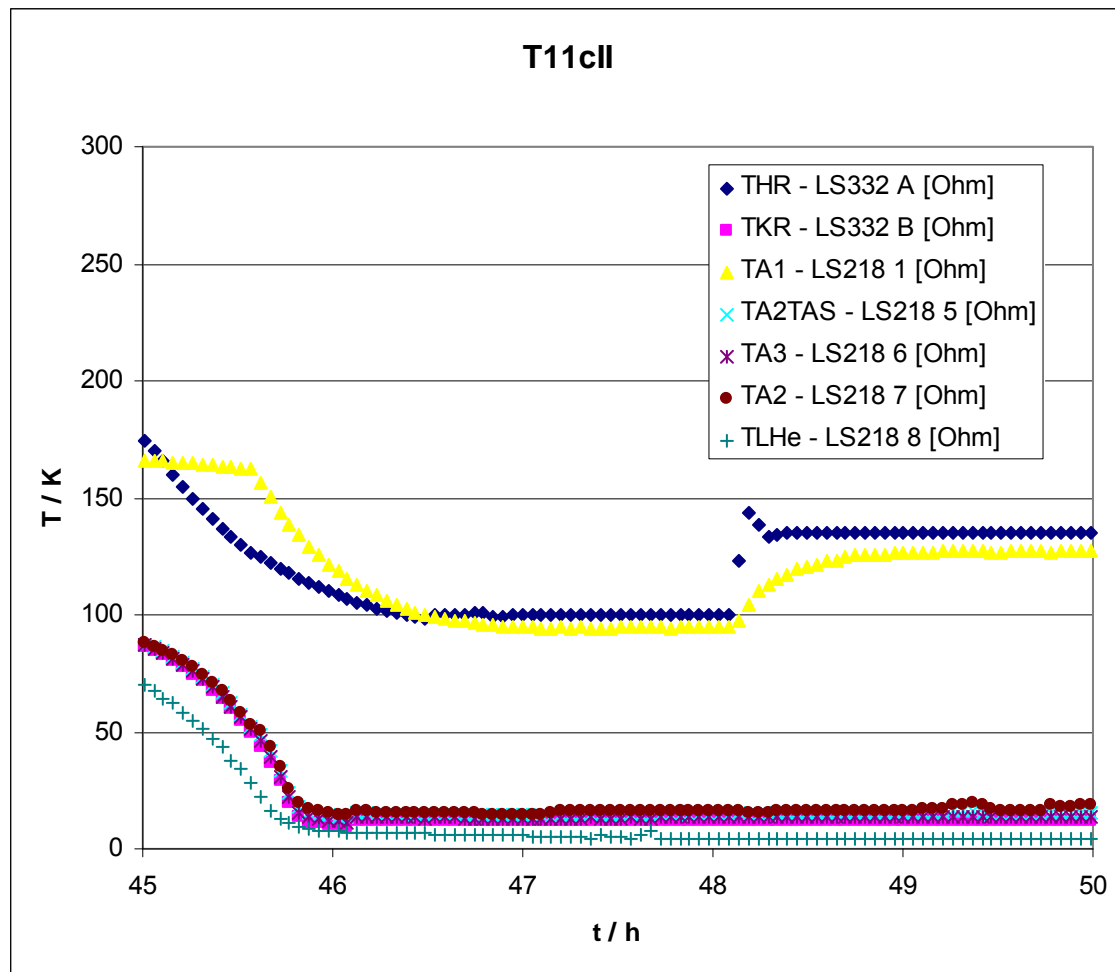


Abb. 3-22 Kühlen und Regeln der Temperaturen nach Umbau der Stickstoffschlange

3.4.3 Temperaturabbaustrecke

Die Modifikationen an der Temperaturabbaustrecke wurden parallel zu den Modifikationen der thermischen Anbindung der unteren Regelplatte durchgeführt. Bei den ersten Messungen mit der Kugel stellte sich eine Temperaturdifferenz von $\Delta T \sim 35$ K zwischen dem Sensor auf der unteren Temperaturregelplatte und dem Sensor am unteren Ende der Temperaturabbaustrecke ein (siehe Abb. 3-23).

Bei den Messungen mit den Zylinderproben war sogar eine noch höhere Temperaturdifferenz zu sehen gewesen, die auf einen schlechten thermischen Kontakt zwischen Temperaturabbaustrecke und unterer Temperaturregelplatte hindeutete.

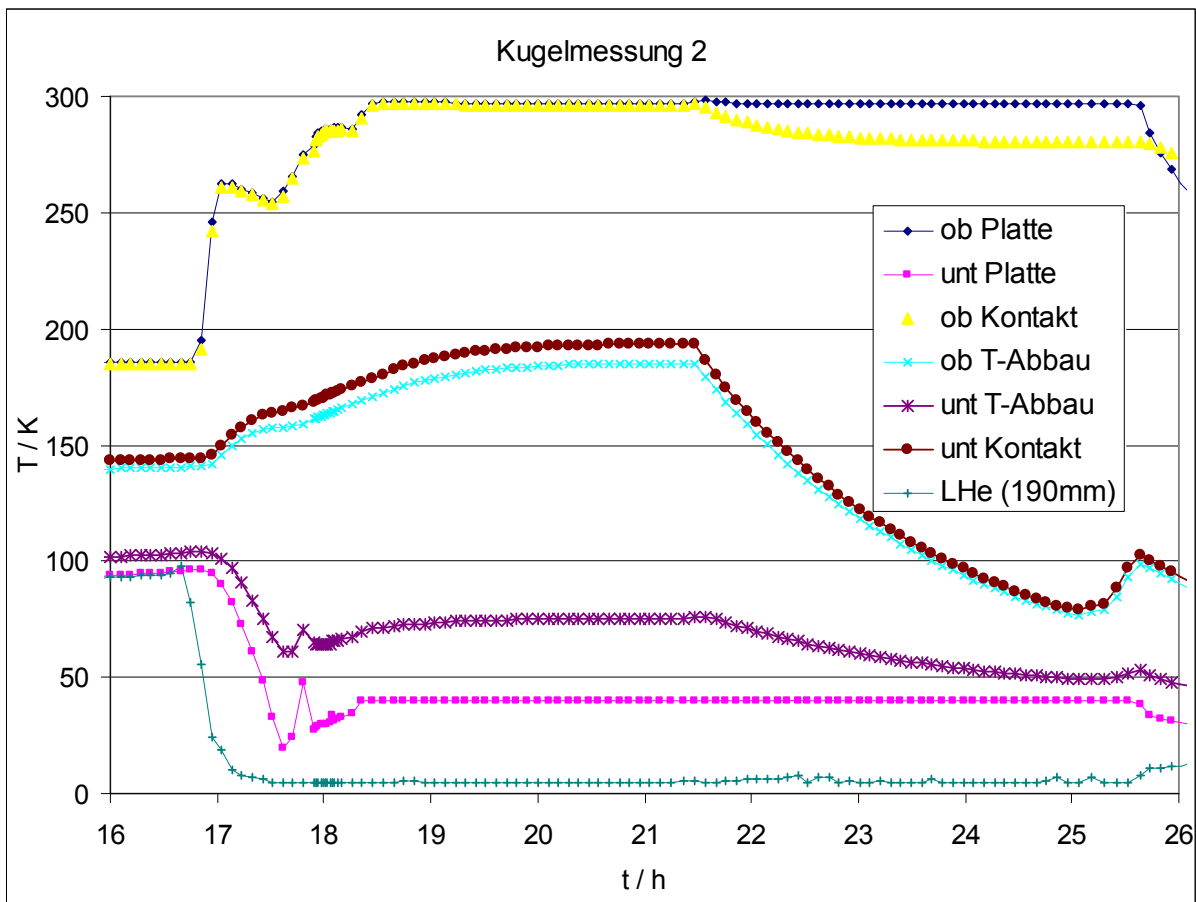


Abb. 3-23 Temperaturverlauf mit aufgesetzter Kugel und Regelung der beiden Temperaturregelplatten, oben auf $T = 297\text{ K}$ und unten auf $T = 40\text{ K}$ (ohne Konstruktion zur Kontaktverbesserung)

Zur Verbesserung dieses Kontaktes wurde ein Einsatz mit einem konischen Innenteil aus rostfreiem Stahl und passenden Aluminiumschalen gefertigt, der die Temperaturabbaustrecke von innen an die Temperaturregelplatte anpresst (siehe Abb. 3-24).

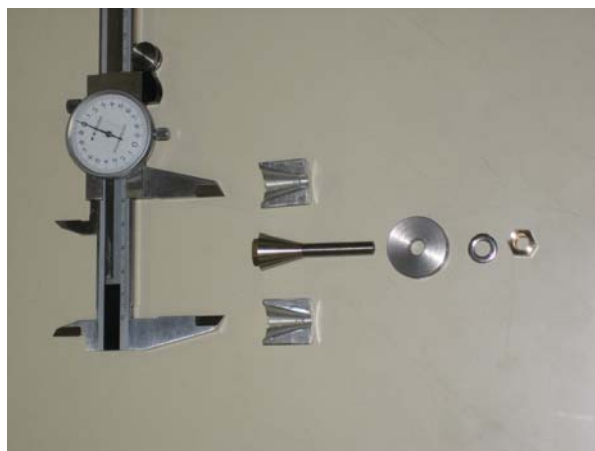


Abb. 3-24 Konstruktion zur Verbesserung des thermischen Kontaktes zwischen Temperaturabbaustrecke und unterer Temperaturregelplatte

Mit der beschriebenen Konstruktion zur Verbesserung dieses thermischen Kontaktes konnte die Temperaturdifferenz auf $\Delta T \sim 3 - 5\text{ K}$ reduziert werden (siehe Abb. 3-25).

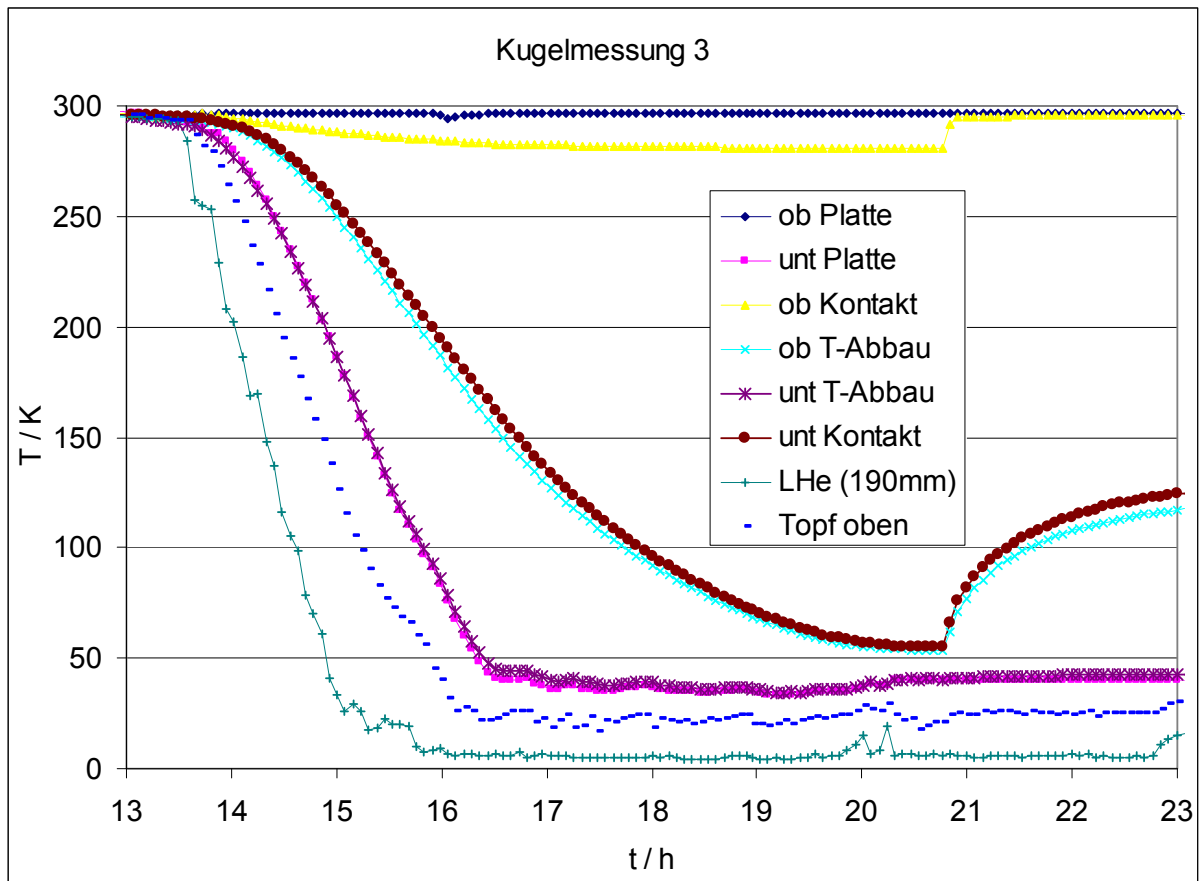


Abb. 3-25 Temperaturverlauf mit aufgesetzter Kugel und Regelung der beiden Temperaturregelplatten, oben auf $T = 297\text{ K}$ und unten auf $T = 40\text{ K}$ (mit Konstruktion zur Kontaktverbesserung)

3.5 Kalibrationsmessungen mit HDPE Zylindern

Zur Überprüfung der Wärmestrommessungen wurden drei Proben aus High Density Polyethylene (HDPE) in der Form zweier aufeinandergesetzter Hohlzylinder verwendet (Abb. 3-26).



Abb. 3-26 HDPE-Probe

Der Durchmesser der inneren Bohrung betrug bei allen drei Proben 2 mm. Der Außendurchmesser des oberen Zylinders lag bei ungefähr 9 mm. Der Außendurchmesser des Unterteils variierte zwischen 5 und 7 mm (Tabelle 3-2). Die Geometrie der Probe ergibt sich aus der Forderung, dass die Nadeln an der oberen Regelplatte die Probe zur Nachkalibrierung abheben können (Abb. 3-27).



Abb. 3-27 HDPE-Probe in der Nadelhalterung (abgehoben)

Um eine ungleichmäßige Belastung der Probe zu vermeiden wurde am oberen Kontakt ein Indiumplättchen beigelegt. Da Indium sehr weich ist, wird eine allfällige geringe Nichtparallelität der beiden Auflageflächen ausgeglichen, da sich die Probe in das Indiumplättchen eindrückt. Zur zusätzlichen Verbesserung des thermischen Kontaktes wurde Wacker „Hochvakuumfett mittel“ auf die Auflageflächen der Probe aufgebracht. Die Probe wurde vor der Messung bei Raumtemperatur im ausgebauten Zustand aufgesetzt, um die Verformung des Indiumplättchens sowie der Vakuumfettschichten zu ermöglichen.

Für die Berechnung der zu erwartenden Wärmeströme wurde der temperaturabhängige Wärmeleitwert von HDPE bestimmt [R. Lackner und E. Bauer, 2007] und mit Werten der Firma Cryodata Inc. [Cryocomp] sowie Werten aus [J. W. Ekin, 2006] verglichen (Abb. 3-28). Die Kurven stimmen relativ gut überein.

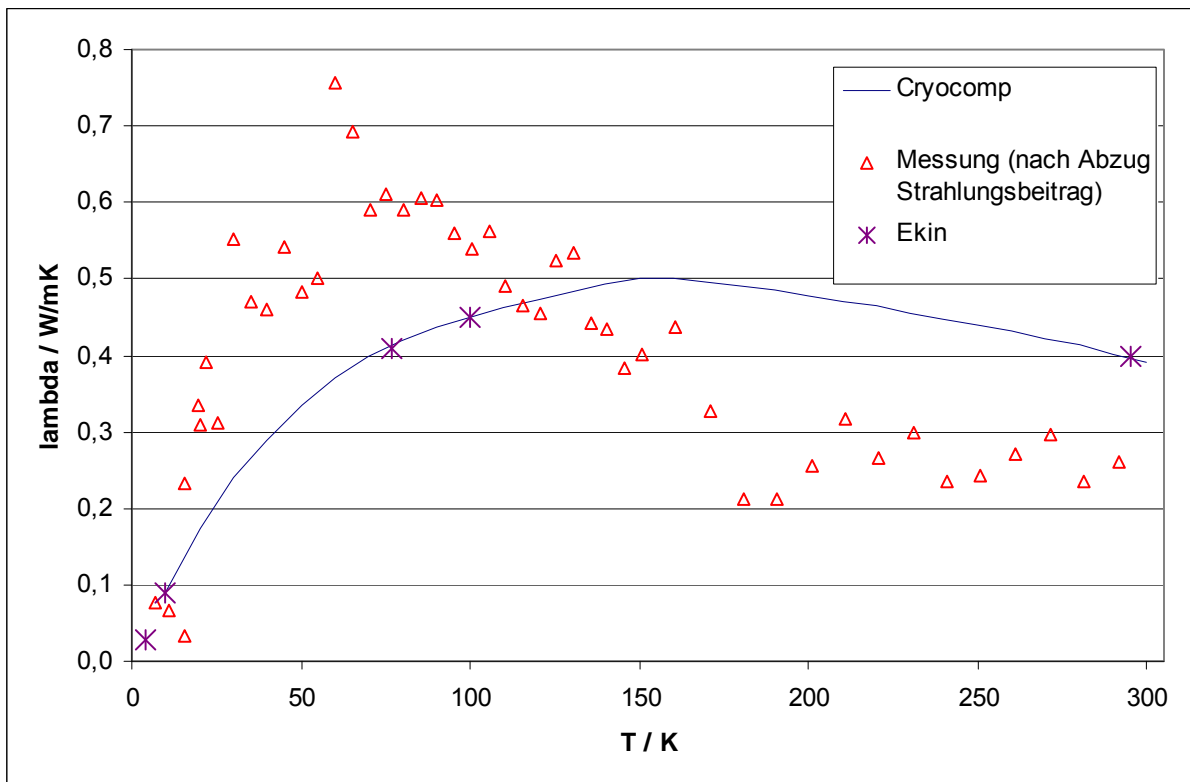


Abb. 3-28 Temperaturabhängige Wärmeleitfähigkeit von HDPE

Eine analytische Abschätzung, bei der als Temperatur an der Verjüngung der Probe eine gewichtete mittlere Temperatur T_m angenommen und der thermische Widerstand durch die Einschnürung der Wärmeflusslinien an der Verjüngung vernachlässigt wurde, liefert brauchbare Ergebnisse (Tabelle 3-2).

$$T_m = \frac{T_{oben} \frac{A_{oben}}{x_{oben}} + T_{unten} \frac{A_{unten}}{x_{unten}}}{\frac{A_{oben}}{x_{oben}} + \frac{A_{unten}}{x_{unten}}}$$

Auch Vorhersagen, die mit der Finite Elemente Software ANSYS gewonnen wurden, sind von den Messungen bestätigt worden (siehe Tabelle 3-2 und Abb. 3-29).

| | HDPE 3 | HDPE 1 | HDPE 2 | Einheit |
|----------------------|----------|----------|----------|----------------|
| $\lambda_{estimate}$ | 0,4 | 0,4 | 0,4 | W/mK |
| D_{innen} | 2 | 2 | 2 | mm |
| D_{oben} | 9,04 | 9,2 | 9 | mm |
| A_{oben} | 6,10E-05 | 6,33E-05 | 6,05E-05 | m ² |
| x_{oben} | 4,04E-03 | 4,00E-03 | 4,15E-03 | m |
| T_{oben} | 296,3 | 297 | 297 | K |
| D_{unten} | 7 | 6 | 5 | mm |
| A_{unten} | 3,53E-05 | 2,51E-05 | 1,65E-05 | m ² |

| | HDPE 3 | HDPE 1 | HDPE 2 | Einheit |
|------------------------------|----------|----------|----------|---------|
| x_{unten} | 4,94E-03 | 4,90E-03 | 5,00E-03 | m |
| T_{unten} | 30 | 30 | 30 | K |
| T_m | 210,73 | 231,67 | 247,72 | K |
| | | | | |
| ANSYS | | | | |
| \dot{Q} | 0,480 | 0,374 | 0,257 | W |
| ΔT_{TAS} | 7,3 | 5,6 | 3,5 | K |
| $\Delta \dot{Q}$ (zu Messg.) | 7,3 | 4,8 | 8,6 | % |
| analytisch | | | | |
| \dot{Q} | 0,517 | 0,414 | 0,287 | W |
| ΔT_{TAS} | 7,9 | 6,2 | 3,9 | K |
| $\Delta \dot{Q}$ (zu Messg.) | 0,0 | -5,4 | -2,3 | % |
| Messung | | | | |
| \dot{Q} | 0,517 | 0,393 | 0,281 | W |
| ΔT_{TAS} | 7,9 | 5,9 | 3,8 | K |

Tabelle 3-2 Zusammenfassung der Wärmestromwerte der Kalibrationsmessungen und Vergleich mit den aus der ANSYS-Simulation und der analytischen Modellrechnung ermittelten Werten. ($x_{oben/unten}$ ist definiert als des jeweiligen Teilzylinders.)

Die Messwerte zeigen die erwartete lineare Abhängigkeit von der Querschnittsfläche. In Verbindung mit der guten Übereinstimmung mit den Ergebnissen aus analytischen Rechnungen und ANSYS-Modellsimulationen zeigt dies, dass die Messung des Wärmestroms mit dem aufgebauten Kalorimeter möglich ist. Die gewichtete mittlere Fläche in Abb. 3-29 wurde mit folgender Formel berechnet:

$$\frac{1}{\overline{A}_{gewichtet}} = (x_{unten} + x_{oben}) \left(\frac{1}{A_{oben} \cdot x_{oben}} + \frac{1}{A_{unten} \cdot x_{unten}} \right)$$

Sie berücksichtigt, dass der Wärmestrom verschwindet, wenn eine der beiden Zylinderquerschnittsflächen gegen Null geht.

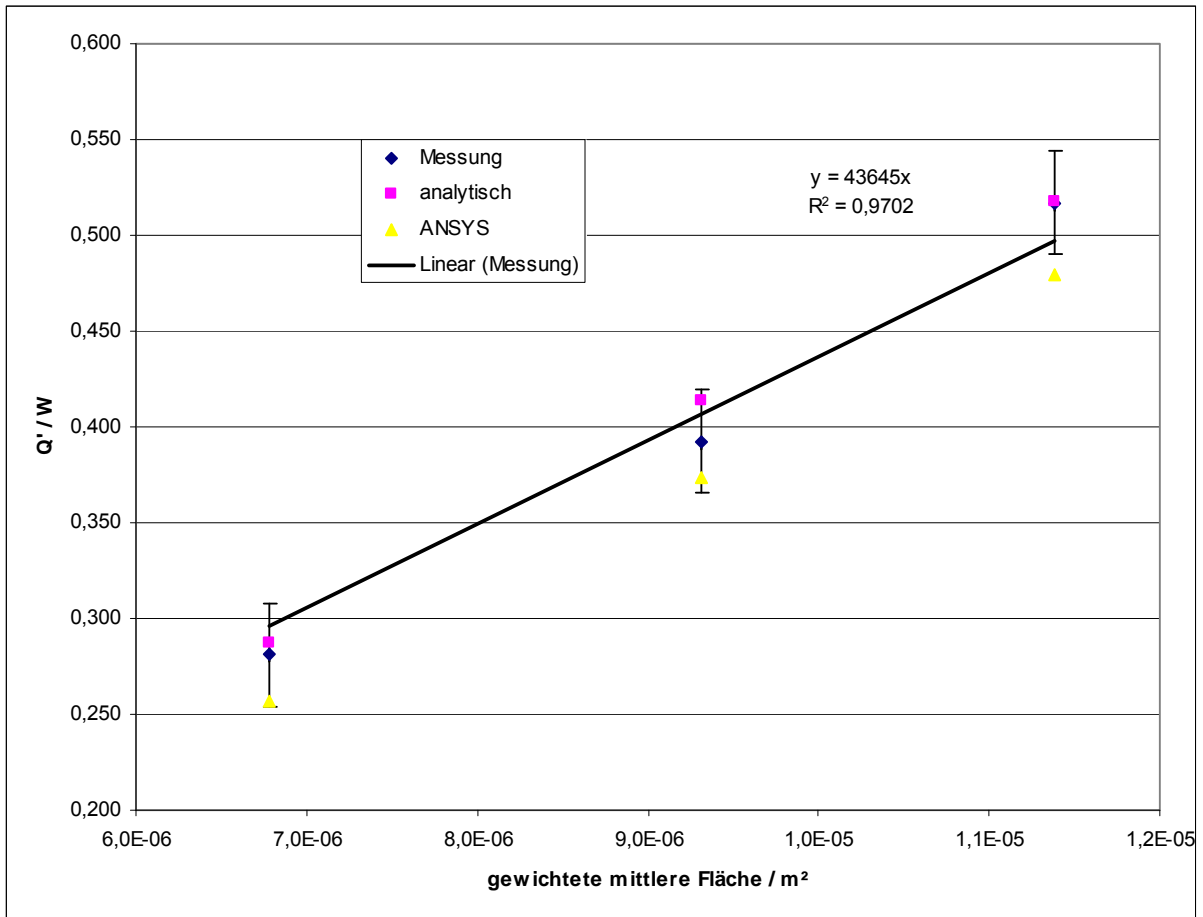


Abb. 3-29 Messwerte und mittels analytischer Modellrechnungen sowie ANSYS Simulation erhaltene Werte für den Wärmefluss bei den Kalibrationsmessungen mit HDPE-Proben

4 Experimenteller Teil

4.1 Wärmestrommessungen mit Kugeln

Die untersuchten Proben und Gegenflächen sind in Tabelle 4-1 und Tabelle 4-2 aufgeführt.

| Bezeichnung | Material | Ø / mm | Ø / in. | Behandlung |
|-------------|--------------------------------|--------|---------|-----------------------------|
| K01 | Si ₃ N ₄ | 9,525 | 3/8 | |
| K02 | AISI 440C | 9,525 | 3/8 | |
| K03 | Si ₃ N ₄ | 4,762 | 3/16 | |
| K04 | Si ₃ N ₄ | 14,288 | 9/16 | |
| K06 | AISI 440C | 9,525 | 3/8 | Beschichtet: Dicronite DL-5 |
| K07 | AISI 440C | 9,525 | 3/8 | Beschichtet: MoS2 |
| K09 | Si ₃ N ₄ | 9,525 | 3/8 | nach Vibrationstest |

Tabelle 4-1 Kugeln an denen Wärmestrommessungen durchgeführt wurden

Die Oberflächenrauheit einer Si₃N₄ Kugel wurde mit einem Taylor Hobson Surtronic 3+ Roughness Checker gemessen [C. Eisenmenger, 2008]. Sie liegt bei $R_a = 0,020 \mu\text{m}$ bzw. $R_{RMS} = 0,027 \mu\text{m}$, wobei die mittlere Rauheit R_a durch

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |r_i|$$

gegeben ist, die quadratische Rauheit R_{RMS} durch

$$R_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n r_i^2}$$

mit

r_i Rautiefe am Messpunkt i

n Anzahl der Messpunkte

Es kann angenommen werden, dass die Rauheit der anderen Kugeln ebenfalls in diesem Bereich liegt.

| Bezeichnung | Material | $R_a / \mu\text{m}$ | | Behandlung |
|---------------------|--------------------|------------------------------------|--|---------------------|
| | | Soll / ist(F_u) / ist(F_o) | | |
| F _{u/o} 01 | 1.4125 / AISI 440C | 0,125 / 0,11 / 0,10 | | |
| F _{u/o} 02 | 1.4125 / AISI 440C | 0,035 / 0,037 / 0,039 | | |
| F _{u/o} 03 | 1.4125 / AISI 440C | 0,8 / 0,396 / 0,610 | | |
| F _{u/o} 04 | 1.4301 / AISI 304 | 0,8 / 0,431 / 0,280 | | |
| F _{u/o} 05 | Al EN AW-7075 | 0,8 / 0,35 / 0,56 | | |
| F _{u/o} 06 | 1.4125 / AISI 440C | 0,125 / 0,062 / 0,058 | | nach Vibrationstest |

Tabelle 4-2 Gegenflächen für die Wärmestrommessungen

In Tabelle 4-2 steht F_u für die untere, F_o für die obere Gegenfläche. Bei den einzelnen Messungen wurden verschiedene Kombinationen aus Flächen und Kugeln verwendet. Welche Kombination bei einer Messung eingebaut war, ist bei der Erläuterung der Ergebnisse angegeben.

Die mittleren Rauheiten der Gegenflächen in Tabelle 4-2 wurden bei der Firma Austrian Aerospace GmbH [C. Neugebauer, 2007] mit einem Mitutoyo Surftest SJ-301 bestimmt. Für die Flächen $F_{u/o}01$ wurde auch die quadratische Rauheit berechnet: $R_{RMS} = 0,14 \mu\text{m}$.

Um zu berücksichtigen, dass bei den vorliegenden Proben die quadratische Rauheit um ungefähr ein Drittel höher ist als die mittlere Rauheit wurden die R_a -Werte der Flächen für die Abschätzung der Werte von R_{RMS} mit $4/3$ multipliziert.

Die Reihenfolge der Messungen wurde so geplant, dass bei den aufeinander folgenden Gruppen von Messungen der Einfluss jeweils eines Parameters untersucht werden kann (Tabelle 4-3).

| Testnummer | Untersuchter Parameter |
|------------|-------------------------------------|
| T01-T04 | Temperaturpaarung an der Kugel |
| T05-T06 | Auflagegewicht |
| T07-T09 | Rauheit der Gegenflächen |
| T10-T11 | Kugeldurchmesser |
| T13-T15 | Material der Kugel und Gegenflächen |
| T16-T17 | Beschichtung der Kugeln |
| T18 | Vibrationstest des Lagers |
| T19 | Temperatur eines Kontaktes |
| T20 | Umgebungsdruck |

Tabelle 4-3 Durchgeführte Wärmestrommessungen mit Kugeln

In den Tests T01(2), T04b, T05c, T10b, T21, T11c und T11d (siehe Appendix A, Tabelle A-1) wurde festgestellt, dass bei mehreren aufeinanderfolgenden Messungen mit Abheben und Wiederaufsetzen der Probe die Reproduzierbarkeit der Messergebnisse für die Wärmeströme sehr gut war. Dadurch war es möglich, ohne vollständige Demontage hintereinander mehrere Temperaturpaarungen an der Probe einzustellen. Durch diese Zeitreduktion war die Anzahl von Datensätzen wesentlich zu erhöhen.

4.1.1 Einfluss der Oberflächenrauheit der Gegenflächen

Es zeigte sich, dass der Wärmefluss bei einer Auflagekraft von $F = 71,1 \text{ N}$, was bei der Kugel aus 440C Stahl mit Durchmesser $d = 9,525 \text{ mm}$ einer Hertzschen Pressung von $\sigma_H = 2071 \text{ MPa}$ entspricht, unabhängig von der Oberflächenrauheit der Stahlplatten ist (Versuche T07-

T09). Die Ergebnisse der zur Untersuchung des Einflusses der Oberflächenrauheit durchgeführten Messungen sind in Tabelle 4-4 angegeben, die verwendeten Kugeln und Gegenflächen in Tabelle 4-5.

| Test # | \varnothing_{Kugel} mm | Bemerkungen | E_{Kugel} Pa | $E_{Flächen}$ Pa | F N | T_{A1} K | T_{A2} K | \dot{Q} mW | a_H m | σ_H MPa |
|--------|-----------------------------|-------------|-------------------|---------------------|----------|---------------|---------------|-----------------|------------|-------------------|
| T07 | 9,525 | F01 | 2,30E+11 | 2,30E+11 | 71,1 | 297,1 | 30 | 360,3 | 1,26E-04 | 2132 |
| T08 | 9,525 | F02 | 2,30E+11 | 2,30E+11 | 71,1 | 297,0 | 29,8 | 371,1 | 1,26E-04 | 2132 |
| | 9,525 | F02 | 2,30E+11 | 2,30E+11 | 71,1 | 297,1 | 60,0 | 350,0 | 1,26E-04 | 2132 |
| | 9,525 | F02 | 2,30E+11 | 2,30E+11 | 71,1 | 297,1 | 79,9 | 333,5 | 1,26E-04 | 2132 |
| T09 | 9,525 | F03 | 2,30E+11 | 2,30E+11 | 71,1 | 297,0 | 29,9 | 371,4 | 1,26E-04 | 2132 |
| | 9,525 | F03 | 2,30E+11 | 2,30E+11 | 71,1 | 297,0 | 29,7 | 364,3 | 1,26E-04 | 2132 |

Tabelle 4-4 Wärmestrommessungen zum Festellen des Einflusses der Oberflächenrauheit

| Test # | Kugel | Flächen |
|--------|-------|---------------------|
| T07 | K02 | F _{o/u} 01 |
| T08 | K02 | F _{o/u} 02 |
| T09 | K02 | F _{o/u} 03 |

Tabelle 4-5 Verwendete Kugeln und Gegenflächen

Unter der Annahme, dass R_{RMS} bei den untersuchten Proben als $R_{RMS} \approx \frac{4}{3} R_a$ abgeschätzt

werden kann, ergeben sich die in Tabelle 4-6 angegebenen Werte für den in 2.1.3 beschriebenen Rauheitsparameter:

| Test # | $R_a^{Flächen}$ µm | $R_{RMS}^{Flächen}$ µm | R_{RMS}^{Kugel} µm | $R_{RMS}^{effektiv}$ µm | $\alpha_{Greenwood}$ |
|--------|-----------------------|---------------------------|-------------------------|----------------------------|----------------------|
| T07 | 0,105 | 0,140 | 0,027 | 0,143 | 0,05 |
| T08 | 0,038 | 0,051 | 0,027 | 0,057 | 0,02 |
| T09 | 0,503 | 0,671 | 0,027 | 0,671 | 0,22 |

Tabelle 4-6 Werte des Rauheitsparameters für T07 – T09

Obwohl bei T09 der Parameter $\alpha_{Greenwood}$ einen Wert erreicht, bei dem bereits eine Abweichung von der Hertzschen Kontaktfläche aus dem gemessenen Wärmestrom ersichtlich sein sollte, konnte hier kein wesentlicher Einfluss auf den gemessenen Wärmestrom festgestellt werden (siehe Tabelle 4-4).

Es zeigte sich auch bei anderen Messungen, bei denen wegen geänderter Auflagekräfte und geänderter Kugeldurchmesser der Parameter $\alpha_{Greenwood}$ Werte $> 0,05$ annahm, dass die Vorhersage der Messergebnisse unter Beschreibung des Kontaktes mit der Hertzschen Theorie trotzdem zielführend ist.

4.1.1.1 Exkurs: Vergleich Lager - Einzelkontakt

Da in [M. J. Anderson, 1996] die Kraft auf das Lager mit $F = 80$ N fast gleich der in den Versuchen T07 - T09 aufgebrauchten Kraft von $F = 71,1$ N ist und in beiden Fällen der Kontakt von Stahlkugeln auf Stahlflächen untersucht wurde, können die Ergebnisse verglichen werden.

Wenn man die geometrieabhängige Wärmeleitfähigkeit

$$\Lambda := \frac{\dot{Q}}{\Delta T}$$

des in [M. J. Anderson, 1996] getesteten Lagers durch die Anzahl der Kugeln dividiert und gegen die mittlere Temperatur des Lagers in einem Diagramm aufträgt, zeigt ein Vergleich mit den in T07 - T09 ermittelten Werten eine geometrieabhängige Wärmeleitfähigkeit pro Kugel in der gleichen Größenordnung.

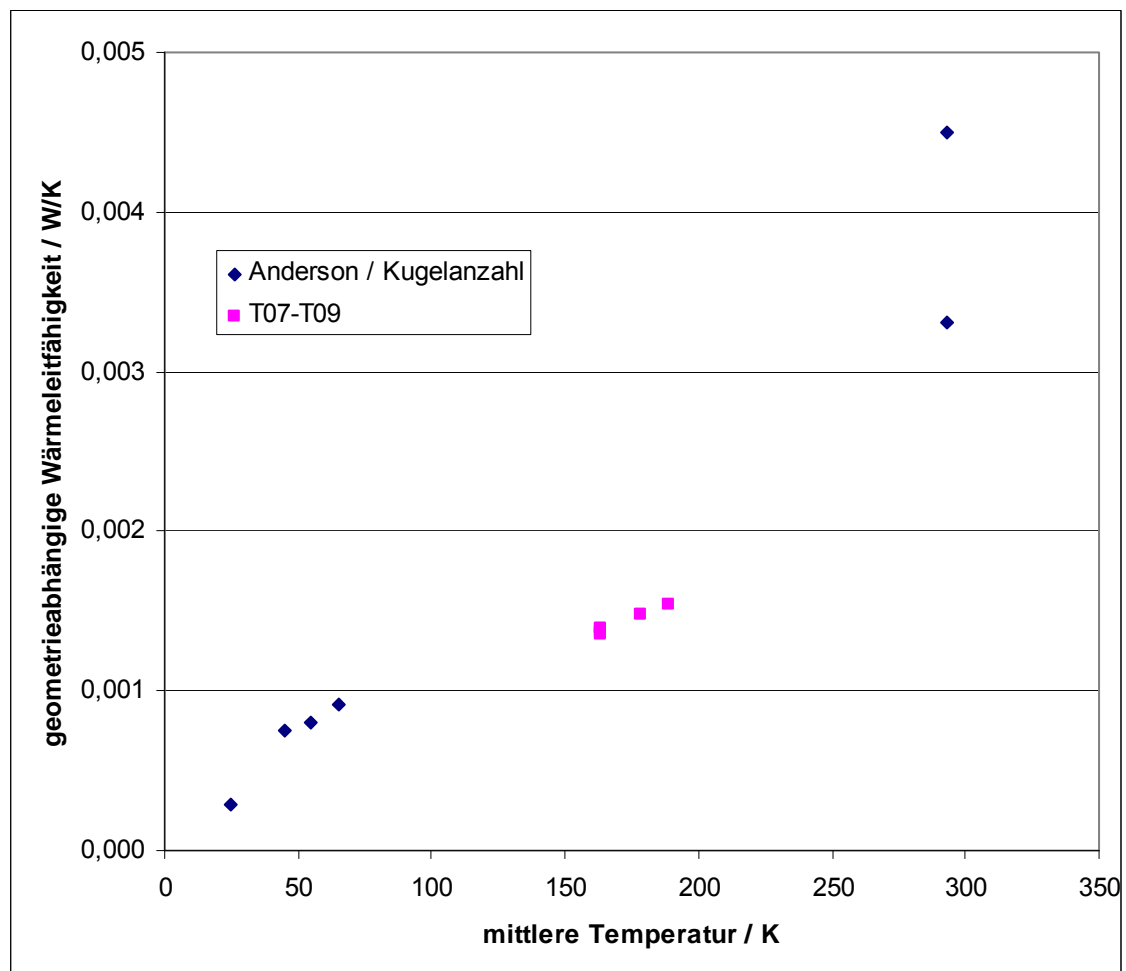


Abb. 4-1 Vergleich der geometrieabhängigen Wärmeleitfähigkeiten in T07-T09 mit den Werten aus [M. J. Anderson, 1996]

4.1.2 Einfluss der Beschichtung der Kugeln

Ein Vergleich der gemessenen Wärmeströme bei einer Temperaturpaarung von 297 K / 30 K zeigt, dass die im Rahmen der Versuche T16 und T17 gemessenen Wärmeflüsse über die beschichteten Kugeln kleiner sind als über die unbeschichtete Kugel (Tabelle 4-7).

Eine der getesteten Kugeln war mit Molybdändisulfid (MoS₂) beschichtet, die andere mit Dicronite DL-5. Dabei handelt es sich laut Angaben des Herstellers [www.dicronite.de, 2008] um Wolframdisulfid in lamellarer Form. Weiters ist laut [www.dicronite.de, 2008] die Oberflächenbeschichtung mit Dicronite DL-5 bis ungefähr 2450 MPa belastbar. Die Hertzsche Pressung bei den Messungen in Tabelle 4-7 lag mit ungefähr 2150 MPa unter diesem Wert. Daher kann davon ausgegangen werden, dass die Beschichtung durch die mechanische Belastung nicht zerstört bzw. zur Seite gedrückt wird und eine Isolationsschicht darstellt, die einen zusätzlichen thermischen Widerstand bietet.

| Test # | \varnothing_{Kugel} mm | Bemerkungen | E_{Kugel} Pa | $E_{Flächen}$ Pa | F N | T_{A1} K | T_{A2} K | \dot{Q} mW | a_H m | σ_H MPa |
|--------|-----------------------------|------------------|-------------------|---------------------|----------|---------------|---------------|-----------------|------------|-------------------|
| T07 | 9,525 | | 2,30E+11 | 2,30E+11 | 71,1 | 297,1 | 30 | 360,3 | 1,26E-04 | 2132 |
| T17 | 9,525 | MoS ₂ | 2,30E+11 | 2,30E+11 | 71,1 | 297,0 | 79,7 | 281,1 | 1,26E-04 | 2132 |
| | 9,525 | MoS ₂ | 2,30E+11 | 2,30E+11 | 71,1 | 297,1 | 60,6 | 294,7 | 1,26E-04 | 2132 |
| | 9,525 | MoS ₂ | 2,30E+11 | 2,30E+11 | 71,1 | 297,1 | 50,2 | 296,5 | 1,26E-04 | 2132 |
| | 9,525 | MoS ₂ | 2,30E+11 | 2,30E+11 | 71,1 | 297,0 | 29,8 | 311,5 | 1,26E-04 | 2132 |
| T16 | 9,525 | Dicronite DL5 | 2,30E+11 | 2,30E+11 | 71,1 | 297,1 | 30,0 | 336,2 | 1,26E-04 | 2132 |

Tabelle 4-7 Wärmestrommessungen zum Feststellen des Einflusses der Oberflächenbeschichtung

| Test # | Kugel | Flächen |
|--------|-------|---------------------|
| T07 | K02 | F _{o/u} 01 |
| T17 | K07 | F _{o/u} 02 |
| T16 | K06 | F _{o/u} 03 |

Tabelle 4-8 Verwendete Kugeln und Gegenflächen

Da sowohl die Wärmeflusswerte über die mit MoS₂ beschichtete Kugel als auch die über die mit Dicronite beschichtete kleiner sind als die bei der unbeschichteten Kugel gemessenen, kann davon ausgegangen werden, dass auch MoS₂ bei den vorliegenden Hertzschen Pressungen an der Stelle des Kontaktes haften bleibt und als thermisch isolierende Schicht wirkt.

Diese Beobachtung stimmt mit den Ergebnissen in [M. J. Anderson, 1996] überein. Auch dort wurde festgestellt, dass Lager, die mit MoS₂ geschmiert waren, eine geringere Wärmeleitfähigkeit aufwiesen.

4.1.3 Einfluss eines Vibrationstests

Vor der Messung T18 wurde eine Kugel sowie zwei Gegenflächen in einer dafür konzipierten Vorrichtung bei der Firma Austrian Aerospace GmbH bei Raumtemperatur Vibrationen ausgesetzt [C. Neugebauer, 2007], um an den Kontaktstellen eine bereits erfolgte mechanische Belastung des Lagers zu simulieren.

Es zeigte sich, dass die Vibrationsbehandlung keinen wesentlichen Einfluss auf den gemessenen Wärmefluss hat (Tabelle 4-9). Dies ist nach den Ergebnissen in 4.1.1 auch zu erwarten, da durch die Vibrationsbehandlung in erster Linie die Oberflächenrauheit verändert wird.

| Test # | \varnothing_{Kugel} mm | Bemerkungen | E_{Kugel} Pa | $E_{Flächen}$ Pa | F N | T_{A1} K | T_{A2} K | \dot{Q} mW | a_H m | σ_H MPa |
|------------|-----------------------------|-----------------------|-------------------|---------------------|----------|---------------|---------------|-----------------|------------|-------------------|
| T01 Wdh | 9,525 | | 3,20E+11 | 2,30E+11 | 71,1 | 296,9 | 30,3 | 469,3 | 1,20E-04 | 2359 |
| T18 | 9,525 | vibriert (F06,K09) | 3,20E+11 | 2,30E+11 | 71,1 | 297,0 | 33,1 | 475,5 | 1,20E-04 | 2359 |

Tabelle 4-9 Wärmestrommessung zum Festellen des Einflusses eines Vibrationstests

| Test # | Kugel | Flächen |
|--------|-------|---------------------|
| T01 | K01 | F _{o/u} 01 |
| T18 | K09 | F _{o/u} 06 |

Tabelle 4-10 Verwendete Kugeln und Gegenflächen

4.1.4 Untersuchung des Konvektionseinflusses

Die Ergebnisse des Tests mit schlechterem Isolationsvakuum (T20) zeigen, dass eine Erhöhung des Umgebungsdruckes im Probenraum von $p < 10^{-6}$ mbar auf $p = 10^{-4}$ mbar keine Änderung des Wärmestroms verursacht (Tabelle 4-11). Die freien Weglängen sind daher größer als die im Messaufbau vorliegenden charakteristischen Abstände.

| Test # | \varnothing_{Kugel} mm | Bemerkungen | E_{Kugel} Pa | $E_{Flächen}$ Pa | F N | T_{A1} K | T_{A2} K | \dot{Q} mW | a_H m | σ_H MPa |
|------------|-----------------------------|---------------------|-------------------|---------------------|----------|---------------|---------------|-----------------|------------|-------------------|
| T01 Wdh | 9,525 | $< 10^{-6}$ mbar | 3,20E+11 | 2,30E+11 | 71,1 | 296,9 | 30,3 | 469,3 | 1,20E-04 | 2359 |
| T20 | 9,525 | 10^{-4} mbar | 3,20E+11 | 2,30E+11 | 71,1 | 297,0 | 30,1 | 447,4 | 1,20E-04 | 2359 |

Tabelle 4-11 Wärmestrommessung zum Festellen des Einflusses von Konvektion.

| Test # | Kugel | Flächen |
|--------|-------|---------------------|
| T01 | K01 | F _{o/u} 01 |
| T20 | K01 | F _{o/u} 01 |

Tabelle 4-12 Verwendete Kugeln und Gegenflächen

4.1.5 Einfluss des Materials der Gegenflächen

Da die Gegenflächen aus Aluminium eine viel geringere mechanische Belastbarkeit aufweisen als die Stahlflächen musste der Test T15 ohne Auflagemassen durchgeführt werden, um eine plastische Verformung der Gegenflächen zu verhindern. Die Auflagkraft ergibt sich dabei nur aus dem Eigengewicht der oberen Regelplatte.

Um vergleichbare Wärmestromwerte zu erhalten, wurde auch bei den Tests T13 und T14 die gleiche kleine Auflagekraft gewählt.

Deshalb sind die in Tabelle 4-15 angegebenen Werte für die Auflagekraft nur Richtwerte, da beim Aufsetzen mit so kleinem Gewicht jener Teil der Gewichtskraft, der über Reibung von den Führungen an der oberen Regelplatte aufgenommen wird, nicht mehr vernachlässigt werden kann.

Darüber hinaus führt die kleine Auflagekraft bei diesen Messungen zu kleinen Hertzschen Kontaktflächen und vergleichsweise kleinen Pressungen, was gemeinsam mit der hohen Rauheit der Gegenflächen einen großen Wert des Rauheitsparameters nach [Greenwood, 1984] zur Folge hat (siehe Tabelle 4-13).

| Test # | $R_a^{Flächen}$ µm | $R_{RMS}^{Flächen}$ µm | R_{RMS}^{Kugel} µm | $R_{RMS}^{effektiv}$ µm | $\alpha_{Greenwood}$ |
|--------|-----------------------|---------------------------|-------------------------|----------------------------|----------------------|
| T13 | 0,503 | 0,671 | 0,027 | 0,671 | 2,98 |
| T14 | 0,356 | 0,474 | 0,027 | 0,475 | 2,06 |
| T15 | 0,455 | 0,607 | 0,027 | 0,607 | 1,57 |

Tabelle 4-13 Werte des Rauheitsparameters für T13 – T15

| Test # | Kugel | Flächen |
|--------|-------|---------------------|
| T13 | K04 | F _{o/u} 03 |
| T14 | K04 | F _{o/u} 04 |
| T15 | K04 | F _{o/u} 05 |

Tabelle 4-14 Verwendete Kugeln und Gegenflächen

Aus diesen beiden Gründen ist die genaue Vorhersage der Wärmeströme für diese Messungen nicht möglich. Die Messergebnisse sind in Tabelle 4-15 angegeben.

| Test # | \varnothing_{Kugel} mm | Bemerkungen | E_{Kugel} Pa | $E_{Flächen}$ Pa | F N | T_{A1} K | T_{A2} K | \dot{Q} mW | a_H m | σ_H MPa |
|--------|-----------------------------|-------------|-------------------|---------------------|--------|---------------|---------------|-----------------|------------|-------------------|
| T13 | 14,288 | F03 | 3,20E+11 | 2,23E+11 | 1,7 | 297,2 | 30,2 | 203,5 | 4,01E-05 | 516 |
| | 14,288 | F03 | 3,20E+11 | 2,23E+11 | 1,7 | 296,8 | 30,7 | 233,1 | 4,01E-05 | 516 |
| T13b | 14,288 | F03 | 3,20E+11 | 2,23E+11 | 1,7 | 296,9 | 29,8 | 206,9 | 3,98E-05 | 512 |
| | 14,288 | F03 | 3,20E+11 | 2,23E+11 | 1,7 | 294,3 | 30,0 | 299,9 | 3,98E-05 | 512 |

| Test # | \varnothing_{Kugel} mm | Bemerkungen | E_{Kugel} Pa | $E_{Flächen}$ Pa | F N | T_{A1} K | T_{A2} K | \dot{Q} mW | a_H m | σ_H MPa |
|--------|-----------------------------|-------------|-------------------|---------------------|----------|---------------|---------------|-----------------|------------|-------------------|
| | 14,288 | F03 | 3,20E+11 | 2,23E+11 | 1,7 | 292,4 | 30,5 | 320,4 | 3,98E-05 | 512 |
| | 14,288 | F03 | 3,20E+11 | 2,23E+11 | 1,7 | 296,7 | 29,7 | 216,2 | 3,98E-05 | 512 |
| | 14,288 | F03 | 3,20E+11 | 2,23E+11 | 1,7 | 296,2 | 30,3 | 279,4 | 3,98E-05 | 512 |
| | 14,288 | F03 | 3,20E+11 | 2,23E+11 | 1,7 | 295,7 | 29,9 | 323,5 | 3,98E-05 | 512 |
| | 14,288 | F03 | 3,20E+11 | 2,23E+11 | 1,7 | 296,5 | 29,7 | 291,3 | 3,98E-05 | 512 |
| | 14,288 | F03 | 3,20E+11 | 2,23E+11 | 1,7 | 296,4 | 29,7 | 274,2 | 3,98E-05 | 512 |
| T14 | 14,288 | F04 | 3,20E+11 | 2,10E+11 | 1,7 | 297,2 | 29,9 | 153,0 | 4,06E-05 | 504 |
| | 14,288 | F04 | 3,20E+11 | 2,10E+11 | 1,7 | 296,7 | 30,1 | 151,3 | 4,06E-05 | 504 |
| T15 | 14,288 | F05 | 3,20E+11 | 7,10E+10 | 1,7 | 297,2 | 80,3 | 148,9 | 5,26E-05 | 299 |
| | 14,288 | F05 | 3,20E+11 | 7,10E+10 | 1,7 | 297,5 | 29,9 | 182,5 | 5,26E-05 | 299 |
| T15(2) | 14,288 | F05 | 3,20E+11 | 7,10E+10 | 1,7 | 297,1 | 30,1 | 152,5 | 5,26E-05 | 299 |
| | 14,288 | F05 | 3,20E+11 | 7,10E+10 | 1,7 | 297,2 | 30,2 | 216,4 | 5,26E-05 | 299 |
| | 14,288 | F05 | 3,20E+11 | 7,10E+10 | 1,7 | 297,7 | 29,7 | 192,3 | 5,26E-05 | 299 |
| | 14,288 | F05 | 3,20E+11 | 7,10E+10 | 1,7 | 297,8 | 30,3 | 218,2 | 5,26E-05 | 299 |

Tabelle 4-15 Wärmestrommessungen zum Festellen des Einflusses des Gegenflächenmaterials

Die gemessenen Wärmeströme zeigen Abweichungen von 20 bis > 200 % von den aus der ANSYS-Simulation und der analytischen Rechnung erhaltenen Ergebnissen. Diese sind einerseits auf die kleine Auflagekraft zurückzuführen, da hier die Führung der oberen Regelplatte durch Reibung einen wesentlichen Teil der Auflagekraft aufnehmen kann.

Andererseits ist zu erwarten, dass die Oberflächenbeschaffenheit bei diesen kleinen Pressungen wegen der verhältnismäßig hohen Rauheitswerte bereits eine Rolle spielt. Das bedeutet, dass bei den hier auftretenden Werten des Rauheitsparameters von $1,5 < \alpha_{Greenwood} < 3$ eine Beschreibung der Kontakte im Rahmen der Hertzschen Theorie alleine nicht mehr möglich ist.

4.1.6 Siliziumnitrid Kugeln auf AISI 440C Gegenflächen

Um ein analytisches Modell für Wärmeströme über Hertzsche Kontaktflächen entwickeln zu können, wurde der Kombination von Si_3N_4 Kugel und AISI 440C Gegenflächen besondere Aufmerksamkeit gewidmet. Es wurden Messungen an Kugeln mit drei verschiedenen Durchmessern durchgeführt, wobei jeweils die Auflagekraft sowie die Temperaturen T_{A1} und T_{A2} variiert wurden.

Als Gegenflächen wurden immer $F_{o/u}01$ verwendet. Die aufgesetzten Kugeln sind aus dem in Tabelle 4-16 angegebenen Kugeldurchmesser ersichtlich: 9,525 mm steht für K01, 4,762 mm für K03 und 14,288 mm für K04.

Zur Vorbereitung der Messungen wurde folgende Vorgangsweise angewandt:

Die Kugeln sowie die Gegenflächen wurden mit Aceton gereinigt. Die Kugel wurde dann in die aus drei Nadeln bestehende Halterung unter der oberen Gegenfläche gelegt und es wurde im ausgebauten Zustand getestet, ob das Abheben und Aufsetzen der Kugel auf die untere Gegenfläche einwandfrei funktioniert. Nach positiver Funktionsüberprüfung aller Heizer und Sensoren wurde der Aufbau mit Superisolation umhüllt, und mit aufgesetzter Kugel in den Kryostaten eingebaut. Anschließend wurde der Probenraum evakuiert. Die Startvakua für das Abkühlen waren kleiner als $1 \cdot 10^{-4}$ mbar.

Das Abkühlen des Systems war üblicherweise innerhalb eines Tages zu bewerkstelligen, in einigen Fällen wurde bereits am Tag des Abkühlens die erste Messung gemacht. Die Messwerte unterschieden sich nicht von den an darauffolgenden Tagen aufgezeichneten Messwerten.

Die Messung selbst wurde folgendermaßen durchgeführt:

Nach dem Beginn des Heliumtransfers in den Heliumbehälter wurden die Temperaturen an oberer und unterer Regelplatte eingestellt und mit dem Regeln begonnen. Nach einigen Stunden war es meist möglich, bei den gewünschten Temperaturen einen Zustand zu erhalten, bei dem die Änderungen der Temperaturen innerhalb von 20 Minuten weniger als 0,1 K betragen. Dieser Zustand wurde als „Gleichgewicht“ definiert, bei dem die Messwerte aufgezeichnet wurden.

Die Kugel wurde dann abgehoben und mit dem Kalibrierheizer die überschlagsmäßig berechnete Heizleistung in der Höhe des bei der Messung geflossenen Wärmestromes eingestellt. Die Heizleistung wurde so lange geändert, bis die Temperaturdifferenz an der Temperaturabbaustrecke sich weniger als 5% von jener der Messung unterschied. Es wurde wieder das oben definierte Gleichgewicht abgewartet und die Temperaturwerte sowie die Spannungswerte am Heizer und dem im Heizerstromkreis befindlichen Shuntwiderstand erfasst.

Mit diesen Schritten und nachfolgender Auswertung (siehe 3.2) erhält man einen Datensatz mit Wärmestrom, Temperaturen und sonstigen bereits vor der Messung festgelegten Parametern wie z.B. Auflagekraft und Kugeldurchmesser. Nach einer solchen Messung können die beiden Regelplatten auf andere Temperaturen gebracht und weitere Messungen nach dem gleichen Schema durchgeführt werden.

Einige charakteristische Datensätze, die als Beispiel den Einfluss verschiedener Kugelradien und Auflagekräfte zeigen, sind in Tabelle 4-16 zusammengestellt. Die gesamten Ergebnisse sind in Appendix A, Tabelle A-1 angeführt. Die große Zahl an Datensätzen ermöglichte die Entwicklung eines analytischen Modells, das in 5.2 beschrieben ist.

| Test # | \varnothing_{Kugel} mm | Bemerkungen | E_{Kugel} MPa | $E_{Flächen}$ MPa | F N | T_{A1} K | T_{A2} K | \dot{Q} mW | a_H m | σ_H MPa |
|------------|-----------------------------|-------------|--------------------|----------------------|----------|---------------|---------------|-----------------|------------|-------------------|
| T06 | 9,525 | | 320000 | 223000 | 17,9 | 296,9 | 29,7 | 290,9 | 7,61E-05 | 1470 |
| T01 Wdh | 9,525 | | 320000 | 223000 | 71,1 | 296,9 | 30,3 | 469,3 | 1,21E-04 | 2331 |
| T05 | 9,525 | | 320000 | 223000 | 1,7 | 294,4 | 29,7 | 113,8 | 3,50E-05 | 676 |
| T10 (2) | 4,762 | | 320000 | 223000 | 17,9 | 297,1 | 30,0 | 240,8 | 6,04E-05 | 2334 |
| T05 b) | 9,525 | | 320000 | 223000 | 43,7 | 297,2 | 29,9 | 394,6 | 1,03E-04 | 1982 |
| T11(2) | 14,288 | | 320000 | 223000 | 71,1 | 296,8 | 34,1 | 588,1 | 1,38E-04 | 1778 |
| T01(2) | 9,525 | | 320000 | 223000 | 71,1 | 297,1 | 31,7 | 505,3 | 1,21E-04 | 2331 |
| T04b | 9,525 | | 320000 | 223000 | 71,1 | 297,0 | 32,6 | 514,2 | 1,21E-04 | 2331 |
| T05c | 9,525 | | 320000 | 223000 | 43,7 | 297,3 | 31,6 | 443,2 | 1,03E-04 | 1982 |
| T10b | 4,762 | | 320000 | 223000 | 43,7 | 297,5 | 30,1 | 332,1 | 8,15E-05 | 3146 |
| T21 | 14,288 | | 320000 | 223000 | 43,7 | 297,5 | 34,9 | 559,2 | 1,18E-04 | 1512 |
| T11c | 14,288 | | 320000 | 223000 | 17,9 | 297,1 | 31,4 | 429,5 | 8,72E-05 | 1122 |
| T11d | 14,288 | | 320000 | 223000 | 71,1 | 297,6 | 33,8 | 573,8 | 1,38E-04 | 1779 |
| T11d II | 14,288 | | 320000 | 223000 | 71,1 | 297,0 | 34,5 | 585,9 | 1,38E-04 | 1779 |
| T11c II | 14,288 | | 320000 | 223000 | 19,2 | 300,1 | 31,5 | 416,7 | 8,93E-05 | 1149 |

Tabelle 4-16 Wärmestrommessungen an Siliziumnitrid-Kugeln

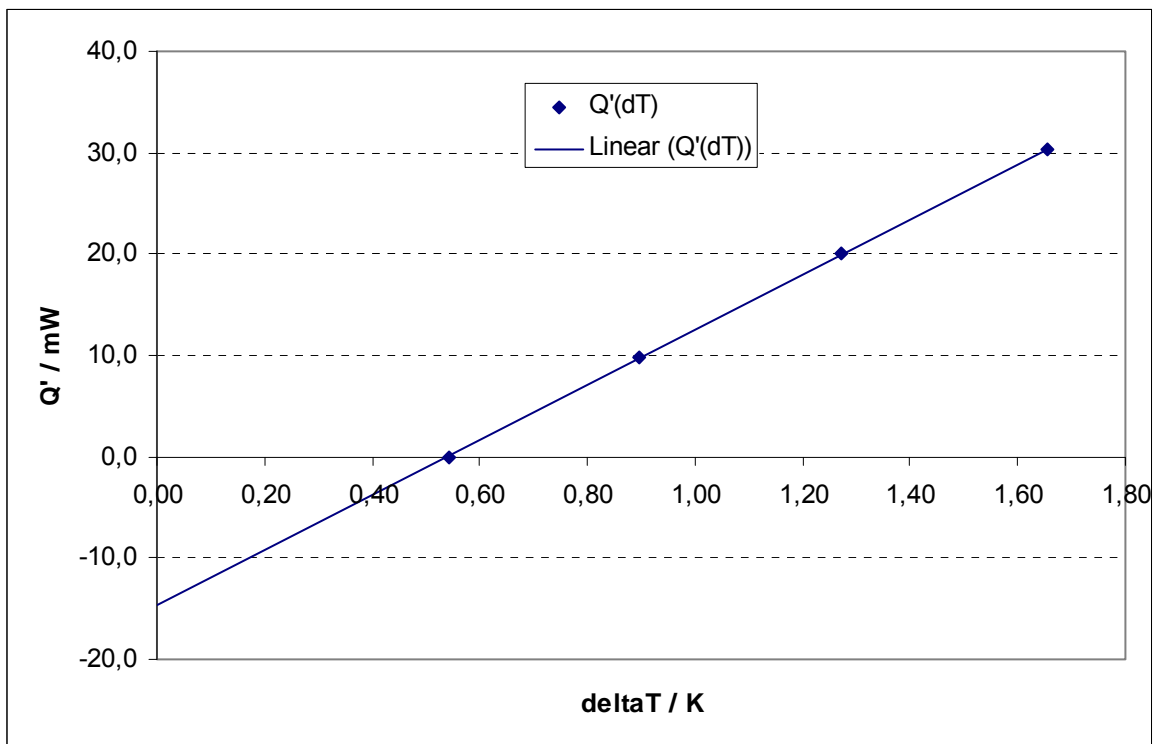
4.1.7 Abschätzung des Einflusses von Wärmestrahlung bei den Messungen mit Kugeln

Um den Einfluss der Wärmestrahlung auf den gemessenen Wärmestrom zu ermitteln, wurde bei einer Messung mit der Kugel K04 und den Flächen $F_{o/u}01$ mit abgehobener Probe eine Messung mit ausgeschaltetem Kalibrierheizer, sowie Messungen mit unterschiedlicher Heizleistung durchgeführt. Bei dieser Messung waren sowohl der Stahlungsschild an der oberen als auch an der unteren Gegenfläche montiert, die Regelplatten wurden auf $T_{HR} = 298$ K bzw. $T_{KR} = 17,8$ K gehalten. Die dabei auftretenden Temperaturdifferenzen an der Temperaturabbaustrecke und die zugehörigen Heizerleistungen sind in Tabelle 4-17 angeführt.

| ΔT K | \dot{Q} mW |
|-----------------|-----------------|
| 0,54 | 0,0 |
| 0,90 | 9,8 |
| 1,27 | 20,0 |
| 1,65 | 30,4 |

Tabelle 4-17 Messung des Wärmestroms durch Strahlung mit K04 und Schilden

Eine Temperaturdifferenz bei abgehobener Kugel kann nur auftreten, wenn ein Wärmestrom durch Strahlung über die Temperaturabbaustrecke fließt. Extrapolieren der Gerade $\dot{Q}(\Delta T)$ gegen $\Delta T = T_{A2} - T_{A3} = 0$ liefert dann den durch Strahlung erzeugten Wärmestrom (siehe Abb. 4-2).

Abb. 4-2 Extrapolation der Heizerleistungen gegen $\Delta T = 0$

Wie im Schnittpunkt der Gerade $\dot{Q}(\Delta T)$ mit der Ordinate in Abb. 4-2 zu sehen ergibt sich für den Wärmestrom durch Strahlung ein Wert von $\dot{Q} \approx 15$ mW.

Die folgende rechnerische Abschätzung trifft die vereinfachende Annahme, dass auf die untere Gegenfläche mit Radius $r = 9,5$ mm und Temperatur $T = 30$ K die Wärmestrahlung aus einem Halbraum mit $T = 300$ K trifft. Die Emissivität der unteren Gegenfläche wurde mit $\varepsilon \approx 0,1$ angenommen.

Mit diesen Werten ergibt sich aus dem Stefan-Boltzmann Gesetz für Lambert-Strahler

$$\dot{Q} = \varepsilon_i \cdot \sigma \cdot A_i \cdot F_{ij} \cdot (T_j^4 - T_i^4)$$

mit

$T_{i,j}$Temperaturen der beiden wechselwirkenden Flächen

ε_i Emissivität der Fläche i

σ Stefan-Boltzmann-Konstante $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$

A_iFlächeninhalt der Fläche i

F_{ij} Formfaktor, wenn Fläche j ein Halbraum ist: $F_{ij} = 1$

ein Wärmestrom von $\dot{Q} \approx 13 \text{ mW}$, also ein Wert, der nahe an dem in der Messung ermittelten liegt.

4.2 Bestimmung der Temperaturabhängigkeit eines Einzelkontaktes

Um die Aussagen über die Temperaturabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit der beiden Kontakte zu erhalten, ist es notwendig, die Temperatur der Kugel während der Messung zu bestimmen. Diese Temperatur wurde mit zwei Methoden festgestellt, die nachfolgend näher erläutert sind.

4.2.1 Messung mit Halbkugel

Um die Temperatur in der Mitte der Kugel zu erhalten wurde eine Messung mit einer Halbkugel aus Si_3N_4 durchgeführt. Wenn an der Kontaktstelle die gleiche Temperatur wie bei der Kugelmessung bei gleicher Belastung und an der Schnittfläche die Temperatur am Äquator der Kugel während der Kugelmessung eingestellt wird, muss auch der Wärmefluss der gleiche wie bei der Kugelmessung sein.

Eine Si_3N_4 -Kugel mit Durchmesser $D = 14,288 \text{ mm}$ wurde mit einer Struers Accutom-5 Säge mit Diamantsägeblatt in zwei Hälften geschnitten. Das entstandene Kugelsegment hat eine Höhe von $h = 7,179 \text{ mm}$. Als Last wurden alle drei Massen aufgelegt, was mit dem Distanzstück aus Kunststoff einer Belastung von $F = 72,5 \text{ N}$ entspricht.

Für die obere Gegenfläche wurde eine neue Halterung gefertigt, da der bei den Kugelmessungen benutzte Strahlungsschild beim Aufsetzen gegen den unteren Strahlungsschild gedrückt worden wäre. Abb. 4-3 zeigt ein Bild der neuen Halterung.



Abb. 4-3 neue Halterung ohne Strahlungsschild für obere Gegenfläche

An der Schnittfläche der Kugel wurde ein Indiumplättchen und Vakuumschmierung verwendet, um den thermischen Kontakt zu verbessern. Die Probe im Versuchsaufbau ist in Abb. 4-4 gezeigt. Als Gegenflächen waren die Flächen $F_{o,u}01$ eingebaut.

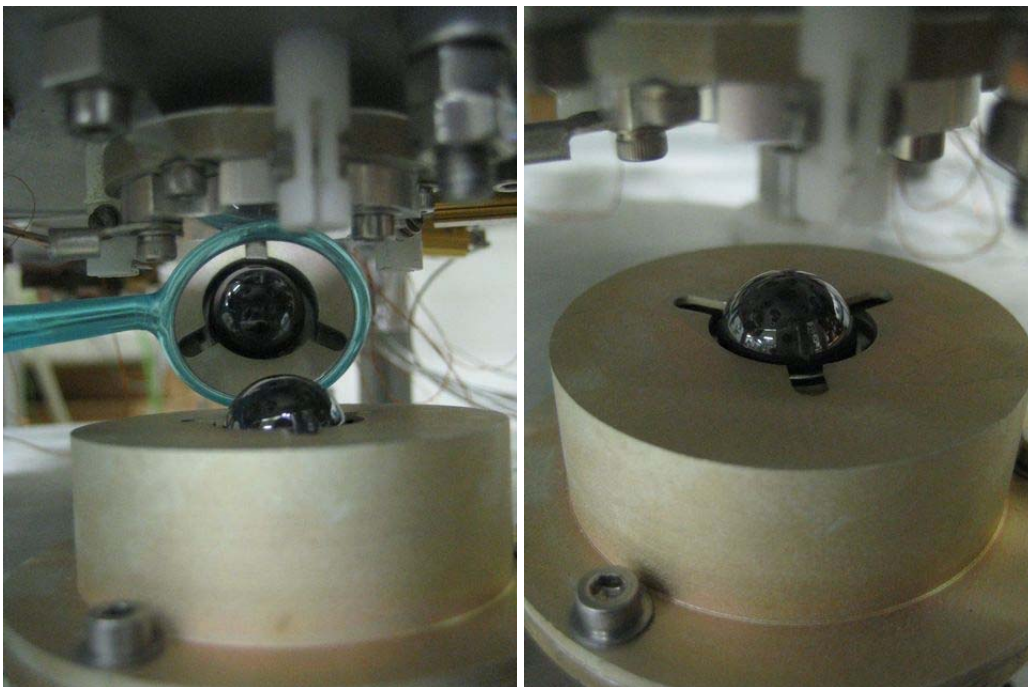


Abb. 4-4 Halbkugel aus Siliziumnitrid im Messaufbau

Das Ergebnis der Halbkugelmessung ist in Tabelle 4-18 zu sehen. Als Temperatur an der Schnittfläche wurde die aus einer ANSYS-Simulation gewonnene Temperatur in der Mitte einer entsprechenden Kugel eingestellt. Eine Auswertung erfolgt gemeinsam mit den Ergebnissen der Thermoelementmessung in 4.2.2.

| Test # | \varnothing_{Kugel} mm | E_{Kugel} Pa | $E_{Flächen}$ Pa | F N | T_{A1} K | T_{A2} K | \dot{Q} mW | a_H m | σ_H Mpa |
|--------------------|-----------------------------|-------------------|---------------------|----------|---------------|---------------|-----------------|------------|-------------------|
| Halbkugel Unten | 14,288 | 320000 | 223000 | 72,5 | 297,0 | 188,0 | 531,2 | 1,39E-04 | 1790 |

Tabelle 4-18 Wärmestrommessung an einer Si₃N₄-Halbkugel

Der Anpressdruck an der Schnittfläche der Kugel beträgt 0,45 MPa, die Extrapolation der Werte in [MIL-HDBK-251, 1978] ergibt damit eine Untergrenze für die Kontaktwärmeleitfähigkeit von $\lambda_c \approx 1700 \text{ W/m}^2\text{K}$. Eine Simulation mit ANSYS (siehe Tabelle 4-19) mit und ohne diesen Kontaktwiderstand ergibt nur eine Änderung des Wärmestroms von 1,6 %.

| | F N | T_{A1} K | T_{A2} K | \dot{Q} mW |
|------------------------|----------|---------------|---------------|-----------------|
| ohne Kontaktwiderstand | 72,5 | 297 | 188 | 604 |
| mit Kontaktwiderstand | 72,5 | 297 | 188 | 594 |

Tabelle 4-19 Wärmestromwerte aus ANSYS-Simulationen mit und ohne Berücksichtigung eines thermischen Kontaktwiderstandes zwischen Schnittfläche der Kugel und unterer Gegenfläche

Wie die nachfolgende Rechnung zeigt, ist die Änderung deshalb so gering, weil der Hertzsche Kontakt der Halbkugel zur oberen Gegenfläche einen so großen thermischen Widerstand darstellt, dass der Wärmestrom hauptsächlich durch diesen bestimmt wird.

Die geometrieabhängige Wärmeleitfähigkeit am Kontakt zwischen Schnittfläche der Kugel und unterer Gegenfläche ergibt sich mit $\lambda_c \approx 1700 \text{ W/m}^2\text{K}$ zu:

$$\Lambda_{\text{Schnittfläche}} = \lambda_c \cdot A_{\text{Schnittfläche}} = 2,7 \cdot 10^{-1} \text{ W/K}$$

Die geometrieabhängige Wärmeleitfähigkeit des Hertzschen Kontaktes zwischen Kugel und oberer Gegenfläche kann aus dem Modell aus [Yovanovich, 1971] gewonnen werden.

Aus dem thermischen Widerstand für einen Kontakt Kugel - Fläche

$$R_{th} = \frac{1}{4a_H \cdot \lambda_1} + \frac{1}{4a_H \cdot \lambda_2}$$

folgt

$$\Lambda_{\text{Hertz}} = 4a_H \left(\frac{\lambda_1 + \lambda_2}{\lambda_1 \lambda_2} \right)^{-1} = 5,0 \cdot 10^{-3} \text{ W/K}$$

Der thermische Widerstand des Hertzschen Kontakts ist also um zwei Größenordnungen höher, daher kann der Einfluss des Kontaktes zwischen Schnittfläche und unterer Gegenfläche vernachlässigt werden.

4.2.2 Messung mit Thermoelementen

Als zweite Methode zur Messung der Temperatur der Kugel wurden Thermoelemente mit Gold - 0,07 at % Eisen als negativem und Chromel-P (einer Legierung aus Nickel und Chrom) als positivem Pol angefertigt. Die Temperatur/Spannungskurve ist in Tabelle 4-20 angegeben. Es wurden teflonisolierte Drähte der Firma Leico Industries Inc. mit einem Durchmesser von 0,005 Inches (=122,5 μm) verwendet. Die Verbindungen zwischen Au-Fe und Chromel Drähten wurden mit Pulsdauern von $t \sim 1$ ms und Leistungen von $P = 0,25 - 0,33$ kW punktgeschweißt.

| T K | U mV |
|----------------------|-----------------------|
| 1,4 | -5,2982 |
| 3 | -5,2815 |
| 4,8 | -5,2594 |
| 7 | -5,2285 |
| 10,5 | -5,1742 |
| 19 | -5,0315 |
| 26 | -4,9126 |
| 48 | -4,5494 |
| 58 | -4,381 |
| 70 | -4,1733 |
| 80 | -3,9952 |
| 90 | -3,8132 |
| 100 | -3,627 |
| 110 | -3,437 |
| 120 | -3,2435 |
| 135 | -2,9477 |
| 150 | -2,6452 |
| 165 | -2,3372 |
| 180 | -2,0242 |
| 200 | -1,6004 |
| 220 | -1,1693 |
| 245 | -0,6232 |
| 270 | -0,0705 |
| 300 | 0,5986 |
| 305 | 0,7158 |

**Tabelle 4-20 Au-0,07 at% Fe gegen Chromel (aus Lakeshore Form Number F036-00-00 Revision 0 – 18
January 2000 – © Lakeshore Cryotronics, Inc.)**

Zur Befestigung wurden in eine Si_3N_4 -Kugel mit Durchmesser $D = 14,288$ mm mit einer Struers Accutom 5 Säge zwei jeweils 1 mm tiefe, 0,5 mm breite Schnitte gemacht, einer am Äquator (relativ zur einer Achse, an deren Endpunkten die Kugel auf den Gegenflächen aufliegt) und ein in Achsrichtung um 5,14 mm in Richtung des einen Pols verschobener Schnitt (siehe Abb. 4-5).

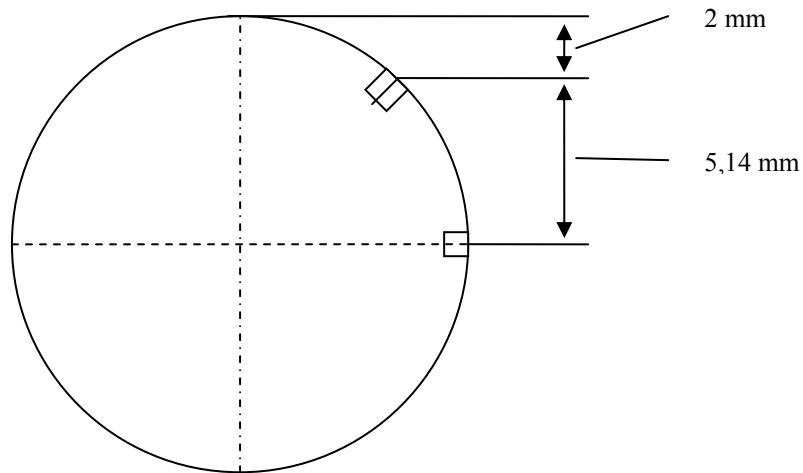


Abb. 4-5 Skizze der in die Siliziumnitrid-Kugel gemachten Schnitte

In jedem der Schnitte wurde je ein Thermoelement befestigt, dessen jeweils anderer Schweißkontakt sowie dessen Lötkontakte zum Messdraht an der Referenzfläche (untere Regelplatte T_{KR}) befestigt wurden.

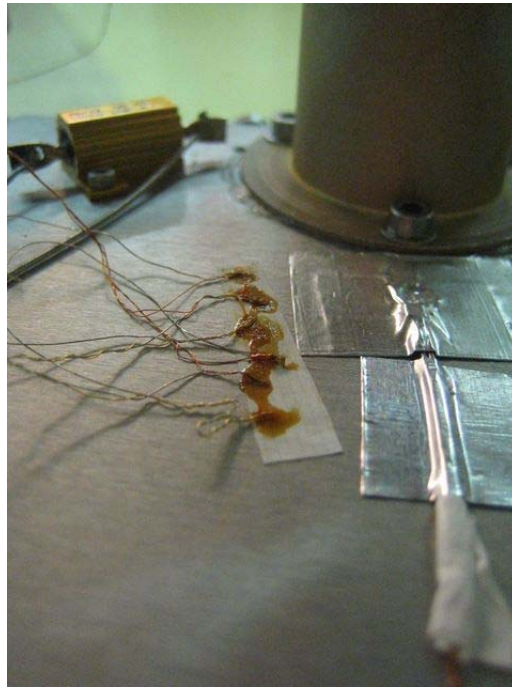


Abb. 4-6 Thermische Anbindung der Lötstellen und negativen Thermoelemente an der unteren Regelplatte

Die Befestigung wurde mit GE Varnish ausgeführt. Bei einer Temperaturpaarung zwischen $T = 273,15$ K (Eiswasser) und $T = 77,36$ K (flüssiger Stickstoff) wurden die Befestigungen, Löt- und Schweißstellen auf Funktion und mechanische Festigkeit getestet.

Das linear interpolierte Ergebnis aus Tabelle 4-20 für diese Temperaturdifferenz ist $U = 4,04$ mV. Bei der Messung in flüssigem Stickstoff betrug die Spannung $U = 4,03$ mV.

Der Einbau in den Teststand erfolgte mit der bereits bei der Halbkugelmessung eingesetzten Halterung für die obere Gegenfläche sowie ohne unteren Strahlungsschild, da sonst die Zuleitungen der Thermoelemente an den Schilden anliegen und das Messergebnis verfälschen würden. Als Gegenflächen waren wieder die Flächen $F_{o/u}01$ eingebaut.

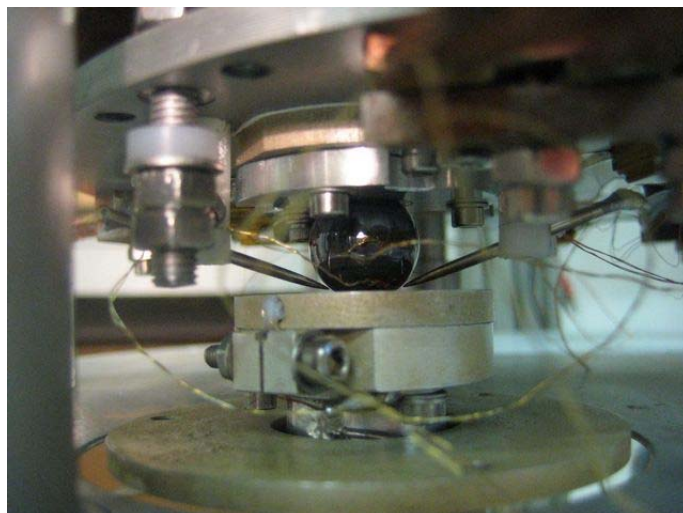


Abb. 4-7 Siliziumnitridkugel mit in Nuten geklebten Thermoelementen

Die Ergebnisse der durchgeführten Messungen sind in Tabelle 4-21 angeführt.

| Test # | \varnothing_{Kugel} mm | E_{Kugel} Pa | $E_{Flächen}$ Pa | F N | T_{A1} K | T_{A2} K | \dot{Q} mW | T_{TC1} K | T_{TC2} K |
|--------|-----------------------------|-------------------|---------------------|----------|---------------|---------------|-----------------|----------------|----------------|
| TC1-1 | 14.288 | 320000 | 223000 | 72.5 | 294.7 | 41.7 | 555.2 | 188 | 183 |
| TC1-2 | 14.288 | 320000 | 223000 | 72.5 | 294.8 | 42.0 | 566.3 | 187 | 182 |
| TC2-1 | 14.288 | 320000 | 223000 | 72.5 | 296.7 | 41.5 | 564.4 | 187 | 183 |
| TC2-2 | 14.288 | 320000 | 223000 | 72.5 | 296.9 | 41.7 | 533.3 | 190 | 186 |

Tabelle 4-21

Die Wärmestromwerte in Tabelle 4-21 sind als Wärmeströme über die Kugel zu verstehen, nicht als Wärmeströme über die Temperaturabbaustrecke (siehe 4.2.4). Die Äquatortemperatur der Kugel sowie die gemessenen Wärmeströme entsprechen den Werten, die mit der Halbkugel ermittelt wurden.

| Test # | $\Delta_1 = T_{A1} - T_{TC1}$ K | $\Delta_2 = T_{TC1} - T_{A2}$ K | $\frac{\Delta_2}{\Delta_1}$ |
|-----------|------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------|
| TC1-1 | 107 | 146 | 1.36 |
| TC1-2 | 108 | 145 | 1.34 |
| TC2-1 | 110 | 145 | 1.32 |
| TC2-2 | 107 | 149 | 1.39 |
| Halbkugel | 109 | - | - |

Tabelle 4-22

In Tabelle 4-22 sind die Temperaturdifferenzen zwischen oberer Gegenfläche und Kugelmittle, zwischen Kugelmittle und unterer Gegenfläche sowie das Verhältnis der beiden Differenzen angegeben. Es zeigt sich, dass die Temperaturdifferenz auf der wärmeren Seite etwa ein Drittel kleiner ist als auf der kälteren.

Der Temperaturverlauf in einer entsprechenden ANSYS-Simulation weist darauf hin, dass dieser Unterschied durch die geringere Wärmeleitfähigkeit der unteren Gegenfläche zustandekommt, da in dieser ein größerer Temperaturabfall stattfindet als in der oberen (siehe Abb. 4-8). Die Temperaturdifferenz zwischen Hertzischem Kontakt und Kugelmittle ist bei der ANSYS-Simulation oben und unten gleich groß. Die erhaltenen Temperaturen stimmen sehr gut mit der Messung überein (siehe Abb. 4-9). Zur etwas höheren Abweichung des Temperaturwertes an dem um 5,14 mm tiefer liegenden Thermoelements ist zu sagen, dass aufgrund der Befestigung der Thermoelemente an der Kugel durch Kleben kein absolut definierter thermischer Kontakt zustandekommt und somit eine Abweichung dieser Größe im zu erwartenden Genauigkeitsbereich liegt.

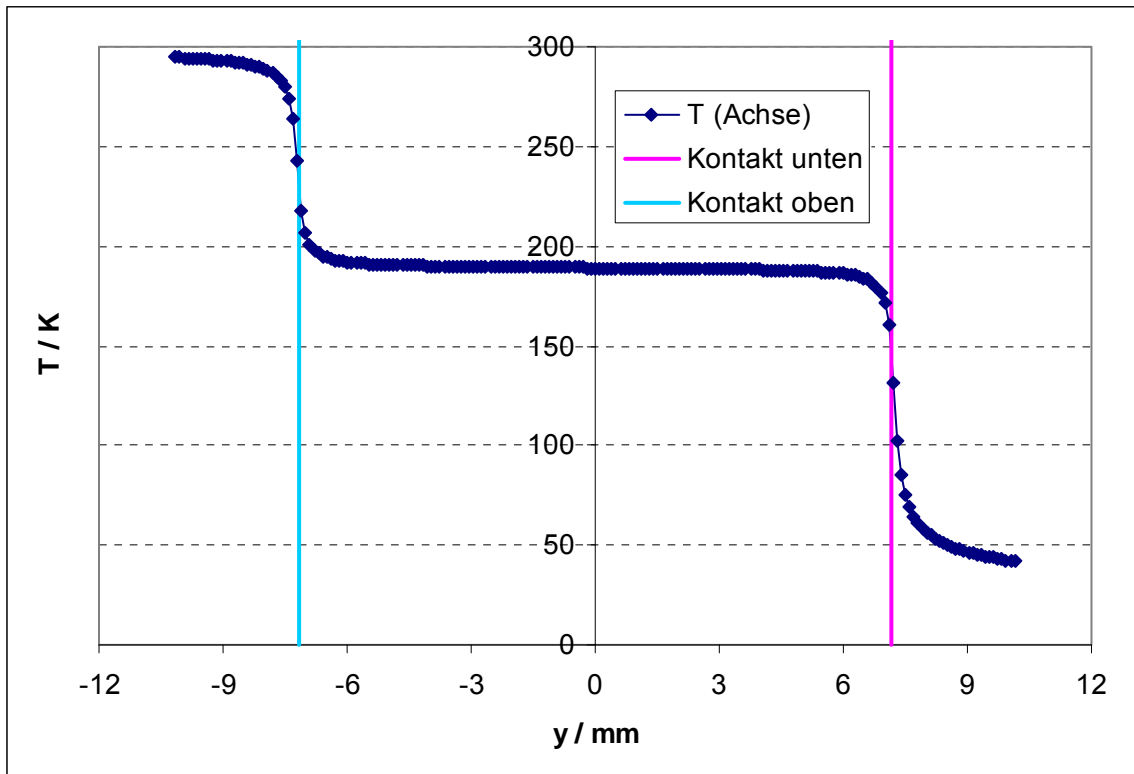


Abb. 4-8 Temperaturverlauf an der Symmetrieachse von Kugeln und Auflageflächen aus ANSYS-Simulation

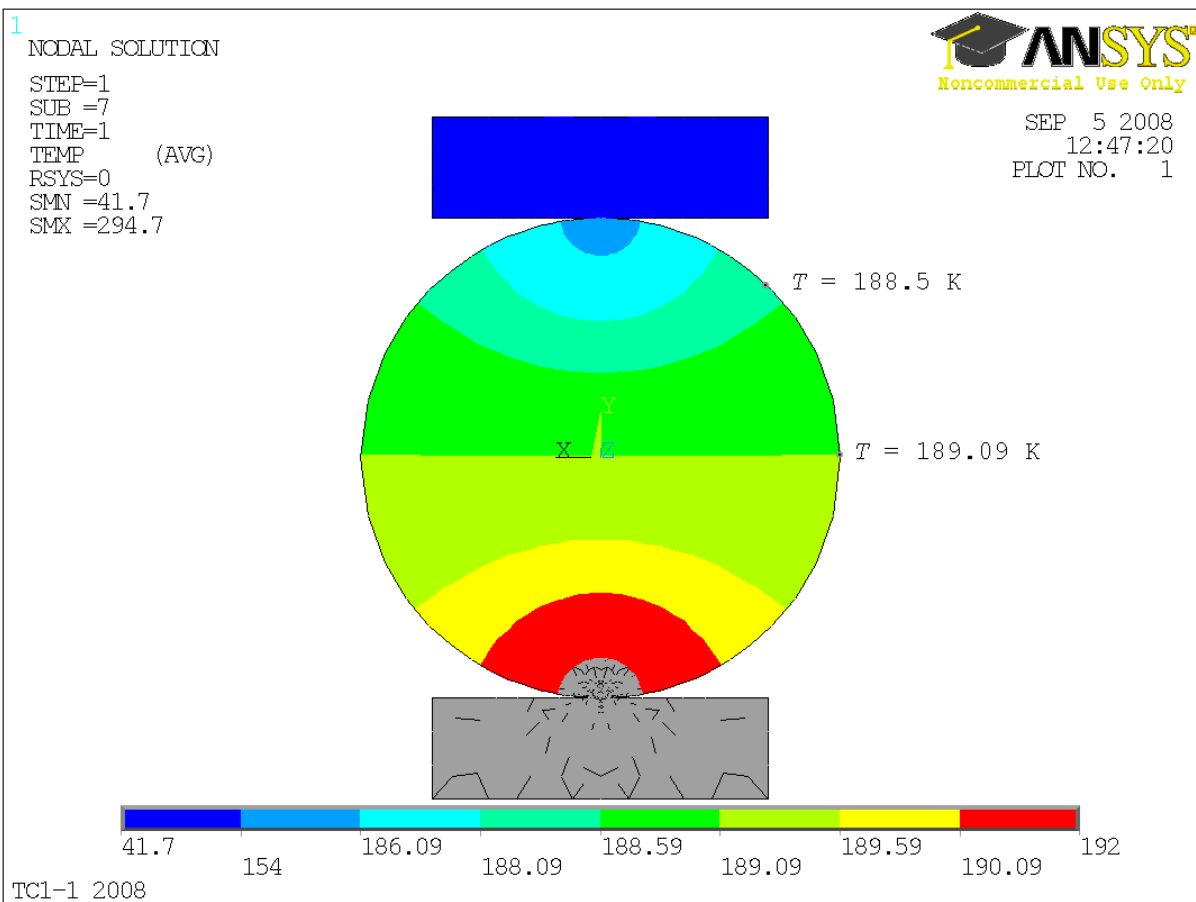


Abb. 4-9 Schnitt durch ANSYS-Simulation der Kugel bei der ersten Messung mit Thermoelementen.

4.2.3 Abschätzung des Wärmestroms über die Drähte der Thermoelemente

Zur Abschätzung des Wärmestromes, der über die Golddrähte der Thermoelemente fließt, wurde folgende Rechnung durchgeführt:

$$\lambda_{Au}(T = 300 \text{ K}) \approx 320 \text{ W/mK}$$

$$r_{\text{Draht}} = 61,25 \text{ } \mu\text{m}$$

$$l_{\text{Draht}} = 0,4 \text{ m}$$

$$T_1 = 180 \text{ K}$$

$$T_2 = 20 \text{ K}$$

$$\dot{Q}_{\text{Draht}} = \lambda \cdot A \frac{\Delta T}{\Delta x} = 320 \cdot (61,25 \cdot 10^{-6})^2 \cdot \pi \cdot \frac{160}{0,4} = 4,8\pi \cdot 10^{-4} = 0,00151 \text{ W}$$

also ungefähr 1,5 mW. Für vier Drähte (unter der Annahme, dass auch die Chromel-Drähte die gleiche hohe Wärmeleitfähigkeit haben) ergibt sich als maximaler Wärmestrom über die Drähte $\dot{Q}_{\text{Drähte}} = 6 \text{ mW}$.

4.2.4 Abschätzung des Einflusses von Wärmestrahlung bei der Thermoelementmessung

Bei der Messung mit Thermoelementen musste auf die Strahlungsschilde verzichtet werden, da sonst die Messdrähte der Thermoelemente möglicherweise von den Schilden eingeklemmt worden wären. Vor allem an der unteren Kontaktfläche entsteht dadurch eine große Fläche, die der Wärmestrahlung aus der Umgebung ausgesetzt ist.

Zur Bestimmung des durch Wärmestrahlung entstehenden Wärmestromes wurde auch hier eine Messung analog zu der in 4.1.7 beschriebenen durchgeführt. Im Rahmen der zweiten Messung mit Thermoelementen wurde bei abgehobener Probe eine Messung mit ausgeschaltetem Kalibrierheizer, sowie Messungen mit drei verschiedenen Heizleistungen durchgeführt. Die obere und untere Regelplatte wurden dabei auf $T_{HR} = 299,6 \text{ K}$ bzw. $T_{KR} = 21 \text{ K}$ gehalten. Die gemessenen Heizerleistungen und Temperaturdifferenzen an der Temperaturabbaustrecke sind in Tabelle 4-23 angeführt.

| ΔT K | \dot{Q} mW |
|-----------------|-----------------|
| 7,17 | 0,0 |
| 7,48 | 9,8 |
| 7,80 | 20,5 |
| 8,10 | 29,9 |

Tabelle 4-23 Messung des Wärmestroms durch Strahlung mit Thermoelementen und ohne Schilde

Auch hier kann eine Temperaturdifferenz $\Delta T = T_{A2} - T_{A3}$ bei abgehobener Kugel nur auftreten, wenn ein Wärmestrom durch Strahlung über die Temperaturabbaustrecke fließt. Die in Abb. 4-10 dargestellte Extrapolation der Gerade $\dot{Q}(\Delta T)$ gegen $\Delta T = 0$ liefert dann den durch Strahlung erzeugten Wärmestrom.

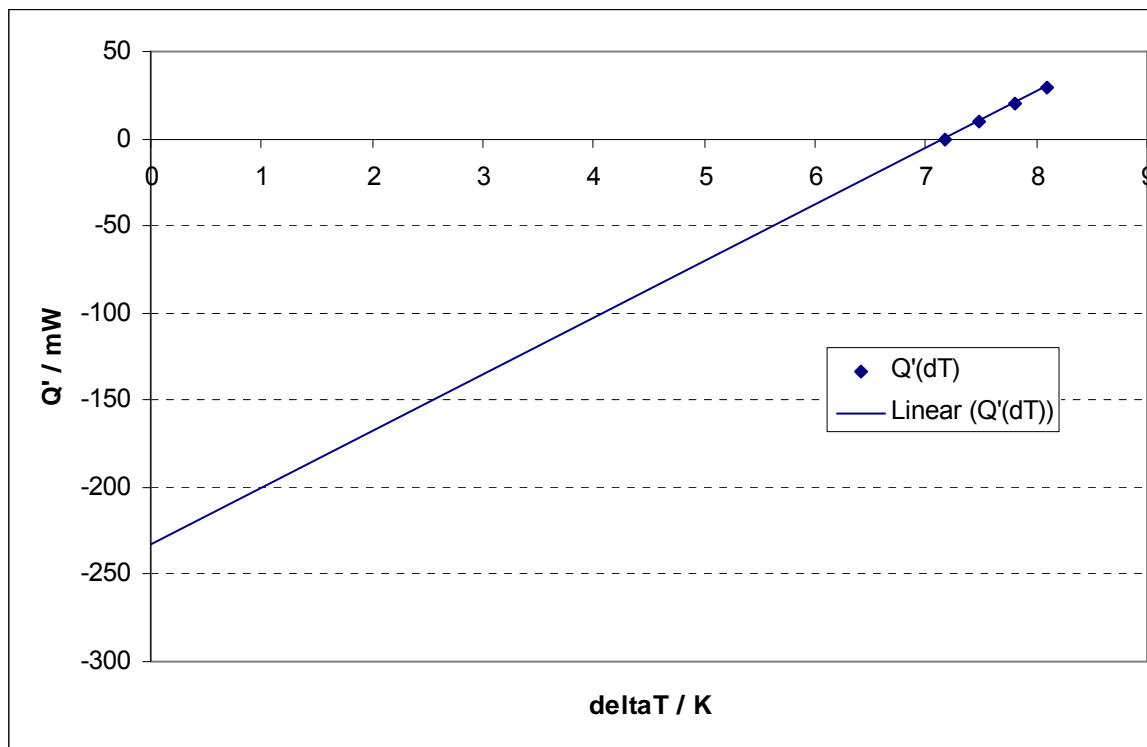


Abb. 4-10 Extrapolation der Heizerleistungen gegen $\Delta T = 0$

Bei $\Delta T = 0$ verbleibt somit ein auf Strahlung zurückzuführender Wärmestrom von $\dot{Q} \approx 230$ mW.

Die rechnerische Abschätzung erfolgt analog zu der in 4.1.7 durchgeführten Rechnung, allerdings sind hier aufgrund der fehlenden Strahlungsschilde auch die aus anodisiertem Aluminium bestehenden Oberflächen der Halterung für die untere Gegenfläche zu berücksichtigen.

Zur Messung der Strahlungstemperatur des Raumes wurde der Cernox-Sensor CX-1070-SD X46351 am großen Aluminium-Strahlungsschild in der Nähe der Kugel angebracht. Die Sensorleitung wurde thermisch an diesen Schild sowie an die den Aufbau außen umgebende Superisolation angebunden. Ein Photo des befestigten Sensors ist in Abb. 4-11 zu sehen. Im Rahmen der Messung T11d II wurde an dieser Position ein Wert von $T \approx 180$ K ermittelt.

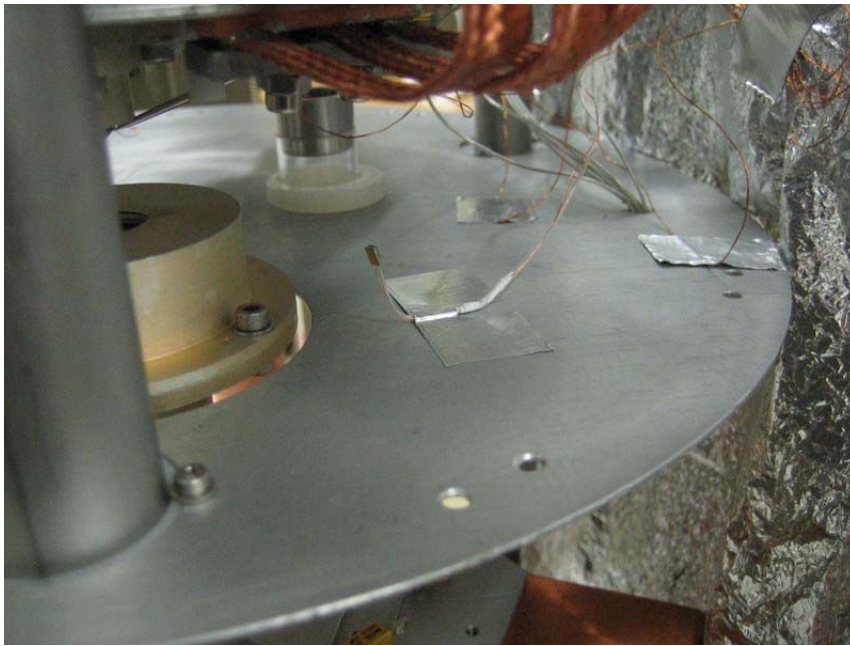


Abb. 4-11 Temperatursensor zur Messung der Strahlungstemperatur des Probenraumes

Zur Berechnung des Wärmestromes wurde wieder das Stefan-Boltzmann-Gesetz für Lambert-Strahler verwendet:

$$P = \varepsilon_i \cdot \sigma \cdot A_i \cdot F_{ij} \cdot (T_j^4 - T_i^4)$$

mit

$$T_i = 30 \text{ K}$$

$$\varepsilon_{\text{Stahl, poliert}} \approx 0,1$$

$$\varepsilon_{\text{Aluminium, anodisiert}} \approx 0,8$$

$$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$$

$$r_{\text{Stirnfläche}} = 16,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$r_{\text{Gegenfläche}} = 9,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$h_{\text{Spannring}} = 11 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$F_{ij} = 1 \text{ (die warmen Flächen werden als Halbraum angenommen)}$$

Unter der Annahme, dass die Gegenfläche sowie die Stirnfläche des umgebenden Rings der Spannringvorrichtung nur die obere Heizplatte und die Mantelfläche der Spannringvorrich-

tung nur die Superisolation sieht, ist $T_j = 300\text{ K}$ für die ringförmige Stirnfläche des Spannrings und die Gegenfläche bzw. $T_j = 180\text{ K}$ für die Mantelfläche des Spannrings.

Es folgt für die Wärmeströme:

$$\dot{Q}_{\text{Gegenfläche}} = 13\text{ mW}$$

$$\dot{Q}_{\text{Ring}} = 210\text{ mW}$$

$$\dot{Q}_{\text{Mantel}} = 54\text{ mW}$$

Für den Wärmestrom durch Strahlung ergibt sich aus der Rechnung $\dot{Q} \approx 280\text{ mW}$.

Es stellt sich nun die Frage, warum trotz des hohen Wärmeeintrags auf die Temperaturabbaustrecke in etwa die gleichen Wärmestromwerte wie in vergleichbaren Messungen mit Strahlungsschilden gemessen werden. Dies ist dadurch begründet, dass der Strahlungsbeitrag bei Messung und Kalibrierung in etwa gleich groß ist und bei der verwendeten Methode zur Berechnung der Wärmeströme nicht berücksichtigt wird:

Unter Berücksichtigung der Wärmestrahlung ist der Wärmestrom über die Temperaturabbaustrecke während der Kalibrierung gegeben durch:

$$\dot{Q}_{\text{Kalibrierung}} = \dot{Q}_{\text{Heizer}} + \dot{Q}_{\text{Strahlung, Kalibrierung}}$$

Der Wärmestrom bei der Messung wird wie in 3.2 beschrieben mit der Formel

$$\dot{Q}^{\text{Messung}} = \dot{Q}^{\text{Kalibrierung}} \frac{\Delta T_{\text{TAS}}^{\text{Messung}}}{\Delta T_{\text{TAS}}^{\text{Kalibrierung}}}$$

berechnet.

Wenn nun die Wärmestrahlung auch bei der Messung berücksichtigt wird, kann man schreiben

$$\dot{Q}^{\text{Messung}} + \dot{Q}_{\text{Strahlung, Messung}} = \left(\dot{Q}_{\text{Heizer}} + \dot{Q}_{\text{Strahlung, Kalibrierung}} \right) \frac{\Delta T_{\text{TAS}}^{\text{Messung}}}{\Delta T_{\text{TAS}}^{\text{Kalibrierung}}}$$

Da bei der Abwesenheit von Strahlungsschilden der Wärmestrom durch Strahlung bei Messung und Kalibrierung in etwa gleich sein wird, ist eine Vereinfachung dieses Ausdrucks auf möglich:

$$\dot{Q}^{\text{Messung}} = \left(\dot{Q}_{\text{Heizer}} + \dot{Q}_{\text{Strahlung}} \right) \frac{\Delta T_{\text{TAS}}^{\text{Messung}}}{\Delta T_{\text{TAS}}^{\text{Kalibrierung}}} - \dot{Q}_{\text{Strahlung}}$$

$$\dot{Q}^{\text{Messung}} = \dot{Q}_{\text{Heizer}} \frac{\Delta T_{\text{TAS}}^{\text{Messung}}}{\Delta T_{\text{TAS}}^{\text{Kalibrierung}}} + \dot{Q}_{\text{Strahlung}} \left(\frac{\Delta T_{\text{TAS}}^{\text{Messung}}}{\Delta T_{\text{TAS}}^{\text{Kalibrierung}}} - 1 \right)$$

Da das Verhältnis der Temperaturdifferenzen an der Temperaturabbaustrecke ungefähr gleich 1 ist, kann man den letzten Term streichen und kommt auf

$$\dot{Q}_{\text{Messung}} \approx \dot{Q}_{\text{Heizer}} \frac{\Delta T_{\text{TAS}}^{\text{Messung}}}{\Delta T_{\text{TAS}}^{\text{Kalibrierung}}}.$$

Der Wärmestrom über die Kugel kann also trotz Abwesenheit von Strahlungsschilden in erster Näherung mit der in 3.2 angegebenen Methode gemessen werden.

4.3 Fehlerrechnung

Das Gaußsche Fehlerfortpflanzungsgesetz lautet für eine Funktion $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ von mehreren fehlerbehafteten Größen x_i :

$$\Delta f = \sum_i \left| \frac{df}{dx_i} \right| \Delta x_i$$

Mit den in den Bedienungsanleitungen der Messgeräte angegebenen Messgenauigkeiten ist es möglich, die Genauigkeit des gemessenen Wärmestroms zu ermitteln. Wie bereits beschrieben wird der während der Messung geflossene Wärmestrom durch

$$\dot{Q}^{\text{Messung}} = \dot{Q}^{\text{Kalibrierung}} \frac{\Delta T_{\text{TAS}}^{\text{Messung}}}{\Delta T_{\text{TAS}}^{\text{Kalibrierung}}}$$

berechnet. Der Fehler des gemessenen Wärmestroms ist dann gegeben durch

$$\Delta \dot{Q}^{\text{Messung}} = \Delta \dot{Q}^{\text{Kal}} \frac{\Delta T_{\text{TAS}}^{\text{Messung}}}{\Delta T_{\text{TAS}}^{\text{Kalibrierung}}} + \dot{Q}^{\text{Kal}} \frac{\Delta \Delta T_{\text{TAS}}^{\text{Messung}}}{\Delta T_{\text{TAS}}^{\text{Kalibrierung}}} + \dot{Q}^{\text{Kal}} \frac{\Delta T_{\text{TAS}}^{\text{Messung}}}{(\Delta T_{\text{TAS}}^{\text{Kalibrierung}})^2} \Delta \Delta T_{\text{TAS}}^{\text{Kalibrierung}}$$

mit

$$\dot{Q}^{\text{Kal}} = \dot{Q}^{\text{Kalibrierung}} = \frac{U_{\text{Shunt}} \cdot U_{\text{Heizer}}}{R_{\text{Shunt}}}$$

$$\Delta \dot{Q}^{\text{Kalibrierung}} = \Delta U_{\text{Shunt}} \frac{U_{\text{Heizer}}}{R_{\text{Shunt}}} + \Delta U_{\text{Heizer}} \frac{U_{\text{Shunt}}}{R_{\text{Shunt}}} + \Delta R_{\text{Shunt}} \frac{U_{\text{Heizer}} \cdot U_{\text{Shunt}}}{(R_{\text{Shunt}})^2}$$

und

$$\Delta T_{\text{TAS}} = T_{\text{A2TAS}} - T_{\text{A3}}$$

$$\Delta \Delta T_{\text{TAS}} = \Delta T_{\text{A2TAS}} + \Delta T_{\text{A3}}$$

In Tabelle 4-24 sind die berechneten Ungenauigkeiten für typische bei Messungen auftretende Temperaturen an der Temperaturabbaustrecke und Heizerleistungen angegeben.

| Kalibrierheizerleistung mW | T_{A2TAS} K | T_{A3} K | Fehler von $\dot{Q}_{Messung}$ mW | Fehler von $\dot{Q}_{Messung}$ % |
|---------------------------------------|-------------------------|----------------------|---|--|
| 570 | 32 | 23 | 4 | 1 |
| 530 | 82 | 77 | 28 | 5 |
| 440 | 139 | 135 | 60 | 14 |
| 420 | 29 | 23 | 4 | 1 |
| 350 | 80 | 76 | 23 | 7 |
| 270 | 138 | 135 | 49 | 18 |

Tabelle 4-24

Dazu kommen Ungenauigkeiten, die durch die während der Messung nicht bestimmten Auflagekräfte entstehen. Durch Reibung in den Führungen der oberen Regelplatte beim Aufsetzen ist die Auflagekraft nicht bei jedem Aufsetzvorgang exakt gleich groß. Dieser Fehler wird mit größerer Auflagekraft kleiner und ist beim Auflegen von drei Massen vernachlässigbar. Im Fall der Messungen ohne Auflagemassen T13 – T15 allerdings hat er zur Folge, dass die Messergebnisse lediglich als Richtwert für die Größenordnung der gemessenen Wärmeströme zu verstehen sind.

5 Modellierung des Systems

5.1 Finite Elemente Modell

Berechnungen, die von der Methode der finiten Elemente Gebrauch machen, wurden mit dem Programm ANSYS Academic Teaching Advanced, Release 11.0 durchgeführt.

5.1.1 Vereinfachungen und Annahmen des Modells

Es wurden folgende Vereinfachungen gemacht:

- Da keine Daten für die temperaturabhängige Wärmeleitfähigkeit des Stahls AISI 440C vorlagen, wurden Werte des Stahls AISI 304 benutzt, da beide Stähle bei Raumtemperatur in etwa die gleiche Wärmeleitfähigkeit besitzen und es wahrscheinlich ist, dass sie ein ähnliches Temperaturverhalten haben.
- Für die Kugeln aus Si_3N_4 wurde die Wärmeleitfähigkeit als temperaturunabhängig angenommen. Als Wert wurde der Raumtemperatur-Wert der Wärmeleitfähigkeit eingesetzt.
- Die Strahlung wurde vernachlässigt.
- Die Kontaktflächen wurden unter Verwendung der Werte der E-Moduln bei Raumtemperatur mit den Formeln der Hertzschen Theorie berechnet.

Im Rahmen der Messungen stellte sich heraus, dass die Messwerte am besten mit einem Modell beschrieben werden können, in dem die Kontaktflächen aus der Hertzschen Theorie gewonnen werden und in dem keine Kontaktwiderstände an diesen Flächen auftreten. Der thermische Widerstand der Anordnung entsteht dann rein aus der geometrischen Einschnürung des dem Wärmestrom zur Verfügung stehenden Weges.

5.1.2 2-d Modell für Wärmestrommessungen mit Kugeln

Modelliert wurden die beiden Auflageplatten, deren Temperaturen T_{A1} und T_{A2} aus den Messungen bekannt sind, sowie die dazwischenliegende Kugel.

Wegen der Zylindersymmetrie der vorliegenden Geometrie wurde zunächst ein zweidimensionales Modell erstellt. Die Kugel und die Auflageflächen wurden mit plane75 Elementen modelliert. Da eine Reihe von Testsimulationen mit verschiedenen Netzen eine starke Abhängigkeit des Wärmeflusses von der Feinheit des Netzes ergab, wenn die Kontaktfläche im Vergleich zum Kugelradius sehr klein war, wurde die Vernetzung der Geometrie variiert. Die

geringste Abhängigkeit wurde erhalten wenn benachbarte Elemente eine ähnliche räumliche Ausdehnung aufweisen. Um korrekte Ergebnisse im Bereich der hohen Temperaturgradienten an den Kontaktflächen zu erhalten, wurde in diesem Bereich das Netz sehr fein gemacht (siehe Abb. 5-1 und Abb. 5-2.).

Um beide Kontakte genau gleich zu gestalten, wurde zuerst die untere Hälfte der Kugel und ein Teil der unteren Auflageplatte modelliert, vernetzt und dann gespiegelt. Danach wurde das verbleibende Stück der unteren Auflageplatte vernetzt.

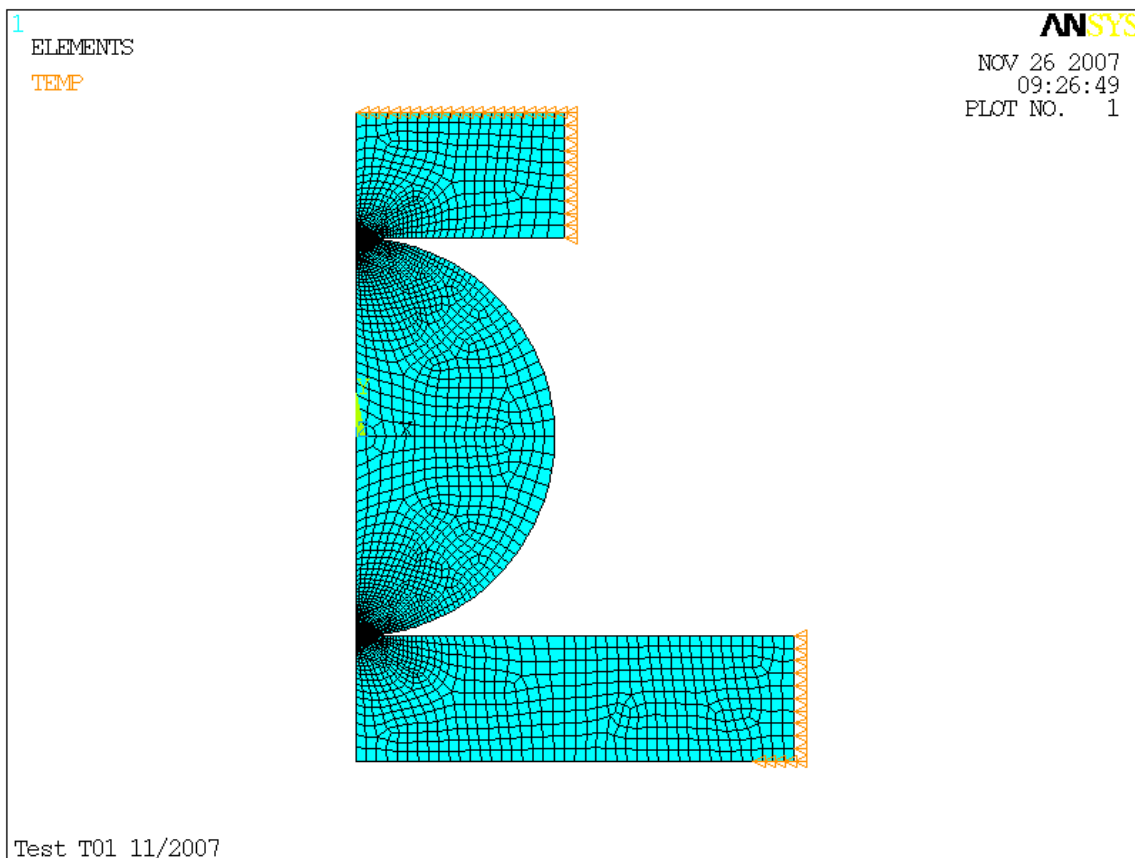


Abb. 5-1 Vernetztes 2-d Modell der Kugel mit den beiden Auflageflächen. Die orangefarbenen Pfeile zeigen die Knoten, in denen die Temperatur der Auflageflächen als Randbedingung festgelegt wurde.

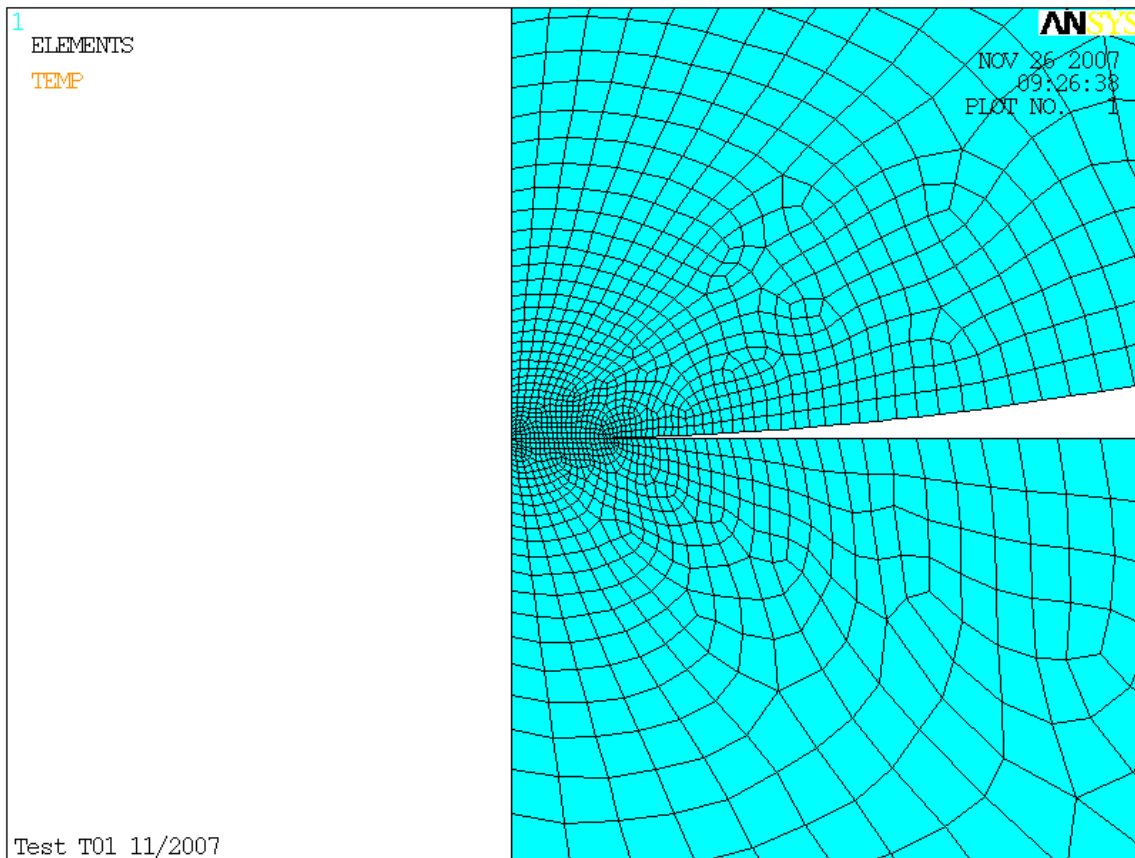


Abb. 5-2 Ausschnitt des Netzes im Bereich des Kontaktes zwischen Kugel und unterer Auflagefläche.

5.1.3 3-d Modell für Wärmestrommessungen mit Kugeln

Zur Verfeinerung wurde auch ein 3-d Modell erstellt. Zunächst wurde ein Achtel einer Kugel als zugrunde liegende Geometrie modelliert. Das Netz wurde über die Linien definiert, die die Geometrie begrenzen. Es wurde so gewählt, dass im Bereich der Kontakte feiner vernetzt wird, da dort sehr hohe Temperaturgradienten auftreten. Die Elemente wurden dann wie beim 2-d Modell gespiegelt, in diesem Fall aber um die drei Ebenen $x = 0$, $y = 0$ und $z = 0$, um ein Modell der gesamten Kugel und beider Gegenflächen zu erhalten.

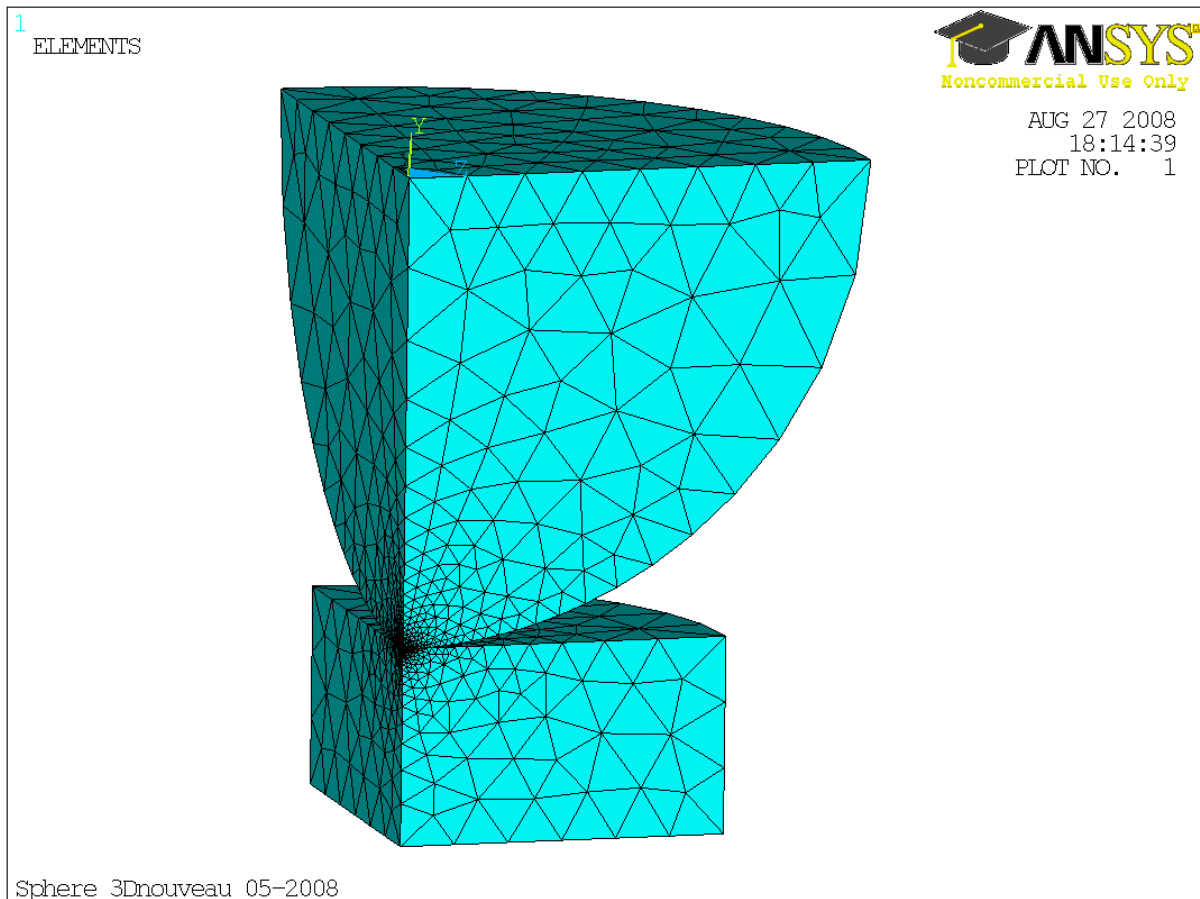


Abb. 5-3 Netz des 3-d Modells vor der Spiegelung

Da sich gezeigt hat, dass ein Verkleinern des Radius der unteren Gegenfläche auf den Wert des Radius der oberen Gegenfläche keinen Einfluss auf den Wärmestrom hat, wurden beide Gegenflächen als gleich groß modelliert.

Als Beispiel ist das Inputfile für die Erstellung des 3-d Modells zur Messung T11d in Appendix B vollständig angegeben.

5.1.3.1 Simulation mit Kontaktwiderstand

Beim Modell für die Messung T11d wurde ein thermischer Kontaktwiderstand in Form eines zylindrischen Plättchens mit der Querschnittsfläche gleich der Hertzschen Kontaktfläche und Höhe $h = 0,01$ mm mit entsprechender Wärmeleitfähigkeit eingebaut. Die Kontaktwärmeleitfähigkeit wurde durch Extrapolation aus den Werten in [MIL-HDBK-251, 1978] gewonnen. Mit diesen Kontaktwiderständen erreicht man eine schlechtere Übereinstimmung mit dem gemessenen Wert als ohne, wie in Tabelle 5-1 zu sehen.

| | λ_c W/m ² K | \dot{Q} mW |
|---------------------|--------------------------------|-----------------|
| T11d Mes- sung | - | 586 |
| ohne R_c | - | 593 |
| $\lambda_{c,screw}$ | 5,0E+05 | 538 |
| $\lambda_{c,stud}$ | 1,2E+06 | 487 |

Tabelle 5-1 Vergleich von Wärmestromwerten aus einer Messung und einer entsprechenden ANSYS-Simulation mit und ohne Kontaktwiderständen

Es wurde daher auf den Einbau von Kontaktwiderständen im finite Elemente Modell verzichtet.

5.1.4 Ergebnisse der Simulation

Die aus dem 2-d und dem 3-d Modell erhaltenen Wärmestromwerte sind annähernd gleich. In beiden Modellen findet der Großteil des Temperaturabfalls geometriebedingt in den Kontakten statt. In Abb. 5-4 ist die Temperaturverteilung in der 2-d Simulation des Tests T01 zu sehen, Abb. 5-5 und Abb. 5-6 zeigen jeweils einen vergrößerten Ausschnitt an den Kontakten oben und unten.

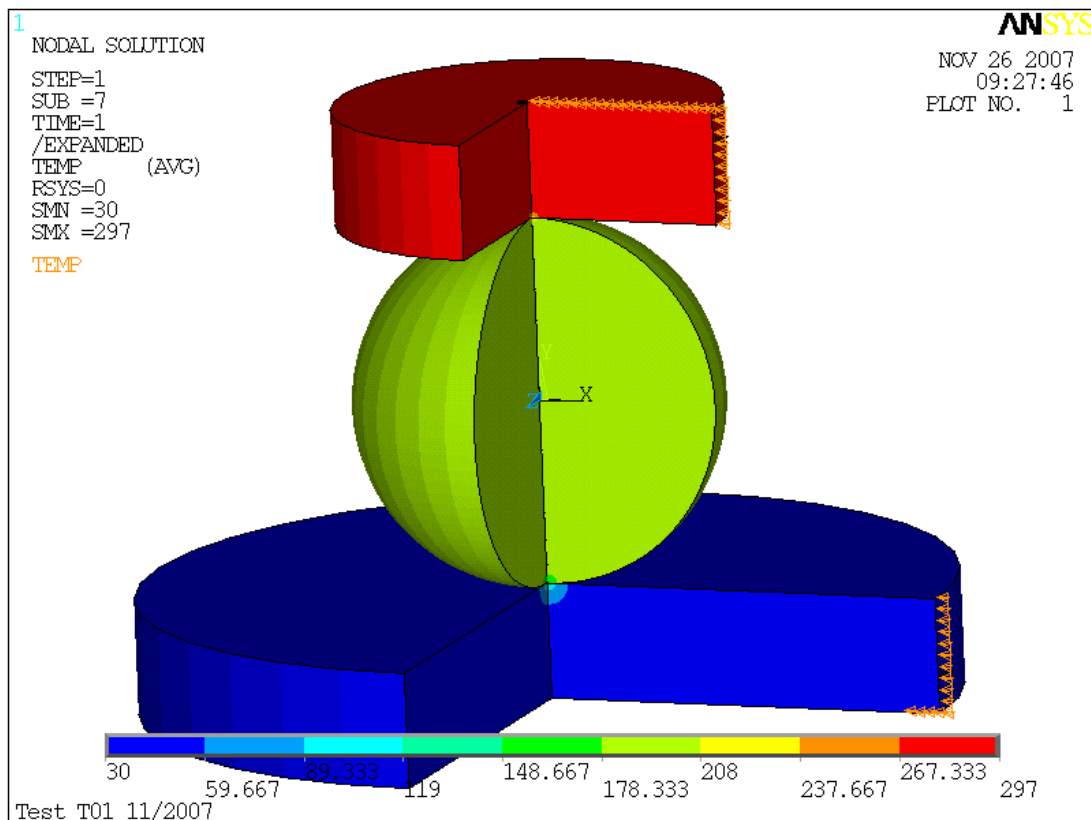


Abb. 5-4 Simulierte Temperaturverteilung im Test T01.

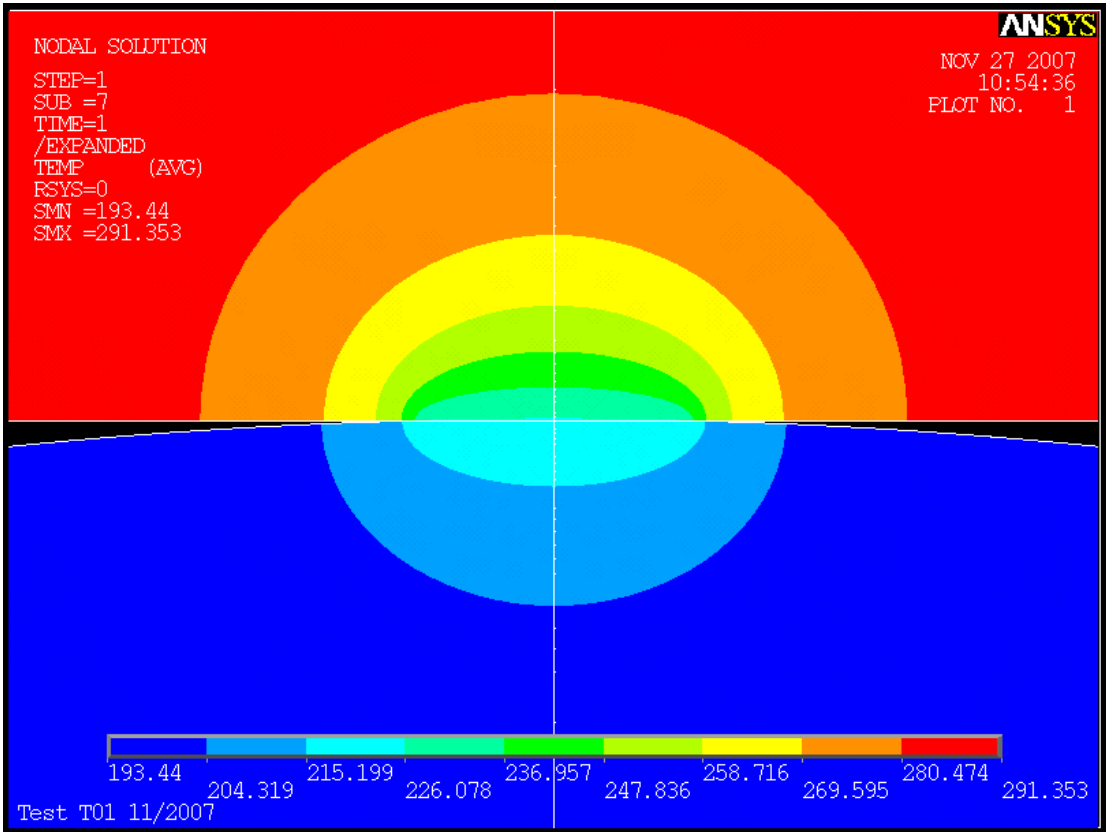


Abb. 5-5 Ausschnitt aus der Temperaturverteilung am Kontakt zwischen Kugel und oberer Auflagefläche

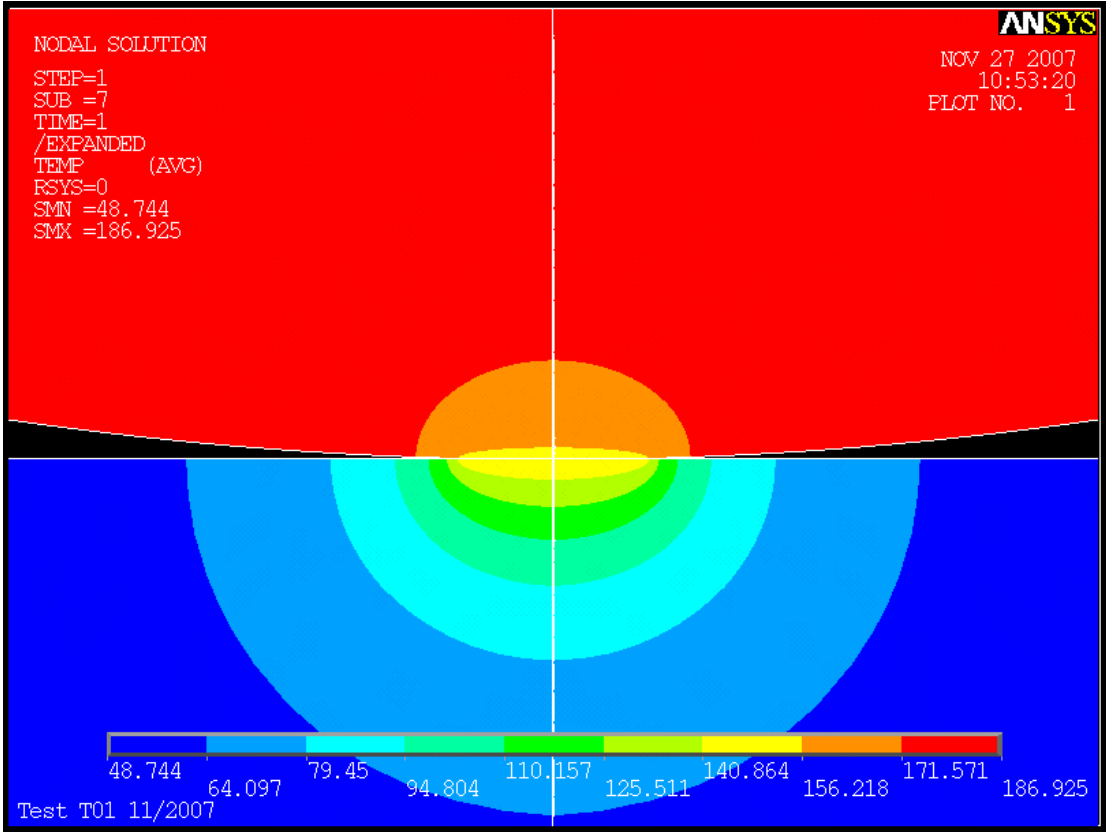


Abb. 5-6 Ausschnitt aus der Temperaturverteilung am Kontakt zwischen Kugel und unterer Auflagefläche

In Tabelle 5-2 sind einige aus den Simulationen erhaltenen Wärmeflusswerte den Werten aus den Messungen gegenübergestellt. Die Tabelle mit dem Vergleich aller Werte findet sich in Appendix A, Tabelle A-2.

| Test # | \varnothing_{Kugel} mm | F N | Kugel- material | T_{A1} K | T_{A2} K | \dot{Q}_{Messg} mW | \dot{Q}_{Ansys} mW | Fehler % |
|------------|-----------------------------|--------|--------------------------------|---------------|---------------|-------------------------|-------------------------|-------------|
| T06 | 9,525 | 17,9 | Si ₃ N ₄ | 297 | 30 | 290,9 | 327 | 12,4 |
| T01 Wdh | 9,525 | 71,1 | Si ₃ N ₄ | 297 | 30 | 469,3 | 518 | 10,4 |
| T05 | 9,525 | 1,7 | Si ₃ N ₄ | 294 | 30 | 113,8 | 149 | 30,9 |
| T10 (2) | 4,762 | 17,9 | Si ₃ N ₄ | 297 | 30 | 240,8 | 259 | 7,6 |
| T05 b) | 9,525 | 43,7 | Si ₃ N ₄ | 297 | 30 | 394,6 | 440 | 11,5 |
| T11(2) | 14,288 | 71,1 | Si ₃ N ₄ | 297 | 34 | 588,1 | 591 | 0,5 |
| T01(2) | 9,525 | 71,1 | Si ₃ N ₄ | 297 | 32 | 505,3 | 517 | 2,3 |
| T04b | 9,525 | 71,1 | Si ₃ N ₄ | 297 | 33 | 514,2 | 516 | 0,4 |
| T05c | 9,525 | 43,7 | Si ₃ N ₄ | 297 | 32 | 443,2 | 440 | -0,7 |
| T10b | 4,762 | 43,7 | Si ₃ N ₄ | 298 | 30 | 332,1 | 349 | 5,1 |
| T21 | 14,288 | 43,7 | Si ₃ N ₄ | 298 | 35 | 559,2 | 502 | -10,2 |
| T11c | 14,288 | 17,9 | Si ₃ N ₄ | 297 | 31 | 429,5 | 384 | -10,6 |
| T11d | 14,288 | 71,1 | Si ₃ N ₄ | 298 | 34 | 573,8 | 593 | 3,3 |
| T11d II | 14,288 | 71,1 | Si ₃ N ₄ | 297 | 35 | 585,9 | 593 | 1,2 |
| T11c II | 14,288 | 19,2 | Si ₃ N ₄ | 300 | 32 | 416,7 | 384 | -7,8 |

Tabelle 5-2

Bei einigen Messpunkten der Messungen T11dII und T11cII ist $\bar{T} = (T_{A1} + T_{A2})/2$ so gering, dass die in der Simulation getroffene Annahme einer temperaturunabhängigen Wärmeleitfähigkeit von Si₃N₄ nicht mehr zulässig ist. Für die Temperaturabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit des benutzten Si₃N₄-Materials lagen keine Daten vor. Leider war eine entsprechende Messung am Institut für Festkörperphysik wegen apparativer Probleme nicht möglich.

In [K. Watari et al., 2005] sind Werte für die temperaturabhängige Wärmeleitfähigkeit von Si₃N₄ in reiner Form sowie mit verschiedenen Fremdphasen angegeben. Wie in Abb. 5-7 zu sehen, ist die Wärmeleitfähigkeit für reines Si₃N₄ (Abb. 5-7 rechts, „Si₃N₄ without additives“), die nur bis 300 K angegeben ist, nur geringfügig temperaturabhängig.

Ein Vergleich mit der Temperaturabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von SiC [G.A. Slack, 1964], einer Keramik, die Si₃N₄ sehr ähnlich ist, sollte eine Abschätzung der Plausibilität der

aus den Simulationen resultierenden Temperaturabhängigkeit für Si_3N_4 ermöglichen (Abb. 5-7).

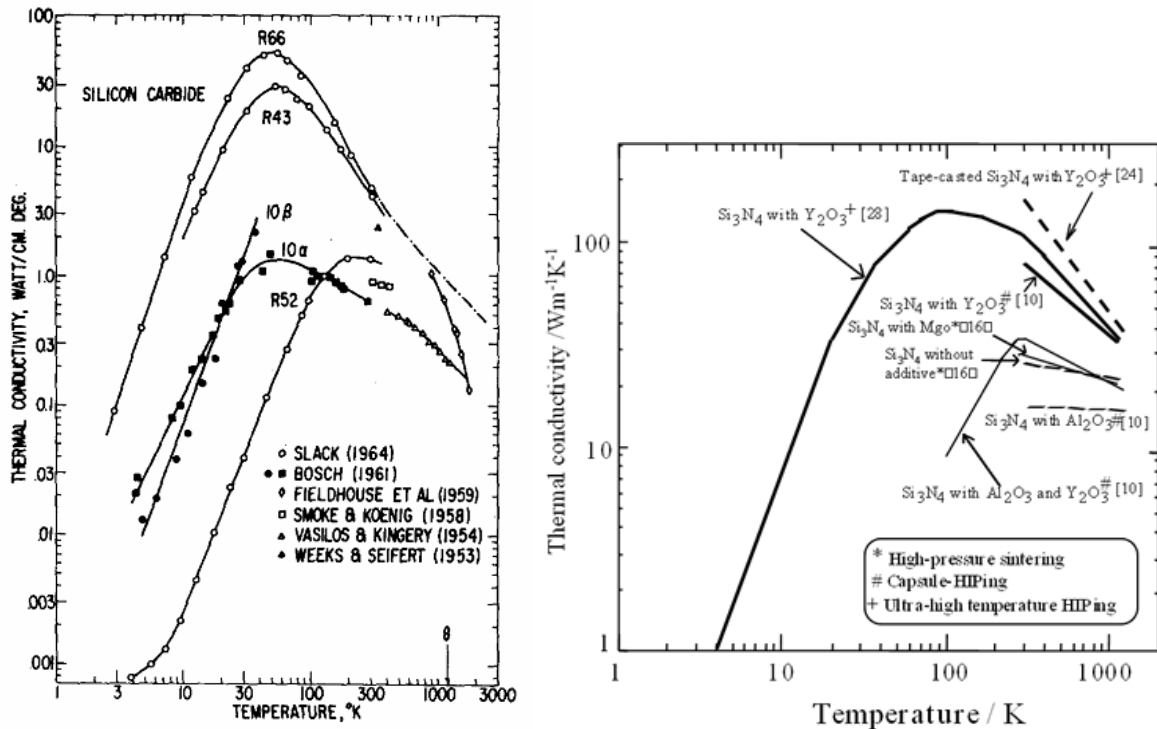


Abb. 5-7 links: Wärmeleitfähigkeit von SiC Proben unterschiedlicher Reinheit (aus [G.A. Slack, 1964])

rechts: Wärmeleitfähigkeit von Si_3N_4 mit verschiedenen Additiven (aus [K. Watari et al., 2005])

Basierend auf der gefundenen Temperaturabhängigkeit von SiC (ein ähnlicher Verlauf ist auch für dotiertes Si_3N_4 gegeben) und dem vom Hersteller angegebenen Raumtemperaturwert der Wärmeleitfähigkeit des vorliegenden Si_3N_4 -Materials wurde eine Wertetabelle für eine hypothetische temperaturabhängige Wärmeleitfähigkeit der untersuchten Proben zwischen 50 und 300 K erstellt, die im oberen Temperaturbereich einen nahezu konstanten Wert hat, und unter einer bestimmten Temperatur stark abfällt. Die gesamte Kurve wurde mehrmals in T -Richtung verschoben und mit den Werten die Simulation der Messung T11dII bei niedrigerer Temperatur \bar{T} wiederholt, bis eine Reproduktion der Messwerte mit Abweichungen $< 5\%$ gegeben war. Die resultierende Kurve für diese Abschätzung der temperaturabhängigen Wärmeleitfähigkeit ist in Abb. 5-8 dargestellt.

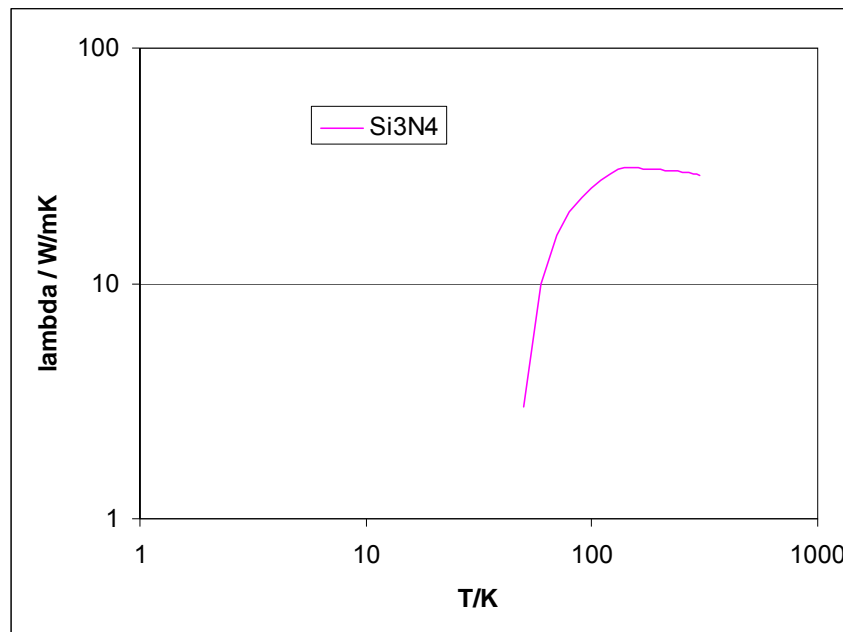


Abb. 5-8 Abschätzung der temperaturabhängigen Wärmeleitfähigkeit des vorliegenden Si_3N_4 -Materials
Zur Kontrolle der gefundenen Temperaturabhängigkeit bei mittleren Temperaturen < 100 K wurde die Simulation der Messung T11cII mit den Werten aus Abb. 5-8 durchgeführt, was zu guten Ergebnissen führte. Die Überprüfung des Verhaltens bei mittleren Temperaturen > 100 K erfolgte durch Simulation der Messung T11d, was zu keiner signifikanten Änderung des resultierenden Wärmestroms führte.

Da bei allen Messungen außer T11dII und T11cII die Temperatur \bar{T} im Bereich geringer Temperaturabhängigkeit von λ liegt, ist die Annahme einer temperaturunabhängigen Wärmeleitfähigkeit bei den ANSYS-Simulationen für diese Messungen gerechtfertigt, wie Abb. 5-9 zeigt.

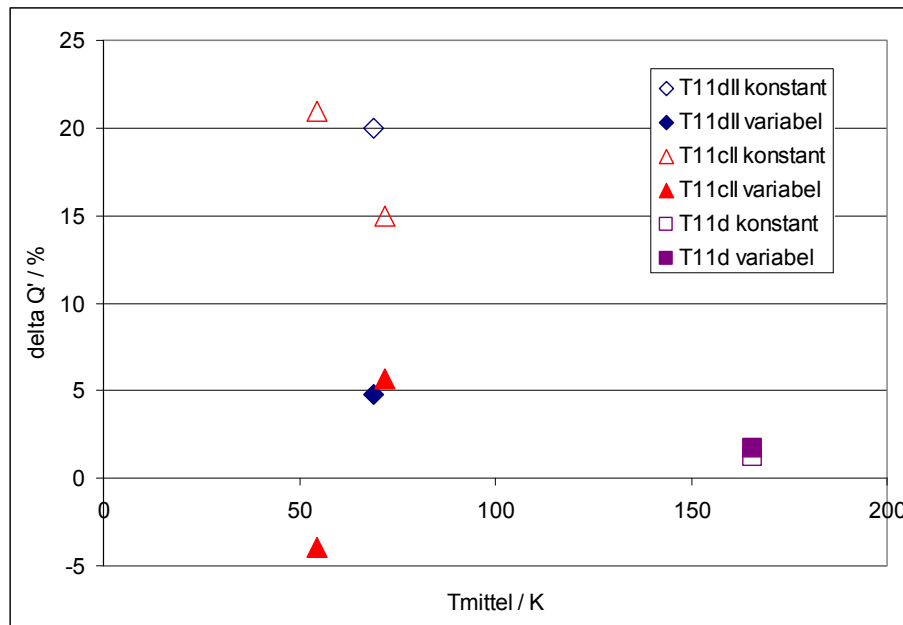


Abb. 5-9 Abweichungen der Wärmestromwerte aus der ANSYS-Simulation von denen aus der Messung, wobei „konstant“ für die Simulation mit temperaturunabhängiger Wärmeleitfähigkeit, „variabel“ für Simulation mit der Temperaturabhängigkeit aus Abb. 5-8 steht.

Es wäre wünschenswert, die Wärmeleitfähigkeit des vorliegenden Si_3N_4 -Materials der Firma Cerobear zwischen 4,2 und 300 K zu messen, da die vorliegende Kurve nur eine grobe Abschätzung darstellt. Selbst bei Vorliegen von Daten für reines Si_3N_4 wäre diese Messung erforderlich, da (wie in Abb. 5-7 zu sehen) bereits kleinste Fremdphysenanteile einen enormen Einfluss haben und über die exakte Zusammensetzung des verwendeten Materials keine Angaben vorliegen.

5.2 Analytisches Modell

Nach den vorliegenden experimentellen Daten (Appendix A, Tabelle A-1) kann angenommen werden, dass sich der Wärmestrom über eine zwischen zwei Flächen befindliche Kugel durch folgenden Ausdruck beschreiben lässt:

$$\dot{Q} = k \cdot \underbrace{R^{\frac{1}{3}} \cdot F^{\frac{1}{3}} \cdot \Delta T \cdot T^{\frac{2}{3}}}_C$$

oder

$$\dot{Q} = k \cdot C$$

Diese Gerade geht durch den Nullpunkt, da für $C = 0$ auch $\dot{Q} = 0$ sein muss. Der materialabhängige Faktor k folgt aus der Steigung (siehe Abb. 5-10).

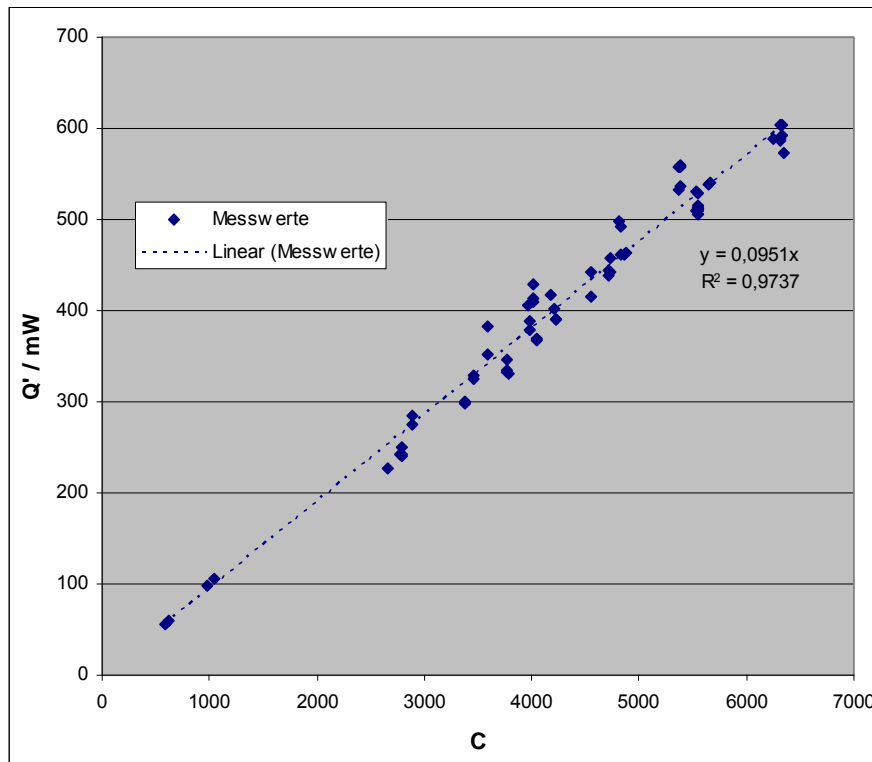


Abb. 5-10 Messwerte für Si_3N_4 Kugeln aufgetragen gegen den Faktor C

5.2.1.1 Faktor C

Der Faktor C ist damit folgendermaßen definiert:

$$C = R^{\frac{1}{3}} \cdot F^{\frac{1}{3}} \cdot \Delta T \cdot \bar{T}^{\frac{2}{3}}$$

FKraft

RKugelradius

ΔT $T_{A1} - T_{A2}$

\bar{T} $(T_{A1} + T_{A2})/2$

Die Exponenten bei Kugelradius und Kraft folgen aus der Hertzschen Theorie. Der Exponent von eins bei ΔT repräsentiert den klassischen Wärmetransport. Die mittlere Temperatur \bar{T} wurde eingeführt, um Änderungen der Materialparameter im untersuchten Temperaturbereich zu berücksichtigen. Der Exponent $2/3$ ergibt sich aus der linearen Regression für die Wärmestromwerte.

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchungen kann er nicht erklärt werden. Der Einfluss der Kontaktfläche wird im Acoustic Mismatch Model [W. A. Little, 1959] durch Änderungen der Phononenfrequenzen und Abweichungen von der T^4 -Abhängigkeit berücksichtigt. Die Ergebnisse zeigten jedoch, dass für die vorliegenden Pressungen und Temperaturen Oberflächenrauheiten nicht von großer Bedeutung sind.

5.2.1.2 Faktor k

Im Faktor k sind die Materialeigenschaften der Kugel und der Gegenflächen enthalten:

$$k = p_{prop} \frac{\lambda'}{E'^{\frac{1}{3}}}$$

mit

$$\lambda' = \frac{2 \cdot \lambda_1 \cdot \lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2} \dots \dots \dots \text{effektive Wärmeleitfähigkeit}$$

$$p_{prop} \dots \dots \dots \text{Proportionalitätsfaktor}$$

Aus der linearen Regression der gemessenen Wärmestromwerte über dem Faktor C wurde k für Si_3N_4 -Kugeln gewonnen. Nach obiger Gleichung folgt dann für den Proportionalitätsfaktor $p_{prop}^{\text{Si}_3\text{N}_4} = 27,3$.

Es wäre zu erwarten, dass bei großen Werten des Rauheitsparameters $\alpha_{Greenwood} \gg 0,05$ der Einfluss der Rauheit der Oberflächen nicht vernachlässigbar sein wird und die Rauheit in den Faktor k eingeht. Allerdings konnte ein derartiger Zusammenhang nicht festgestellt werden, da auch Messungen mit $0,05 < \alpha_{Greenwood} < 0,5$ mit dem Modell ohne Berücksichtigung der Rauheit gut beschreibbar sind.

5.3 Anwendung des analytischen Modells auf Stahlkugeln

Um die allgemeine Anwendbarkeit des analytischen Modells und insbesondere die Formel für den Faktor k zu überprüfen, ist es notwendig, das Modell auch auf andere Materialien anzuwenden. Der Faktor k für die Messungen mit Stahlkugeln wird im Folgenden auf verschiedene Arten berechnet und die Ergebnisse verglichen.

5.3.1 Berechnung des materialabhängigen Faktors aus Messwerten

Die Berechnung von k für die Messung T07 (alle Größen in C sind bekannt) liefert einen Wert von

$$k_{Stahl} = \frac{\dot{Q}^{Messung}}{C} \approx 0,066$$

Bei der Messung T08 wurde nur die Rauheit der Gegenflächen variiert, was nach den vorliegenden Resultaten keinen bedeutenden Einfluss auf den thermischen Widerstand hat (siehe 4.1.1). Eine lineare Anpassung der in dieser Messung ermittelten Werte (siehe Abb. 5-11) ergibt

$$k_{Stahl} = \frac{\dot{Q}^{Messung}}{C} \approx 0,067 .$$

5.3.2 Berechnung des materialabhängigen Faktors aus Materialparametern und Anpassung der Werte von Si₃N₄-Kugeln

Folgende Materialparameter fließen in die Berechnung des Faktors k ein:

$$E'_{Stahl-Si_3N_4} = 119665 \text{ MPa}$$

$$E'_{Stahl-Stahl} = 101465 \text{ MPa}$$

$$\lambda_{Si_3N_4} = 30 \text{ W/mK (bei } T = 170 \text{ K)}$$

$$\lambda_{Stahl} = 12 \text{ W/mK (bei } T = 170 \text{ K)}$$

$$\lambda'_{Stahl-Si_3N_4} = \frac{2 \cdot \lambda_1 \cdot \lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2} = 17,1 \text{ W/mK}$$

Mit Hilfe der Hertzschen Formeln kann man allgemein schreiben:

$$\frac{k_{Stahl}}{k_{Si_3N_4}} = \frac{\frac{\lambda_{Stahl}}{E'_{Stahl-Stahl}^{\frac{1}{3}}}}{\frac{\lambda'}{E'_{Stahl-Si_3N_4}^{\frac{1}{3}}}} \approx 0,75$$

Aus der Analyse der Messungen für Si₃N₄, Abb. 5-10, folgt $k_{Si_3N_4} \approx 0,095$. Dieser Wert, multipliziert mit 0,75 ergibt $k_{Stahl} \approx 0,07$.

In diese Überlegung fließt die Annahme eines temperaturunabhängigen Wertes von $\lambda_{Si_3N_4} = 30$ W/mK ein. Es ergibt sich aber annähernd der gleiche Wert für k_{Stahl} wie bei den Überlegungen in 5.3.1 und 5.3.3, die ohne diese Annahme gemacht wurden. Dies ist ein weiterer Hinweis, dass die Annahme einer temperaturunabhängigen Wärmeleitfähigkeit von Si₃N₄ im betrachteten Temperaturbereich eine zulässige Näherung ist.

5.3.3 Berechnung des materialabhängigen Faktors aus der ANSYS Simulation

Eine Reihe von ANSYS Simulationen für Stahlkugeln wurde durchgeführt, wobei die Parameter Kugeldurchmesser, Auflagekraft und Temperaturpaarung variiert wurden. Die aus der Simulation erhaltenen Wärmeflüsse sind in Tabelle 5-3 angegeben.

| $\varnothing_{\text{Kugel}}$ mm | F N | T_{A1} K | T_{A2} K | ΔT K | \bar{T} K | \dot{Q} mW |
|------------------------------------|----------|---------------|---------------|-----------------|----------------|-----------------|
| 14,288 | 72,5 | 297 | 30 | 267 | 164 | 447 |
| 14,288 | 72,5 | 297 | 80 | 217 | 189 | 402 |
| 14,288 | 72,5 | 80 | 30 | 50 | 55 | 46 |
| 14,288 | 45,1 | 297 | 30 | 267 | 164 | 382 |
| 14,288 | 45,1 | 297 | 80 | 217 | 189 | 343 |
| 9,525 | 72,5 | 297 | 30 | 267 | 164 | 389 |
| 9,525 | 71,1 | 297,0 | 29,8 | 267 | 163 | 385 |
| 9,525 | 71,1 | 297,1 | 60,0 | 237 | 179 | 365 |
| 9,525 | 71,1 | 297,1 | 79,9 | 217 | 189 | 346 |
| 9,525 | 45,1 | 297 | 80 | 217 | 189 | 299 |
| 9,525 | 19,2 | 297 | 80 | 217 | 189 | 225 |
| 4,726 | 19,2 | 297 | 30 | 267 | 164 | 197 |

Tabelle 5-3 Wärmestromwerte aus ANSYS Simulationen für Stahlkugeln

Die Ergebnisse wurden mit der Formel des analytischen Modells gefittet und in Abb. 5-11 mit den Ergebnissen aus Messung T08 verglichen.

Der Fit der ANSYS Simulationen ergibt $k_{\text{Stahl}} \approx 0,07$, in sehr guter Übereinstimmung mit den oben beschriebenen Berechnungen aus den Materialparametern und der Anpassung der an Si_3N_4 gemessenen Werte.

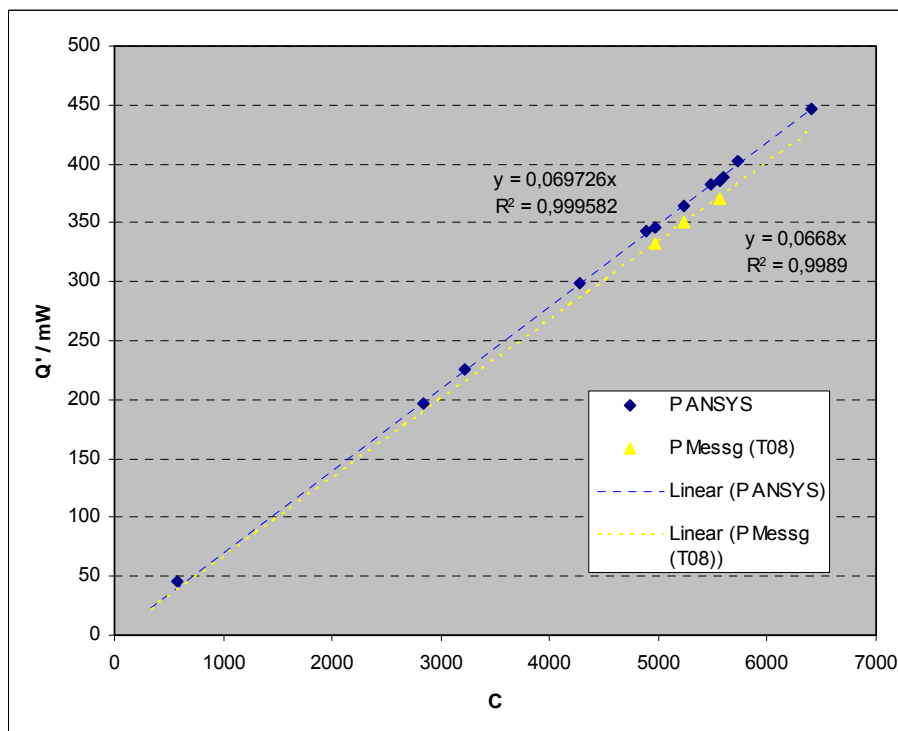


Abb. 5-11 Vergleich der Ergebnisse des analytischen Modells für die Messergebnisse von T08 und die mit ANSYS Simulationen erhaltenen Werte

Bei Kenntnis von Wärmeleitfähigkeit, Geometrie, Temperatur und Anpresskraft kann für eine gegebene Anordnung bereits nach der Finite Elemente Simulation von einigen wenigen Fällen eine Abschätzung von k durch das analytische Modell für alle anderen Fälle erfolgen.

5.3.4 Anwendbarkeit des Modells auf Stahl und andere Materialien

Für den Proportionalitätsfaktor p_{prop} ergibt sich mit dem aus der Messung T08 ermittelten

Wert für k :

$$p_{prop}^{Stahl} = 26,0$$

Dieser Wert ist annähernd gleich dem aus den Messungen mit der Si_3N_4 -Kugel folgenden, $p_{prop}^{Si_3N_4} = 27,3$.

Es kann daher angenommen werden, dass die Formulierung des Faktors k in der angegebenen Form möglich ist und das Modell auch auf Materialpaarungen anderer Werkstoffe anwendbar ist.

5.4 Vergleich mit Modell für thermischen Einschnürungswiderstand

Wie bereits in 2.1.4 angegeben, folgt aus dem von [M. M. Yovanovich, 1971] entwickelten Modell für den thermischen Einschnürungswiderstand zwischen einer Kugel aus einem Material und zwei ebenen Flächen aus einem zweiten Material:

$$R_{th} = \frac{1}{a_H \lambda'}$$

mit

$$\lambda' = \frac{2 \cdot \lambda_1 \cdot \lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2}$$

Damit kann man den Wärmestrom als

$$\dot{Q}_Y = a_H \lambda' \cdot \Delta T$$

schreiben.

Ein Vergleich mit dem im Rahmen dieser Arbeit entwickelten analytischen Modell zeigt, dass sich die Modelle bis auf die Berücksichtigung der mittleren Temperatur nur durch konstante Faktoren unterscheiden:

$$\dot{Q}_{dieseArbeit} = k \cdot C = p_{prop} \frac{\lambda'}{E'^{\frac{1}{3}}} \cdot R^{\frac{1}{3}} \cdot F^{\frac{1}{3}} \cdot \Delta T \cdot \bar{T}^{\frac{2}{3}} = \underbrace{a_H \cdot \lambda' \cdot \Delta T}_{\dot{Q}_Y} \cdot \left(\frac{3}{4}\right)^{-\frac{1}{3}} \cdot \bar{T}^{\frac{2}{3}} \cdot p_{prop}$$

Die gemessenen Wärmestromwerte werden in Abb. 5-12 und Abb. 5-13 mit den berechneten Werten der beiden Modelle verglichen.

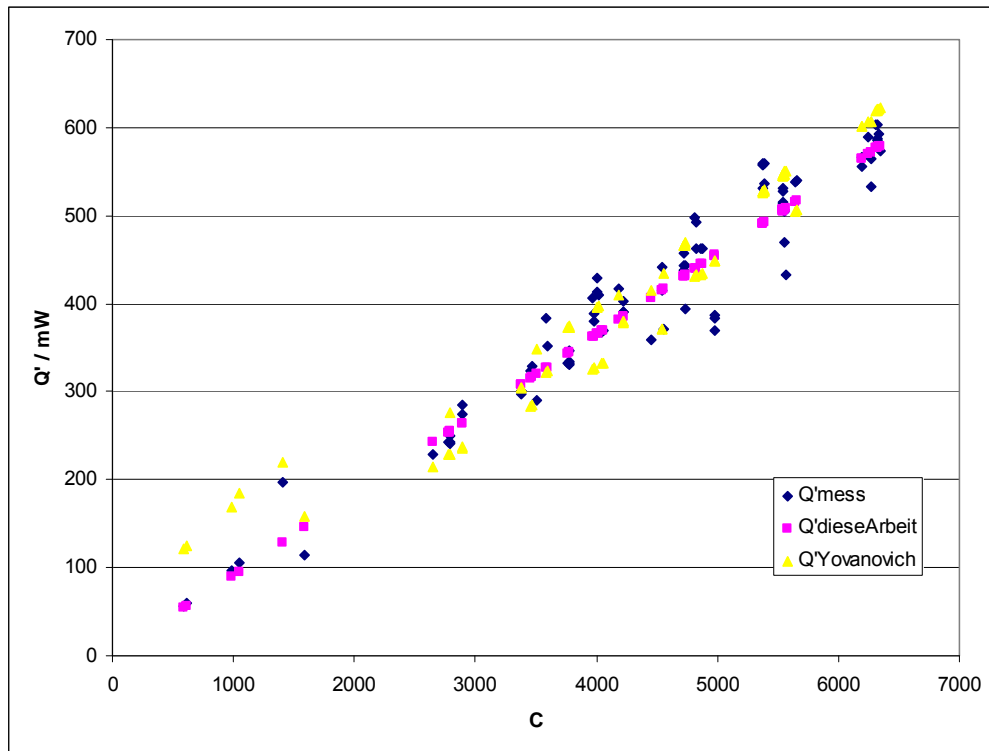


Abb. 5-12 Vergleich der gemessenen und berechneten Wärmeströme für Siliziumnitrid-Kugeln

Bei den Messungen Si_3N_4 Kugeln mit mittleren Temperaturen $\bar{T} < 160 \text{ K}$ unterscheiden sich die mit dem Modell aus 5.2 berechneten Wärmestromwerte um maximal 9 % von den gemessenen Werten, die mit dem Modell von [M. M. Yovanovich, 1971] berechneten Werte liegen um 70 % bis über 100 % darüber.

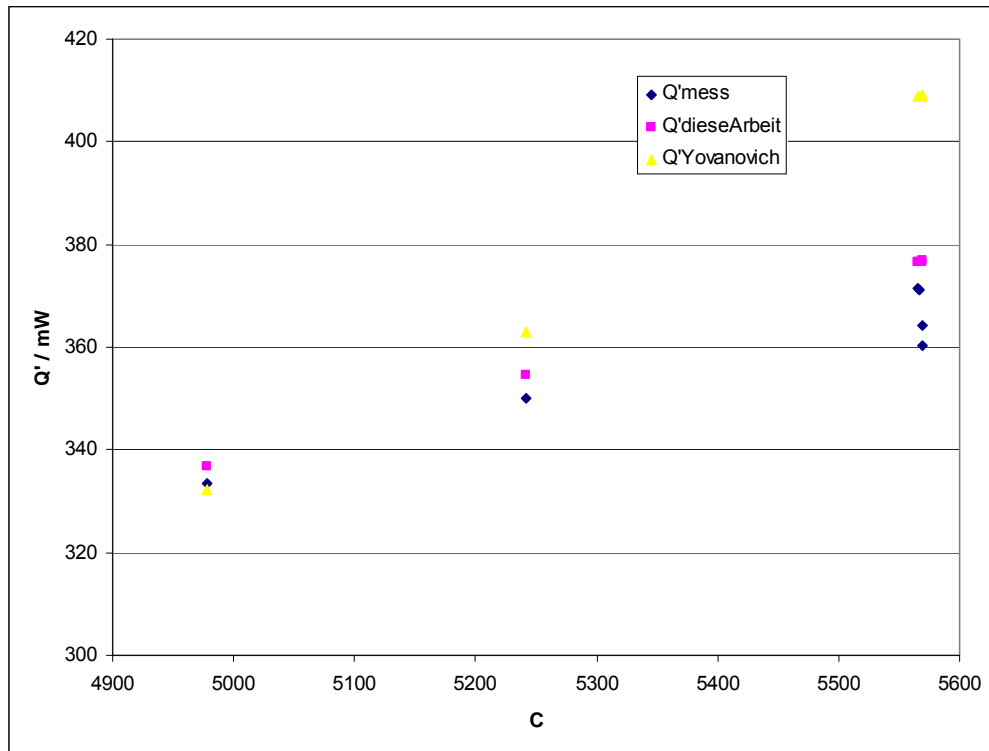


Abb. 5-13 Vergleich der gemessenen und berechneten Wärmeströme für Stahl-Kugeln

An Stahlkugeln wurden nicht so viele Messungen durchgeführt, und die tiefste mittlere Temperatur $\bar{T} = (T_{A1} + T_{A2})/2$ lag bei 163 K. Trotzdem war auch hier wieder die Tendenz festzustellen, dass das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Modell eine bessere Beschreibung der Wärmeströme liefert. Für die Messungen bei $\bar{T} = 163$ K lag die Abweichung der analytisch berechneten Wärmeströme mit dem Modell von [M. M. Yovanovich, 1971] bei 10 bis 13 %, mit dem Modell aus 5.2 bei nur 2 bis 5 %.

6 Diskussion

Mit dem aufgebauten Teststand war es möglich, die gewünschten Temperaturniveaus einzustellen und die geplanten Messungen durchzuführen. Bei den mit HDPE-Zylindern vorgenommenen Testmessungen konnte die aus der Theorie folgende lineare Abhängigkeit von der mittleren Querschnittsfläche nachgewiesen werden. Aus den gewonnenen Ergebnissen der Untersuchungen von Kombinationen Stahl-Siliziumnitridkugel-Stahl sowie Stahl-Stahlkugel-Stahl können die folgenden Schlussfolgerungen gezogen werden:

Der thermische Widerstand für die Anordnung, bestehend aus einer zwischen zwei ebenen Platten eingespannten Kugel, wird in erster Linie von der Makrogeometrie, den Materialien, den Temperaturen und der Auflagekraft bestimmt. Bei einer Temperaturpaarung von 297 K – 30 K, einer Auflagekraft von 71,1 N und einem Kugeldurchmesser von 9,525 mm floss über die Stahl kugel ein Wärmestrom von ~370 mW, über die Siliziumnitridkugel ~510 mW. Über Siliziumnitridkugeln mit den Durchmessern von 4,762 mm, 9,525 mm und 14,288 mm wurden bei einer Auflagekraft von 17,9 N bei der oben angeführten Temperaturpaarung Wärmeströme von ~240 mW, ~300 mW und ~420 mW gemessen, bei einer Auflagekraft von 43,7 N waren es ~330 mW, ~440 mW und ~550 mW. Die gemessenen Wärmeströme stimmen mit den in der vorhandenen Literatur zu ähnlichen Problemstellungen angegebenen Zahlenwerten in der Größenordnung gut überein.

Die Beschichtung von Kugeln mit Dicronite DL-5 und MoS₂ verkleinert den Wärmestrom. In [M. J. Anderson, 1996] wurde ebenfalls eine Erhöhung des thermischen Widerstands bei Beschichtung mit MoS₂ gefunden. Bei den aufgebrauchten Pressungen von etwa 2150 MPa lösen sich die Beschichtungen nicht vom Substrat ab und verursachen daher einen zusätzlichen thermischen Widerstand zwischen Kugeln und Gegenflächen.

Bei den Untersuchungen des Einflusses der Oberflächenrauheit wurde festgestellt, dass auch bei einem Wert des von [J. A. Greenwood et al., 1984] definierten Rauheitsparameters $\alpha_{Greenwood} > 0,05$ bei einer Hertzschen Pressung von 2100 MPa und Rauheiten der Gegenflächen von $0,04 \mu\text{m} < R_a < 0,6 \mu\text{m}$ keine Abhängigkeit des gemessenen Wärmeflusses von der Oberflächenrauheit feststellbar ist.

Die Güte des Isolationsvakuums spielt bei den im Kalorimeter vorliegenden charakteristischen Abständen bis zu Drücken unter 10^{-4} mbar keine herausragende Rolle. Bei Druckwerten von $1 \cdot 10^{-7}$ mbar $< p < 1 \cdot 10^{-4}$ mbar wurden die gleichen Wärmeströme gemessen.

Sowohl für das entwickelte zwei- als auch das dreidimensionale finite Elemente Modell stimmen die gewonnenen Resultate nach entsprechender Verfeinerung des Netzes gut mit den Messungen überein.

Aus der großen Zahl der gemessenen Datensätze ergab sich die Möglichkeit, eine analytische Formel zur Beschreibung des Wärmestroms zu entwickeln:

$$\dot{Q} = p_{prop} \frac{\lambda'}{E'^{\frac{1}{3}}} \cdot R^{\frac{1}{3}} \cdot F^{\frac{1}{3}} \cdot \Delta T \cdot \bar{T}^{\frac{2}{3}}$$

Das gefundene analytische Modell ist nach Umformung bis auf den Faktor $\bar{T}^{\frac{2}{3}}$ nahezu äquivalent dem Modell aus [M. M. Yovanovich, 1971], das bei hohen Temperaturen auch ähnliche Werte liefert. Bei der Verwendung von linear gemittelten Werten für die Wärmeleitfähigkeit der Materialien liefert das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Modell bei kleinen mittleren Temperaturen eine bessere Reproduktion der gemessenen Wärmeströme. Es ist damit geeignet, auf einfachem Weg schnell eine gute Näherung für den gesuchten Wärmestromwert in dem für Wasserstofftanks maßgebenden Temperaturintervall zu erhalten.

Zusammenfassend ist für die Minimierung des Wärmestroms eine Kombination aus möglichst steifen Materialien mit geringer Wärmeleitfähigkeit sowie Kugeln mit kleinem Durchmesser am besten geeignet. Bei der Dimensionierung eines gesamten Lagers muss allerdings noch die aus mechanischen Gründen notwendige größere Kugelanzahl als ein den Gesamtwärmeeintrag erhöhender Faktor berücksichtigt werden.

Schrifttum

- M. J. Anderson: Thermal Conductance of Solid Lubricated Bearings at Cryogenic Temperatures in Vacuum, European Space Tribology Lab , 30th Aerospace Mechanisms Symposium (1996) 31- 45
- R. Berman: Some Experiments on Thermal Contact at Low Temperatures, J. Appl. Phys. 27 (1956) 318-323
- CRYOCOMP, Cryodata Inc.
- Der BMW Hydrogen 7, Pressemitteilung von BMW (13.11.2006),
www.press.bmwgroup.com/pressclub/at01.nsf
- H. Dubbel: Taschenbuch für den Maschinenbau, 20. Aufl., Berlin: Springer (2001)
- C. Eisenmenger, private Mitteilung (2008)
- J. W. Ekin: Experimental Techniques für low-temperature measurements, Oxford University Press (2006)
- L. S. Fletcher: A Review of Thermal Enhancement Techniques for Electronic Systems, Components, Hybrids, and Manufacturing Technology, IEEE Transactions on, Vol. 13 Iss. 4 (1990) 1012 - 1021
- E. Gmelin, M. Asen-Palmer, M. Reuther and R. Villar: Thermal boundary resistance of mechanical contacts between solids at sub-ambient temperatures, J. Phys. D: Appl. Phys. 32 (1999) R19-R43
- J. A. Greenwood, K. L. Johnson, and E. Matsubara: A surface roughness parameter in Hertz Contact, Wear, Vol. 100, no. 1-3 (1984) 47-57
- Z. Gurmai, A. Wijkman, V. Prodi, U. Guidoni, C. Turmes: Erklärung des Europäischen Parlaments zur Schaffung einer umweltfreundlichen Wasserstoffwirtschaft und zur Initiierung einer dritten industriellen Revolution in Europa durch eine Partnerschaft mit den engagierten Regionen und Städten, KMU und Organisationen der Zivilgesellschaft. Schriftliche Erklärung des EU Plenums (2007),
www.europarl.europa.eu/activities/plenary/writtenDecl.do?language=DE
- H. Hertz: Ueber die Beruehrung fester elastischer Koerper, Journal für die reine und angewandte Mathematik 92 (1881) 156-171
- R. B. Jacobs and C. Starr: Thermal Conductance of Metallic Contacts, Rev. Sci. Instrum. 10 (1939) 140-141

-
- G. Krainz, G. Bartlok, P. Bodner, P. Casapicola, Ch. Doeller, F. Hofmeister, E. Neubacher, A. Zieger: Development of Automotive Liquid Hydrogen Storage Systems: Advances in Cryogenic Engineering; Volume 49 A (2003)
- R. Lackner and E. Bauer, private Mitteilung (2007)
- W. A. Little: The transport of heat between dissimilar solids at low temperatures, *Can. J. Phys.* 37 (1959) 334-349
- O. V. Lounasmaa: Experimental Principles and Methods below 1 K, Academic Press, London (1974) 263 ff.
- C. V. Madhusudana: Thermal Contact Conductance, Berlin: Springer (1995)
- M. Marchetti, P. Testa, F. R. Torris: Measurement of Thermal Conductivity and Thermal Contact Resistance in Composite Materials for Space Applications, *ESA Journal* 12 (1988) 369-377
- Military Handbook: Reliability/Design Thermal Applications (MIL-HDBK-251), U.S. Department of Defense, Washington D.C. (1978) 647
- C. Neugebauer, private Mitteilung (2007)
- J. Nowotny, C.C. Sorrell, L.R. Sheppard, T. Bak: Solar-hydrogen: Environmentally safe fuel for the future, *International Journal of Hydrogen Energy* 30 (2005) 521 – 544
- L. Risegari, M. Barucci, E. Olivieri, E. Pasca, G. Ventura: Very-Low-Temperature Thermal Conductivity of Polymeric Supports for Massive Cryogenic Detectors, *Proceedings of 8th International Conference on Advanced Technology and Particle Physics* (2003)
- E. W. Roberts, *Space tribology handbook* (3rd ed.), AEA Technology PLC, ESTL (2002)
- M.C. Runyan and W.C. Jones: Thermal Conductivity of Thermally-Isolating Polymeric and Composite Structural Support Materials Between 0.3 and 4 K, Arxiv preprint arXiv:0806.1921 (2008)
- L. J. Salerno, P. Kittel and A. L. Spivak: Thermal Conductance of Pressed Copper Contacts at Liquid Helium Temperatures, *AIAA J.* 22 (1984) 1810-1816
- R. Schaellig and A. Seidel: Very low force cooling contacts for the ISO cryostat cover, *Cryogenics* 30 (1990) 173-177
- L. Schlapbach and A. Züttel: Hydrogen-storage materials for mobile applications, *Nature* 414 (2001) 353
- G. A. Slack: Thermal Conductivity of pure and Impure Silicon, Silicon Carbide, and Diamond, *J. Appl. Phys.* 35 (1964) 3460
- E. T. Swartz and R. O. Pohl: Thermal Boundary Resistance, *Rev. Mod. Phys.*, Vol. 61, No. 3 (1989) 605 - 668

- Y. R. Takeuchi, M. A. Eby, B. A. Blake, S. M. Demsky and J. T. Dickey: Influence of Oil Lubrication on Spacecraft Bearing Thermal Conductance, Proceedings of the 38th Aerospace Mechanisms Symposium, Langley Research Center (2006) 291-302.
- K. Tetzlaff: Bio-Wasserstoff als idealer Kraftstoff, Vortrag im Tagungsband „NAROSSA, 7th International Conference for Renewable Resources“ 11-12 Juni, Magdeburg (2001)
- S. M. S. Wahid and C. V. Madhusudana: Thermal contact conductance: effect of overloading and load cycling, *Int. J. Heat Mass Transfer* 46 (2003) 4139–4143
- K. Watari, K. Hirao, M. E. Brito, M. Toriyama and K. Ishizaki: Factors to Enhance Thermal Conductivity of β - Si_3N_4 Ceramics (Review), *Advances in Technology of Materials and Materials Processing*, 7[2] (2005) 191-202
- C. M. White, R. R. Steeper, A. E. Lutz: The hydrogen-fueled internal combustion engine: a technical review, *International Journal of Hydrogen Energy* 31 (2006) 1292 – 1305
- www.cerobear.de/index.php?id=34 (09/2008)
- www.dicronite.de/dicronitedl5.htm (09/2008)
- www.pro-physik.de/Phy/leadArticle.do?laid=10921 (09/2008)
- Y. Xiao, H. Sun, L. Xu, H. Feng, and H. Zhu: Thermal contact conductance between solid interfaces under low temperature and vacuum, *Rev. Sci. Instrum.* 75/ 9 (2004) 3074-3076
- M. M. Yovanovich: Thermal Constriction Resistance Between Contacting Metallic Paraboloids: Application to Instrument Bearings, *AIAA Progress in Astronautics and Aeronautics: Heat Transfer and Spacecraft Control*. Vol.24 (1971) 337–358

Appendix A: Tabellen

| Test # | \varnothing_{Kugel} mm | Bemerkungen | E_{Kugel} Pa | $E_{Flächen}$ Pa | F N | T_{A1} K | T_{A2} K | \dot{Q} mW | a_{Hertz} m | σ_{Hertz} MPa |
|--------------|-----------------------------|-------------|-------------------|---------------------|--------|---------------|---------------|-----------------|------------------|-------------------------|
| T06 | 9,525 | | 320000 | 223000 | 17,9 | 296,9 | 29,7 | 290,9 | 7,61E-05 | 1470 |
| T04 | 9,525 | | 320000 | 223000 | 71,1 | 136,3 | 30,2 | 197,8 | 1,21E-04 | 2331 |
| T02 | 9,525 | | 320000 | 223000 | 71,1 | 297,3 | 80,0 | 369,8 | 1,21E-04 | 2331 |
| T01 Wdh | 9,525 | | 320000 | 223000 | 71,1 | 296,9 | 30,3 | 469,3 | 1,21E-04 | 2331 |
| T05 | 9,525 | | 320000 | 223000 | 1,7 | 294,4 | 29,7 | 113,8 | 3,50E-05 | 676 |
| T01 Repro | 9,525 | | 320000 | 223000 | 71,1 | 297,0 | 30,1 | 433,4 | 1,21E-04 | 2331 |
| T02 Repro | 9,525 | | 320000 | 223000 | 71,1 | 297,0 | 80,0 | 383,6 | 1,21E-04 | 2331 |
| | 9,525 | | 320000 | 223000 | 71,1 | 297,0 | 80,1 | 386,4 | 1,21E-04 | 2331 |
| T10 (2) | 4,762 | | 320000 | 223000 | 17,9 | 297,1 | 30,0 | 240,8 | 6,04E-05 | 2334 |
| T05 b) | 9,525 | | 320000 | 223000 | 43,7 | 297,3 | 60,5 | 358,5 | 1,03E-04 | 1982 |
| | 9,525 | | 320000 | 223000 | 43,7 | 297,3 | 50,2 | 371,3 | 1,03E-04 | 1982 |
| | 9,525 | | 320000 | 223000 | 43,7 | 297,2 | 29,9 | 394,6 | 1,03E-04 | 1982 |
| T11(2) | 14,288 | | 320000 | 223000 | 71,1 | 296,8 | 34,1 | 588,1 | 1,38E-04 | 1778 |
| | 14,288 | | 320000 | 223000 | 71,1 | 296,9 | 40,0 | 589,0 | 1,38E-04 | 1778 |
| | 14,288 | | 320000 | 223000 | 71,1 | 296,8 | 34,5 | 603,4 | 1,38E-04 | 1778 |
| T01(2) | 9,525 | | 320000 | 223000 | 71,1 | 297,1 | 31,7 | 505,3 | 1,21E-04 | 2331 |
| | 9,525 | | 320000 | 223000 | 71,1 | 296,9 | 32,0 | 511,6 | 1,21E-04 | 2331 |
| | 9,525 | | 320000 | 223000 | 71,1 | 297,0 | 32,4 | 510,4 | 1,21E-04 | 2331 |
| | 9,525 | | 320000 | 223000 | 71,1 | 297,0 | 32,5 | 510,9 | 1,21E-04 | 2331 |
| | 9,525 | | 320000 | 223000 | 71,1 | 297,2 | 32,4 | 505,8 | 1,21E-04 | 2331 |
| | 9,525 | | 320000 | 223000 | 71,1 | 296,9 | 32,6 | 510,2 | 1,21E-04 | 2331 |
| | 9,525 | | 320000 | 223000 | 71,1 | 296,9 | 32,2 | 511,3 | 1,21E-04 | 2331 |
| T04b | 9,525 | | 320000 | 223000 | 71,1 | 297,0 | 32,6 | 514,2 | 1,21E-04 | 2331 |
| | 9,525 | | 320000 | 223000 | 71,1 | 297,3 | 32,8 | 514,9 | 1,21E-04 | 2331 |
| | 9,525 | | 320000 | 223000 | 71,1 | 297,2 | 136,2 | 366,9 | 1,21E-04 | 2331 |
| | 9,525 | | 320000 | 223000 | 71,1 | 296,8 | 86,7 | 462,6 | 1,21E-04 | 2331 |
| | 9,525 | | 320000 | 223000 | 71,1 | 297,2 | 33,2 | 528,0 | 1,21E-04 | 2331 |
| | 9,525 | | 320000 | 223000 | 71,1 | 297,3 | 136,2 | 368,9 | 1,21E-04 | 2331 |
| | 9,525 | | 320000 | 223000 | 71,1 | 296,7 | 86,7 | 462,5 | 1,21E-04 | 2331 |
| | 9,525 | | 320000 | 223000 | 71,1 | 297,0 | 33,2 | 530,5 | 1,21E-04 | 2331 |
| T05c | 9,525 | | 320000 | 223000 | 43,7 | 297,3 | 31,6 | 443,2 | 1,03E-04 | 1982 |

| Test # | \varnothing_{Kugel} mm | Bemerkungen | E_{Kugel} Pa | $E_{Flächen}$ Pa | F N | T_{A1} K | T_{A2} K | \dot{Q} mW | a_{Hertz} m | σ_{Hertz} MPa |
|--------|-----------------------------|-------------|-------------------|---------------------|--------|---------------|---------------|-----------------|------------------|-------------------------|
| | 9,525 | | 320000 | 223000 | 43,7 | 296,8 | 31,1 | 443,9 | 1,03E-04 | 1982 |
| | 9,525 | | 320000 | 223000 | 43,7 | 297,4 | 81,1 | 389,9 | 1,03E-04 | 1982 |
| | 9,525 | | 320000 | 223000 | 43,7 | 297,3 | 81,1 | 390,2 | 1,03E-04 | 1982 |
| | 9,525 | | 320000 | 223000 | 43,7 | 297,6 | 135,7 | 329,0 | 1,03E-04 | 1982 |
| | 9,525 | | 320000 | 223000 | 43,7 | 296,9 | 31,1 | 437,6 | 1,03E-04 | 1982 |
| | 9,525 | | 320000 | 223000 | 43,7 | 297,5 | 135,8 | 324,2 | 1,03E-04 | 1982 |
| | 9,525 | | 320000 | 223000 | 43,7 | 297,2 | 81,3 | 402,2 | 1,03E-04 | 1982 |
| | 9,525 | | 320000 | 223000 | 43,7 | 297,2 | 31,5 | 457,4 | 1,03E-04 | 1982 |
| T10b | 4,762 | | 320000 | 223000 | 43,7 | 297,5 | 30,1 | 332,1 | 8,15E-05 | 3146 |
| | 4,762 | | 320000 | 223000 | 43,7 | 297,9 | 30,5 | 346,4 | 8,15E-05 | 3146 |
| | 4,762 | | 320000 | 223000 | 43,7 | 297,7 | 79,8 | 300,2 | 8,15E-05 | 3146 |
| | 4,762 | | 320000 | 223000 | 43,7 | 297,7 | 133,1 | 242,4 | 8,15E-05 | 3146 |
| | 4,762 | | 320000 | 223000 | 43,7 | 297,5 | 142,9 | 227,8 | 8,15E-05 | 3146 |
| | 4,762 | | 320000 | 223000 | 43,7 | 297,6 | 28,6 | 331,5 | 8,15E-05 | 3146 |
| | 4,762 | | 320000 | 223000 | 43,7 | 297,8 | 30,4 | 334,6 | 8,15E-05 | 3146 |
| | 4,762 | | 320000 | 223000 | 43,7 | 298,0 | 79,9 | 297,4 | 8,15E-05 | 3146 |
| | 4,762 | | 320000 | 223000 | 43,7 | 297,9 | 133,2 | 249,9 | 8,15E-05 | 3146 |
| | 4,762 | | 320000 | 223000 | 43,7 | 298,0 | 30,3 | 332,0 | 8,15E-05 | 3146 |
| | 4,762 | | 320000 | 223000 | 43,7 | 297,9 | 79,8 | 300,5 | 8,15E-05 | 3146 |
| | 4,762 | | 320000 | 223000 | 43,7 | 297,8 | 133,1 | 242,4 | 8,15E-05 | 3146 |
| T21 | 14,288 | | 320000 | 223000 | 43,7 | 297,5 | 34,9 | 559,2 | 1,18E-04 | 1512 |
| | 14,288 | | 320000 | 223000 | 43,7 | 297,5 | 34,2 | 536,3 | 1,18E-04 | 1512 |
| | 14,288 | | 320000 | 223000 | 43,7 | 297,3 | 82,0 | 462,5 | 1,18E-04 | 1512 |
| | 14,288 | | 320000 | 223000 | 43,7 | 297,5 | 134,9 | 379,2 | 1,18E-04 | 1512 |
| | 14,288 | | 320000 | 223000 | 43,7 | 296,9 | 34,3 | 531,9 | 1,18E-04 | 1512 |
| | 14,288 | | 320000 | 223000 | 43,7 | 297,0 | 34,8 | 557,9 | 1,18E-04 | 1512 |
| | 14,288 | | 320000 | 223000 | 43,7 | 297,5 | 82,3 | 492,2 | 1,18E-04 | 1512 |
| | 14,288 | | 320000 | 223000 | 43,7 | 297,8 | 135,4 | 389,2 | 1,18E-04 | 1512 |
| | 14,288 | | 320000 | 223000 | 43,7 | 297,2 | 34,8 | 556,9 | 1,18E-04 | 1512 |
| | 14,288 | | 320000 | 223000 | 43,7 | 297,0 | 34,9 | 558,6 | 1,18E-04 | 1512 |
| | 14,288 | | 320000 | 223000 | 43,7 | 297,4 | 82,5 | 498,3 | 1,18E-04 | 1512 |
| | 14,288 | | 320000 | 223000 | 43,7 | 297,4 | 135,3 | 406,4 | 1,18E-04 | 1512 |
| T11c | 14,288 | | 320000 | 223000 | 17,9 | 297,1 | 31,4 | 429,5 | 8,72E-05 | 1122 |
| | 14,288 | | 320000 | 223000 | 17,9 | 297,1 | 31,0 | 409,6 | 8,72E-05 | 1122 |
| | 14,288 | | 320000 | 223000 | 17,9 | 297,2 | 80,4 | 351,1 | 8,72E-05 | 1122 |
| | 14,288 | | 320000 | 223000 | 17,9 | 297,2 | 138,6 | 274,8 | 8,72E-05 | 1122 |
| | 14,288 | | 320000 | 223000 | 17,9 | 297,2 | 138,5 | 285,3 | 8,72E-05 | 1122 |

| Test # | \varnothing_{Kugel} mm | Bemerkungen | E_{Kugel} Pa | $E_{Flächen}$ Pa | F N | T_{A1} K | T_{A2} K | \dot{Q} mW | a_{Hertz} m | σ_{Hertz} MPa |
|------------|-----------------------------|-------------|-------------------|---------------------|----------|---------------|---------------|-----------------|------------------|-------------------------|
| | 14,288 | | 320000 | 223000 | 17,9 | 297,1 | 80,9 | 382,8 | 8,72E-05 | 1122 |
| | 14,288 | | 320000 | 223000 | 17,9 | 297,1 | 31,3 | 414,1 | 8,72E-05 | 1122 |
| T11d | 14,288 | | 320000 | 223000 | 71,1 | 297,6 | 33,8 | 573,8 | 1,38E-04 | 1779 |
| | 14,288 | | 320000 | 223000 | 71,1 | 297,1 | 83,1 | 538,7 | 1,38E-04 | 1779 |
| | 14,288 | | 320000 | 223000 | 71,1 | 297,3 | 140,4 | 442,0 | 1,38E-04 | 1779 |
| | 14,288 | | 320000 | 223000 | 71,1 | 297,2 | 34,9 | 603,0 | 1,38E-04 | 1779 |
| | 14,288 | | 320000 | 223000 | 71,1 | 297,3 | 34,5 | 593,0 | 1,38E-04 | 1779 |
| | 14,288 | | 320000 | 223000 | 71,1 | 297,4 | 83,1 | 540,4 | 1,38E-04 | 1779 |
| | 14,288 | | 320000 | 223000 | 71,1 | 297,3 | 140,4 | 414,8 | 1,38E-04 | 1779 |
| T11d II | 14,288 | | 320000 | 223000 | 71,1 | 297,0 | 34,5 | 585,9 | 1,38E-04 | 1779 |
| | 14,288 | | 320000 | 223000 | 71,1 | 108,1 | 30,2 | 104,9 | 1,38E-04 | 1779 |
| T11c II | 14,288 | | 320000 | 223000 | 19,2 | 96,5 | 15,0 | 59,7 | 8,93E-05 | 1149 |
| | 14,288 | | 320000 | 223000 | 19,2 | 94,2 | 14,9 | 56,2 | 8,93E-05 | 1149 |
| | 14,288 | | 320000 | 223000 | 19,2 | 127,3 | 16,7 | 97,4 | 8,93E-05 | 1149 |
| | 14,288 | | 320000 | 223000 | 19,2 | 300,1 | 31,5 | 416,7 | 8,93E-05 | 1149 |

Tabelle A-1 Wärmestrommessungen an Siliziumnitrid-Kugeln

| Test # | \varnothing_{Kugel} mm | F N | Kugel- material | T_{A1} K | T_{A2} K | \dot{Q}_{Messg} mW | \dot{Q}_{Ansys} mW | Fehler | C |
|--------------|-----------------------------|----------|--------------------|---------------|---------------|-------------------------|-------------------------|--------|------|
| T06 | 9,525 | 17,9 | Si3N4 | 297 | 30 | 290,9 | 327 | 12,4 | 3510 |
| T02 | 9,525 | 71,1 | Si3N4 | 297 | 80 | 369,8 | 461 | 24,8 | 4983 |
| T01 Wdh | 9,525 | 71,1 | Si3N4 | 297 | 30 | 469,3 | 518 | 10,4 | 5560 |
| T07 | 9,525 | 71,1 | AISI440C | 297 | 30 | 360,3 | 385 | 6,8 | 5569 |
| T20 | 9,525 | 71,1 | Si3N4 | 297 | 30 | 447,4 | 518 | 15,8 | 5566 |
| T01 Repro | 9,525 | 71,1 | Si3N4 | 297 | 30 | 433,4 | 518 | 19,5 | 5564 |
| T02 Repro | 9,525 | 71,1 | Si3N4 | 297 | 80 | 383,6 | 461 | 20,3 | 4972 |
| | 9,525 | 71,1 | Si3N4 | 297 | 80 | 386,4 | 461 | 19,4 | 4972 |
| T10 (2) | 4,762 | 17,9 | Si3N4 | 297 | 30 | 240,8 | 259 | 7,5 | 2788 |
| T05 b) | 9,525 | 43,7 | Si3N4 | 297 | 60 | 358,5 | 416 | 16,0 | 4458 |
| | 9,525 | 43,7 | Si3N4 | 297 | 50 | 371,3 | 426 | 14,7 | 4561 |
| | 9,525 | 43,7 | Si3N4 | 297 | 30 | 394,6 | 440 | 11,5 | 4740 |
| T08 | 9,525 | 71,1 | AISI440C | 297 | 30 | 371,1 | 385 | 3,7 | 5566 |

| Test # | \varnothing_{Kugel} mm | F N | Kugel- material | T_{A1} K | T_{A2} K | \dot{Q}_{Messg} mW | \dot{Q}_{Ansys} mW | Fehler | C |
|--------|-----------------------------|--------|--------------------|---------------|---------------|-------------------------|-------------------------|--------|------|
| | 9,525 | 71,1 | AISI440C | 297 | 60 | 350,0 | 365 | 4,3 | 5242 |
| | 9,525 | 71,1 | AISI440C | 297 | 80 | 333,5 | 346 | 3,7 | 4978 |
| T09 | 9,525 | 71,1 | AISI440C | 297 | 30 | 371,4 | 385 | 3,7 | 5566 |
| | 9,525 | 71,1 | AISI440C | 297 | 30 | 364,3 | 385 | 5,7 | 5569 |
| T18 | 9,525 | 71,1 | Si3N4 | 297 | 33 | 475,5 | 518 | 8,9 | 5536 |
| T11(2) | 14,29 | 71 | Si3N4 | 297 | 34 | 588,1 | 591 | 0,5 | 6318 |
| | 14,29 | 71 | Si3N4 | 297 | 40 | 589,0 | 586 | -0,5 | 6250 |
| | 14,29 | 71 | Si3N4 | 297 | 35 | 603,4 | 591 | -2,1 | 6314 |
| T01(2) | 9,525 | 71,1 | Si3N4 | 297 | 32 | 505,3 | 517 | 2,3 | 5552 |
| | 9,525 | 71,1 | Si3N4 | 297 | 32 | 511,6 | 517 | 1,1 | 5544 |
| | 9,525 | 71,1 | Si3N4 | 297 | 32 | 510,4 | 517 | 1,3 | 5543 |
| | 9,525 | 71,1 | Si3N4 | 297 | 32 | 510,9 | 517 | 1,2 | 5540 |
| | 9,525 | 71,1 | Si3N4 | 297 | 32 | 505,8 | 517 | 2,2 | 5549 |
| | 9,525 | 71,1 | Si3N4 | 297 | 33 | 510,2 | 517 | 1,3 | 5537 |
| | 9,525 | 71,1 | Si3N4 | 297 | 32 | 511,3 | 517 | 1,1 | 5541 |
| T04b | 9,525 | 71,1 | Si3N4 | 297 | 33 | 514,2 | 516 | 0,4 | 5541 |
| | 9,525 | 71,1 | Si3N4 | 297 | 33 | 514,9 | 516 | 0,2 | 5547 |
| | 9,525 | 71,1 | Si3N4 | 297 | 136 | 366,9 | 363 | -1,1 | 4050 |
| | 9,525 | 71,1 | Si3N4 | 297 | 87 | 462,6 | 451 | -2,6 | 4872 |
| | 9,525 | 71,1 | Si3N4 | 297 | 33 | 528,0 | 516 | -2,3 | 5541 |
| | 9,525 | 71,1 | Si3N4 | 297 | 136 | 368,9 | 363 | -1,6 | 4052 |
| | 9,525 | 71,1 | Si3N4 | 297 | 87 | 462,5 | 451 | -2,6 | 4868 |
| | 9,525 | 71,1 | Si3N4 | 297 | 33 | 530,5 | 516 | -2,7 | 5535 |
| T05c | 9,525 | 43,7 | Si3N4 | 297 | 32 | 443,2 | 440 | -0,7 | 4729 |
| | 9,525 | 43,7 | Si3N4 | 297 | 31 | 443,9 | 440 | -0,9 | 4718 |
| | 9,525 | 43,7 | Si3N4 | 297 | 81 | 389,9 | 391 | 0,2 | 4226 |
| | 9,525 | 43,7 | Si3N4 | 297 | 81 | 390,2 | 391 | 0,1 | 4224 |
| | 9,525 | 43,7 | Si3N4 | 298 | 136 | 329,0 | 309 | -6,2 | 3462 |
| | 9,525 | 43,7 | Si3N4 | 297 | 31 | 437,6 | 440 | 0,5 | 4722 |
| | 9,525 | 43,7 | Si3N4 | 297 | 136 | 324,2 | 309 | -4,8 | 3458 |
| | 9,525 | 43,7 | Si3N4 | 297 | 81 | 402,2 | 391 | -2,8 | 4218 |
| | 9,525 | 43,7 | Si3N4 | 297 | 32 | 457,4 | 440 | -3,8 | 4725 |
| T10b | 4,762 | 43,7 | Si3N4 | 298 | 30 | 332,1 | 349 | 5,1 | 3767 |
| | 4,762 | 43,7 | Si3N4 | 298 | 31 | 346,4 | 349 | 0,7 | 3772 |
| | 4,762 | 43,7 | Si3N4 | 298 | 80 | 300,2 | 310 | 3,3 | 3372 |
| | 4,762 | 43,7 | Si3N4 | 298 | 133 | 242,4 | 249 | 2,7 | 2782 |
| | 4,762 | 43,7 | Si3N4 | 297 | 143 | 227,8 | 236 | 3,6 | 2652 |

| Test # | \varnothing_{Kugel} mm | F N | Kugel- material | T_{A1} K | T_{A2} K | \dot{Q}_{Messg} mW | \dot{Q}_{Ansys} mW | Fehler | C |
|---------|-----------------------------|--------|--------------------|---------------|---------------|-------------------------|-------------------------|--------|------|
| | 4,762 | 43,7 | Si3N4 | 298 | 29 | 331,5 | 349 | 5,3 | 3779 |
| | 4,762 | 43,7 | Si3N4 | 298 | 30 | 334,6 | 349 | 4,3 | 3770 |
| | 4,762 | 43,7 | Si3N4 | 298 | 80 | 297,4 | 310 | 4,2 | 3379 |
| | 4,762 | 43,7 | Si3N4 | 298 | 133 | 249,9 | 249 | -0,4 | 2786 |
| | 4,762 | 43,7 | Si3N4 | 298 | 30 | 332,0 | 349 | 5,1 | 3777 |
| | 4,762 | 43,7 | Si3N4 | 298 | 80 | 300,5 | 310 | 3,2 | 3378 |
| | 4,762 | 43,7 | Si3N4 | 298 | 133 | 242,4 | 249 | 2,7 | 2784 |
| T21 | 14,29 | 43,7 | Si3N4 | 297 | 35 | 559,2 | 502 | -10,2 | 5387 |
| | 14,29 | 43,7 | Si3N4 | 297 | 34 | 536,3 | 502 | -6,4 | 5393 |
| | 14,29 | 43,7 | Si3N4 | 297 | 82 | 462,5 | 447 | -3,3 | 4823 |
| | 14,29 | 43,7 | Si3N4 | 298 | 135 | 379,2 | 358 | -5,6 | 3975 |
| | 14,29 | 43,7 | Si3N4 | 297 | 34 | 531,9 | 502 | -5,6 | 5375 |
| | 14,29 | 43,7 | Si3N4 | 297 | 35 | 557,9 | 502 | -10,0 | 5371 |
| | 14,29 | 43,7 | Si3N4 | 298 | 82 | 492,2 | 447 | -9,2 | 4825 |
| | 14,29 | 43,7 | Si3N4 | 298 | 135 | 389,2 | 358 | -8,0 | 3975 |
| | 14,29 | 43,7 | Si3N4 | 297 | 35 | 556,9 | 502 | -9,9 | 5380 |
| | 14,29 | 43,7 | Si3N4 | 297 | 35 | 558,6 | 502 | -10,1 | 5371 |
| | 14,29 | 43,7 | Si3N4 | 297 | 83 | 498,3 | 447 | -10,3 | 4817 |
| | 14,29 | 43,7 | Si3N4 | 297 | 135 | 406,4 | 358 | -11,9 | 3965 |
| T11c | 14,29 | 17,9 | Si3N4 | 297 | 31 | 429,5 | 384 | -10,6 | 4011 |
| | 14,29 | 17,9 | Si3N4 | 297 | 31 | 409,6 | 384 | -6,2 | 4014 |
| | 14,29 | 17,9 | Si3N4 | 297 | 80 | 351,1 | 335 | -4,6 | 3590 |
| | 14,29 | 17,9 | Si3N4 | 297 | 139 | 274,8 | 260 | -5,4 | 2891 |
| | 14,29 | 17,9 | Si3N4 | 297 | 138 | 285,3 | 260 | -8,9 | 2893 |
| | 14,29 | 17,9 | Si3N4 | 297 | 81 | 382,8 | 335 | -12,5 | 3584 |
| | 14,29 | 17,9 | Si3N4 | 297 | 31 | 414,1 | 384 | -7,3 | 4012 |
| T11d | 14,29 | 71,1 | Si3N4 | 298 | 34 | 573,8 | 593 | 3,3 | 6350 |
| | 14,29 | 71,1 | Si3N4 | 297 | 83 | 538,7 | 524 | -2,7 | 5644 |
| | 14,29 | 71,1 | Si3N4 | 297 | 140 | 442,0 | 408 | -7,7 | 4548 |
| | 14,29 | 71,1 | Si3N4 | 297 | 35 | 603,0 | 593 | -1,7 | 6324 |
| | 14,29 | 71,1 | Si3N4 | 297 | 35 | 593,0 | 593 | 0,0 | 6331 |
| | 14,29 | 71,1 | Si3N4 | 297 | 83 | 540,4 | 524 | -3,0 | 5657 |
| | 14,29 | 71,1 | Si3N4 | 297 | 140 | 414,8 | 408 | -1,6 | 4549 |
| T11d II | 14,29 | 71,1 | Si3N4 | 297 | 34 | 585,9 | 593 | 1,2 | 6322 |
| | 14,29 | 71,1 | Si3N4 | 108 | 30 | 104,9 | 126 | 20,2 | 1048 |
| T11c II | 14,29 | 19 | Si3N4 | 97 | 15 | 59,7 | 71 | 18,8 | 614 |
| | 14,29 | 19 | Si3N4 | 94 | 15 | 56,2 | 68 | 21,0 | 589 |

| Test # | \varnothing_{Kugel} mm | F N | Kugel- material | T_{A1} K | T_{A2} K | \dot{Q}_{Messg} mW | \dot{Q}_{Ansys} mW | Fehler | C |
|---------------|--|----------------|----------------------------|----------------------------------|----------------------------------|--|--|---------------|----------|
| | 14,29 | 19 | Si3N4 | 127 | 17 | 97,4 | 112 | 14,9 | 987 |
| | 14,29 | 19 | Si3N4 | 300 | 31 | 416,7 | 384 | -7,8 | 4181 |

Tabelle A-2 Ergebnisse der ANSYS-Simulationen für Messungen mit Kugeln

Appendix B1: Inputfile 3D-Modell ANSYS (Beispiel)

```

!-----
! ANSYS Input File, created by Harald Schulz, TU Wien
!-----
FINI                ! Exits normally from a processor
/CLEAR,START       ! Clears the database
/CONFIG,NRES,10000 ! maximum number of result sets (substeps) allowed in the result
file. Defaults to 1000
!-----VARIABLES--(SI units)-----
! _____|
/FILNAM,3Dnouveau ! eigtl. /filename
! _____|
c_stef=5.67051e-8   ! Stefan-Boltzmann constant
c_pi=3.141592654   ! PI
! _____|
t_upper=297.
t_lower=34.
t_unif=220.
! _____|
/TITEL,Sphere 3Dnouveau 2008
/PREP7
FINI
! _____|
g_mult=1           !determines how fine the line division will be
! _____|
g_Kontaktradius=1.38172e-4
g_Kugelradius=14.288e-3/2
g_hilfs=g_Kugelradius*g_Kugelradius-g_Kontaktradius*g_Kontaktradius
g_Eindringtiefe=g_Kugelradius-sqrt(g_hilfs)

g_1=-g_Kugelradius+g_Eindringtiefe-3.e-3
g_2=-g_Kugelradius+g_Eindringtiefe
g_3=0
g_4=g_Kugelradius-g_Eindringtiefe
g_5=g_Kugelradius-g_Eindringtiefe+3.e-3
!=====
/PREP7
!-----MATERIALS-----
MPTEMP,,10,20,30,40,50,60
MPTEMP,,70,80,90,100,110,120
MPTEMP,,130,140,150,160,170,180
MPTEMP,,190,200,210,220,230,240
MPTEMP,,250,260,270,280,290,300
!----- MATERIAL 1 = 304 stainless steel [AAE - Cryocomp]-----
MPDATA,KXX,1,1,0.77,1.95,3.3,4.7,5.8,6.8
MPDATA,KXX,1,,7.6,8.26,8.86,9.4,9.9,10.4
MPDATA,KXX,1,,10.8,11.2,11.5,11.9,12.2,12.5
MPDATA,KXX,1,,12.7,13,13.2,13.5,13.7,13.9
MPDATA,KXX,1,,14.1,14.3,14.4,14.6,14.8,14.9
!----- MATERIAL 6 = Si3N4-----

```

```

MP,KXX,6,30
!-----ELEMENTS-----
!ET,1,SOLID90
!ET,1,SOLID70
ET,1,SOLID87
!-----
TUNIF,t_unif          !assign uniform temp to all nodes
!-----GEOMETRY-----
SPH4,,,g_Kugelradius
wpro,0,90,0
CYL4,,,g_Kontaktradius,,,-(g_Kugelradius+1.e-3)
CYL4,,,g_Kontaktradius,,, (g_Kugelradius+1.e-3)

VSBV,1,2
VSBV,4,3

CYL4,,,g_Kontaktradius,,, -sqrt(g_hilfs)
CYL4,,,g_Kontaktradius,,, sqrt(g_hilfs)

VADD,ALL

BLOCK,-20e-3,0,-20e-3,20e-3,-20e-3,20e-3,
VSBV,4,1
BLOCK,-20e-3,20e-3,-20e-3,20e-3,-20e-3,0,
VSBV,2,1
BLOCK,-20e-3,20e-3,-20e-3,0,-20e-3,20e-3,
VSBV,3,1
wpro,0,-90,0

wpro,0,90,0
CYL4,,,5e-3,0,90,3e-3          !-----Obere Fläche-----
VGEN,,1,,, -sqrt(g_hilfs),,,,1
wpro,0,-90,0

VGLUE,ALL
!-----MESH-----
LSEL,S,,,11
LSEL,A,,,12
LESIZE,ALL,,,5*g_mult          !Kontaktfläche

LSEL,S,,,13
LESIZE,ALL,,,8*g_mult          !Kontaktfläche Kreisbogen

LSEL,S,,,23
LSEL,A,,,20
LESIZE,ALL,,,28*g_mult,0.01    !Oberfläche

LSEL,S,,,14
LESIZE,ALL,,,23*g_mult,100     !Achse

LSEL,S,,,16

```

```

LSEL,A,,,18
LESIZE,ALL,,,8*g_mult           !Projektion Aequator

LSEL,S,,,2
LESIZE,ALL,,,12*g_mult         !Aequator

TYPE,1
MAT,6
VSEL,S,,,3
VMESH,ALL

LSEL,S,,,10
LESIZE,ALL,,,20*g_mult,100     !Platte Achse
LSEL,S,,,17
LSEL,A,,,15
LESIZE,ALL,,,20*g_mult,0.01    !Platte Kanten

LSEL,S,,,6
LSEL,A,,,7
LESIZE,ALL,,,6*g_mult         !Platte Unterkanten

LSEL,S,,,8
LSEL,A,,,9
LESIZE,ALL,,,3*g_mult         !Platte Außenkanten

LSEL,S,,,4
LSEL,A,,,5
LESIZE,ALL,,,8*g_mult         !Platte Kreisbögen

TYPE,1
MAT,1
VSEL,S,,,4
VMESH,ALL
ALLSEL,ALL
!-----create axisymmetric elements-----
ALLSEL,ALL
*GET,g_nodenummer,NODE,0,NUM,MAX

NSYM,X,g_nodenummer,ALL
ESYM,,g_nodenummer,ALL
NSYM,Y,2*g_nodenummer,ALL
ESYM,,2*g_nodenummer,ALL
NSYM,Z,4*g_nodenummer,ALL
ESYM,,4*g_nodenummer,ALL

ALLSEL,ALL
EPlot
NUMMRG,NODE,1e-9, ,LOW
!-----Boundary conditions-----
NSEL,S,LOC,Y,g_1
D,ALL,TEMP,t_upper

```

```
NSEL,S,LOC,Y,g_5
D,ALL,TEMP,t_lower
```

```
ALLSEL,ALL
FINI
```

```
!=====
/SOLU
ANTYPE,STATIC      ! analysis type
AUTOTS,ON          ! use automatic time stepping or load stepping
KBC,1              ! stepped or ramped loading within a load step, 1=Loads are step changed
TIME,1             ! Sets the time for a load step, Time at the end of the load step
NSUBST,10,10,5    ! number of substeps to be taken this load step, size of the first sub-
                  ! step, max substeps, min substeps
SOLVE
FINI
```

```
!=====
/POST1
SET,LAST           ! data set to be read from the results file
PLNS,temp          ! eigtl plnsol: display results as continuous contours.
NSEL,S,LOC,Y,g_1
FSUM
```

Appendix B2: Inputfile 2D-Modell ANSYS (Beispiel)

```

!-----
! ANSYS Input File, created by Harald Schulz, TU Wien
!-----
FINI                ! Exits normally from a processor
/CLEAR,START        ! Clears the database
/CONFIG,NRES,100000 ! maximum number of result sets (substeps) allowed in the result
file. Defaults to 1000
!-----VARIABLES--(SI units)-----
! _____|
/FILNAM,2D_axi      ! eigtl. /filename
! _____|
c_stef=5.67051e-8    !Stefan-Boltzmann constant
c_pi=3.141592654     !PI
! _____|
t_upper=297.6
t_lower=33.8
t_unif=220.
! _____|
/PREP7
/titel,Modell 2D Axialsymmetrisch 2008
FINI
!=====
/PREP7
!-----MATERIALS-----
MPTEMP,,10,20,30,40,50,60
MPTEMP,,70,80,90,100,110,120
MPTEMP,,130,140,150,160,170,180
MPTEMP,,190,200,210,220,230,240
MPTEMP,,250,260,270,280,290,300
!----- MATERIAL 1 = 304 stainless steel [AAE - Cryocomp]-----
MPDATA,KXX,1,1,0.77,1.95,3.3,4.7,5.8,6.8
MPDATA,KXX,1,,7.6,8.26,8.86,9.4,9.9,10.4
MPDATA,KXX,1,,10.8,11.2,11.5,11.9,12.2,12.5
MPDATA,KXX,1,,12.7,13,13.2,13.5,13.7,13.9
MPDATA,KXX,1,,14.1,14.3,14.4,14.6,14.8,14.9
!----- MATERIAL 6 = Si3N4-----
MP,KXX,6,30
!-----ELEMENTS-----
ET,1,PLANE75
!-----
TUNIF,t_unif        !assign uniform temp to all nodes
!-----GEOMETRY-----
g_Kontaktradius=1.38200e-4
g_Kugelradius=7.144e-3
      g_hilfs=g_Kugelradius*g_Kugelradius-g_Kontaktradius*g_Kontaktradius
g_Eindringtiefe=g_Kugelradius-sqrt(g_hilfs)

K,1000,0,0,0
K,1001,g_Kontaktradius,0,0

```



```

K,1002,5e-3,0,0
K,1003,5e-3,3e-3,0
K,1004,0,3e-3,0
K,1005,0,g_Kontaktradius,0

K,2000,0,-(g_Kugelradius-g_Eindringtiefe),0
K,2001,g_Kugelradius,-(g_Kugelradius-g_Eindringtiefe),0
K,2002,0,-g_Kontaktradius,0
K,2003,0,-2*g_Kugelradius+2*g_Eindringtiefe+g_Kontaktradius,0

K,3000,0,-2*g_Kugelradius+2*g_Eindringtiefe,0
K,3001,g_Kontaktradius,-2*g_Kugelradius+2*g_Eindringtiefe,0
K,3002,10.5e-3,-2*g_Kugelradius+2*g_Eindringtiefe,0
K,3003,10.5e-3,-2*g_Kugelradius+2*g_Eindringtiefe-3e-3,0
K,3004,0,-2*g_Kugelradius+2*g_Eindringtiefe-3e-3,0
K,3005,0,-2*g_Kugelradius+2*g_Eindringtiefe-g_Kontaktradius,0

LSTR,1000,1001    !L1
LSTR,1001,1002
LSTR,1002,1003
LSTR,1003,1004
LSTR,1004,1005
LSTR,1005,1000
LARC,1001,1005,1000,g_Kontaktradius    !L7

LSTR,1000,2002
LSTR,2002,2000
LSTR,2000,2003
LSTR,2003,3000
LARC,1001,3001,2000,-g_Kugelradius
LARC,1001,2002,1000,g_Kontaktradius
LARC,2003,3001,3000,g_Kontaktradius

LSTR,3000,3001
LSTR,3001,3002
LSTR,3002,3003
LSTR,3003,3004
LSTR,3004,3005
LSTR,3005,3000
LARC,3001,3005,3000,g_Kontaktradius

AL,5,7,2,3,4
AL,1,7,6

AL,8,1,13
AL,13,9,10,14,12
AL,11,14,15

AL,20,21,15
AL,16,17,18,19,21

```

```

!-----MESH-----
LSEL,S,,,1
LSEL,A,,,6
LSEL,A,,,7
LSEL,A,,,8
LSEL,A,,,13

LSEL,A,,,11
LSEL,A,,,14
LSEL,A,,,15
LSEL,A,,,20
LSEL,A,,,21

LESIZE,ALL,,12

LSEL,S,,12      !Kugeloberfläche
LESIZE,ALL,,100,-50

LSEL,S,,9       !Achse
LESIZE,ALL,,36,30
LSEL,S,,10
LESIZE,ALL,,36,0.0333

LSEL,S,,5       !Achse PLatten
LSEL,A,,,19
LESIZE,ALL,,24,0.0333

LSEL,S,,2       !Fläche PLatten
LSEL,A,,,16
LESIZE,ALL,,48,40

TYPE,1
MAT,1
ASEL,S,,1
ASEL,A,,,2
ASEL,A,,,6
ASEL,A,,,7
AMESH,ALL

TYPE,1
MAT,6
ASEL,S,,3
ASEL,A,,,4
ASEL,A,,,5
AMESH,ALL
!-----Boundary conditions-----
LSEL,S,LINE,,4
NSLL,S,1
D,ALL,TEMP,t_upper

LSEL,S,LINE,,18

```

```
NSLL,S,1
D,ALL,TEMP,t_lower
```

```
ALLSEL,ALL
FINI
```

```
=====
/SOLU
ANTYPE,STATIC      ! analysis type
AUTOTS,ON          ! use automatic time stepping or load stepping
KBC,1              ! stepped or ramped loading within a load step, 1=Loads are step changed
TIME,1             ! Sets the time for a load step, Time at the end of the load step
NSUBST,10,10,5     ! number of substeps to be taken this load step, size of the first sub-
step, max substeps, min substeps
SOLVE
FINI
```

```
=====
/POST1
SET,LAST           ! data set to be read from the results file
PLNS,temp          ! eigtl plnsol: display results as continuous contours.
LSEL,S,LINE,,4
NSLL,S,1
FSUM
```