

**Untersuchungen von transienten mechanischen Störungen
in intern gekühlten Supraleiterkabeln**

R. Hertle

IPP 2/324

Januar 1994



MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR PLASMAPHYSIK

85748 GARCHING BEI MÜNCHEN

**MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR PLASMAPHYSIK
GARCHING BEI MÜNCHEN**

Untersuchungen von transienten mechanischen Störungen in intern
gekühlten Supraleiterkabeln

Diplomarbeit

**Untersuchungen von transienten mechanischen Störungen
in intern gekühlten Supraleiterkabeln**

Max-Planck-Institut für Plasmaphysik
R. Hertle
Boltzstraße 2
85748 Garching bei München

IPP 2/324

Januar 1994

vorgelegt am
20. Januar 1994

an der

Technischen Universität
München

*Die nachstehende Arbeit wurde im Rahmen des Vertrages zwischen dem
Max-Planck-Institut für Plasmaphysik und der Europäischen Atomgemeinschaft über die
Zusammenarbeit auf dem Gebiete der Plasmaphysik durchgeführt*

Untersuchungen von transienten mechanischen Störungen in intern gekühlten
Supraleiterkabeln

Inhalt

1. Einleitung	
Untersuchungen von transienten mechanischen Störungen in intern gekühlten Supraleiterkabeln	3
1.2 Ziel der Arbeit	3
2. Versuchsanordnung	
2.1 Prüfvorrichtung	5
2.2 Kabelproben	7
2.3 Meßtechnik	8
2.3.1 Weg- und Kraftaufnehmer	8
2.3.2 Schallemissionsmessung	10
Diplomarbeit	
von	
Rainer Hertle	
3. Vergleichsrechnung mit 2D-FEM-Programmen	
3.1 Ziel der Rechnung	15
3.2 Das ADINA-Programm	16
3.3 Verifikation der FEM-Rechnung	17
3.4 Anpassung der Parameter	20
3.5 Das ANSYS-Programm	23
3.6 Anpassung der Materialparameter an Meßkurve	25
3.7 Belastung durch Lorentzkräfte	28
3.8 Resultate der Vergleichsrechnung	29
vorgelegt am	
20. Januar 1994	
4. Versuchsdurchführung	
4.1 Gemessene Kabel und Definition des Meßnullpunktes	31
4.2 Messung bei $T = 300\text{ K}$	31
4.3 Messung bei $T = 77\text{ K}$	34
an der	
5. Auswertung und Interpretation der Meßergebnisse	
5.1 Kraft-Weg-Hysteresis-Kurven	36
5.2 Akustische Emissionssignale	41
5.2.1 Normierung der Energie der AE-Signale	41
5.2.2 Anzahl der aufgezeichneten Punkte	42
5.2.3 Energie und Verteilung der Signale	43
5.3 Vorschläge zu weitergehenden Untersuchungen	43

Untersuchungen von transienten mechanischen Störungen in intern gekühlten Supraleiterkabeln

Inhalt

1. Einleitung	
1.1 Motivation	3
1.2 Ziel der Arbeit	3
2. Versuchsanordnung	
2.1 Preßvorrichtung	5
2.2 Kabelproben	7
2.3 Meßtechnik	8
2.3.1 Weg- und Kraftaufnehmer	8
2.3.2 Schallemissionsmessung	10
3. Vergleichsrechnung mit 2D-FEM-Programmen	
3.1 Ziel der Rechnung	15
3.2 Das ADINA-Programm	16
3.3 Verifikation der FEM-Rechnung	17
3.4 Anpassung der Parameter an erste Belastungskurve	20
3.5 Das ANSYS-Programm	23
3.6 Anpassung der Materialparameter an Meßkurve	25
3.7 Belastung durch Lorentzkräfte	28
3.8 Resultate der Vergleichsrechnung	29
4. Versuchsdurchführung	
4.1 Gemessene Kabel und Definition des Meßnullpunktes	31
4.2 Messung bei $T = 300\text{ K}$	31
4.3 Messung bei $T = 77\text{ K}$	34
5. Auswertung und Interpretation der Meßergebnisse	
5.1 Kraft-Weg-Hysterese-Kurven	36
5.2 Akustische Emissionssignale	41
5.2.1 Normierung der Energie der SE-Signale	41
5.2.2 Anzahl der aufgezeichneten Bursts	42
5.2.3 Energie und Verteilung der Signale	43
5.3 Vorschläge zu weitergehenden Untersuchungen	48

6. Zusammenfassung	50
7. Danksagung	52
Quellenverzeichnis	53
Anhang A1	54
Anhang A2	57
Anhang A3	58
Anhang B1	59
Anhang B2	61
Anhang B3	65
Anhang B4	67
Anhang B5	70
Anhang C	73
Anhang D1	74
Anhang D2	75

1. Einleitung

1.1 Motivation

Im Hinblick auf eine Sicherung des stetig zunehmenden Weltenergiebedarfs wird derzeit in großen Projekten zu zeigen versucht, daß das Prinzip der kontrollierten Kernfusion zur Energiegewinnung eingesetzt werden kann. Das Ziel einer Fachrichtung der Forschungsarbeiten besteht zur Zeit vor allem darin, Plasmen zu erzeugen, die genügend hohe Dichte und Temperatur besitzen und ausreichend gut mit magnetischen Feldern eingeschlossen sind, um den Betrieb eines Fusionsreaktors zu ermöglichen. Weiter gilt es, die erforderliche anspruchsvolle Technik sowie Materialien zu entwickeln und ihre Verlässlichkeit in der Praxis unter Beweis zu stellen.

In diesem Zusammenhang laufen derzeit am Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, kurz IPP, die Planungen für das Projekt W7-X, das auf dem Einschlußprinzip des modularen Stellarators begründet ist und als nächster Schritt nach dem bestehenden Stellaratorexperiment W7-AS in Garching zu sehen ist. "The construction of WENDELSTEIN 7-AS was accompanied by continuing intensive work on numerical and theoretical stellarator studies. The further optimized stellarator experiment now being planned, WENDELSTEIN 7-X, should thus succeed in demonstrating that the new stellarator concept is suitable for a reactor."^{1/}

Zur Erzeugung der benötigten starken Magnetfelder sollen, nicht nur beim W7-X, die Spulen in Zukunft aus supraleitenden Kabeln gewickelt werden. Ein bestimmter Typ eines solchen Kabels ist Gegenstand dieser Arbeit.

Die Wahlfachvorlesungen "Einführung in die kontrollierte Kernfusion" und "Supraleitung" weckten das Interesse an diesem Themenkomplex, sowie eine in diesem Zusammenhang vom Institut für Plasmaphysik ausgeschriebene Diplomarbeit. Dabei war weiter sehr faszinierend, selbst einen kleinen Beitrag zur Kernfusionsforschung zu leisten.

1.2 Ziel der Arbeit

Eine der Hauptursachen eines vorzeitigen Verlusts der Supraleitfähigkeit von Kabeln in Supraleiter-Magneten sind durch Lorentzkräfte verursachte mechanische Störungen wie Reibungsvorgänge, Risse, Sprünge und Verformungen, die sowohl den Leiter als auch Strukturmaterialien und Isolatoren betreffen können. Solche Störungen erzeugen Wärme, die in vielen Fällen ausreicht, den Supraleiter wegen der bei tiefen Temperaturen extrem niedrigen Wärmekapazitäten in die Normalleitung zu treiben. Es ist zwar möglich, die Grenze abzuschätzen, bis zu welcher Störenergie ein Supraleiter stabil ist, aber es ist bisher für intern gekühlte CIC-Leiter (cable in conduit) nicht möglich, die Größe solcher Störungen vor einem Spulentest zu bestimmen.

Basierend auf einigen am IPP durchgeführten theoretischen Überlegungen^{2/} soll im Rahmen der Diplomarbeit eine Methode entwickelt werden, mit Hilfe derer man in der Lage ist, die beim Hochfahren eines aus einem CIC-Leiter aufgebauten Magneten die im Kabel freiwerdende Reibungs- und Verformungsenergie durch einen einfachen Versuch an einem Kabelstück schon vorher zu bestimmen.

So sollen an kurzen Leiterstücken bei Raum- und LN₂-Temperatur Spannungs-Dehnungs-Hysteresiskurven bei transversaler Kompression aufgenommen werden. Weiterhin sind die Zahl bzw. Rate und Stärke einzelner Reibungs- bzw. Verformungsereignisse durch

2. Versuchsanordnung

2.1 Preßvorrichtung

Am IPP war bereits eine einfache mechanische Meßeinrichtung für die Kompressionsversuche vorhanden^{3/}. Es galt diese in Betrieb zu setzen, zu kalibrieren und dabei kleine Veränderungen vorzunehmen. Abbildung 2.1 zeigt die gesamte Versuchsanordnung:

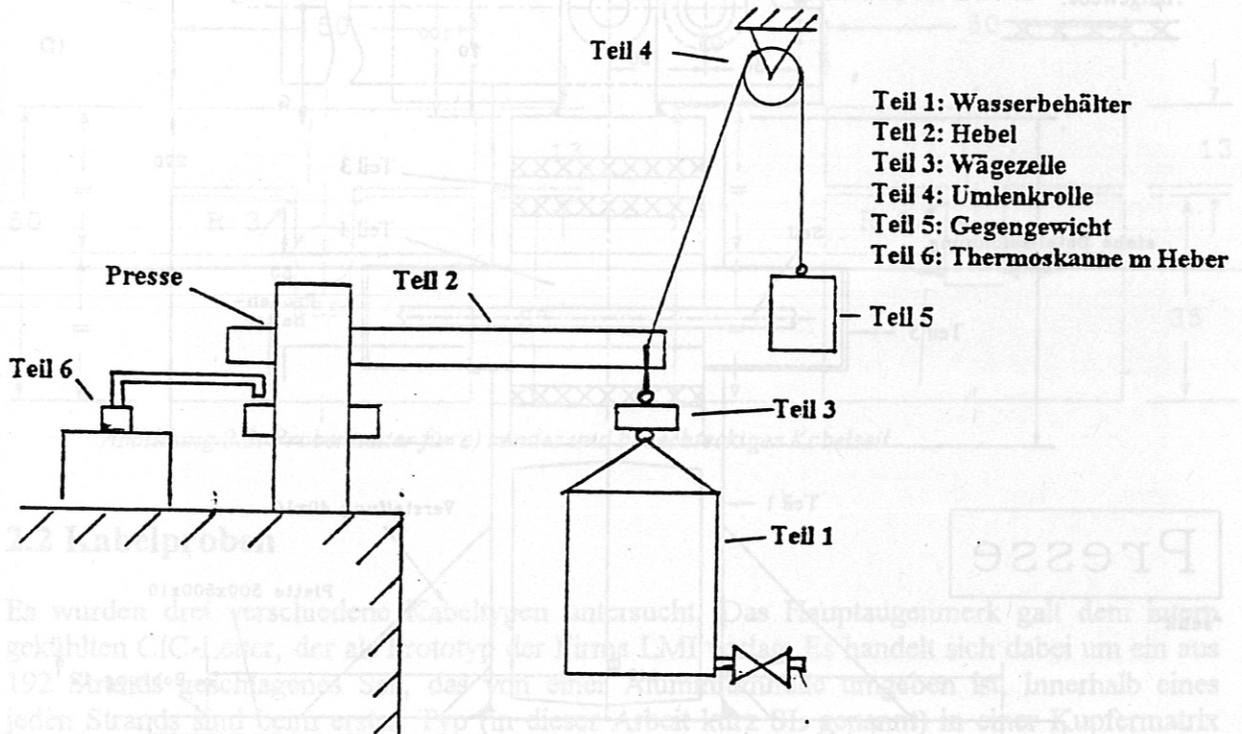


Abbildung 2.1: Prinzipieller Aufbau der Versuchsanordnung

Die Preßvorrichtung besteht aus einem Rahmen (Abb. 2.2, Teil 1), in dem ein Hebel (Teil 2) gelagert ist. Der Hebel kann am Ende über einen Halter mit Gewichten G beladen werden und wirkt andererseits mit dem Kraftverhältnis von 21:1 auf den Stempel (Teil 3), der innerhalb des Rahmens daran befestigt ist. Zwischen Stempel und Rahmen kann nun der Probenhalter (Teil 4) eingebracht werden. Um den Probenhalter ist eine Wanne (Teil 5) montiert, in die flüssiger Stickstoff eingefüllt werden kann, um das Kabel auf LN_2 -Temperatur abzukühlen. Der Stahl des Stempels und der Auflage für den Probenhalter ist durch zwei bzw. eine Schicht Hartgewebe unterbrochen, wodurch eine Verringerung der Wärmeleitfähigkeit erreicht wird. Oben am Rahmen wird die Bewegung des Stempels über den Hebel im Verhältnis 1:1 gemessen, was zunächst mit einer mechanischen Uhr vorgesehen war. Bei den Experimenten wurde dann stattdessen ein induktiver Wegaufnehmer verwendet.

Der 80 mm lange Probenhalter besteht aus zwei Teilen: In den unteren ist eine 9,5 mm breite Vertiefung der Länge nach eingelassen und der obere dient als Probenstempel. Das Profil von Probensockel und Probenstempel ist entsprechend dem Kabelquerschnitt rund (Abb. 2.3 a) oder rechteckig (Abb. 2.3 b). Diese Teile wurden im Sinne des Erosionsschutzes und zur Herstellung definierter Reibungsverhältnisse verchromt bzw. vernickelt.

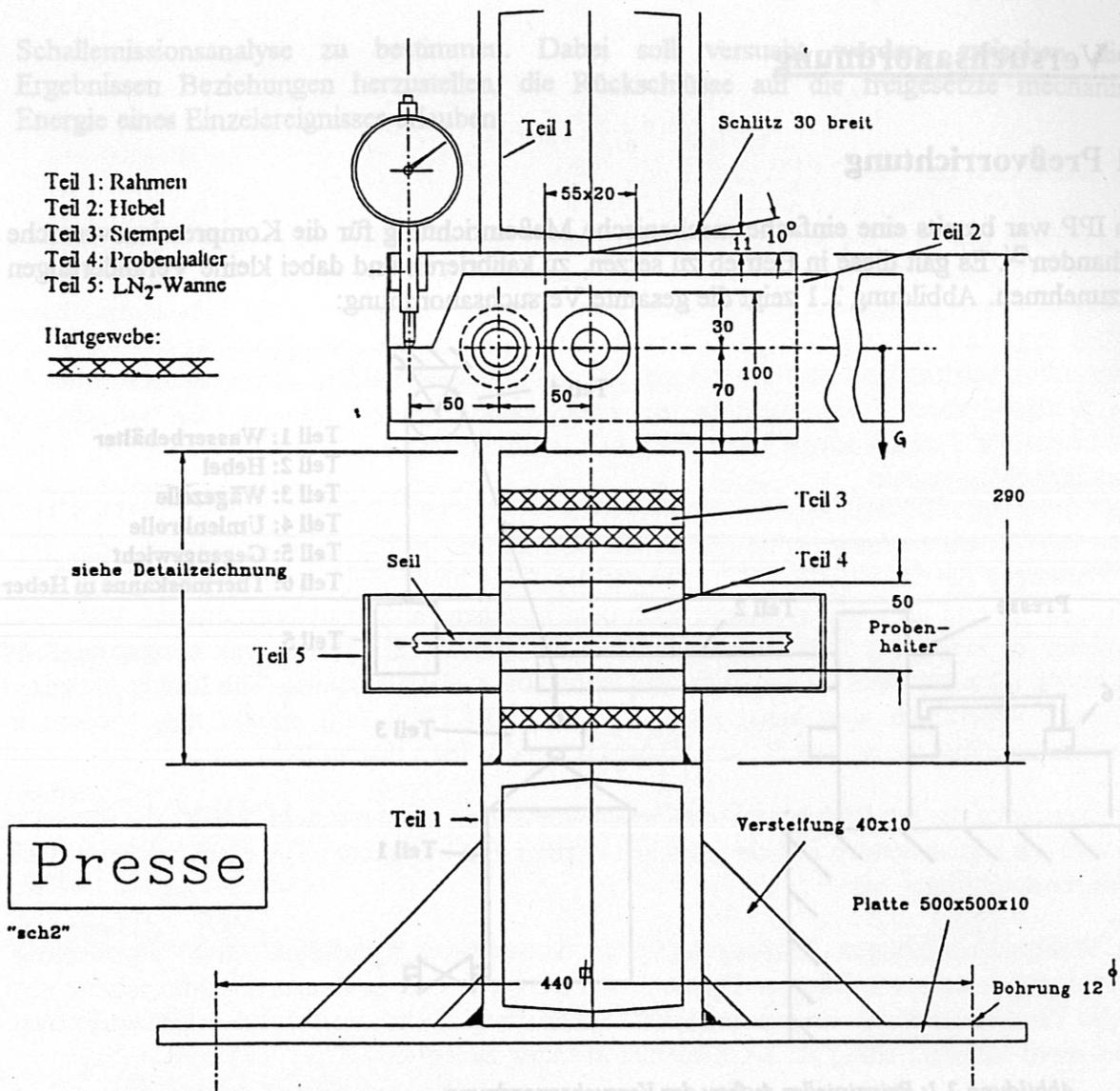


Abbildung 2.2: Aufbau der Preßvorrichtung

Die Stickstoffwanne aus Edelstahl ist außen mit Hartschaumstoff umkleidet, wodurch eine Verringerung der Wärmeeinleitung erreicht wird. Des weiteren werden die freien Flächen des Stickstoffbades mit demselben Material abgedeckt. Weitere Detailzeichnungen sind im Anhang A1 beigelegt.

Oben am Stempel, unterhalb des Gelenkes zum Hebel, ist ein 20W-Widerstand (47Ω) angebracht, der im kalten Betrieb mit Strom geheizt wird. Dies dient erstens zum Erwärmen des Lagers, um eine Benetzung durch Kondensation zu vermeiden, und zweitens als konstantes Temperaturniveau, um möglichst einen stabilen Temperaturverlauf im Stempel zu erhalten.

Es zeigte sich bei ersten Versuchen mit den vorgesehenen Gewichten bald, daß eine kontinuierliche Belastung der Proben bzgl. der Schallemission von Vorteil wäre und auch dem Hochfahren des Kabels mit Strom besser entspricht. So wurde statt des Gewichtehalters ein Wasserbehälter mit Ablaufventil (Abb. 2.1, Teil 1) angebracht, der mit einem schalldämpfenden Kunststoffseil am Hebel (Teil 2) aufgehängt wurde. Zwischen Seil und Wassertank befindet sich eine Wägezelle (Teil 3) zur elektrischen Erfassung der Last. Befüllt wird der Behälter mit einem Wasserschlauch und entleert in einen Trichter, beide sind an einem separaten Stativ kontaktlos zur Vorrichtung montiert.

Zur Kompensation des Eigengewichts von Hebel, Wägezelle und Behälter ist am Hebelende ein über eine an der Decke angebrachte Umlenkrolle (Teil 4) laufendes dünnes Seil mit einem entsprechenden Gegengewicht (Teil 5) befestigt. Somit wirkt nur die Gewichtskraft des Wassers über den besagten Hebelarm auf die Probe.

Der Stickstoff wird aus einer 100-l-Thermoskanne mittels eines Hebbers (Teil 6) bei einem Überdruck von bis zu 0,75 bar entnommen. Das Ende des Hebbers taucht dabei nicht in den flüssigen Stickstoff der Wanne ein, um zwischen den Nachfüllzeiten keine Wärme einzuleiten und den gasförmig austretenden Stickstoff nicht das Bad durchströmen zu lassen.

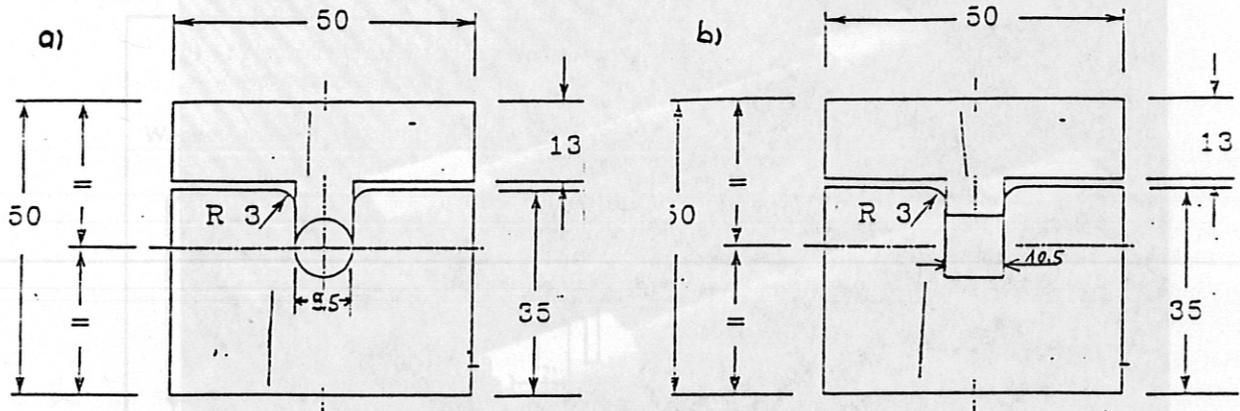


Abbildung 2.3: Probenhalter für a) rundes und b) rechteckiges Kabelseil

2.2 Kabelproben

Es wurden drei verschiedene Kabeltypen untersucht. Das Hauptaugenmerk galt dem intern gekühlten CIC-Leiter, der als Prototyp der Firma LMI vorlag. Es handelt sich dabei um ein aus 192 Strands geschlagenes Seil, das von einer Aluminiumhülle umgeben ist. Innerhalb eines jeden Strands sind beim ersten Typ (in dieser Arbeit kurz SL genannt) in einer Kupfermatrix 132 Filamente aus dem Supraleiter Niobtitan (NbTi) eingearbeitet. Weitere Daten können Tabelle 2.1 entnommen werden.

Tab. 2.1: Einige Daten des LMI-Leiters^{2/}

Strand	Stranddurchmesser:	0,55 mm
	Anzahl der Filamente:	132/Strand
	Filament-Durchmesser:	27 μm
	E-Modul (geschätzt):	~ 115 GPa
	I_c bei 4,2 K und 6 T:	~ 170 A
Kabel	$A_{\text{Cu}}/A_{\text{NbTi}}$:	2,02
	Anzahl der Strands:	192
	Verkabelungsart:	Gleichschlag
	Verkabelungsstufen:	3x4x4x4
	Kabeldurchmesser:	$\sim 9,5$ mm
Hülle	Void Fraction (He-Anteil):	~ 38 %
	Kantenlänge:	~ 15 mm

Beim zweiten Typ, dem sog. Dummy (kurz D), handelt es sich um das gleiche Kabel, nur daß die Strands aus reinem Kupfer bestehen.

Die dritte Kabelart besteht aus einem geflochtenen Kabel mit quadratischem Querschnitt (kurz G) das ebenfalls aus Strands mit Supraleiter besteht, aber noch nicht extrudiert wurde, d.h. keine Hülle besitzt.

Die Proben sind 130 - 150 mm lang und bei den extrudierten Typen sind 90 mm der Hülle mittig entfernt (Abb. 2.4). Beim Typ G ist das Seil an den Enden jeweils mit einem Metallbügel gegen Entflechten gesichert (Abb. 2.5).

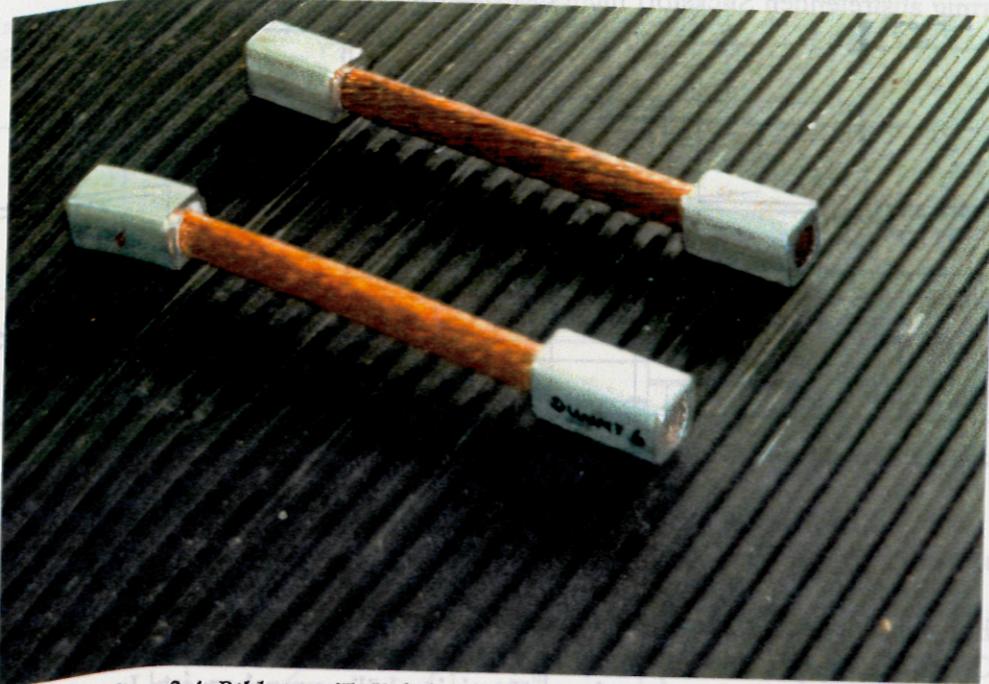


Abbildung 2.4: Bild einer SL-Kabelprobe von einem CIC-Leiter

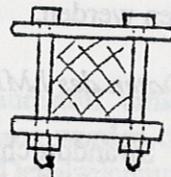
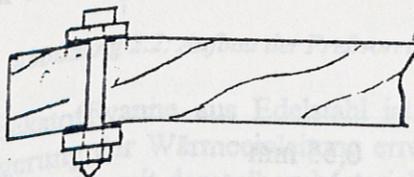


Abbildung 2.5: Sicherung der G-Kabelprobe von einem geflochtenen Leiter

2.3 Meßtechnik

2.3.1 Weg- und Kraftaufnehmer

Zur Wegmessung wurde der induktive Wegaufnehmer W5TK der Firma HBM in Darmstadt mit dem 5 kHz TF Meßverstärker KWS 3073 verwendet.

In dem zylindrischen Aufnehmergehäuse, das wie Tastbolzen und Spannschaft aus rostfreiem Stahl besteht, bilden zwei Meßspulen mit dem axial verschiebbaren Tauchanker eine induktive Halbbrücke (Abb. 2.6 a). Der Aufnehmer wird an einen Trägerfrequenz-Meßverstärker angeschlossen und dort durch zwei Präzisionswiderstände zu einer vollen Wheatstone-Brücke ergänzt. Durch die von der Tastspitzenbewegung bewirkte Tauchankerverschiebung wird die vorher abgegliche Brückenschaltung verstimmt. Das vom Aufnehmer erzeugte Meßsignal ist der Tastbolzenverschiebung proportional (Abb. 2.6 b).

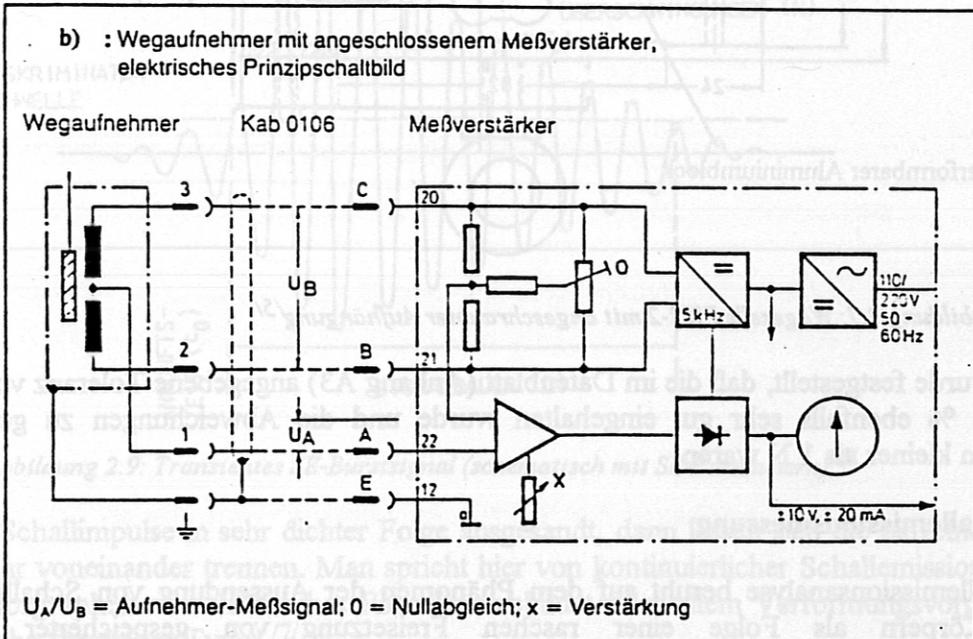
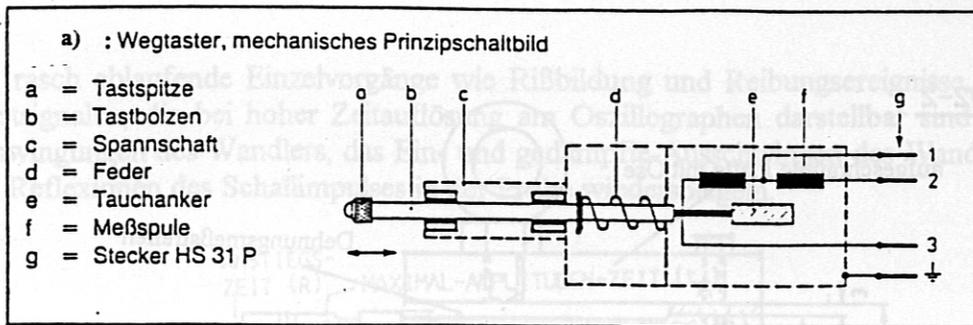


Abbildung 2.6: a) Mechanisches und b) elektrisches Prinzipschaltbild des Wegaufnehmers^{14/}

Das Meßsystem wurde mit dem Huggenberg-Kalibrator kalibriert. Beim Huggenberg-Kalibrator handelt es sich um eine Einrichtung, mit der für aufgespannte Wegaufnehmer exakte Wegänderungen vorgegeben werden können. Dies geschieht über eine von Hand verstellbare Spindel mit einer Toleranz von $< 0,3 \mu\text{m}$. Hierbei wurde festgestellt, daß die vom Hersteller (Anhang A2) angegebene Meßtoleranz für den W5TK sehr gut erreicht wurde und die Abweichungen kleiner als $1 \mu\text{m}$ waren.

Der Meßverstärker wurde so eingestellt, daß ein Hub von $\pm 2 \text{ mm}$ ein Ausgangssignal von $\pm 10 \text{ V}$ ergibt.

Zur Kraftmessung wurde eine Wägezelle PW2-2 36K von HBM mit bereits erwähntem Meßverstärker eingesetzt.

An beiden Seiten der Wägezelle wurden kleine Platten mit Ösen angebracht, an denen der Wasserbehälter bzw. die Zelle selbst aufgehängt sind. Auf dem verformbaren Teil der Zelle sind Dehnungsmeßstreifen aufgebracht (Abb. 2.7). Diese sind, wie in Abbildung 2.6 b) gezeigt, zu einer Vollbrücke verschaltet. Die durch Zugbelastung verformte Wägezelle verstimmt so die Meßbrücke, und das erzeugte Meßsignal ist proportional zur wirkenden Kraft.

Die Meßeinheit wurde so kalibriert, daß das Gewicht des Wasserbehälters mit der Brücke abgeglichen wurde und damit nur der Inhalt einen Meßbeitrag liefert. Weiter wurde der Meßbereich so eingestellt, daß 10 kN Belastung auf der Probe 10 V Meßsignal ergeben, d.h. das Hebelverhältnis von 21:1 schon berücksichtigt ist.

PW2-2

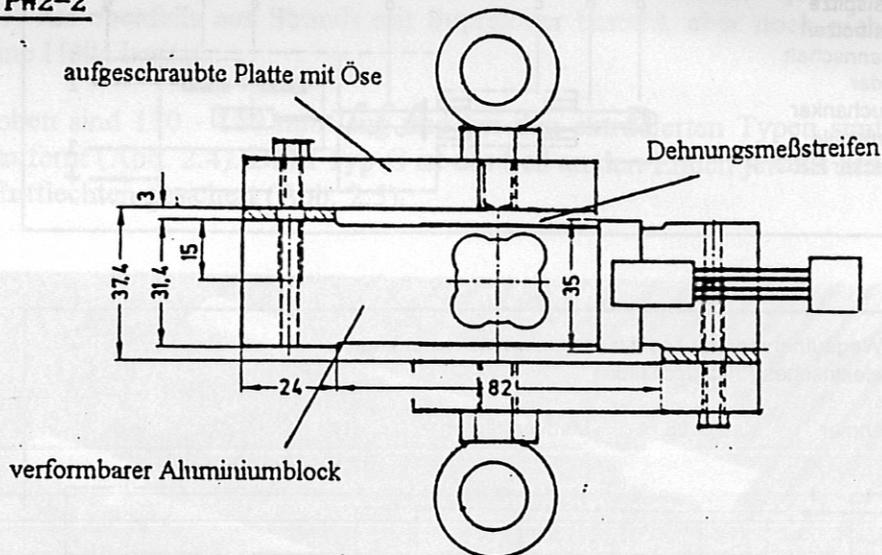


Abbildung 2.7: Wägezelle PW2-2 mit angeschraubter Aufhängung^{5/}

Hierbei wurde festgestellt, daß die im Datenblatt (Anhang A3) angegebene Toleranz von kleiner als 0,023 % ebenfalls sehr gut eingehalten wurde und die Abweichungen zu gewogenen Gewichten kleiner als 1 N waren.

2.3.2 Schallemissionsmessung

Die Schallemissionsanalyse beruht auf dem Phänomen der Aussendung von Schallwellen in festen Körpern als Folge einer raschen Freisetzung von gespeicherter Energie. Verformungsvorgänge, schnell ablaufende Phasenumwandlungen und vor allem Ribbildung, Ribfortschritt und Bruchvorgänge kommen als Ursachen für Schallemission in Frage. Darüber hinaus führen auch Reibungsvorgänge zur Emission von Schallwellen, deren Frequenzen bis in das Ultraschallgebiet reichen.

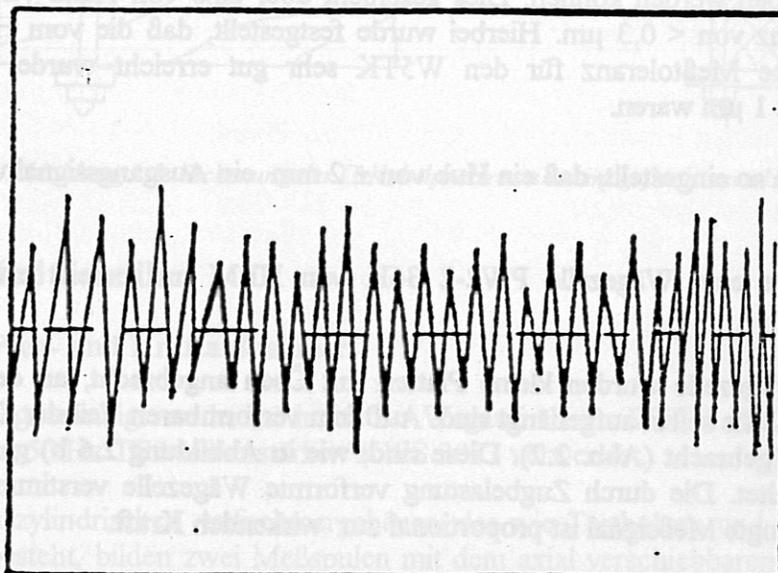


Abbildung 2.8: Kontinuierliche Schallemission (schematisch)^{6/}

Dabei treten zwei Grundtypen der Signalform auf, zum einen kontinuierliche Schallemission (Abb.2.8) und zum anderen Burstsignale (Abb. 2.9).

Diskrete, rasch ablaufende Einzelvorgänge wie Ribbildung und Reibungsereignisse führen zu sog. Burstsignalen, die bei hoher Zeitaufösung am Oszillographen darstellbar sind und viele Einzelschwingungen des Wandlers, das Ein- und gedämpfte Ausschwingen des Wandlers sowie eventuell Reflexionen des Schallimpulses in der Probe widerspiegeln.

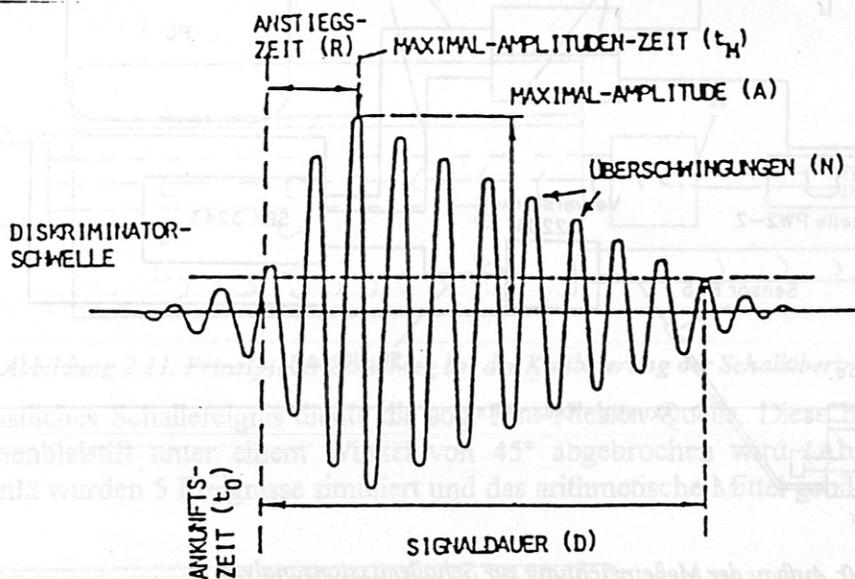


Abbildung 2.9: Transientes SE-Burstsignal (schematisch mit SE-Parametern)^{6/}

Werden Schallimpulse in sehr dichter Folge ausgesandt, dann lassen sich die einzelnen Signale nicht mehr voneinander trennen. Man spricht hier von kontinuierlicher Schallemission, die sich im Oszillographen wie elektrisches Rauschen abbildet. Vor allem Verformungsvorgänge sind die Ursache für diesen Typus.^{7/}

Eingesetzt wird diese Methodik in vielen Gebieten der Materialprüfung und unter anderem zur Untersuchung von Kabeln und Drahtseilen, wobei sowohl infolge Reibung untereinander als auch durch Bruch einzelner Fasern oder Drähte Schallemission entsteht.^{8/}

Die Schallemissionsanalyse ist eben auch für Untersuchungen von Einzelereignissen innerhalb des Kabels gut geeignet, allerdings sind bisher abgesehen von Arbeiten an großen Spulen^{9/} keine Anwendungen an CIC-Kabeln bekannt.

Verwendet wurde ein Meßsystem, das aus folgenden Komponenten besteht: Piezoaufnehmer, Vorverstärker und eine PC-Steckkarte; im einzelnen von der Firma Fischer-Pierce & Waldburg in Kisslegg der Sensor R15, der Vorverstärker 1220A mit 50 kHz Hochpaß und die PC-Karte SEK 3243 mit drei zusätzlichen 0 -10 V Analog-In-Kanälen (Abb. 2.10). Der Hochpaß dient zur Herausfilterung von Störsignalen, die vornehmlich in diesem unteren Frequenzbereich auftreten.^{7/}

Der Sensor wurde am Ende eines Akustik-Wellenleiters montiert, der in eine entsprechende Bohrung des Probenhalters eingeschraubt ist. Es wurde damit vermieden, den Sensor dem Stickstoffbad aussetzen zu müssen.

Die Meßeinheit ist in der Lage bis zu 1000 Bursts pro Sekunde zu erfassen und aufzuzeichnen. Von jedem einzelnen Burstsignal werden folgende Kenngrößen registriert:

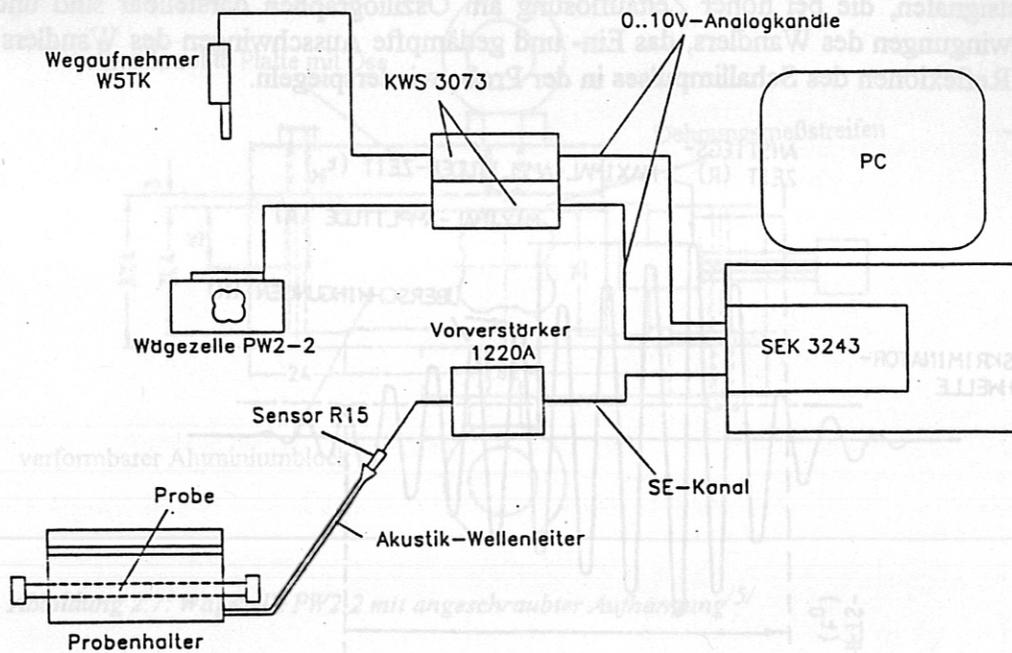


Abbildung 2.10: Aufbau der Meßeinrichtung zur Schallemissionsanalyse

Schallemissionsenergie E

Durch Integration über den Betrag des SE-Signals gebildeter Wert, der als Energieäquivalent dient. [mVs]

Maximalamplitude A

Größter während des Bursts auftretender Amplitudenwert [V]

Ankunftszeit t_0

Zeitpunkt der ersten Überschreitung des Schwellwertes; Zeitauflösung: 1 μ s

Abstandszeit t_d

Zeitlicher Abstand von der ersten Überschreitung des Schwellwertes zum Ende des vorhergehenden SE-Signal; Zeitauflösung: 1 μ s

Anstiegszeit R

Zeitraum zwischen Ankunftszeit und Erreichen der Maximalamplitude des Bursts; Zeitauflösung: 1 μ s

Signaldauer D

Zeitraum zwischen erster und letzter Schwellwertüberschreitung; Zeitauflösung: 1 μ s

Zahl der Überschreitungen N

Zahl der Schwellwertüberschreitungen während eines Bursts

Zur Kalibrierung der ersten dieser Größen galt es zu untersuchen, in welcher Abhängigkeit die aufgezeichneten Signale zur aufgebrachtten Last stehen, d.h. wie stark die Schallübertragung vom Kabel zum Probenhalter von letzterer abhängen.

Hierzu wurden Kabel vom Typ SL in der Vorrichtung mit Belastungszyklen beaufschlagt und an mehreren Belastungspunkten Kalibriersignale in das Kabel eingeleitet. Beim ersten Kabel wurde das Signal direkt auf den Strands an der Stirnfläche (Abb. 2.11, Pkt. A) erzeugt, bei der

zweiten Messung über einen Stahlstift in die Mitte der Stirnfläche des Seils (Abb. 2.11, Pkt. B) eingeleitet.

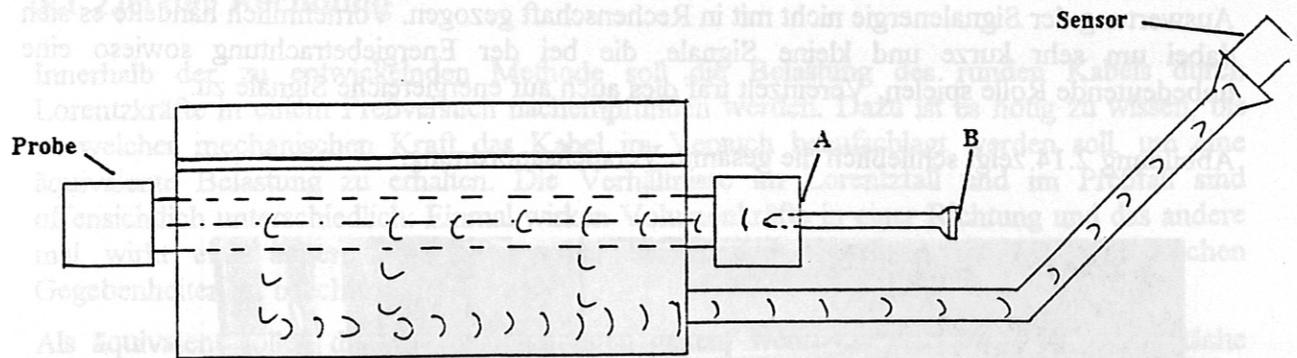


Abbildung 2.11: Prinzipieller Schallweg bei der Kalibrierung der Schallübertragung

Als künstliches Schallereignis diente die sog. Hsu-Nielsen Quelle. Diese besteht darin, daß ein 2H-Minenbleistift unter einem Winkel von 45° abgebrochen wird (Abb. 2.12). An jedem Meßpunkt wurden 5 Ereignisse simuliert und das arithmetische Mittel gebildet.

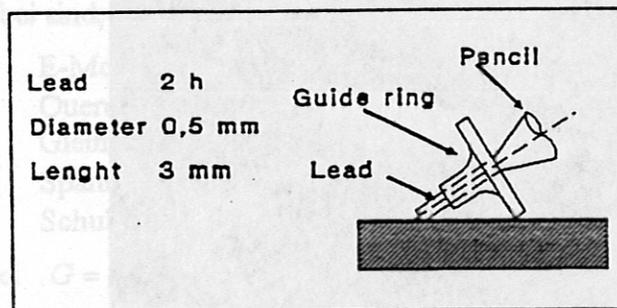


Abbildung 2.12: Hsu-Nielsen Quelle^{10/}

Das Ergebnis zeigt, daß, wie erwartet, mit zunehmender Belastung und Verdichtung des Seils die Bursts besser übertragen werden. Durch die zwei Meßkurven wurde eine Gerade gelegt, die als Kalibrierfaktor der Energiewerte der Signale herangezogen wurde (Abb. 2.13).

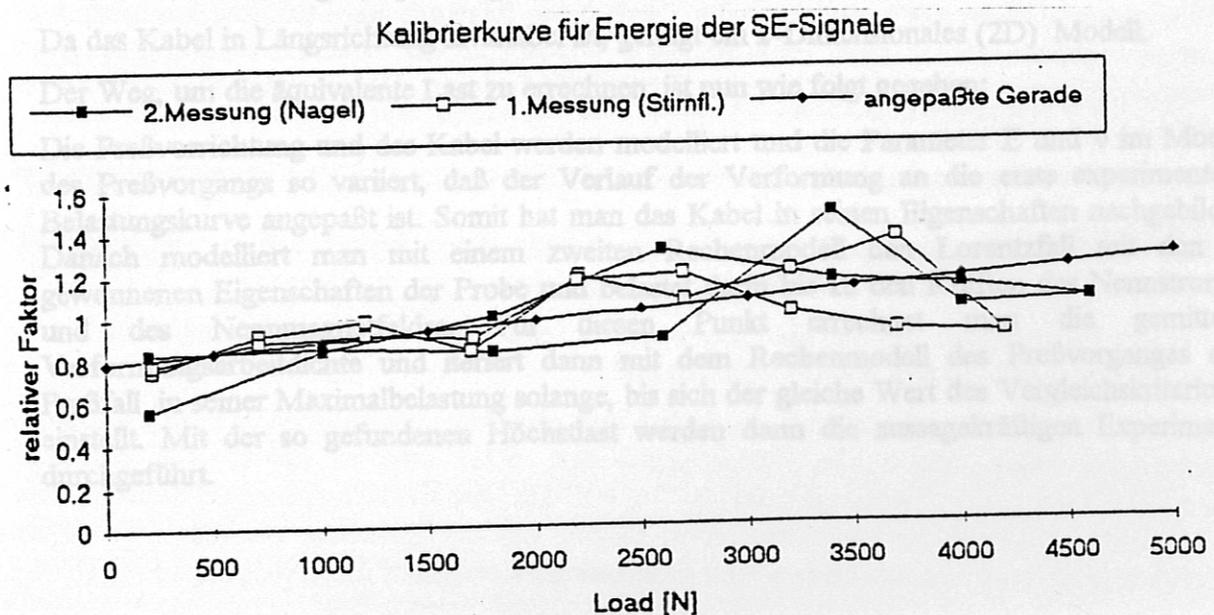


Abbildung 2.13: Kalibriergerade für Energie der SE-Signale

Bei der Auswertung der Schallemissionssignale zeigte sich, daß bei manchen Signalen plausible Bedingungen nicht mehr erfüllt waren. Zum Beispiel muß das Produkt aus Signaldauer D und Maximalamplitude A stets größer als der Energiewert E sein und die Signaldauer D stets größer als die Anstiegszeit R . Signale, die diesen Bedingungen zuwider sprachen, wurden bei der Auswertung der Signalenergie nicht mit in Rechenschaft gezogen. Vornehmlich handelte es sich dabei um sehr kurze und kleine Signale, die bei der Energiebetrachtung sowieso eine unbedeutende Rolle spielen. Vereinzelt traf dies auch auf energiereiche Signale zu.

Abbildung 2.14 zeigt schließlich die gesamte Versuchsanordnung.

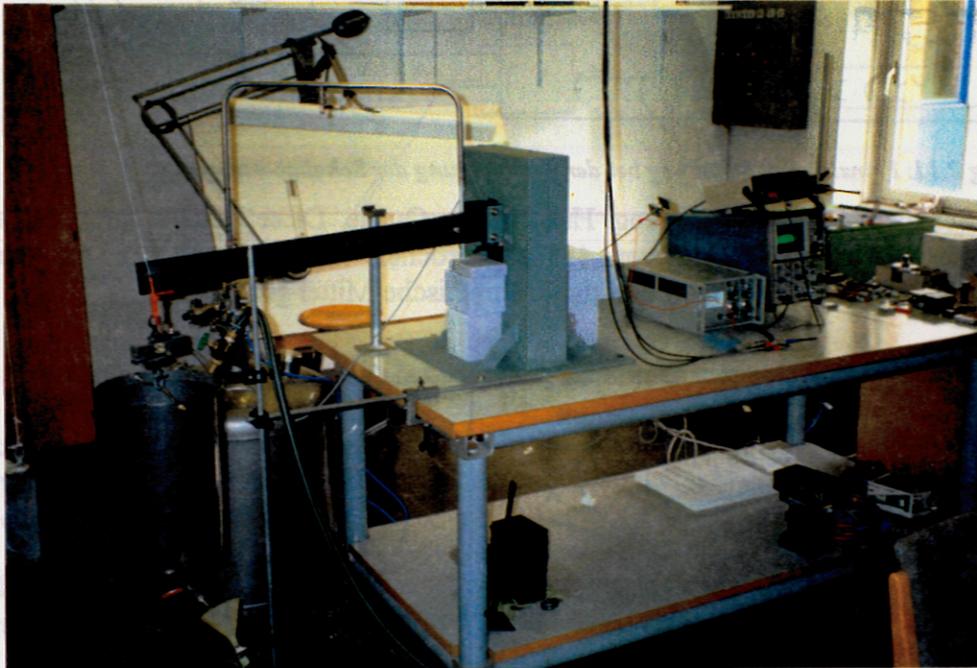


Abbildung 2.14: Bild der gesamten Versuchsanordnung

3. Vergleichsrechnung mit 2D-FEM-Programmen

3.1 Ziel der Rechnung

Innerhalb der zu entwickelnden Methode soll die Belastung des runden Kabels durch Lorentzkräfte in einem Preßversuch nachempfunden werden. Dazu ist es nötig zu wissen, bis zu welcher mechanischen Kraft das Kabel im Versuch beaufschlagt werden soll, um eine äquivalente Belastung zu erhalten. Die Verhältnisse im Lorentzfall und im Preßfall sind offensichtlich unterschiedlich: Einmal wirken Volumenkräfte in einer Richtung und das andere mal wirkt eine äußere Preßkraft, wobei bei runden Kabeln noch die geometrischen Gegebenheiten zu beachten sind.

Als äquivalent sollen die beiden Belastungen gelten, wenn die über die Querschnittsfläche gemittelte, pro Volumeneinheit eingebrachte Verformungsarbeit in beiden Fällen gleich ist.^{/11/}

Nach S. Timoshenko^{/12/} gilt für die bei einer elastischen Verformung pro Volumeneinheit eingebrachte Energie U_0 :

$$U_0 = \frac{1}{2E}(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2) - \frac{\nu}{E}(\sigma_x\sigma_y + \sigma_y\sigma_z + \sigma_z\sigma_x) + \frac{1}{2G}(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2) \quad (3.1)$$

Hierbei sind,

- E E-Modul
- ν Querdehnungszahl
- G Gleitmodul
- σ_i Spannung in i-Richtung
- τ_{ij} Schubspannung in ij-Ebene

wobei $G = \frac{E}{2(1 + \nu)}$ (3.2)

Zur Berechnung der Verformungsenergie benötigt man also die Spannungen innerhalb des Kabels, was bei der gegebenen Geometrie eine nicht triviale Aufgabe ist.

Dafür wurden Finit-Element-Methode-Programme (FEM) herangezogen, die für derlei Probleme Verformungen, Spannungsverläufe, etc. errechnen.

Da das Kabel in Längsrichtung invariabel ist, genügt ein 2-Dimensionales (2D) Modell.

Der Weg, um die äquivalente Last zu errechnen, ist nun wie folgt gegeben:

Die Preßvorrichtung und das Kabel werden modelliert und die Parameter E und ν im Modell des Preßvorgangs so variiert, daß der Verlauf der Verformung an die erste experimentelle Belastungskurve angepaßt ist. Somit hat man das Kabel in seinen Eigenschaften nachgebildet. Danach modelliert man mit einem zweiten Rechenmodell den Lorentzfall mit den so gewonnenen Eigenschaften der Probe und belastet darin bis zu den Kräften des Nennstromes und des Nennmagnetfeldes. Für diesen Punkt errechnet man die gemittelte Verformungsarbeitdichte und iteriert dann mit dem Rechenmodell des Preßvorganges den Preßfall in seiner Maximalbelastung solange, bis sich der gleiche Wert des Vergleichskriteriums einstellt. Mit der so gefundenen Höchstlast werden dann die aussagekräftigen Experimente durchgeführt.

3.2 Das ADINA-Programm

Am IPP war bereits ein solches 2D-FEM-Programm vorbereitet^{13/} und zwar mit dem Softwarepaket Automatic Dynamic Incremental Nonlinear Analysis (ADINA) Version 6.0.3.

Dabei mußten die in Abbildung 3.1 gezeigten Verhältnisse der Preßvorrichtung und des verseilten Kabels modelliert werden.

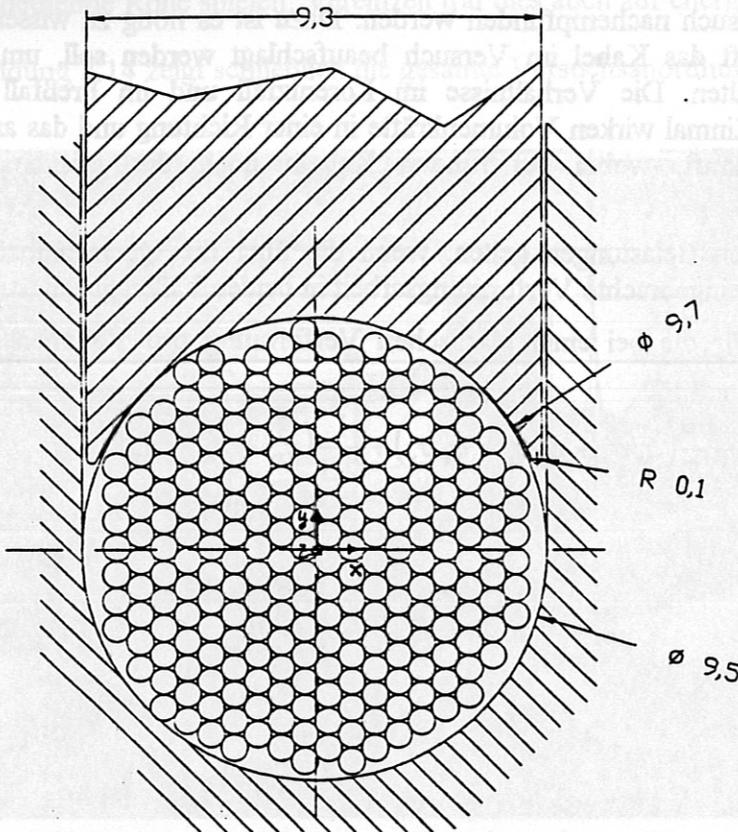


Abbildung 3.1: Verseiltes Kabel im Probenhalter

Aufgrund der gegebenen Symmetrie bzgl. der y-Achse wurde nur eine Hälfte gerechnet, wobei sich dann die Punkte im Modell entlang der y-Achse konsequenterweise nicht in x-Richtung bewegen können. Hierbei wurde das Kabel bestehend aus seinen 192 Strands nur als ein homogenes Material wiedergegeben, das durch seine Materialparameter dem Verhalten des Kabels angepaßt werden muß. Eine detaillierte Wiedergabe der verseilten Drähte hätte einen ungleich höheren Aufwand und immense Rechenzeit bedeutet. Das so entstandene 2D-FEM-Modell zeigt Abbildung 3.2.

Bei einem 2-dimensionalen Fall mußte für die dritte Dimension noch eine Festlegung getroffen werden. Da sich innerhalb eines Querschnitts das Kabel nicht entlang seiner Länge verformen kann, wurde die Bedingung "plane strain" vorgegeben. Diese besagt, daß in z-Richtung des gegebenen 2-D-Modells keine Verformungen, aber Spannungen zugelassen sind.

In einem FEM-Modell werden die Körper aus einzelnen Elementen zusammengesetzt, die in ihren Ecken durch die sog. Knoten definiert sind.

Probensockel, Probenstempel und das Kabel sind als unterschiedliche Materialien modelliert, wobei die ersten beiden die Eigenschaften von Stahl erhalten haben, d.h. E-Modul $E = 210 \text{ GPa}$ und Querdehnungszahl $\nu = 0,3$. Da die Berührungspunkte zwischen den Materialien aufgrund der unterschiedlichen Radien von der Belastung abhängen, wurde als Berührungselement "contact surface" mit dem Reibungskoeffizient $\mu = 0$ festgelegt.

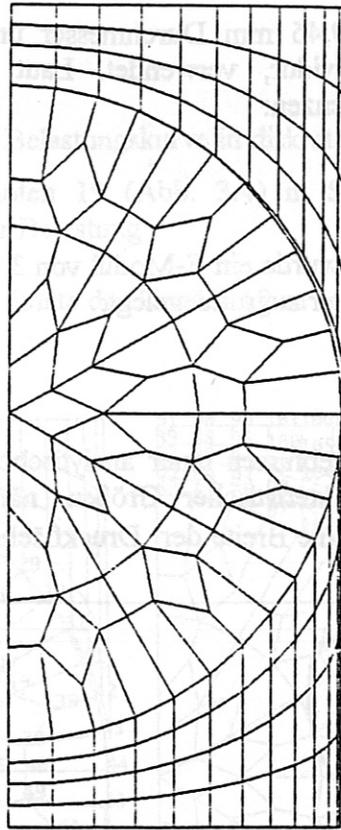


Abbildung 3.2: FEM-Modell des Kabels in Preßvorrichtung für das ADINA-Programm

Es galt, sich nun in das Programm soweit einzuarbeiten, daß eine Variation der Inputdaten vorgenommen, der Rechenjob abgeschickt sowie überwacht und der Output verstanden und ausgewertet werden konnte.

Der normale Weg einer Berechnung mit dem ADINA-Programm am IPP beschreibt sich wie folgt:

Die Inputwerte, wie Knotenkoordinaten, Elementelisten, Materialeigenschaften, Rechenparameter usw. werden auf einer VAX-Rechenanlage mit ADINA-IN, einem gesonderten Programm, zu einem Inputdatenfile verarbeitet. Dieses wird nun zusammen mit dem Job zur CRAY geschickt und dort mit ADINA gerechnet und zu einem Outputfile verarbeitet. Nun kann man diese Daten mit einem Postprocessing-Programm auswerten oder dies selbst tun.

Um sich jetzt nicht auf drei Systemen einarbeiten zu müssen, wurden die Parameter im vorgefertigten Inputdatenfile (Anhang B1) für die CRAY geändert und die Auswertung am Outputfile, soweit nötig, selbst auf dem Unix-System UTS vorgenommen. Das Outputfile enthält sowohl das Rechenprotokoll wie auch alle gewünschten Ergebnisse wie Spannungen in den Knoten und Verschiebungen derselben, Auflagekräfte, Berührungspunkte, Kontaktkräfte und anderes mehr (Anhang B2). Ein Hauptgesichtspunkt war beispielsweise, wie verschiebt sich der Probenstempel mit steigender Last?

3.3 Verifikation der FEM-Rechnung

Um Vertrauen in das mathematische Modell zu gewinnen und das richtige Arbeiten des Programms zu bestätigen, wurden die Ergebnisse der FEM-Rechnung an einem Material mit bekannten Eigenschaften verifiziert.

Dazu wurde ein homogener Zylinder mit 9,45 mm Durchmesser und 80 mm Länge aus weichem PVC-Kunststoff, und zwar Trovidur, verwendet. Laut Hersteller liegen die Materialeigenschaften innerhalb folgender Grenzen:

$$E = 3,0 - 3,3 \text{ GPa}$$

$$\nu = 0,33 - 0,35$$

Von der Zentralen Materialprüfstelle des IPP wurde ein E-Modul von 3,05 GPa gemessen. Der ADINA-Rechnung wurde folglich als Parameter zugrundegelegt:

$$E = 3,05 \text{ GPa}$$

$$\nu = 0,34$$

Zunächst erfolgte ein Vergleich mit den Ergebnissen einer analytischen Rechnung, den sog. Hertzschen Formeln. Anhand zweier charakteristischer Größen, nämlich der maximal in Krafrichtung auftretenden Spannung σ_0 und die Breite der Druckfläche $2a$ (Abb. 3.3), wurde diese Gegenüberstellung vorgenommen.

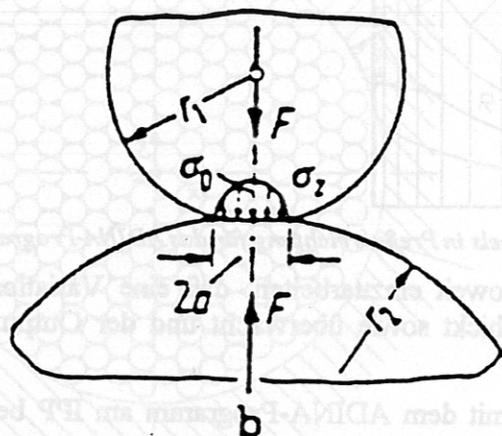


Abbildung 3.3: Verhältnisse bei der Berührung zweier zylindrischer Körper^{/14/}

Für die Pressung eines Zylinders mit Radius r_1 in einen zylindrischen Sockel mit Radius r_2 gilt:^{/14/}

$$\sigma_0 = \sqrt{\frac{2f}{\pi K_R C_E}} \quad (3.3)$$

$$a = \sqrt{\frac{4}{\pi} f K_R C_E} \quad (3.4)$$

mit

- f Kraft pro Länge
- r_1 Radius des Zylinders
- r_2 Radius des zylindrischen Sockels
- ν_1 Querdehnungszahl des Zylinders
- ν_2 Querdehnungszahl des Sockels
- E_1 E-Modul des Zylinders
- E_2 E-Modul des Sockels

Hierbei gilt,

$$K_R = \frac{r_1 r_2}{r_2 - r_1} \quad (3.5)$$

$$C_E = \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \quad (3.6)$$

ADINA berechnet die Belastungskurve in diskreten Schritten.

Im Outputfile ist Knoten 19 (Abb. 3.4) in Step 28 das erste Mal als Berührungspunkt ausgewiesen, was einer Belastung

$f = 70\,000\text{ N/m}$

entspricht. Die x-Koordinate des Knoten 19 ist

$x_{19} = 2,36\text{ mm}$.

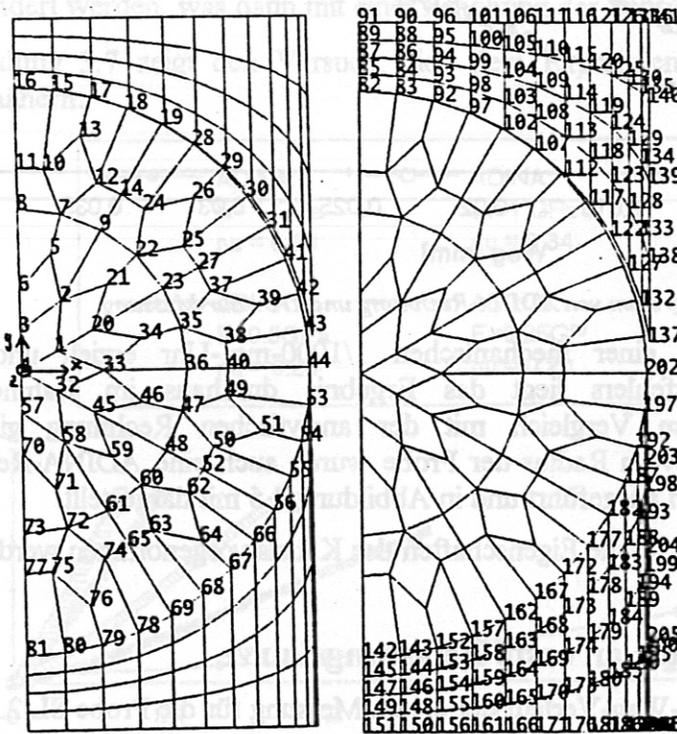


Abbildung 3.4: Knotennumerierung im ADINA-Modell

Diese Belastung und die oben genannten Materialdaten in die Hertzschen Formeln eingesetzt ergeben nach Gl. (3.4) für die halbe Breite der Berührfläche

$a = 2,20\text{ mm}$,

was einer Abweichung von 7,3 % entspricht. Hierbei gilt zu bedenken, daß beispielsweise eine Änderung des Durchmessers des Trovidurstabes um 0,03 mm diesen Fehler bereits ausgleicht.

Für die maximale Spannung σ_0 ergibt sich nach Gl. (3.3)

$\sigma_0 = 20,3\text{ MPa}$.

ADINA errechnet für den obersten Knoten des Kabels

$\sigma_y = 21,9\text{ MPa}$,

was einer Differenz von 7,9 % gleichkommt.

Des weiteren wurde ein Kraft-Weg-Diagramm für den Trovidurstab aufgenommen und mit der Rechnung verglichen. Dabei wurde die Probe mit $F_{\max} = 5\,000\text{ N}$ belastet, was bei 80 mm Länge $f = 62\,500\text{ N/m}$ entspricht. Das Ergebnis zeigt Abbildung 3.5:

Vergleich ADINA-Rechnung <-> Trovidur-Messung

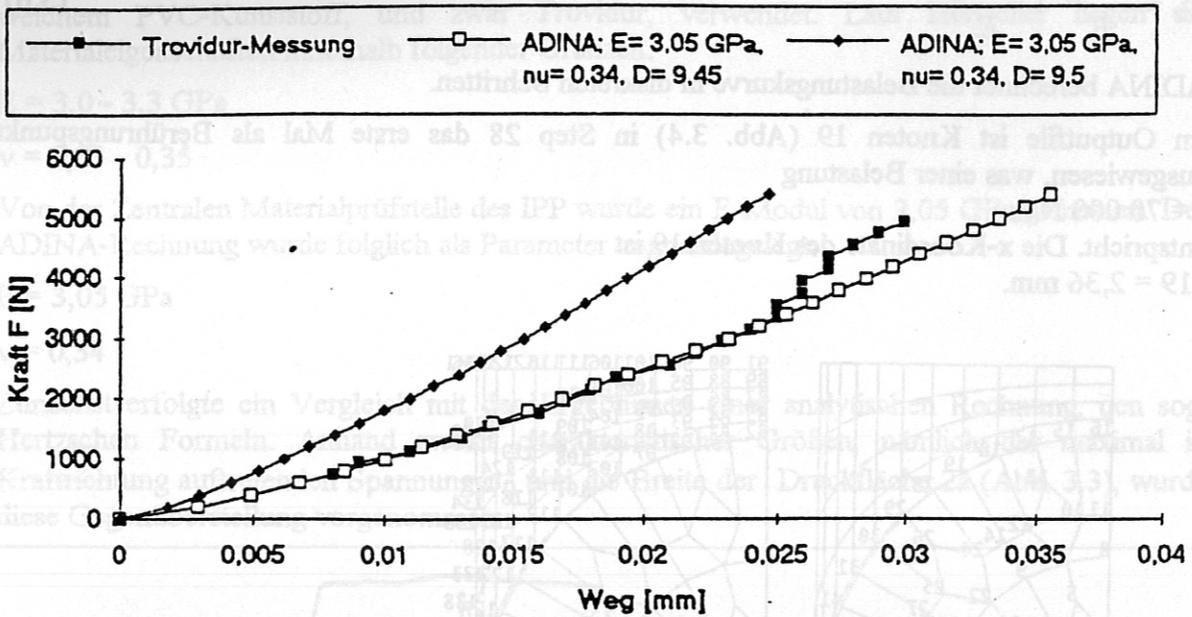


Abbildung 3.5: Kraft-Weg-Diagramm von ADINA-Rechnung und Trovidur-Messung

Dieses Meßergebnis wurde mit einer mechanischen 1/1000-mm-Uhr erzielt und unter Betrachtung des Quantisierungsfehlers liegt das Ergebnis durchaus im Rahmen des Akzeptablen, was auch für den Vergleich mit der analytischen Rechnung gilt. Zur Verdeutlichung der Abhängigkeit vom Radius der Probe wurde auch eine ADINA-Rechnung mit dem Durchmesser $D = 9,5$ mm ausgeführt und in Abbildung 3.5 mit dargestellt.

Danach konnte nun die Anpassung an die Eigenschaften des Kabels vorgenommen werden:

3.4 Anpassung der Parameter an erste Belastungskurve

Die Abbildung 3.6 zeigt den Kraft-Weg-Verlauf der ersten Messung für die Probe SL 2.

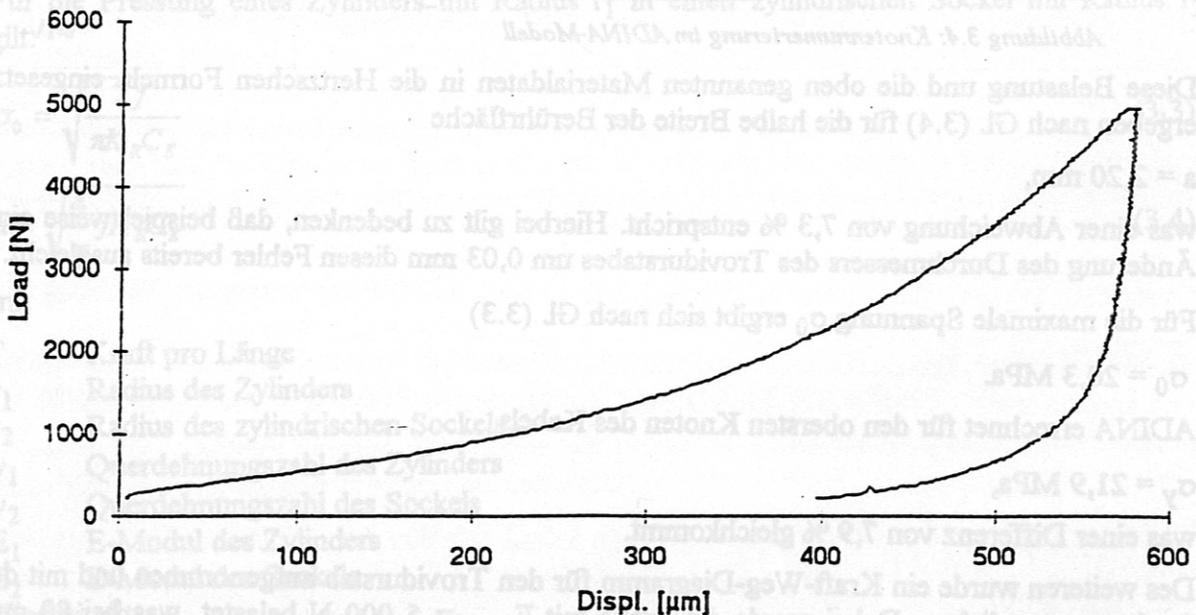


Abbildung 3.6: Kraft-Weg-Diagramm von Probe SL 2

Eine erste grobe Betrachtung von Verformung und Last gibt die Größenordnung der zu erwartenden Eigenschaften des Kabels an. Würde es sich um eine 80 mm lange Probe mit

rechteckigem Querschnitt handeln, Seitenlänge 9,5 mm, und diese wird von einer Seite mit der Gesamtlast von 5000 N beaufschlagt, so ergäbe sich aus der gemessenen Verformung von ca. 0,6 mm mit

$$\sigma = \varepsilon E \quad (3.7)$$

ein E-Modul von $E = 106 \text{ MPa}$. Dies zeigt, daß der E-Modul, ausgehend von der Verifikationsrechnung ($E = 3,05 \text{ GPa}$), im Rechenmodell um mindestens eine Größenordnung verkleinert werden muß.

Bei der Verkleinerung des E-Moduls trat das Problem auf, daß das Programm nicht mehr konvergierte. Dies konnte durch Erniedrigung des Belastungshubes pro Rechenschritt verhindert werden, was dann mit einer Erhöhung der Schrittzahl und Rechenzeit einherging.

Abbildung 3.7 zeigt den Versuch, sich dem Experiment durch Variationen von E und ν anzunähern:

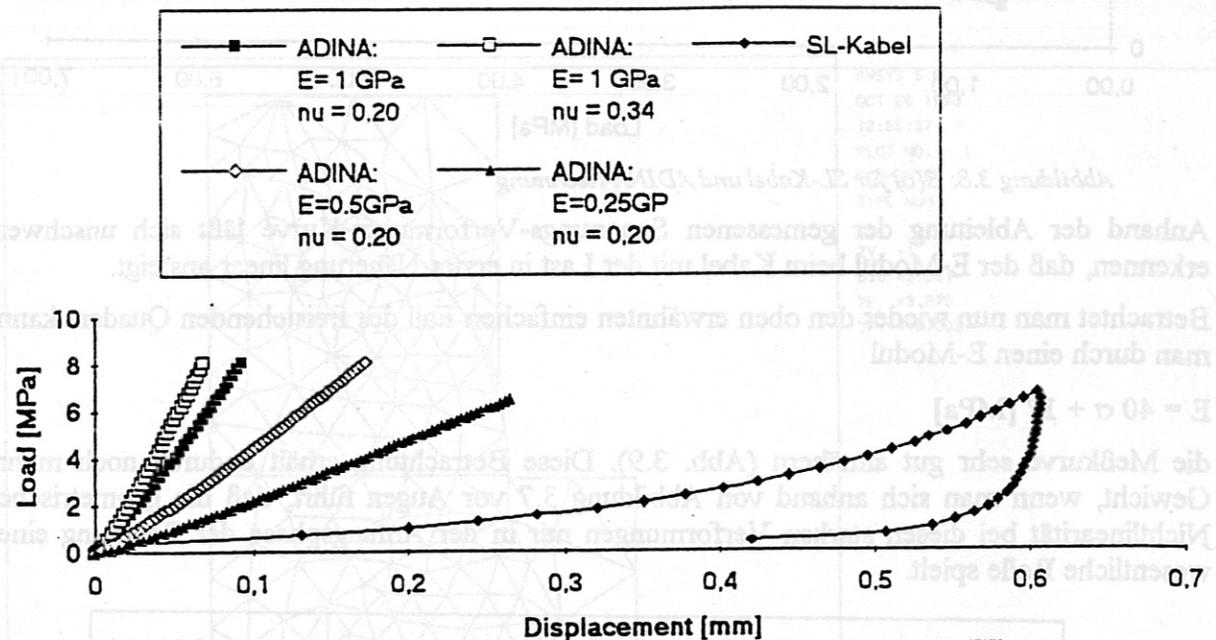


Abbildung 3.7: ADINA-Variationsrechnungen bzgl. E und ν im Vergleich zum SL-Kabel

Es zeigt sich, daß der nichtlineare Effekt aufgrund der runden Geometrie kaum mehr ins Gewicht fällt und die Kurven der FEM-Rechnung in guter Näherung durch Geraden beschrieben werden.

An diesem Punkt war nun abzusehen, daß mit der Verkleinerung des E-Moduls allein die Meßkurve nicht anzunähern sein wird. Dies bestätigte sich nach folgender Überlegung:

Bei der Kompression eines freistehenden, elastischen Quaders entspricht die Ableitung der σ - ε -Kurve dem E-Modul des Körpers mit $d\sigma = d\varepsilon E$, also

$$E = \frac{d\sigma}{d\varepsilon} \quad (3.9)$$

So wurde für die gemessene SL-Kurve und die ADINA-Kurve mit $E = 0,25 \text{ GPa}$ und $\nu = 0,20$ anhand dieser Näherung $E(\sigma)$ bestimmt. Das Ergebnis zeigt Abbildung 3.8.

Bei der ADINA-Kurve sieht man deutlich die Auswirkung der runden Geometrie auf die beschriebene Näherungsrechnung am Anfang der Kurve, sowie die leichten Einschnitte, die von den nach und nach in Kontakt tretenden Knotenpunkten herrühren.

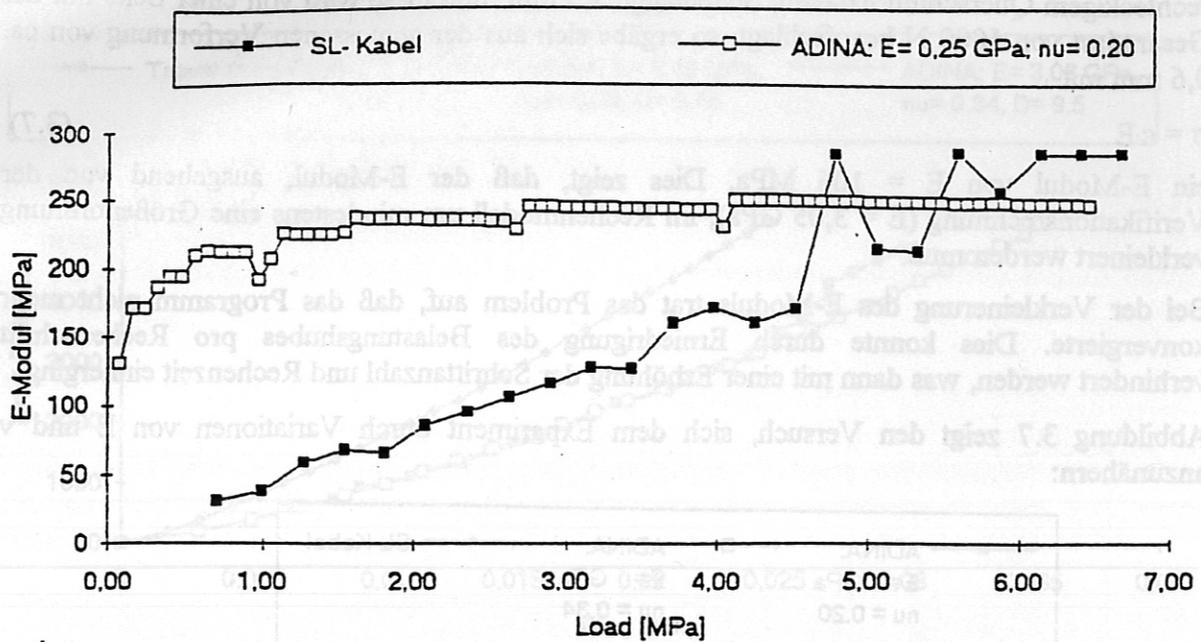


Abbildung 3.8: $E(\sigma)$ für SL-Kabel und ADINA-Rechnung

Anhand der Ableitung der gemessenen Spannungs-Verformungs-Kurve läßt sich unschwer erkennen, daß der E-Modul beim Kabel mit der Last in erster Näherung linear ansteigt.

Betrachtet man nun wieder den oben erwähnten einfachen Fall des freistehenden Quaders kann man durch einen E-Modul

$$E = 40 \sigma + 17 \text{ [MPa]}$$

die Meßkurve sehr gut annähern (Abb. 3.9). Diese Betrachtung erhält dadurch noch mehr Gewicht, wenn man sich anhand von Abbildung 3.7 vor Augen führt, daß die geometrische Nichtlinearität bei diesen starken Verformungen nur in der Anfangsphase der Belastung eine wesentliche Rolle spielt.

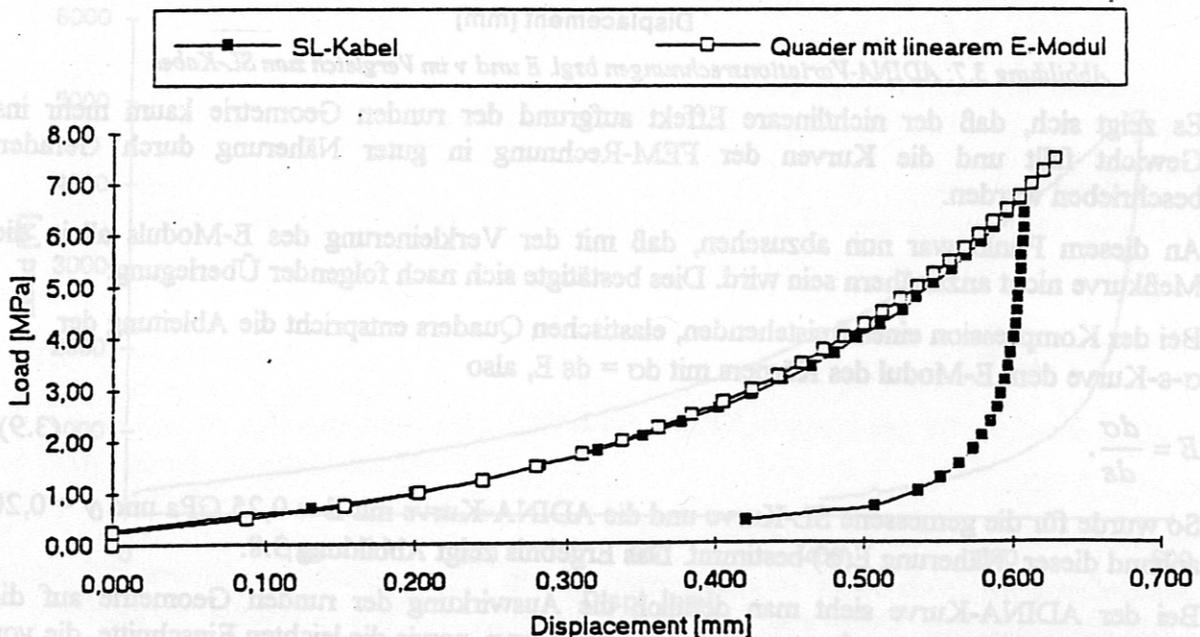


Abbildung 3.9: Spannung-Weg-Kurve für linear steigenden E-Modul und SL-Messung

Die so erarbeitete Forderung nach mit der Last ansteigendem E-Modul in der ADINA-Rechnung erzwang nun den Wechsel zu einem anderen FEM-Programm, da es nicht möglich gewesen war, die geforderte Variationsmöglichkeit in das bestehende Modell zu implementieren.

3.5 Das ANSYS-Programm

Nun wurde vom IPP^{15/} ein Modell mit dem Programm ANSYS Version 5.0 der Swanson Analysis Systems Inc. in Houston, USA, erarbeitet und zur Verfügung gestellt.

Die Eigenschaften waren zunächst die gleichen wie bei ADINA, d.h. wie oben beschrieben.

Es wurden jedoch Dreiecke als Form der Elemente gewählt, was zu einer kürzeren Rechenzeit führt. Abbildung 3.10 zeigt das ANSYS-Modell:

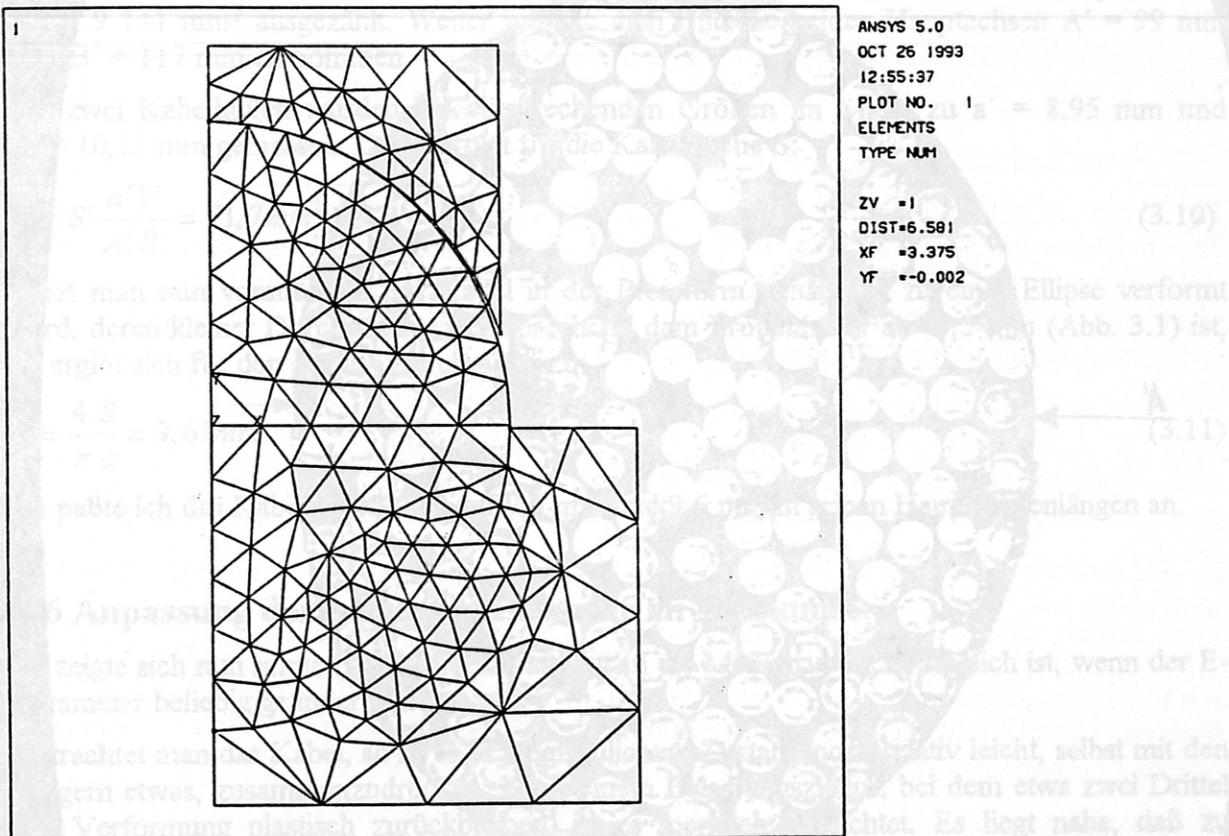


Abbildung 3.10: FEM-Modell des ANSYS-Programms

Während der Entwicklungsphase konnte ich mich diesmal auch in die Modellierung mit einarbeiten und somit selbst nötige Änderungen am Modell vornehmen.

ANSYS hat eine Benutzeroberfläche von der aus alle nötigen Module zur Modellierung, Berechnung, graphischer Auswertung usw. erreicht werden können. Es zeichnet sich dadurch aus, daß die Nomenklatur der Befehle sehr durchgängig ist und diese nach kurzer Gewöhnungszeit auch intuitiv gefunden werden können. Wie bereits erwähnt, läuft ANSYS auf nur einem System und zwar zunächst auf einer VAX. Im Laufe der Arbeiten mit ANSYS wurde das Softwarepaket allerdings auf eine SUN umgestellt. Dies hatte den Nachteil einer erneuten Umstellung bzgl. der Systemumgebung, zahlte sich aber bei den Variationsrechnungen durch ca. 30-fach schnellere Berechnungszeiten wieder aus.

Die Berechnungen wurden nicht interaktiv, sondern wie bei ADINA im Batchmode ausgeführt, so daß die Materialeigenschaften in einem Inputdatenfile übergeben wurden; Anhang B3 zeigt ein solches.

Ein variabler E-Modul kann nun für jeden Belastungsschritt nach folgendem Konstrukt getrennt vorgegeben werden.

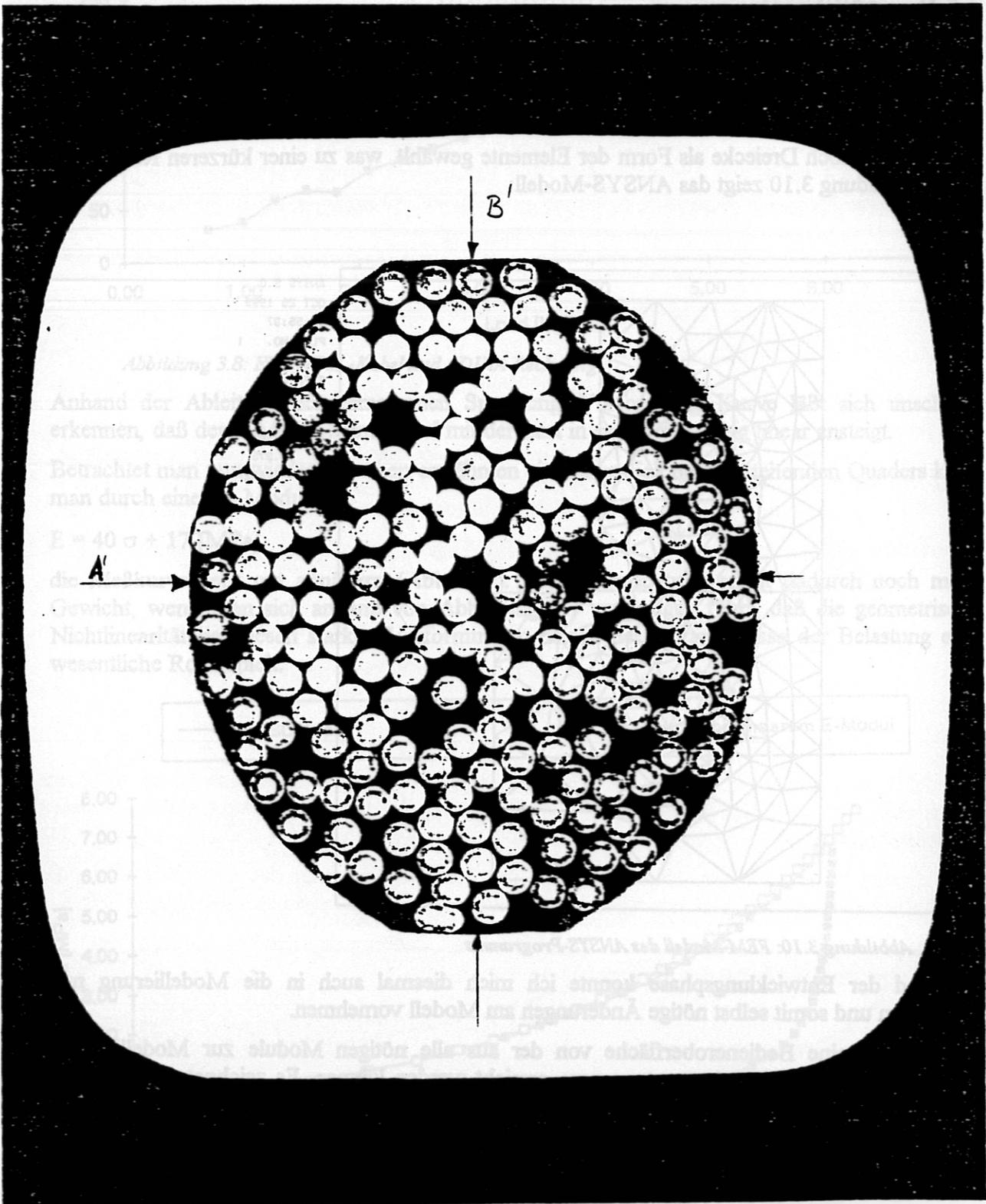


Abbildung 3.11: Schliffbild des CIC-Leiters

Es ist ein linearer Temperaturanstieg definiert. Alle Parameter können nun linear abhängig von der Temperatur definiert werden. Mit der Belastung für den jeweiligen Schritt wird auch eine beliebige Temperatur vorgegeben. So kann für jede beliebige Last ein beliebiger Parametersatz als Grundlage zur Rechnung dienen.

Die Last selbst wurde als Flächendruck auf den Probenstempel vorgegeben. Mit den Abmessungen dieses Stempels von 9,3 mm x 80 mm entspricht einem Belastungsdruck von $\sigma = 1 \text{ MPa}$ die Stempelkraft $F = 744 \text{ N}$.

Die Auswertung ist komfortabel, da man direkt Verschiebungskurven einzelner Punkte oder beispielsweise jede Spannung in graphischen Diagrammen erhält (Anhang B4).

Um eine definierte Startposition für die Messung und eine genaue Nachbildung im Modell zu erhalten, wurde die Fläche S des eingeschlossenen Kabels in der extrudierten Hülle als Grundlage herangezogen. Diese sollte in Messung und FEM-Rechnung übereinstimmen.

Zur Ermittlung der Fläche S wurde zunächst die Fläche S' eines Schliffbildes (Abb. 3.11) vom LMI-Kabel bestimmt. Dazu wurden die Kästchen eines darüberliegenden Millimeterpapiers zu $S' = 9\,141 \text{ mm}^2$ ausgezählt. Weiter wurden dem Bild die beiden Hauptachsen $A' = 99 \text{ mm}$ und $B' = 117 \text{ mm}$ entnommen.

An zwei Kabelhüllen wurden die entsprechenden Größen im Mittel zu $a' = 8,95 \text{ mm}$ und $b' = 10,15 \text{ mm}$ gemessen. Daraus folgt für die Kabelfläche S :

$$S = S' \frac{a' b'}{A' B'} = 71,7 \text{ mm}^2 \quad (3.10)$$

Setzt man nun voraus, daß das Kabel in der Pressform annähernd zu einer Ellipse verformt wird, deren kleiner Durchmesser a entsprechend dem Probenhalter $a = 9,5 \text{ mm}$ (Abb. 3.1) ist, so ergibt sich für den großen Durchmesser b :

$$b = \frac{4 S}{\pi a} = 9,61 \text{ mm} \quad (3.11)$$

So paßte ich das Kabel im Modell auf 9,5 mm und 9,6 mm in seinen Hauptachsenlängen an.

3.6 Anpassung der Materialparameter an Meßkurve

Es zeigte sich nun schnell, daß eine Anpassung an die Meßkurve leicht möglich ist, wenn der E-Parameter beliebig geändert wird.

Betrachtet man das Kabel, so ist es in jungfräulichem Zustand noch relativ leicht, selbst mit den Fingern etwas, zusammenzudrücken. Nach einem Belastungszyklus, bei dem etwa zwei Drittel der Verformung plastisch zurückbleiben, ist es merklich verdichtet. Es liegt nahe, daß zu Beginn noch viele Hohlräume innerhalb des Kabels vorhanden sind, in die sich Strands hineinschieben. Zunächst noch leicht, doch dies dürfte zunehmend schwieriger werden und der seitliche Druck auf die den Freiraum umgebenden Strands wird zunehmen. Diesem Verhalten kann durch eine Erhöhung des Parameters ν mit der Last Rechnung getragen werden. So wurde bei kleiner Querdehnungszahl gestartet und linear gesteigert. Ebenso wurde ein linear ansteigender E-Modul vorgegeben.

In 6 Schritten wurden die Parameter gesteigert, nach jeweils 744 N Belastung.

So wurde $\nu = 0,05 - 0,34$ gewählt.

Nach entsprechenden Variationen des Parameters E wurde die Meßkurve für $E = 50 - 108 \text{ MPa}$ ausreichend gut angenähert (Abb. 3.12). Wertet man für die so vorgegebenen Parameter Gl. (3.2) aus, so stellt man fest, daß sich der Gleitmodul G nur sehr

wenig ändert. D.h. der Gleitmodul G ist die am konstanteste Größe, er nimmt von 23 MPa nahezu linear auf 40 MPa zu.

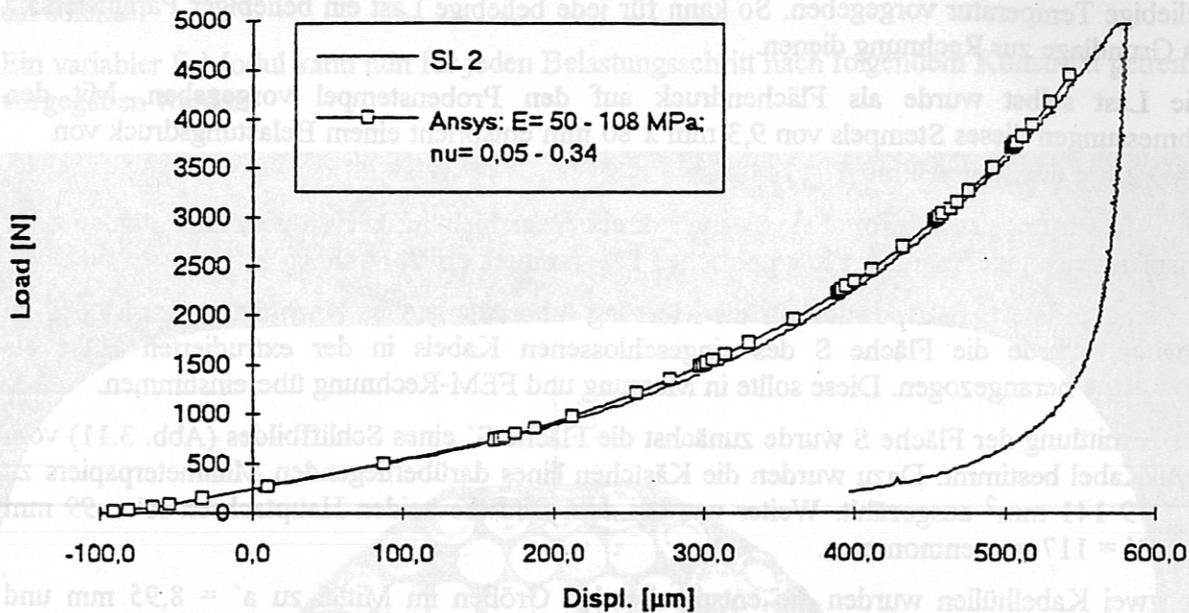


Abbildung 3.12: Load-Displacement-Diagramm für SL2 und ANSYS-Rechnung

Ein Vergleich mit dem oben grob abgeschätzten Wert von 106 MPa zeigt, daß man mit der Berechnung sehr gut im Rahmen liegt. Die etwas niedrigeren Werte in der Rechnung lassen sich dadurch erklären, daß das Kabel im Probenhalter nahezu vollständig eingeschlossen ist und somit bei gleicher Verformung und gleicher Kraft ein kleinerer E-Modul vorliegen muß als im seitlich nicht eingeschlossenen Näherungsfall.

Für den nun berechneten Fall können Spannungsverteilungen und andere Ergebnisse mit ANSYS leicht ausgewertet werden. Dies kann in Form von Listen wie bei ADINA geschehen oder graphisch. Abbildung 3.13 zeigt beispielsweise die Verteilung der Spannung in y -Richtung innerhalb des Kabels. Weitere Spannungsverteilungen finden sich im Anhang B4.

Es läßt sich die Spitzenbelastung oben am Stempel erkennen und die Verteilung des Druckes nach unten hin.

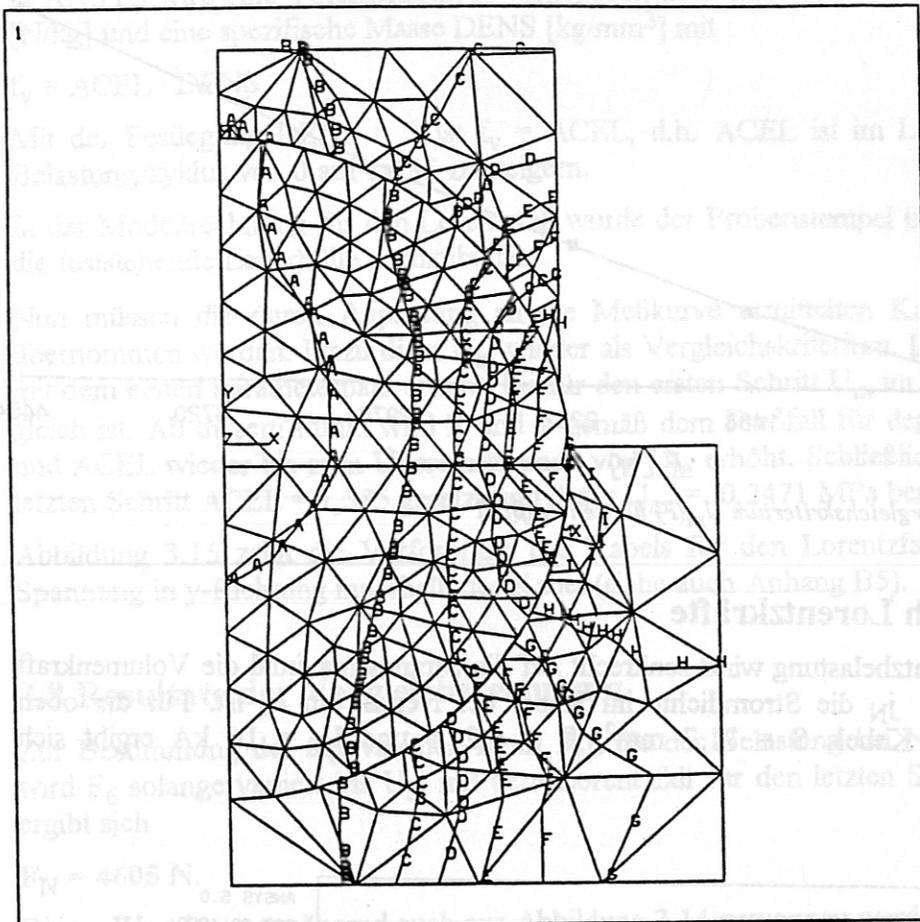
Nun sind mittels ANSYS die herrschenden Spannungen in jedem Knoten bekannt. Hieraus werden jedem Element i die einzelnen Spannungskomponenten σ_x , σ_y , σ_z , τ_{xy} , τ_{yz} und τ_{xz} über das arithmetische Mittel der drei anliegenden Knotenspannungen zugeordnet. Die letzten beiden Komponenten sind aufgrund "plain strain" folgerichtig gleich Null.

Für jedes Element i berechnet sich nun nach Gl. (3.1) die eingebrachte Energiedichte U_{0i} . Diese Dichte wird nun über alle Flächen A_i des Kabels zu U_{0m} gemittelt, nach

$$U_{0m} = \frac{\sum U_{0i} A_i}{\sum A_i} \quad (3.12)$$

Da innerhalb eines jeden Belastungsschrittes j andere Parameter E_j und ν_j gelten, muß die innerhalb eines jeden Schrittes eingebrachte gemittelte Energiedichte ΔU_{0mj} berechnet werden. Wenn F_j die maximale Last im Schritt j ist und $F_0 = 0$, gilt

$$\Delta U_{0mj} = U_{0m}(F_j, E_j, \nu_j) - U_{0m}(F_{j-1}, E_{j-1}, \nu_{j-1}) \quad (3.13)$$



```

ANSYS 5.0
OCT 26 1993
12:48:43
PLOT NO. 4
NODAL SOLUTION
STEP=6
SUB =7
TIME=6
SY (AVG)
RSYS=0
DPMX =0.661446
SMN =-7.966
SMNB=-8.752
SMX =0.575608
SMXB=1.389
A =-7.492
B =-6.543
C =-5.594
D =-4.645
E =-3.695
F =-2.746
G =-1.797
H =-0.848074
I =0.101048
  
```

Abbildung 3.13: σ_y -Verteilung bei Maximalbelastung im Preßfall

Somit ist die gesamte eingebrachte gemittelte Verformungsenergiegedichte U_m die Summe über die Energiegedichten der Einzelschritte:

$$U_m = \sum_j \Delta U_{omj} \quad (3.14)$$

Daraus ist das Vergleichskriterium U_m am Ende der einzelnen Schritte bekannt, siehe Tabelle 3.1. Einfachheit halber wurde die Verformung bei der Flächenmittung nicht berücksichtigt.

Tabelle 3.1: Eingebrachte Verformungsarbeitsdichte im Preßfall

Schritt j	Last F [N]	E_j [MPa]	v_j [1]	ΔU_{omj} [MPa]	U_m [MPa]
1	744	50	0,05	0,0151	0,0151
2	1488	62	0,11	0,0326	0,0477
3	2232	73	0,17	0,0422	0,0899
4	2976	85	0,23	0,0471	0,1370
5	3720	97	0,28	0,0500	0,1870
6	4464	108	0,34	0,0500	0,2370

Abbildung 3.14 zeigt die Abhängigkeit von U_m bzgl. der Last F.

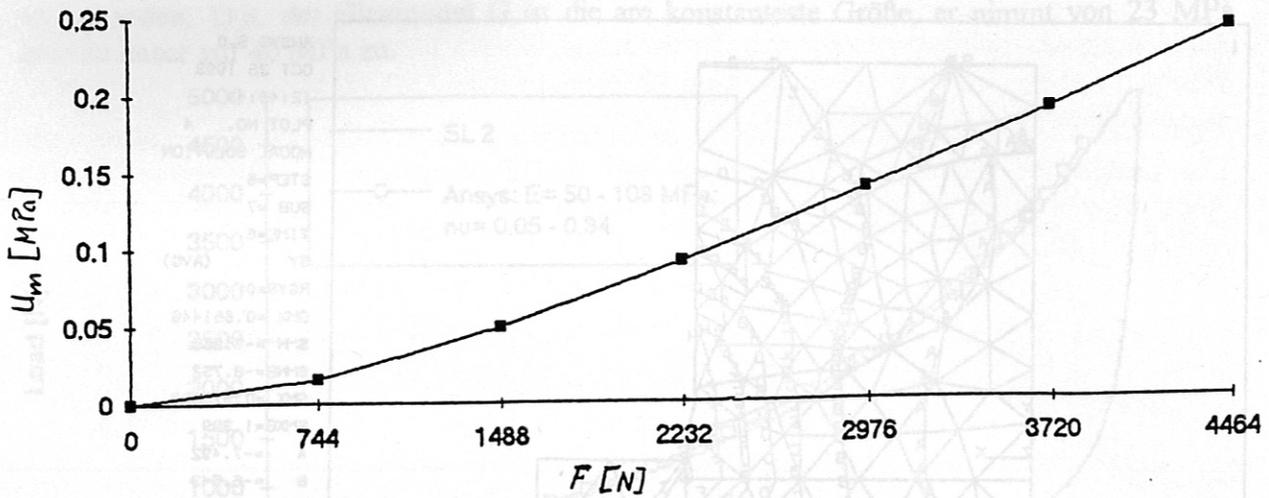


Abbildung 3.14: Vergleichskriterium $U_m(F)$ für den Preßfall

3.7 Belastung durch Lorentzkräfte

Im realen Fall der Lorentzbelastung wirkt senkrecht auf die Strands maximal die Volumenkraft $f_{Lmax} = B \cdot j_N$, wenn j_N die Stromdichte im Kabel bei Nennstrom I_N ist. Für die oben berechnete Fläche des Kabels $S = 71,7 \text{ mm}^2$, $B = 6,2 \text{ T}$ und $I_N = 16 \text{ kA}$ ergibt sich mit $j_N = I_N / S$

$$f_{Lmax} = 1,385 \text{ N/mm}^3.$$

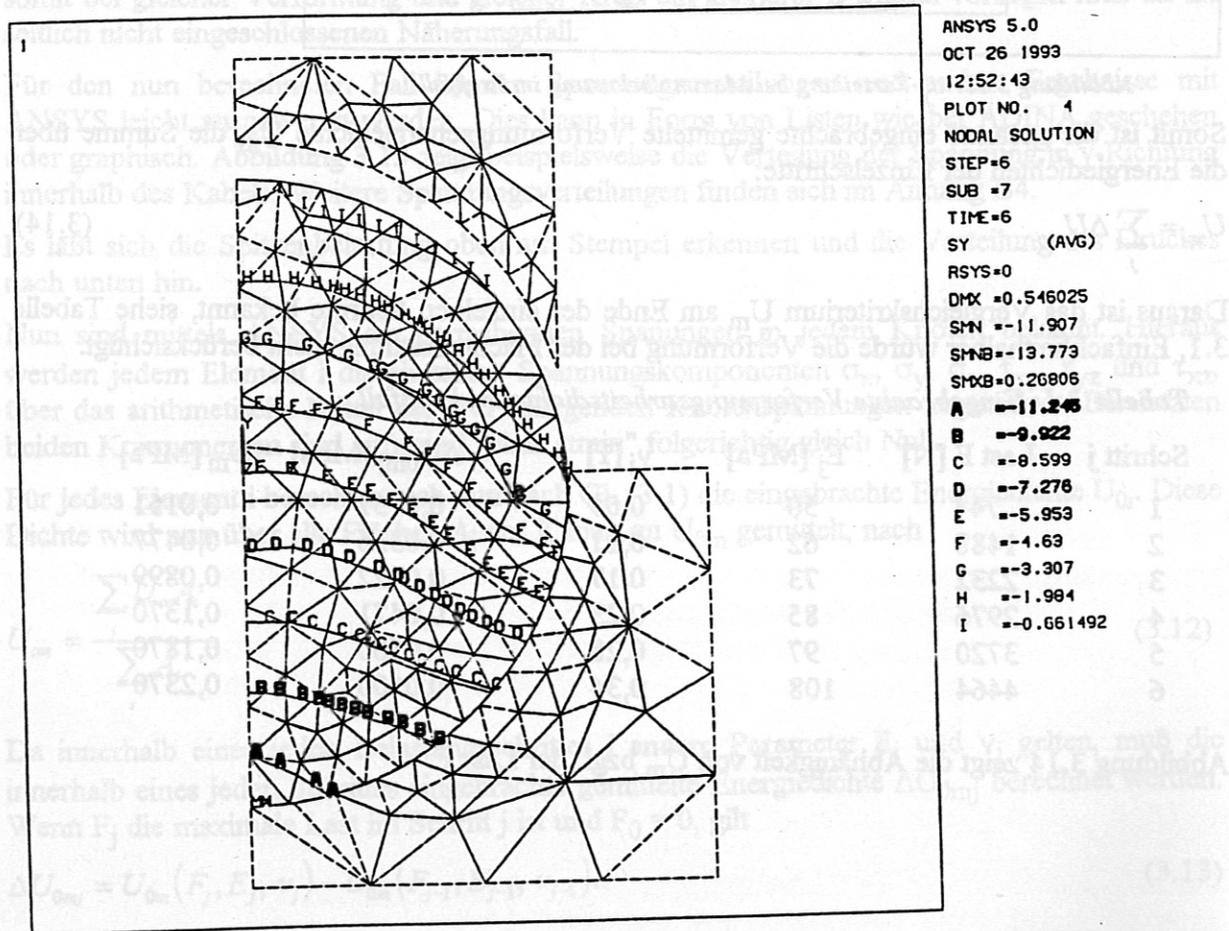


Abbildung 3.15: Verformung und σ_y -Verteilung bei Maximalbelastung im Lorentzfall

In ANSYS wird eine Volumenkraft f_v vorgegeben über eine variierbare Beschleunigung ACEL [N/kg] und eine spezifische Masse DENS [kg/mm³] mit

$$f_v = \text{ACEL} \cdot \text{DENS}.$$

Mit der Festlegung DENS = 1 ist $f_v = \text{ACEL}$, d.h. ACEL ist im Lorentzfall innerhalb des Belastungszyklus von 0 auf 1,385 zu steigern.

In der Modellrechnung für den Lorentzfall wurde der Probenstempel im Programm fixiert, um die feststehende Leiterhülle nachzubilden.

Nun müssen die durch Anpassung an die Meßkurve ermittelten Kabelparameter E und ν übernommen werden. Dazu dient U_m wieder als Vergleichskriterium. D.h. ACEL wird solange mit dem ersten Parameterpaar erhöht, bis für den ersten Schritt U_m im Preßfall und Lorentzfall gleich ist. Ab diesem Punkt wird E und ν gemäß dem Preßfall für den zweiten Schritt erhöht und ACEL wieder bis zum Übereinstimmen von U_m erhöht. Schließlich wird im sechsten und letzten Schritt ACEL = 1,385 gesetzt und dafür $U_m = 0,2471$ MPa berechnet.

Abbildung 3.15 zeigt die Verformung des Kabels für den Lorentzfall und den Verlauf der Spannung in y-Richtung innerhalb des Kabel (siehe auch Anhang B5).

Als Ausgangspunkt für die Weg-Messung soll folgende Definition gelten:

3.8 Resultate der Vergleichsrechnung

Zur Bestimmung der äquivalenten Kraft F_N , die der Belastung bei Nennstrom I_N entspricht, wird F_6 solange variiert bis U_m mit dem Lorentzfall für den letzten Schritt übereinstimmt. Es ergibt sich

$$F_N = 4605 \text{ N}.$$

Dieser Wert kann annähernd auch aus Abbildung 3.14 gewonnen werden. Tabelle 3.2 zeigt den Vergleich der einzelnen Schritte.

Tabelle 3.2: Vergleich von U_m für Preßfall (F) und Lorentzfall (A)

Um(Load)							
Step	Load F [N]	Um(F) [MPa]	Uj(F) [MPa]	Um(F)-Um(A)	Um(A) [MPa]	Uj(A) [MPa]	Load A [N/mm ²]
0	0	0	0	0	0	0	0
1	744	0,01506175	0,01506175	-0,000064	0,01512552	0,01512552	0,216
2	1488	0,04769271	0,03263095	0,000073	0,04761952	0,03249399	0,433
3	2232	0,08986585	0,04217315	0,000076	0,08978968	0,04217016	0,655
4	2976	0,13697997	0,04711412	0,000020	0,13695959	0,04716991	0,880
5	3720	0,18699552	0,05001555	0,000016	0,18697996	0,05002037	1,110
6	4605	0,24702232	0,06002681	-0,000035	0,24705728	0,06007732	1,385

Die Summe der Lorentzkräfte F_{LN} bei Nennstrom auf die 80 mm lange Probe wäre $F_{LN} = f_{Lmax} \cdot S \cdot l_{Probe} = 7936 \text{ N}$.

Bei gleichem Energieinhalt ist das Verhältnis der von außen pro Länge aufgebrauchter Preßkraft zur Summe der Lorentzkräfte pro Länge gegeben durch

$$\frac{F_N}{F_{LN}} = 58\%.$$

Gibt man den Rechnungen für die beiden Fälle ein erhöhtes E-Profil von 80 - 138 MPa vor und vergleicht U_m von beiden Belastungsfällen, so ergibt sich nur eine Abweichung von 1,2 %. Interpoliert man F_N , so tritt eine Veränderung von 0,9 % nach oben auf. Dieser E-Modul-Verlauf führt dazu, daß die Verformung bei F_N nur ca. $\frac{2}{3}$ gegenüber vorher beträgt. D.h. die Vergleichsrechnung ist sehr robust gegen Änderungen der Materialparameter.

Wie Abbildung 3.15 zu entnehmen ist, wird sich sicherlich aufgrund des ausgebildeten Spalts die Reibungszahl für das strömende Helium erniedrigen.

Mit den so ermittelten Größen wurde die Versuchsreihe durchgeführt.

Abbildung 3.15 zeigt die Verteilung des Kabels für den Lorentzfall und den Verlauf der Spannung in y-Richtung innerhalb des Kabels (siehe auch Anhang B5).

7.3 Belastung durch Lorentzkraft

Im realen Fall der Lorentzbelastung wirkt senkrecht zur Stromrichtung die Lorentzkraft F_L an. Diese Kraft führt zu einer Verformung des Kabels, die wiederum zu einer Änderung der Reibungszahl führt. Die Reibungszahl f ist ein Maß für den Widerstand, den ein strömendes Fluid einem Festkörper entgegenstellt. In der Praxis wird die Reibungszahl oft durch die Darcy-Weisbach-Gleichung beschrieben:

$$\Delta p = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v^2$$

Die Reibungszahl f ist eine Funktion der Reynoldszahl Re und der Rauheit ϵ des Rohrs. In der vorliegenden Arbeit wird die Reibungszahl für das strömende Helium durch die Darcy-Weisbach-Gleichung bestimmt. Die Reibungszahl f ist ein Maß für den Widerstand, den ein strömendes Fluid einem Festkörper entgegenstellt. In der Praxis wird die Reibungszahl oft durch die Darcy-Weisbach-Gleichung beschrieben:

Tabelle 3.2: Vergleich von U_m für Profil (P) und Lorentzfall (L)

U (m/s)	U (MPa)						
0	0	0	0	0	0	0	0
0.216	0.015252	0.015252	0.015252	0.015252	0.015252	0.015252	0.015252
0.432	0.030504	0.030504	0.030504	0.030504	0.030504	0.030504	0.030504
0.648	0.045756	0.045756	0.045756	0.045756	0.045756	0.045756	0.045756
0.864	0.061008	0.061008	0.061008	0.061008	0.061008	0.061008	0.061008
1.110	0.081360	0.081360	0.081360	0.081360	0.081360	0.081360	0.081360
1.382	0.101712	0.101712	0.101712	0.101712	0.101712	0.101712	0.101712

Die Summe der Lorentzkraft F_L ist $F_L = 7936 \text{ N}$. Bei gleichem Energieinhalt ist das Verhältnis der von beiden pro Länge angelegten Lorentzkraft zu Summe der Lorentzkraft pro Länge gegeben durch:

$$\frac{F_L}{L} = 28 \text{ N/m}$$

Gibt man den Rechnungen für die beiden Fälle ein erhöhtes E-Profil von 80 - 138 MPa vor und vergleicht U_m von beiden Belastungsfällen, so ergibt sich nur eine Abweichung von 1,2%. Interpretiert man F_L so mit einer Veränderung von 0,9% nach oben auf dieser E-Modul-Verformung, so führt dies zu einer Veränderung der Reibungszahl f von 0,9% nach unten. D.h. die Vergleichsrechnung ist sehr robust gegen Änderungen der Materialparameter.

4. Versuchsdurchführung

4.1 Gemessene Kabel und Definition des Meßnullpunktes

Beim SL-Kabel stellte sich während der Arbeit heraus, daß bei der Herstellung eine Verunreinigung der verseilten Strands mit Mineralöl und Ziehseife stattfand (Anhang C). Da für das Betreiben des CIC-Leiters der Supraleiter aber metallisch sauber vorliegen soll, wurde ein Teil der Proben mit CCl_4 im Ultraschallbad gereinigt.

Somit stehen 4 Kabelsorten mit verschiedenen Eigenschaften zur Verfügung, die wie folgt bezeichnet sind:

- CIC-Leiter vom Hersteller: SL 1 - 7
- CIC-Leiter gereinigt: SL 8 - 15
- CIC-Dummy: D 1 - 8
- Geflochtenes SL-Kabel: G 1 - 6

Als Nullpunkt für die Weg-Messung soll folgende Definition gelten:

Bei den CIC-Leitern ist die Fläche S des extrudierten Kabels gleich der einer Ellipse, die zwischen Probenstempel und Probensockel im Weg-Nullpunkt eingeschrieben ist.

Nach den Abmessungen aus Abbildung 2.2 und der in Kapitel 3.5 ermittelten Fläche $S = 71,7 \text{ mm}^2$ sind die beiden Hauptachsen der eingeschriebenen Ellipse $a = 9,5 \text{ mm}$ (siehe Abb. 2.2) und $b = 9,6 \text{ mm}$. Zur Fixierung des Meßnullpunktes müssen Abstandshalter von 2,10 mm Stärke zwischen Probenstempel und Probensockel angebracht werden (Abb. 4.1).

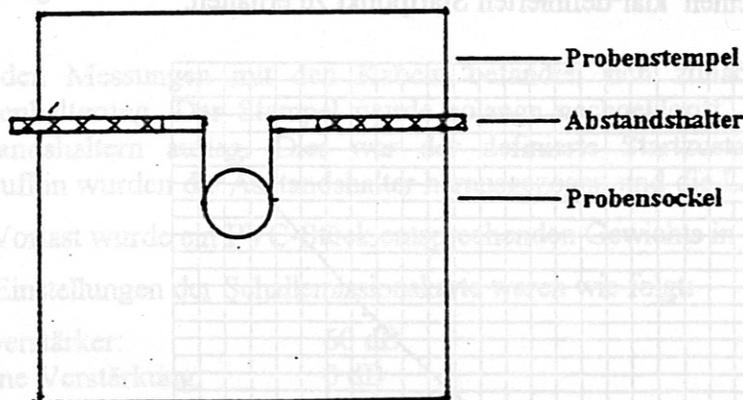


Abbildung 4.1: Probenhalter mit Abstandshalter

Beim geflochtenen Kabel soll das Rechteck zwischen Probenstempel und Probensockel die gleiche Fläche haben wie ein Quadrat mit der Seitenlänge der mittleren Dicke des Kabels.

Gemessen wurde eine mittlere Dicke $d_G = 10,5 \text{ mm}$. Mit den Abmessungen aus Abbildung 2.2 müssen Abstandshalter mit 2,00 mm Stärke als Fixierung dienen (analog Abb 4.1).

4.2 Messung bei $T = 300 \text{ K}$

Da die Verformung des Kabels nicht unmittelbar, beispielsweise durch die Verschiebung von Probenstempel und Probensockel gegeneinander, gemessen wird, sondern am Hebel, gehen die gesamten Oberflächeneffekte des schichtweisen Aufbaus und die Verformung der Presse, einschließlich ihrer Lager, in die Messung mit ein.

Aus diesem Grund ist es zwingend, eine Kalibrierkurve der Anordnung ohne Kabel aufzunehmen.

Bei ersten Kalibrierversuchen zeigte sich, daß Anfangs- und Endpunkte der Kurve ab dem 2.ten Zyklus immer wieder in sich zurückkehren (Abb. 4.2). Für die exakte Messung zur Kalibrierung wurden deshalb nur 2 Belastungszyklen aufgenommen.

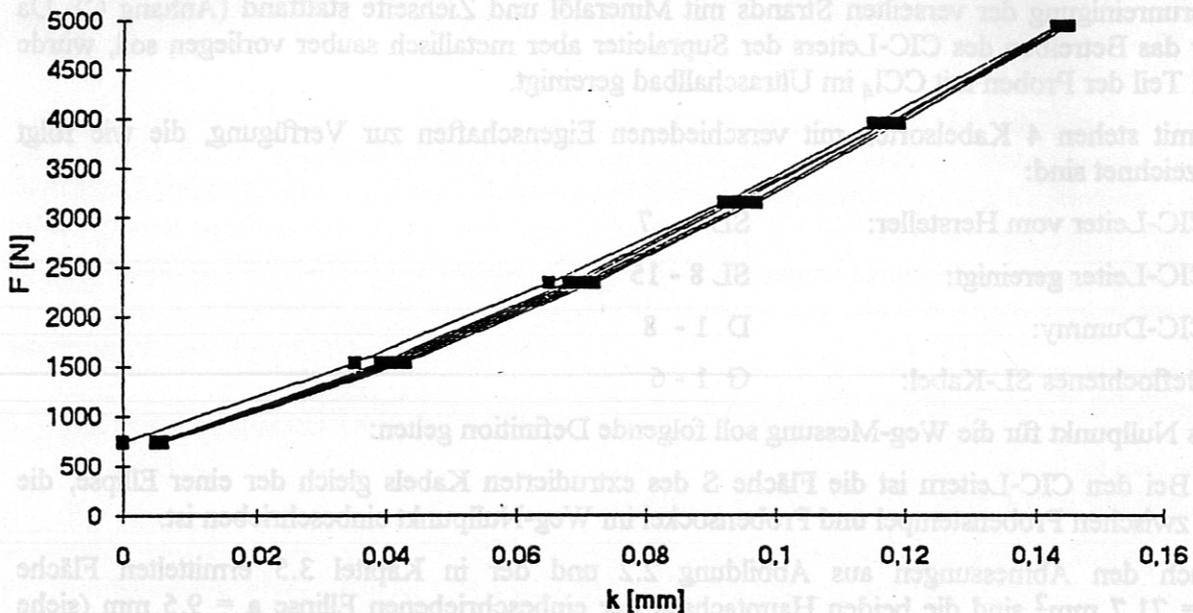


Abbildung 4.2: Verformung der Presse innerhalb von 4 Zyklen

Bei der genauen Kalibrierung (Abb. 4.3) war festzustellen, daß mindestens eine Vorlast $F_V = 200$ N zu wählen ist, um einen klar definierten Startpunkt zu erhalten.

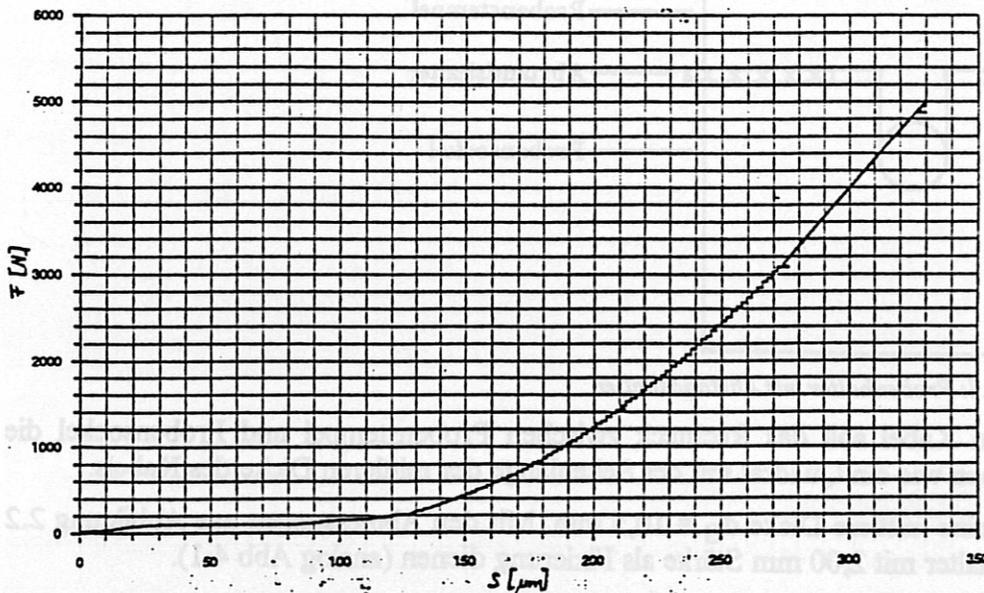


Abbildung 4.3: Kraft-Weg-Kurve der Presse

Die eigentliche Kalibrierkurve $k(F)$ wurde also bei $F_V = 200$ N begonnen und anstatt des Kabels war ein Edelstahlzylinder mit einem Durchmesser $D_E = 9,4$ mm eingelegt. Abbildung 4.4 zeigt die aufgenommenen Meßdaten.

Mit Hilfe dieser Kalibrierkurve konnten nun die Meßdaten korrigiert werden. In jedem Halbzyklus wurde vom Meßwert der Kalibrierwert des entsprechenden Astes der Kurve $k(F)$

subtrahiert. Für den dritten und alle höheren Zyklen wurde wieder der Kalibrierwert des zweiten Zyklus herangezogen, da $k(F)$ für diese Zyklen nach obiger Betrachtung identisch ist.

Weil sich aber alle Messungen im gleichen zeitlichen Rahmen abspielen, wird die Kalibrierung mit der Kalibrierkurve ausgeglichen. Die Ergebnisse sind dadurch nicht verfälscht.

$T = 300 \text{ K}$

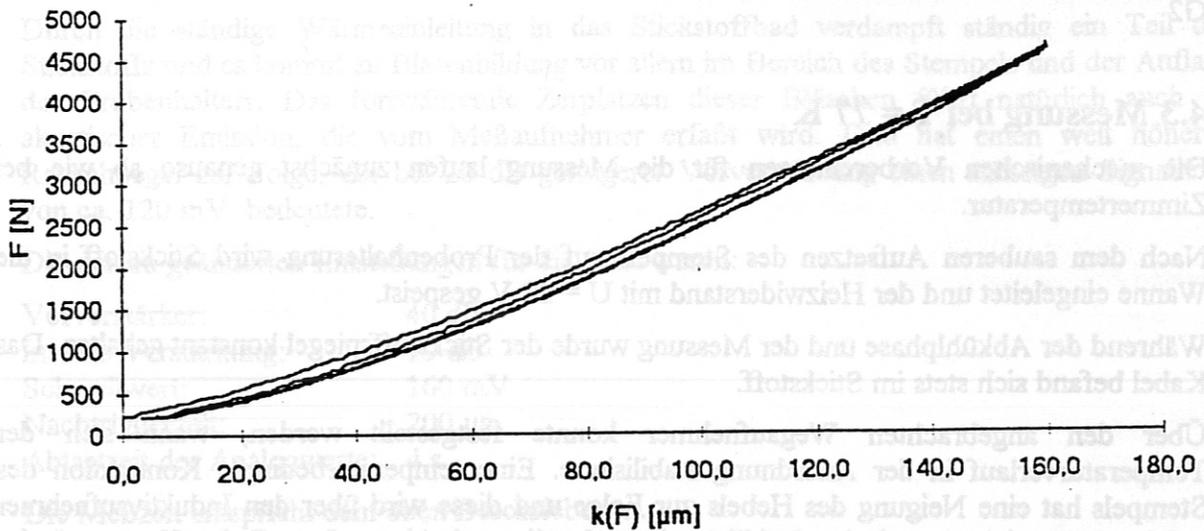


Abbildung 4.4: Kalibrierkurve $k(F)$ für die Presse ($T = 300 \text{ K}$)

Vor Beginn jeder Messung wurde nach dem Aufsetzen des Stempels auf den Probenhalter der Stempel von beiden Seiten mit leichten Hammerschlägen belegt. Dadurch wurde eine optimale Auflage erreicht und ein Verkanten vermieden. Eine gute Kontrollmöglichkeit war die Anzeige des Wegaufnehmers, konnte diese nicht mehr gesteigert werden, lag der Stempel befriedigend auf.

Bei den Messungen mit den Kabeln befanden sich zunächst die Abstandshalter in der Probenhalterung. Der Stempel wurde solange nachgeklopft, bis der Probenstempel auf den Abstandshaltern auflag. Dies war der definierte Startzustand, der aufgezeichnet wurde. Daraufhin wurden die Abstandshalter herausgezogen und die Last konnte erhöht werden.

Als Vorlast wurde ein PVC-Stück entsprechenden Gewichts in den Wasserbehälter gelegt.

Die Einstellungen der Schallemissionskarte waren wie folgt:

Vorverstärker:	60 dB
Interne Verstärkung:	0 dB
Schwellwert:	50 mV
Nachtriggerzeit:	200 μs
Abtastzeit der Analogwerte:	4 s

Der Schwellwertfestlegung ging eine Messung des Rauschpegel von ca. 25 mV voraus.

Während einem Zeitraum von ca. 1000 s wurde die Belastung der Probe auf $F_N = 4605 \text{ N}$ gesteigert. Dasselbe gilt auch für die Entlastung, was einer Anzahl von ca. 500 Datenpunkten pro Zyklus entspricht.

Die Wandlung der Analogwerte durch die SEK 3240 war nur bis zu ca. 6 V linear. Es wurde darauf geachtet, daß die Analogwerte der Meßaufnehmer 5 V nicht überstiegen. War dies bei Messungen abzusehen, wurde diese unterbrochen und der Wegaufnehmer umgesetzt.

Gemessen wurden bei Zimmertemperatur folgende Proben, die zur Auswertung zur Verfügung stehen:

SL 7, 10, 11

D4

G2

4.3 Messung bei $T = 77\text{ K}$

Die mechanischen Vorbereitungen für die Messung laufen zunächst genauso ab wie bei Zimmertemperatur.

Nach dem sauberen Aufsetzen des Stempels auf der Probenhalterung wird Stickstoff in die Wanne eingeleitet und der Heizwiderstand mit $U = 20\text{ V}$ gespeist.

Während der Abkühlphase und der Messung wurde der Stickstoffspiegel konstant gehalten. Das Kabel befand sich stets im Stickstoff.

Über den angebrachten Wegaufnehmer konnte festgestellt werden, wann sich der Temperaturverlauf in der Anordnung stabilisierte. Eine temperaturbedingte Kontraktion des Stempels hat eine Neigung des Hebels zur Folge und diese wird über den Induktivaufnehmer erfaßt. Stellt sich thermische Stabilität ein, geht dies mit einem "zur Ruhe Kommen" der Weganzeige einher.

Nach jeweils ca. 75 min war befriedigende Stabilität erreicht, d.h. der Wegaufnehmer änderte sich um weniger als $1\text{ }\mu\text{m}$ innerhalb von 5 min, und die Messung wurde begonnen.

Nach den Messungen wurde der Stickstoff größtenteils abgeschöpft und die Presse mit einem Föhn wieder erwärmt.

Auch für dieses Temperaturniveau wurde eine Kalibrierkurve aufgenommen und für die Meßdatenkorrektur bei $T = 77\text{ K}$ herangezogen. Abbildung 4.5 zeigt das Ergebnis:

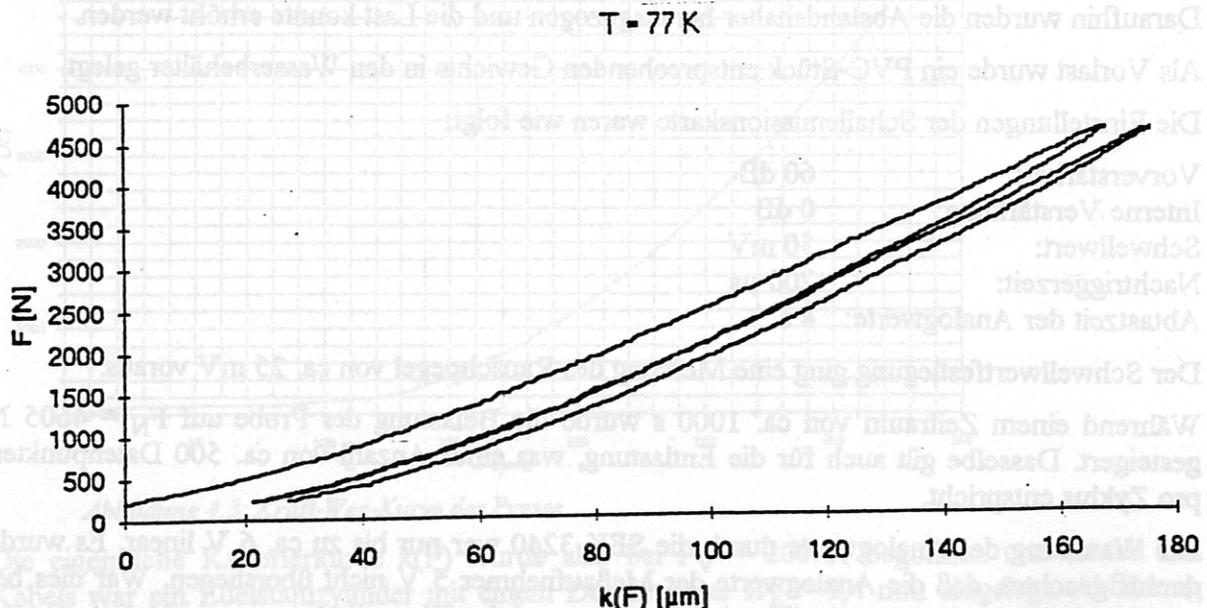


Abbildung 4.5: Kalibrierkurve $k(F)$ für die Presse ($T = 77\text{ K}$)

Die größere Hysterese in der Kalibrierkurve gegenüber der bei Zimmertemperatur rührt daher, daß sich in der gesamten Anordnung Teile wie der Rahmen, die Probenaufgabe usw. langsam

abkühlten. Da diese Teile mit ihrer dadurch bedingten Längenänderung mit in die Messung eingehen, wird eine größere bleibende Verformung der Presse gemessen.

Weil sich aber alle Messungen im gleichen zeitlichen Rahmen abspielen, wird dies durch die Korrektur mit der Kalibrierkurve ausgeglichen, und die Ergebnisse sind dadurch nicht verfälscht.

Durch die ständige Wärmeeinleitung in das Stickstoffbad verdampft ständig ein Teil des Stickstoffs und es kommt zu Blasenbildung vor allem im Bereich des Stempels und der Auflage des Probenhalters. Das fortwährende Zerplatzen dieser Bläschen führt natürlich auch zu akustischer Emission, die vom Meßaufnehmer erfaßt wird. Dies hat einen weit höheren Rauschpegel zur Folge, der bei 20 dB geringerer Vorverstärkung einen ständigen Signallevel von ca. 120 mV bedeutete.

Die darum geänderten Einstellungen für die SEK waren:

- Vorverstärker: 40 dB
- Interne Verstärkung: 10 dB
- Schwellwert: 160 mV
- Nachtriggerzeit: 200 µs
- Abtastzeit der Analogwerte: 4 s

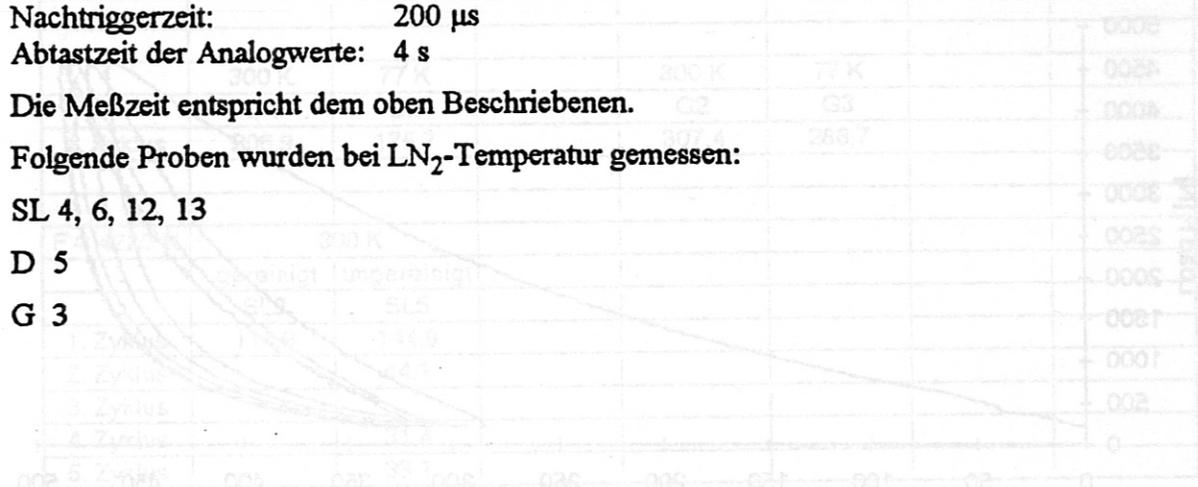
Die Meßzeit entspricht dem oben Beschriebenen.

Folgende Proben wurden bei LN₂-Temperatur gemessen:

SL 4, 6, 12, 13

D 5

G 3



Die während eines Zyklus eingesetzte Energie berechnet sich aus der Differenz zwischen dem Integral über der Load-Displacement-Kurve beim Hochfahren und beim Zurückfahren der Last. Das Integral wurde numerisch aus den Meßdaten mit Hilfe der Trapezregel

$$E_i = \frac{1}{2} (F_{i+1} + F_i) (x_{i+1} - x_i)$$

ermittelt, wenn F_i die Last und x_i die Verformung im Meßpunkt i ist. Das Integral E wird dann

$$E = \sum E_i$$

normiert auf das Volumen der Probe

$$V_{\text{Probe}} = \frac{\pi}{4} d^2 L$$

mit einem mittleren Durchmesser der Probe von $d = 0,3$ mm und $L = 80$ mm ergibt sich

$$V_{\text{Probe}} = 2,37 \text{ cm}^3$$

5. Auswertung und Interpretation der Meßergebnisse

5.1 Kraft-Weg-Hysterese-Kurven

Wie bereits oben beschrieben, ist in jedem Meßwert $s(F)$ die Verformung der Presse mitenthalten und es wird bei einer Vorlast F_0 mit der Messung begonnen. Für die Presse wurde für die beiden Temperaturen die Kalibrierkurve $k(F)$ bestimmt. So errechnet sich die Verformung x der Kabel bei einer Last F nach der Formel

$$x(F) = [s(F) - s(F_0)] - [k(F) - k(F_0)] \quad (5.1)$$

Abbildung 5.1 zeigt einen typischen Load-Displacement-Verlauf der ersten 5 Belastungszyklen eines Kabels vom gereinigten SL-Typ bei Zimmertemperatur. Die maximale Verformung im ersten Zyklus liegt bei $x = 0,45$ mm.

SL11 (gereinigt), $T = 300$ K

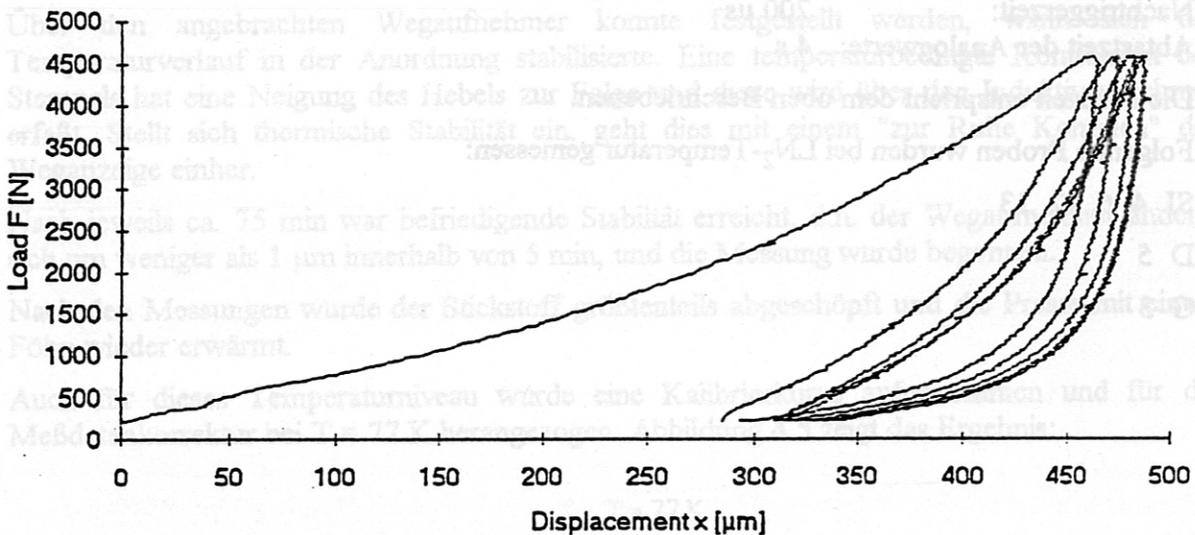


Abbildung 5.1: Load-Displacement-Diagramm SL 11

Die während eines Zyklus eingebrachte Energie berechnet sich aus der Differenz zwischen dem Integral über der Load-Displacement-Kurve beim Hochfahren und beim Zurückfahren der Last. Das Integral wurde numerisch aus den Meßdaten mit Hilfe der Trapezregel

$$E_i = 1/2 (F_{i+1} + F_i) \cdot (x_{i+1} - x_i) \quad (5.2)$$

ermittelt, wenn F_i die Last und x_i die Verformung im Meßpunkt i ist. Das Integral E wird dann aus der Summe über alle E_i gebildet:

$$E = \sum_i E_i \quad (5.3)$$

Normiert auf das Volumen der Probe

$$V_{\text{Probe}} = \pi/4 \cdot l_{\text{Probe}} \cdot d^2 \quad (5.4)$$

ist die eingebrachte Energiedichte

$$e = E/V_{\text{Probe}} \quad (5.5)$$

Mit einem mittleren Durchmesser der Probe von $d = 9,5$ mm und $l_{\text{Probe}} = 80$ mm ergibt sich $V_{\text{Probe}} = 5,67$ cm³.

Es ergibt sich also für den ersten Zyklus eine ins Kabel eingebrachte Energiedichte von $e = 130 \text{ mJ/cm}^3$ (siehe Tab. 5.1).

Um zu oft üblichen Energiewerten pro Strandvolumen zu kommen, sind die in der Arbeit angegebenen Werte von e mit $1/(1 - 0,38)$ zu multiplizieren, wenn die void fraction 38 % beträgt.

Tabelle 5.1:

Eingebrachte Energiedichte e für alle gemessenen Kabel							
F = 4605 N	300 K			77 K			
	gereinigt		ungereinigt	gereinigt		ungereinigt	
	SL10	SL11	SL7	SL12	SL14	SL4	SL6
1. Zyklus	123,5	130,0	144,3	115,3	122,9	123,7	120,5
2. Zyklus	34,2	36,4	42,7	26,7	35,0	31,8	
3. Zyklus	31,9	29,6	36,8	27,4	26,9	27,7	
4. Zyklus	27,1	28,0	35,1				
5. Zyklus	23,9	30,0	32,6				
6. Zyklus		26,5					
	300 K	77 K		300 K	77 K		
	D4	D5		G2	G3		
1. Zyklus	206,9	175,7		307,4	286,7		
F = 4220 N	300 K						
	gereinigt	ungereinigt					
	SL9	SL5					
1. Zyklus	114,9	144,9					
2. Zyklus		44,1					
3. Zyklus							
4. Zyklus		31,4					
5. Zyklus		33,1					

SL7 (ungereinigt), T = 300 K

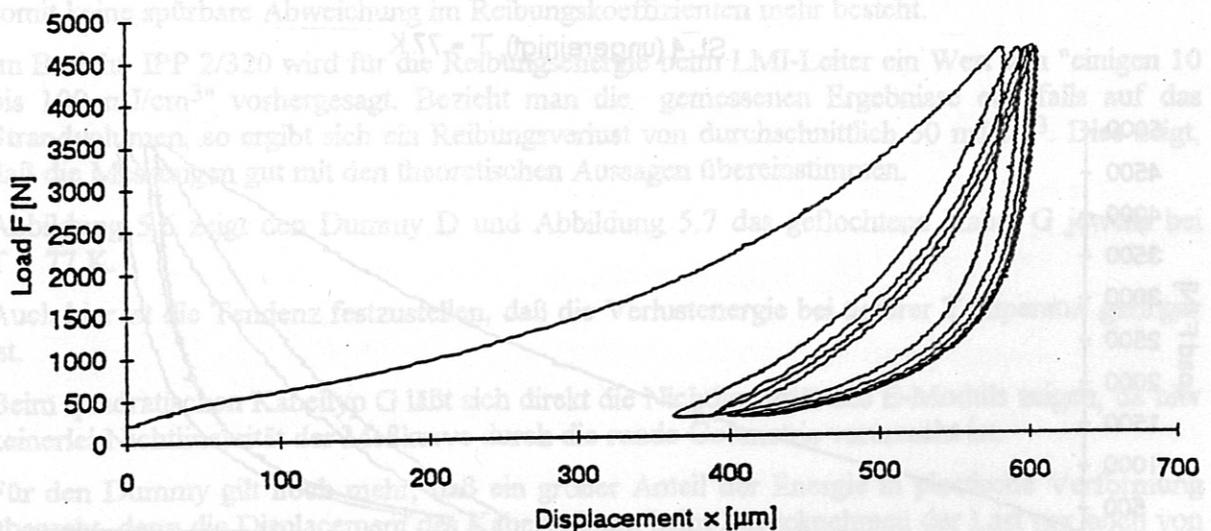


Abbildung 5.2: Load-Displacement-Diagramm SL 7

Vergleicht man bei $T = 300\text{ K}$ das gereinigte Kabel vom Typ SL mit dem Unbehandelten (Abb. 5.2), so stellt man für letzteres eine um $150\text{ }\mu\text{m}$ deutlich größere Verformung fest. Die Energiedichte e ist ebenfalls größer und zwar im ersten Zyklus um durchschnittlich 17 mJ/cm^3 .

Diesen unterschiedlichen Verläufen von gereinigtem und unbehandeltem Kabel entsprechen die beiden E-Modul-Verläufe in der FEM-Rechnung (Kap. 3.8) von $80 - 138\text{ MPa}$ bzw. $50 - 108\text{ MPa}$.

Abbildung 5.3 zeigt das typische Ergebnis einer Messung bei $T = 77\text{ K}$.

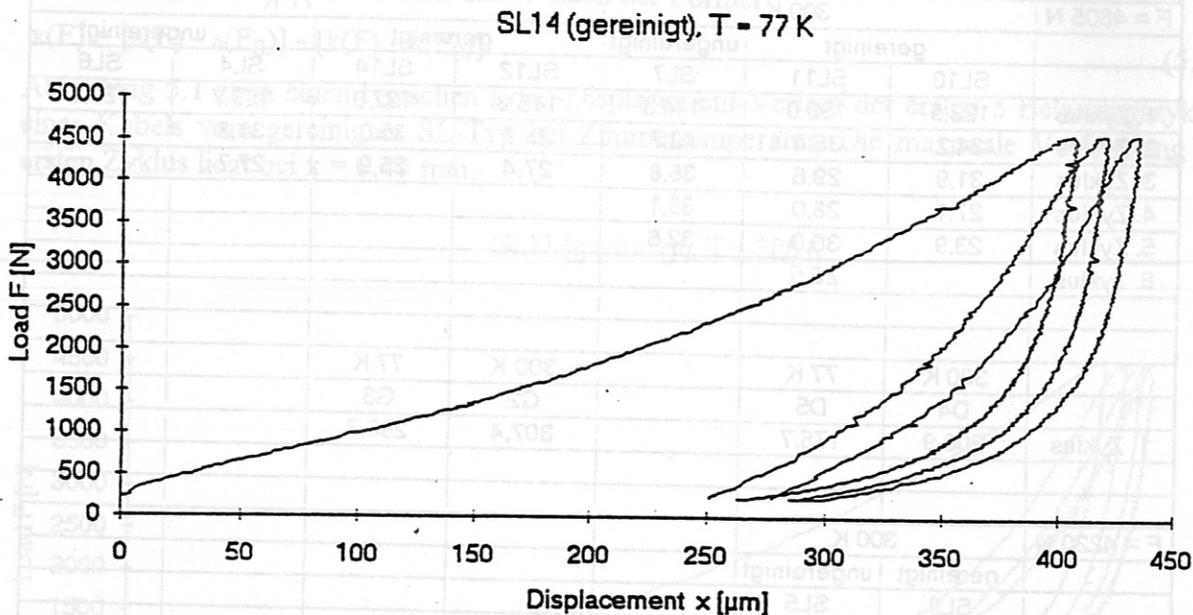


Abbildung 5.3: Load-Displacement-Diagramm SL 14

Die maximale Verformung liegt hier bei ca. $0,40\text{ mm}$ und die im Kabel verbrauchte Energie ist für den ersten Zyklus ebenfalls um durchschnittlich 6% niedriger (siehe Tab. 5.1).

Bei LN_2 -Temperatur ist nun der signifikante Unterschied zwischen gereinigtem und verschmutztem Kabel nicht mehr vorhanden (Abb. 5.4). Auch bzgl. des Energieinhalts sind die Ergebnisse gleich (Tab. 5.1).

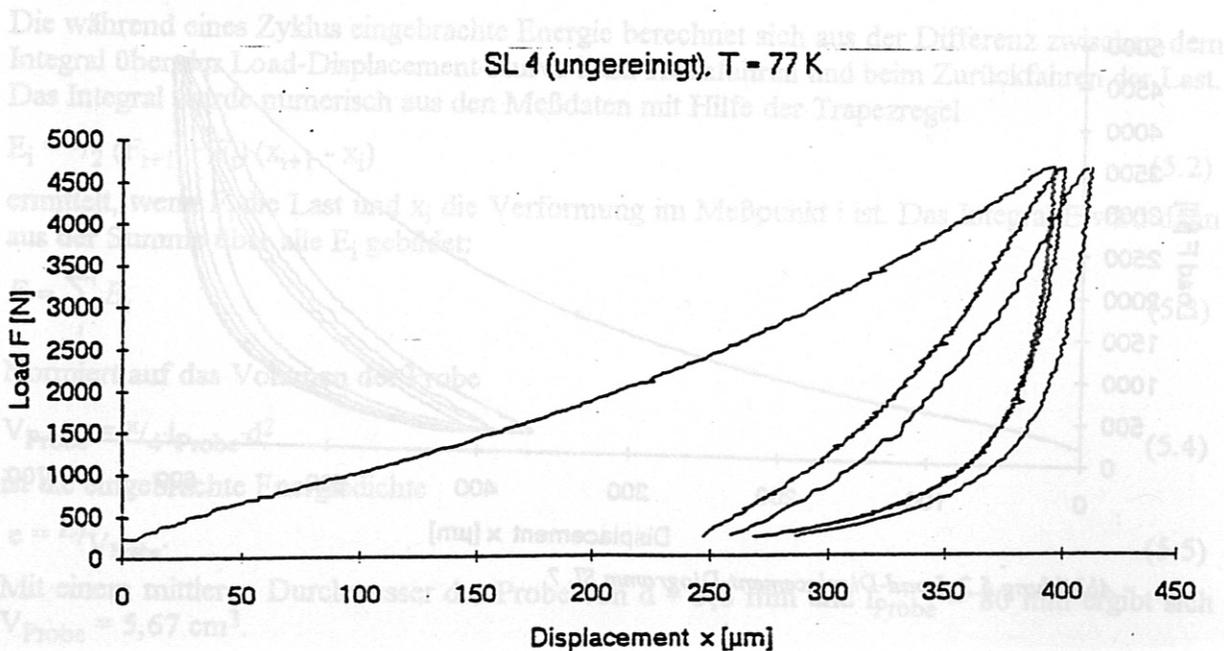


Abbildung 5.4: Load-Displacement-Diagramm SL 4

Die durch die Öl-Verunreinigung niedrigere Reibungszahl μ erleichtert wohl das Rutschen der Strands gegeneinander. Dies führt zu einer größeren Verformung als bei höherem μ , wo sich die Strandoberflächen eher ineinander verhaken und ein weiteres Rutschen verhindern.

Betrachtet man in diesem Zusammenhang jeweils den 5. Zyklus der beiden Kabelsorten (Abb. 5.5), dürfte hier die plastisch verbrauchte Energie nur noch eine geringe Rolle spielen, da sich die Kurven des 4. und des 5. Zykluses nahezu überdecken. D.h. es wird vornehmlich Reibungsenergie verbraucht. Auch hier ist die eingebrachte Energie des gereinigten Kabels mit durchschnittlich 27 mJ/cm^3 gegenüber 34 mJ/cm^3 kleiner (siehe Tab. 5.1). Nach den Aussagen des Berichtes IPP 2/320 steigt die Reibungsenergie mit $\mu \cdot (L/d)^3$. Mit kleinerem μ erhöht sich wohl effektiv die freie Strandlänge L bei konstantem Straddurchmesser d . Nach den Messungen scheint dieser Effekt in der dritten Potenz zu dominieren.

5.Zyklus SL7 und SL 11, T = 300 K

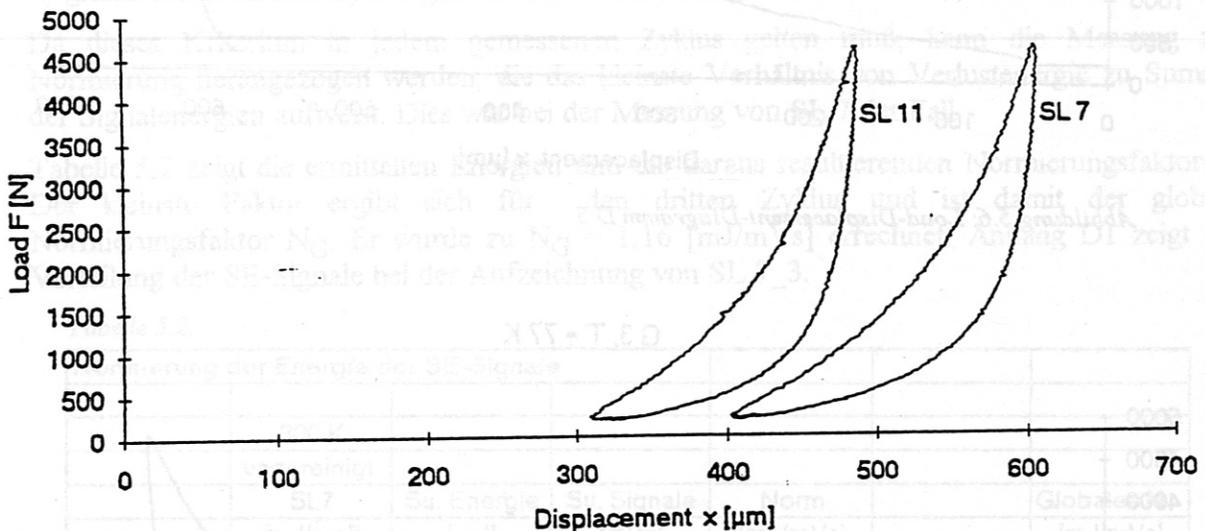


Abbildung 5.5: Load-Displacement-Diagramm des 5. Zyklus SL 7 und SL 11

Bei LN_2 -Temperatur ist dieser Unterschied, wie schon erwähnt, nicht mehr vorhanden. Dies kann dadurch erklärt werden, daß alle flüssigen Ölspuren bei $T = 77 \text{ K}$ festgefroren sind und somit keine spürbare Abweichung im Reibungskoeffizienten mehr besteht.

Im Bericht IPP 2/320 wird für die Reibungsenergie beim LMI-Leiter ein Wert von "einigen 10 bis 100 mJ/cm^3 " vorhergesagt. Bezieht man die gemessenen Ergebnisse ebenfalls auf das Strandvolumen, so ergibt sich ein Reibungsverlust von durchschnittlich 50 mJ/cm^3 . Dies zeigt, daß die Messungen gut mit den theoretischen Aussagen übereinstimmen.

Abbildung 5.6 zeigt den Dummy D und Abbildung 5.7 das geflochtene Kabel G jeweils bei $T = 77 \text{ K}$.

Auch hier ist die Tendenz festzustellen, daß die Verlustenergie bei tieferer Temperatur geringer ist.

Beim quadratischen Kabeltyp G läßt sich direkt die Nichtlinearität des E-Moduls zeigen, da hier keinerlei Nichtlinearität der Meßkurve durch die runde Geometrie verursacht ist.

Für den Dummy gilt noch mehr, daß ein großer Anteil der Energie in plastische Verformung übergeht, denn die Displacement des Kabels nimmt beim Zurücknehmen der Last nur noch von ca. 620 µm um 40 µm ab. Dem Dummy fehlen die Filamente aus dem härteren Niobtitan.

D5.T - 77 K

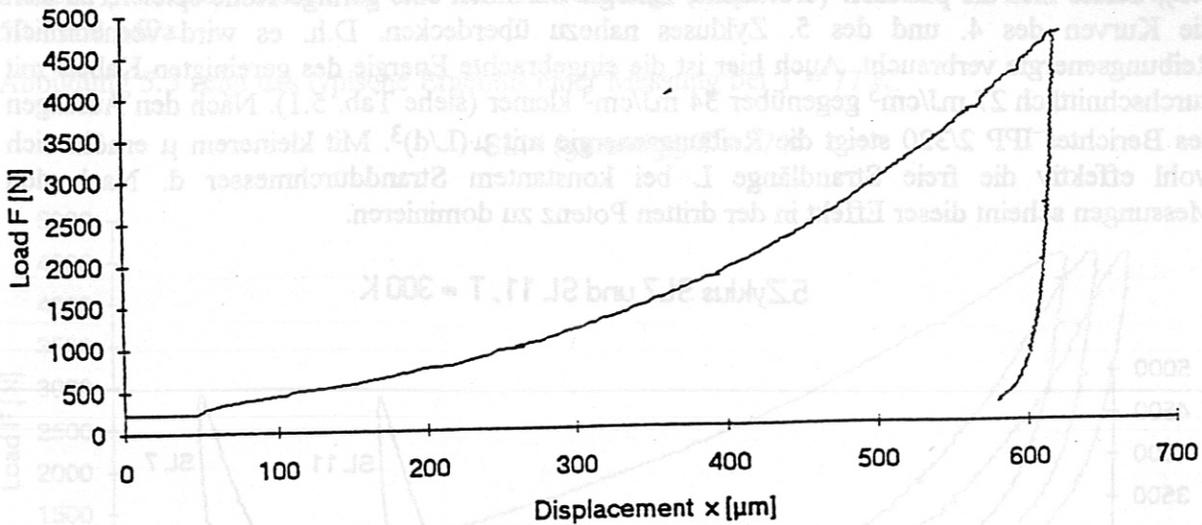


Abbildung 5.6: Load-Displacement-Diagramm D 5

G3.T - 77 K

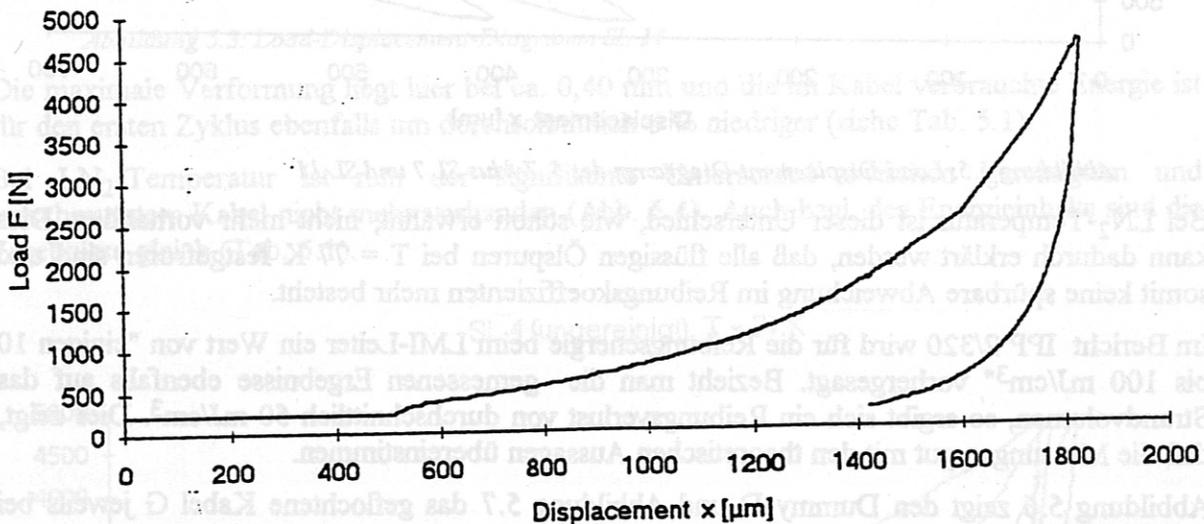


Abbildung 5.7: Load-Displacement-Diagramm G 3

Bei allen Kabeltypen sind deutliche Einkerbungen an den Strands nach den Versuchen an den Stellen zu erkennen, an denen sich die Strands überkreuzten. Hier dürfte der Hauptteil der plastischen Verformung zurückgebliebenen und die entsprechende plastische Energie verbraucht worden sein.

5.2 Akustische Emissionssignale

5.2.1 Normierung der Energie der SE-Signale

Bevor es an die genauere Auswertung der Meßdaten der akustischen Emissionssignale geht, muß zunächst das Problem der Normierung dieser Signale geregelt sein. Es soll der in [mVs] aufgezeichnete Energieinhalt der Signale zu dem gemessenen Energieverlust [mJ] des Kabels in Bezug gesetzt werden.

Diese Signale werden zuerst mit der oben ermittelten Kalibrierkurve (Abb. 2.13) korrigiert. Danach wird ein sehr konservatives Kriterium zur Normierung herangezogen:

Die Summe der Energien aller in einem Zyklus aufgezeichneten Signale muß kleiner oder gleich der in diesem Zyklus gemessenen Verlustenergie E sein.

Da dieses Kriterium in jedem gemessenen Zyklus gelten muß, kann die Messung zur Normierung herangezogen werden, die das kleinste Verhältnis von Verlustenergie zu Summe der Signalenergien aufweist. Dies war bei der Messung von SL 7 der Fall.

Tabelle 5.2 zeigt die ermittelten Energien und die daraus resultierenden Normierungsfaktoren. Der kleinste Faktor ergibt sich für den dritten Zyklus und ist damit der globale Normierungsfaktor N_G . Er wurde zu $N_G = 1,16$ [mJ/mVs] errechnet. Anhang D1 zeigt die Verteilung der SE-Signale bei der Aufzeichnung von SL 7_3.

Tabelle 5.2:

Normierung der Energie der SE-Signale						
	300 K					
	ungereinigt					
	SL7	Su. Energie	Su. Signale	Norm		Globales N
	[mJ/cm ²]	[mJ]	[mVs]	[mJ/mVs]		[mJ/mVs]
1. Zyklus	144,3	818,17	163,78	5,00		1,16
2. Zyklus	42,7	242,01	177,98	1,36		
3. Zyklus	36,8	208,68	179,16	1,16		
4. Zyklus	35,1	199,18	129,48	1,54		
5. Zyklus	32,6	184,85	122,46	1,51		

An diesen Ergebnissen von SL 7 sieht man, daß scheinbar nicht alles der verbrauchten Energie in Ereignisse, die akustisch aufgezeichnet werden können, umgeformt wird. Beim ersten Zyklus beispielsweise findet sehr viel plastische Verformung statt (Abb. 5.2), und hierfür registriert man nur ein Fünftel der Verlustenergie als SE-Signale (Tab. 5.2): Der Normierungsfaktor im ersten Zyklus errechnet sich zu 5 mJ/mVs im Gegensatz zu N_G von ungefähr 1 mJ/mVs.

Vergleicht man N_G mit weiteren Zyklen bei SL 7, so stellt man fest, daß Reibungsenergie wohl noch durch andere Vorgänge verloren geht, die ich als nicht hörbare Mikroereignisse bezeichnen möchte. Diese sind wohl weniger energiereich und damit weniger gefährlich, überdies dürften sie über den ganzen Zyklus verteilt sein.

Dies wird wohl auch bei dem Zyklus der Fall sein, der letztlich zur Normierung herangezogen wurde. So ist dieser globale Normierungsfaktor N_G und damit die errechneten Energien der Einzelsignale als Obergrenze zu verstehen.

Die Übertragbarkeit dieser Normierung auf andere Messungen erklärt sich dadurch, daß sich am Schallübertragungsverhalten nichts ändert und somit ein gleiches Ereignis zum gleichen

Signal führt. Lediglich bei LN_2 -Temperatur ist der Raum zwischen den Strands mit Stickstoff gefüllt, wodurch sich die Übertragungseigenschaften aber nur verbessern dürften, da im allgemeinen Schall in Flüssigkeiten besser geleitet wird als in Luft. N_G bleibt damit sein Charakter als Obergrenze erhalten.

Alle in der weiteren Auswertung aufgeführten Energiewerte von Signalen, angegeben in mJ, sind wie unter Kapitel 2.3.2 beschrieben kalibriert und mit N_G normiert.

5.2.2 Anzahl der aufgezeichneten Bursts

Betrachtet man zunächst die Häufigkeit der aufgezeichneten Signale, so ergibt sich ein sehr differenziertes Bild:

Gezählt wurden alle registrierten Bursts über einem Belastungszyklus, wobei noch unterschieden wurde, ob die Signale beim Aufwärts- oder Abwärtsfahren der Belastung auftraten. In Tabelle 5.3 ist die Anzahl der Bursts signale für alle Meßkurven aufgelistet.

Tabelle 5.3:

Zahl der aufgezeichneten SE-Signale							
F = 4605 N	300 K				77 K		
	gereinigt		ungereinigt		gereinigt		ungereinigt
	SL10	SL11	SL7	SL12	SL14	SL4	SL6
1. Zyklus	409	377	1541	1260	842	228	255
auf	338	351	616	1168	811	216	226
ab	71	26	925	92	31	12	29
2. Zyklus	74	20	982	336	388	18	
auf	69	16	133	132	357	11	
ab	5	4	849	204	31	7	
3. Zyklus	34	41	883	138	44	292	
auf	8	6	156	77	31	253	
ab	26	35	727	61	13	39	
4. Zyklus	16	6	723				
auf	9	2	79				
ab	7	4	644				
5. Zyklus		22	769				
auf		14	112				
ab		8	657				
6. Zyklus		14					
		8					
		6					
	300 K	77K	300 K	77K			
	D4	D5	G2	G3			
1. Zyklus	265	55	217	415			
auf	177	47	214	339			
ab	88	8	3	76			

Vergleicht man den jeweils ersten Zyklus miteinander, so stellt man bei $T = 300 \text{ K}$ fest, daß der gereinigten SL-Typus mit ca. 400 Bursts deutlich unter dem ungereinigten mit ca. 1500 Signalen liegen. Dagegen kehrt sich dieses Verhältnis in ungefähr 1000 zu 250 bei $T = 77 \text{ K}$ um.

Stellt man gleiche Kabeltypen bei unterschiedlicher Temperatur gegenüber, so ergibt sich folgendes Bild: Beim gereinigten SL-Kabeltyp erhöht sich die Burstanzahl bei LN_2 -Temperatur von durchschnittlich 400 auf 1000. Die ungereinigten SL-Proben verhalten sich mit 1500 zu

250 gegenläufig. Die Anzahl nimmt beim Dummy D ebenfalls mit der Temperatur von 265 auf 55 ab, wogegen beim geflochtene Kabel G die Anzahl von 217 auf 415 steigt.

Zwei Dinge haben hierauf einen Einfluß, die den Vergleich zwischen den Temperaturen verfälschen.

Zum einen wurde bei LN_2 -Temperatur eine deutlich höhere Schwelle (s. Kap. 4) eingestellt, was dann zu einer Abnahme der Signalzahl führt. Diesen Einfluß zeigt in Tabelle 5.3 die Meßreihe SL 4: Hier wurde beim dritten Zyklus die Schwelle auf 60 mV gesetzt und die Anzahl der Signale erhöht sich beträchtlich.

Auf der anderen Seite ist das Kabelseil bei LN_2 -Temperatur mit flüssigem Stickstoff umgeben, was zur besseren Schalleitung zwischen den Strands und damit zu größeren Signalen für gleiche Ereignisse führen könnte. Dadurch überschreiten wieder mehr Signale den Schwellwert.

Weiter ist festzustellen, daß die Anzahl der Burstsignale innerhalb der Meßreihe eines Kabels mit den Zyklen erwartungsgemäß abnimmt. Bei $T = 300 \text{ K}$ nimmt für das gereinigte SL-Kabel die Schallemissionsrate ab dem 3. Zyklus auf nahezu null ab. Das Ungereinigte bleibt hier bei Werten um 750 stabil. Ebenso ist eine Abnahme bei $T = 77 \text{ K}$ für gleiche Schwellwerte ersichtlich.

Die Tatsache, daß Zyklen aufgezeichnet wurden, die nahezu keine akustische Emission aufweisen, dient auch als Beweis, daß keine Signale von der Presse oder von außen eingeleitet wurden.

Für alle Meßreihen mit genügend hoher Signalzahl außer für das ungereinigte Kabel SL 7 bei $T = 300 \text{ K}$ gilt, daß beim Hochfahren der Belastung die Burstrate größer ist als beim Zurückfahren. Für SL 7 ist vom 1. Zyklus an dieses Verhältnis umgekehrt.

Keinen Einfluß auf die Burstrate scheint die Geschwindigkeit der Lastzunahme zu haben. Für den 6. Zyklus von SL 11 wurde die Maximallast nicht nach ca. 20 min erreicht, sondern schon innerhalb von 2 min. Dies hatte keine signifikante Änderung der Signalzahl zur Folge.

Als wichtiges Ergebnis bleibt dagegen folgende Erkenntnis festzuhalten:

Eine leichte Erhöhung oder Schwankung der Last im Maximalpunkt zieht eine starke Aktivität akustischer Emission nach sich und dies auch in höheren Zyklen. Solche erhöhte Schallemission war zu beobachten, wenn die Maximallast leicht, d.h. um wenige Prozent, überschritten wurde oder beim Öffnen des Ablassventils am Wasserbehälter kurzzeitige Schwankungen der Last verursacht wurden. Dieses Phänomen trat auch auf, wenn während des Versuchs an die Anordnung gestoßen wurde, wobei die Energieinhalte dieser SE-Signale im Rahmen der übrigen Emission lag.

5.2.3 Energie und Verteilung der Signale

Wie sind nun diese Signale auf die Belastungskurve verteilt und was sind typische Energiegrößen dieser Burstsignale? In Abbildung 5.8 sind die Bursts über der Last F mit ihren ermittelten Energiewerten aufgetragen. Es handelt sich bei diesem typischen Beispiel um die Probe SL 12 im ersten Zyklus beim Aufwärtsfahren der Last.

Es ist festzuhalten, daß die allermeisten Signale Energiewerte bis 5 mJ aufweisen. In den meisten Zyklen treten noch zusätzlich einige Signale mit Werten typisch bis zu 10 mJ auf.

Die Verteilung der Signale nun ist derart, daß für niedrige Last die meisten Bursts auftreten. Das ist der Bereich, in dem auch die Verformung pro Krafteinheit am größten ist.

Für das supraleitende Kabel ist aber noch interessanter wie die Bursts bzgl. des Stromes im Kabel verteilt sind. Für die Lorentzbelastung im Kabel gilt $F \sim I^2$.

Burstsignale SL12: 1.Zyklus auf

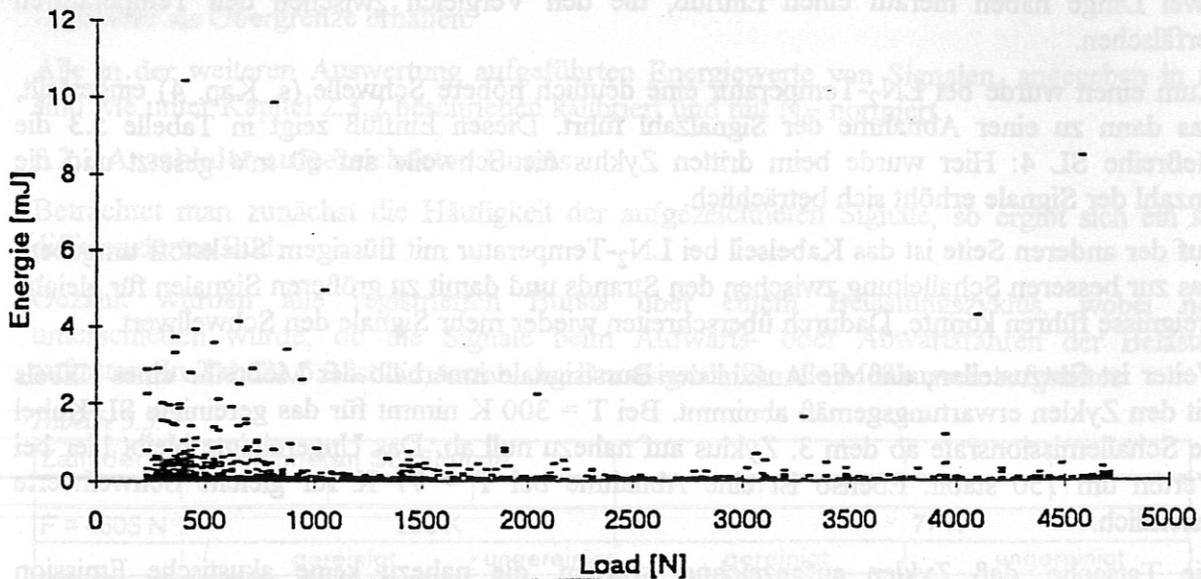


Abbildung 5.8: Verteilung der SE-Signale bzgl. der Last von SL 12

Somit gilt für $F_{\max} = 4605 \text{ N}$ bei $I_{\max} = I_N = 16 \text{ kA}$

$$\frac{I}{I_{\max}} = \sqrt{\frac{F}{F_{\max}}}$$

Abbildung 5.9 zeigt die Verteilung der Signalenergien bzgl. des Verhältnisses I/I_{\max} :

Burstsignale SL12: 1.Zyklus auf

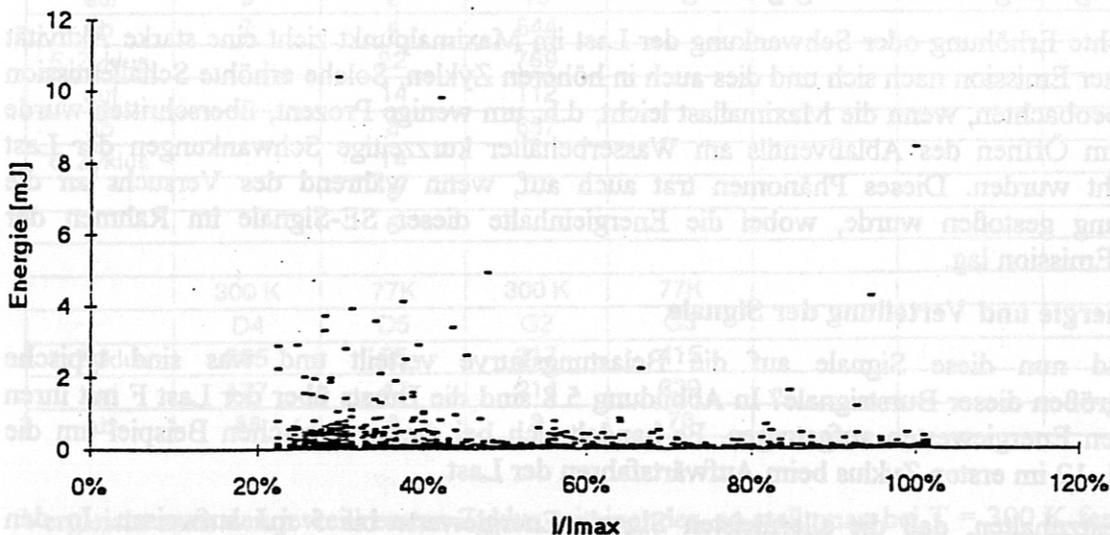


Abbildung 5.9: Verteilung der SE-Signale bzgl. I/I_{\max} von SL 12

Hieraus ist ersichtlich, daß die meisten Signale und die überwiegende Zahl der energiereichen Bursts im weniger quenchempfindlichen Bereich auftreten.

Schließlich zeigt Abbildung 5.10 die typische Verteilung der Burstenergien, aufgetragen über der Last beim Zurückfahren derselben. Es gelten im Prinzip dieselben Aussagen wie für Abbildung 5.8.

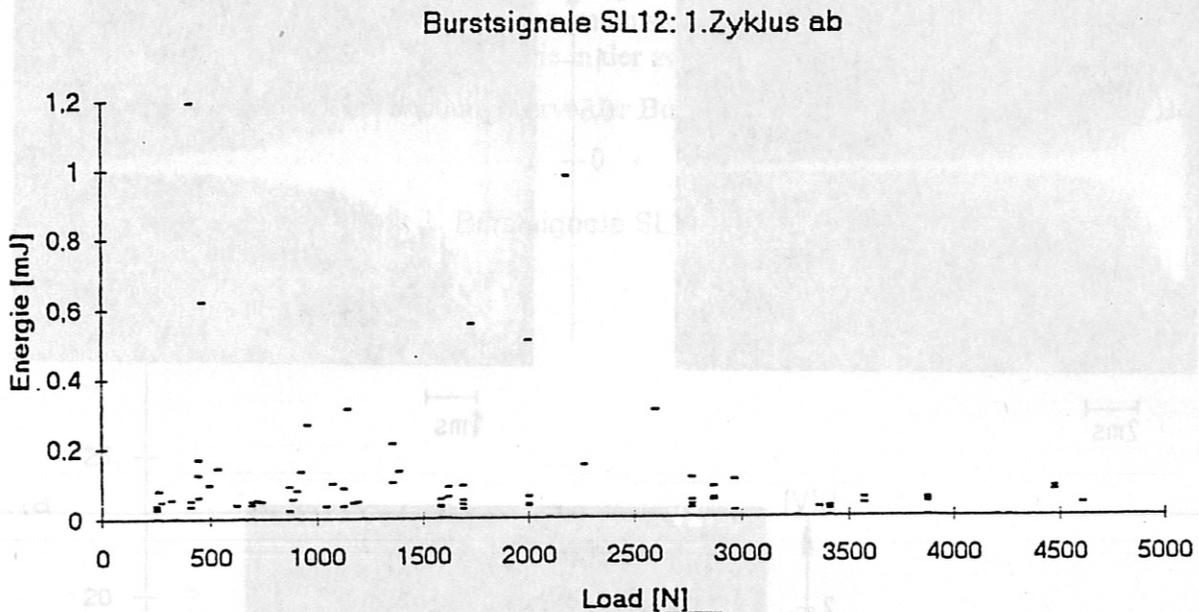


Abbildung 5.10: Verteilung der SE-Signale bzgl. der Last von SL 12

Im Anhang D2 finden sich weitere Verteilungskurven quer durch die Palette der Messungen der SL-Kabel.

Zuletzt schließlich zu der wichtigsten Frage nach der Energieabschätzung der aufgezeichneten Burstsignale.

Die häufiger registrierten Signale von 5 - 10 mJ Energie erstrecken sich über eine Signaldauer von 4 - 8 ms. Es ist dabei zu erwähnen, daß Aufschwingen und Abklingen der Komponenten in der Meßkette letztendlich auch mitgemessen werden^{7/}.

Die Anstiegszeit R liegt in der Regel unter 5 % der Signaldauer, d. h. bei wenigen 100 μ s.

Die Zahl der Überschwinger N pro 1 ms bewegt sich zwischen 50 und 90, was einer Frequenz von 50 - 90 kHz entspricht.

Die Amplitude der Signale verhalten sich annähernd wie die Energien der Signale.

Bei der Aufzeichnung der Burstsignale mit dem Oszilloskop war deutlich festzustellen, daß es sich um einzelne Ereignisse handelt. Einige Beispiele von solchen Aufzeichnungen zeigen die Abbildungen 5.11 a - c.

In Tabelle 5.4 sind die energiereichsten SE-Signale aller SL-Meßreihen nach Temperatur getrennt zusammengestellt. In dieser Tabelle wurden die jeweils größten Signale des ersten Zykluses eines jeden Kabels aufgenommen, sowohl beim Erhöhen der Last (a) als auch beim Zurückfahren der Last (b). Weiter wurden alle Signale der SL-Messungen aufgenommen, die eine Signalenergie von wenigsten 10 mJ aufwiesen.

Spalte 3 - 8 enthält die von der SEK-Karte aufgezeichneten Werte der entsprechenden Signalgrößen.

Es ist also festzustellen, daß, wenn auch sehr wenige, Signale auftreten, die Signalenergien von bis zu 32 mJ enthalten. Hierbei handelt es sich um sehr lange Signale mit einer Dauer von bis zu 14 ms. Auffällig ist dabei, daß die Anstiegszeit R mit zum Teil 4 ms sehr lang ist. Dies deutet darauf hin, daß hier mehrere Ereignisse stattfinden, eventuell eine kleine Lawine von Rutschereignissen losgetreten wurde. Nichtsdestotrotz kann dieses als ein Reibungsereignis für das SL-Kabel aufgefaßt werden, dem diese hohe Energie zugeordnet ist.

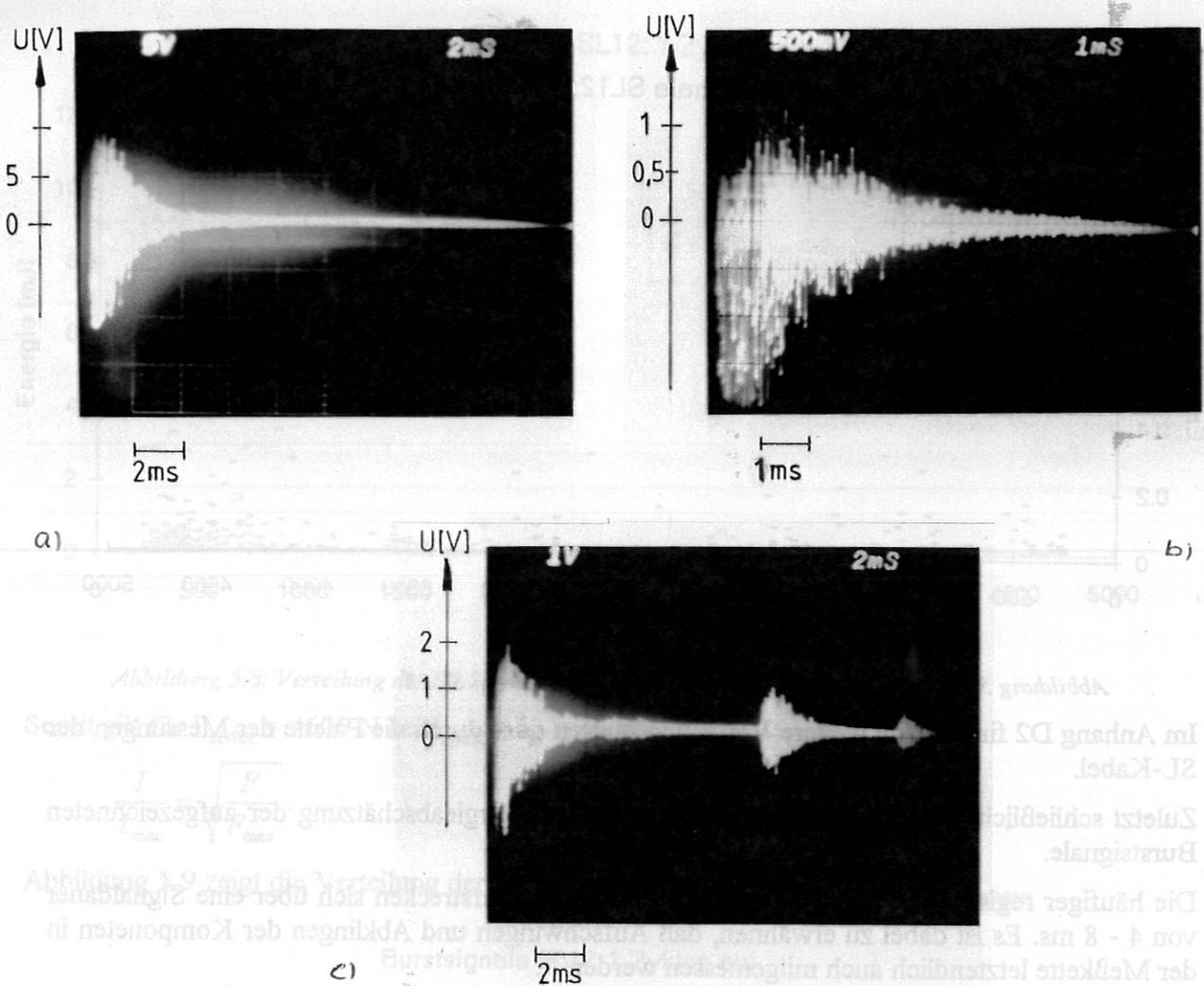


Abbildung 5.11: a) - c) Bilder von SE-Signalen mittels Oszilloskopspeicherung

Tabelle 5.4: Zusammenstellung der energiereichsten SE-Signale

Kabel	Zyklus	Länge [µs]	Abstand	Überschw.	Anstieg [µs]	Energ [mVs]	Ampl. [V]	Load [N]	I/Imax	Energ [mJ]
Temperatur = 77 K										
SL 14	1 a	14.219	2.614	1006	205	2.70	1.581	1904	64%	32.34
SL 6	1 b	6.697	4.256.897	444	710	2.96	1.581	4258	96%	28.89
SL 14	2 a	7.796	14.047.514	467	89	1.48	0.637	2031	66%	17.50
SL 14	1 a	5.442	1.066.083	270	77	0.90	0.575	498	33%	12.42
SL 14	1 a	7.120	3.605.448	390	78	0.77	0.731	469	32%	10.77
SL 14	1 a	1.266	724.902	78	158	0.79	1.378	850	43%	10.57
SL 14	1 a	1.667	7.039.057	99	288	0.90	1.239	2178	69%	10.56
SL 12	1 a	3.663	102.486	235	226	7.43	5	391	29%	10.43
SL 4	1 a	2.173	11.801.688	154	23	0.66	1.581	1660	60%	8.06
SL 6	1 a	2.189	36.666.848	109	74	0.56	1.309	2246	70%	6.46
SL 14	1 b	1.384	386.926.149	102	24	0.29	1.292	1250	52%	3.69
SL 4	1 b	966	111.964.991	38	145	0.11	0.453	283	25%	1.60
SL 12	1 b	1.361	11.331.520	90	67	0.85	2.645	391	29%	1.19
Temperatur = 300 K										
SL 10	1 a	14.101	1.149.752	777	3988	23.14	5	1651	60%	28.42
SL 10	1 a	12.065	44.346	671	3166	12.70	5	1299	53%	16.16
SL 7	4 b	5.590	3.919.848	677	111	10.87	5	1250	52%	13.91
SL 7	5 b	8.076	190.909	662	290	8.73	5	752	40%	11.77
SL 7	3 b	12.225	3.395.967	795	220	8.24	5	262	24%	11.74
SL 7	5 b	9.935	2.681.495	758	328	7.93	3.686	332	27%	11.20
SL 7	3 b	8.792	3.167.170	576	480	7.71	3.234	371	28%	10.84
SL 7	5 b	8.251	5.691.506	670	188	7.30	4.038	254	23%	10.41
SL 7	4 b	7.336	578.630	687	181	7.37	3.023	420	30%	10.31
SL 7	3 b	8.353	1.145.645	656	231	8.27	4.548	1631	60%	10.18
SL 7	1 b	8.753	387.547	814	253	7.01	5	313	26%	9.92
SL 7	1 a	8.558	2.561.261	734	208	3.84	4.292	1279	53%	4.90
SL 11	1 a	4.475	6.714.378	387	593	3.02	5	2568	75%	3.40
SL 10	1 b	18.927	5.691	833	15095	0.79	0.352	2090	67%	0.93
SL 11	1 b	2.275	4.152.915	255	143	0.41	2.029	4561	100%	0.39

Solche Ereignisse treten zufällig auf und scheinen von den lokalen Verhältnissen zwischen den Strands abhängig zu sein. Ihr Auftreten hängt nicht von der Anzahl oder von der Größe der übrigen Ereignisse im Zyklus ab. Ebenso traten sie nicht nur im ersten Belastungszyklus auf und dabei wiederum sowohl in der ersten wie in der zweiten Hälfte.

Abbildung 5.12 zeigt die Verteilungskurve der Burstenergien für einen solchen Fall am Beispiel von SL 10:

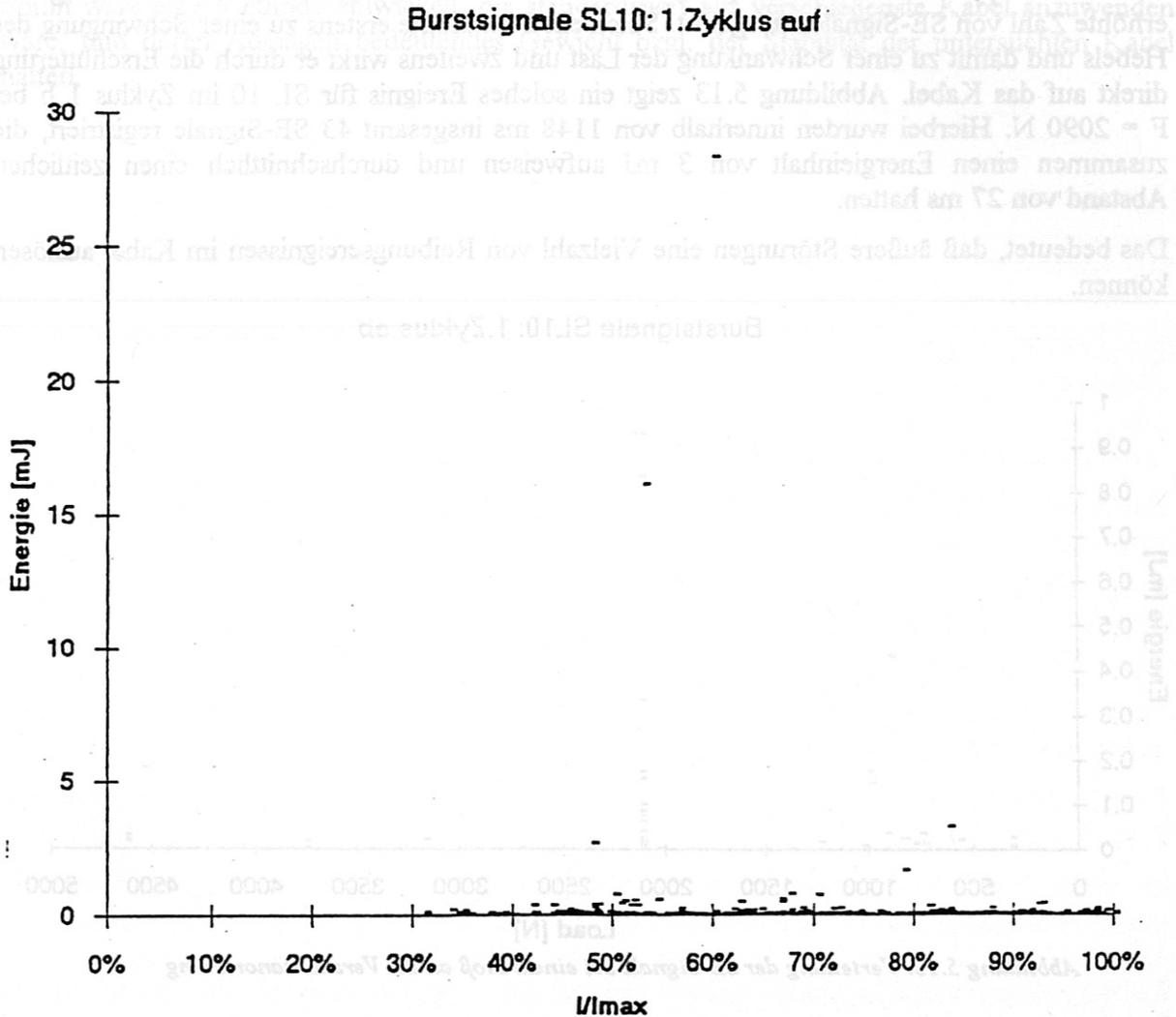


Abbildung 5.12: Verteilung der SE-Signale bzgl. der Last von SL 10

Die energiereichsten SE-Signale liegen alle im niedrigeren Belastungsbereich, in dem I/I_{\max} kleiner als 66 % ist, von einer Ausnahme abgesehen: SL 6, Zyklus 1 b, $I/I_{\max} = 96$ %.

Es bleibt also festzuhalten, daß bei den untersuchten Kabeltypen Einzelereignisse möglich sind, die einige 10 mJ Energie freisetzen.

Welche Folgen hat nun ein Einzelereignis, das durch Reibung zweier Strands 10 mJ Energie freisetzt?

Zur Beantwortung dieser Frage dient die folgende Abschätzung:

Es wird angenommen, daß sich das Ereignis auf einer Strandlänge L von 10 mm zwischen zwei Strands abspielt. Mit den Daten aus Tabelle 2.1 ist damit ein Strandvolumen $V_S = 2 \cdot 10 \text{ mm} \cdot 0,24 \text{ mm}^2 = 4,8 \text{ mm}^3$ betroffen. Die dadurch eingebrachte Energie pro Strandvolumen ist folglich $e_S = 10 \text{ mJ} / 4,8 \text{ mm}^3 = 2083 \text{ mJ/cm}^3$.

Nach dem Bericht IPP 2/320^{2/} liegt die Stabilitätsgrenze aber bei einigen 10 mJ/cm^3 , so daß die betroffenen Strands mit Sicherheit lokal quenzen.

Wäre der Energieaustausch ausreichend schnell, daß das Ereignis auf 10 mm Länge den gesamten Kabelquerschnitt betreffen würde, würde man die Reibungsenergie pro Strandvolumen von $e_S / 96 = 22 \text{ mJ/cm}^3$ einbringen. Dies bedeutet, daß solche Ereignisse in eine Größenordnung reichen können, die für den Supraleiter gefährlich werden kann.

Wie unter Kapitel 5.2.2 schon erwähnt, wird durch einen Stoß an die Versuchsanordnung eine erhöhte Zahl von SE-Signalen ausgelöst. Solch ein Stoß führte erstens zu einer Schwingung des Hebels und damit zu einer Schwankung der Last und zweitens wirkt er durch die Erschütterung direkt auf das Kabel. Abbildung 5.13 zeigt ein solches Ereignis für SL 10 im Zyklus 1 b bei $F = 2090 \text{ N}$. Hierbei wurden innerhalb von 1148 ms insgesamt 43 SE-Signale registriert, die zusammen einen Energieinhalt von 3 mJ aufweisen und durchschnittlich einen zeitlichen Abstand von 27 ms hatten.

Das bedeutet, daß äußere Störungen eine Vielzahl von Reibungsereignissen im Kabel auslösen können.

Burstsignale SL10: 1.Zyklus ab

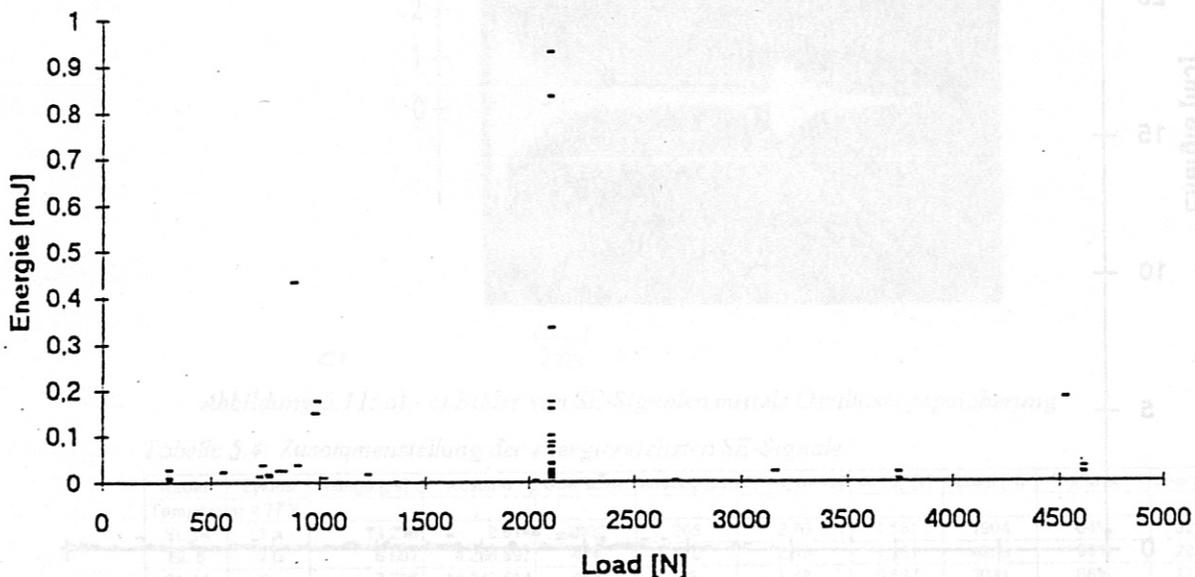


Abbildung 5.13: Verteilung der SE-Signale bei einem Stoß an die Versuchsanordnung

5.3 Vorschläge zu weitergehenden Untersuchungen

Um die bisher gewonnenen Erkenntnisse noch zu erweitern und die entwickelte Methode zu verfeinern, ist der nächste Schritt sicher in Messungen bei LHe-Temperatur zu sehen.

Damit könnten sich folgende Möglichkeiten eröffnet werden:

Man ermittelt die Verlustenergie bei Betriebstemperatur.

Fein eingearbeitete Thermolemente bestimmen in einer entsprechenden Versuchsanordnung die Temperaturerhöhung und lassen genaue Rückschlüsse auf die freigewordene Energie zu.

Damit werden die SE-Signale exakter kalibriert und es kann versucht werden, ein temperaturunabhängiges Kalibriersignal zu entwickeln und zu normieren.

Das Kabel wird unter Lorentzbelastung getestet. Dabei wird erfaßt, ob einzelne Strands lokal queren, und die Ergebnisse mit der Schallemissionsanalyse verglichen.

Man vergleicht die aufgezeichneten Einzelergebnisse mit denen des Preßversuchs und stellt entsprechende Beziehungen her.

Mit diesem Wissen ausgestattet, wäre der bisher durchgeführte einfache Preßversuch bei LN_2 -Temperatur wohl wieder ausreichend und exakter auf den realen Belastungsfall übertragbar.

Somit wäre eine Methode entwickelt, die standardisiert auf verschiedenste Kabel anzuwenden wäre, und deren Aussagen bedeutendes Gewicht bzgl. der Stabilität der untersuchten Kabel hätten.

6. Zusammenfassung

Lorentzkräfte verursachen transiente mechanische Störungen in den Kabeln von Supraleiter-Magneten, die in vielen Fällen ausreichen, daß das Kabel lokal seine Supraleitfähigkeit verliert.

Ausgehend von dem Wunsch, die Größe dieser Störereignisse vorher abzuschätzen, wurde eine Methode entwickelt, die diesem Anliegen anhand eines Preßversuchs an einem Kabelstück nachkommt.

Zunächst wurde die maximale Preßkraft F_N ermittelt, die der Belastung durch die Lorentzkräfte unter Nennbedingungen äquivalent ist. Als äquivalent galt, daß die eingebrachte Verformungsarbeit pro Volumeneinheit über die Kabelfläche gemittelt in beiden Fällen gleich ist.

Dies geschah dadurch, daß die Verhältnisse in einer FEM-Rechnung modelliert wurden, wobei die Eigenschaften des Kabels so angepaßt wurden, daß Rechen- und Versuchsergebnisse übereinstimmten.

Die Kraft F_N wurde für $I_N = 16$ kA und $B = 6,2$ T zu $F_N = 4605$ N für das 80 mm lange Preßstück bestimmt. Somit entspricht das Verhältnis von maximaler Preßkraft zur Summe der Lorentzkräfte im Kabel 58 %, wobei diese Vergleichsrechnung gegen Änderungen der Kabelparameter sehr stabil ist.

Dabei stellte sich heraus, daß der E-Modul und die Querdehnungszahl für das gesamte Kabel gesehen mit der transversalen Belastung linear zunimmt.

Weiter zeigte sich, daß sich für die Lorentzbelastung in der Kabelhülle ein beträchtlicher Spalt ausbildet. Dadurch muß sich die Reibungszahl für das strömende Helium erniedrigen.

Mit diesem Ergebnis wurden Kraft-Weg-Hysteresekurven aufgenommen, die eine Verlustenergie von 115 - 124 mJ/cm³ bezogen auf das gesamte Kabelvolumen bei den CIC-Leitern im jungfräulichen Zyklus bei LN₂-Temperatur auswiesen.

Bei den Experimenten wurde entdeckt, daß der Verlust an Reibungsenergie mit abnehmendem Reibungskoeffizienten μ steigt.

Im ersten Zyklus ist der Anteil an plastisch verlorener Energie sehr hoch und es bleibt eine starke Verformung von ca. 0,3 mm nach der Entlastung zurück. Für höhere Zyklen sinkt der Anteil auf nahezu null und es wird nur noch Reibungsenergie verbraucht. Dabei liegt die durch Reibung eingebrachte Energiedichte bezogen auf das Strandvolumen von ca. 50 mJ/cm³ im Rahmen der theoretischen Vorhersagen^{2/}.

Die einzelnen Reibungsereignisse wurden dabei mit Hilfe von Schallemissionsanalyse erfaßt und der Größe nach abgeschätzt.

Die Energie der aufgezeichneten SE-Signale wurde nach folgender konservativer Bedingung normiert: Die Summe der Energien aller in einem Zyklus aufgezeichneten SE-Signale muß kleiner oder gleich der in diesem Zyklus verbrauchten mechanischen Hystereseverluste sein.

Mit dieser Festlegung wurde die Schallemissionsanalyse ausgewertet und führte zu folgendem Ergebnis:

Nahezu alle Einzelereignisse besitzen eine Energie von weniger als 10 mJ. Einige Ausnahmen können bis zu gemessenen 32 mJ reichen.

Ein Einzelereignis von 10 mJ Energie bringt nach einer Abschätzung auf die betroffenen zwei Strands eine Energie pro Strandvolumen von ca. 2000 mJ/cm³ ein. D.h. Strands werden lokal

sicher quenchen. Bezogen auf den gesamten Kabelquerschnitt können solche Ereignisse mit der Energiedichte in die Größenordnung der Stabilitätsgrenze des Kabels kommen.

Bei Schwankungen der Spitzenbelastung oder von außen verursachten Erschütterungen kann eine erhöhte, lawinenartige Häufung von Reibungsereignissen ausgelöst werden, die sich in ihrem Energieinhalt im Rahmen der üblichen Signale bewegen.

Die Reibungsvorgänge scheinen den Aufzeichnungen nach bis zu einigen ms lang zu sein und nicht, wie den theoretischen Überlegungen zugrunde gelegt, 0,5 - 1 ms.

Es würde sich empfehlen, die Energienormierung der SE-Signale besser einzugrenzen und Messungen bei LHe-Temperatur durchzuführen.

Besonders bin ich Herrn Dr. F. Schauer für seine behutsame Unterstützung sowie für die vertrauensvolle und hilfsbereite Zusammenarbeit in allen Fragen der Arbeit zu Dank verpflichtet.

Weiter möchte ich denen danken, die durch ihre Mithilfe die Arbeit vorantreiben haben. Dies ist Herr Dr. J. Simon-Weidner, der das ADINA-Programm erstellt und zusammen mit Herrn N. Jaksic bei allen ADINA-Fragen hilfsbereit zur Seite stand. Einmalig ist Herr O. Jandl, Programmierer des ANSYS-Modell und -Rechner, der mich auch die Einführung in das Softwarepaket

in Fragen der Mechanik und der Kalibrierung von Sensoren, konnte ich nicht alles an Herrn H.-J. Kutsch, wiewohl die Anwendung in der Forschung und der Anwendung zu. Mit Ihren Erfahrungen bei Konstruktions- und P-Problem haben Herr F. Mehnert und Herr I. Schoenwolf meine Arbeit sehr erleichtert.

Herr B. Feischer wurde stets in allen Zusammenhängen der verschiedenen Fachbereiche Rat durch zügige Anteilnahme von Einwirkung der Vorgehensweise. Herr R. Singer und alle Mitarbeiter der Werkstatt für einen raschen Fortgang der Arbeiten. Schließlich möchte ich mich bei den Damen im Sekretariat und allen IPP-Mitarbeitern bedanken, die mir in vielen Kleinigkeiten weitergeholfen und immer für ein angenehmes Betriebsklima sorgten.

- /10/ CEN meeting of 25-26.03.1993 in London:
"Definition of Terms in Acoustic Emission"
6th draft version of 30.03.1993
- /11/ Nach einem Vorschlag von Herrn O. Jandl, IPP 1993
- /12/ S. Timoshenko und J. N. Goodier:
"Theory of Elasticity"
McGraw-Hill Book Company, Inc. (1951).
- /13/ Dr. J. Simon-Weidner, IPP 1993
- /14/ W. Beitz, K.-H. Küttner:
Doppel "Faschenbuch für den Maschinenbau", 15. Auflage
Springer-Verlag, Berlin (1984)
- /15/ O. Jandl, IPP 1993

7. Danksagung

Schließlich möchte ich diese Arbeit nicht schließen, ohne all denen meinen Dank ausgesprochen zu haben, die zum einen diese Diplomarbeit erst ermöglicht haben und zum anderen zu ihrem Gelingen entscheidend beigetragen haben.

Bei Herrn Prof. Dr. J. Raeder bedanke ich mich recht herzlich für die akademische Betreuung, wodurch diese Diplomarbeit realisiert werden konnte.

Ebenso danke ich stellvertretend für das Institut für Plasmaphysik Herrn Dr. G. Grieger und Herrn J. Sapper, daß sie den Untersuchungen innerhalb ihres Bereichs bzw. ihres Projekts organisatorisch den Weg geebnet haben.

Besonders bin ich Herrn Dr. F. Schauer für seine betreuende Unterstützung sowie für die vertrauensvolle und hilfsbereite Zusammenarbeit in allen Fragen der Arbeit zu Dank verpflichtet.

Weiter möchte ich denen danken, die durch ihre Mithilfe die Arbeit vorangebracht haben:

Dies ist Herr Dr. J. Simon-Weidner, der das ADINA-Programm erstellte und zusammen mit Herrn N. Jaksic bei allen ADINA-Fragen hilfsbereit zur Seite stand.

Herr O. Jandl programmierte das ANSYS-Modell und übernahm bereitwillig auch die Einführung in das Softwarepaket.

In Fragen der Meßtechnik und der Kalibrierung von Signalen konnte ich mich stets an Herrn H.-J. Kutsch wenden.

Mit ihren Erfahrungen bei Konstruktions- und PC-Problemen haben Herr H. Münch und Herr I. Schoenewolf meine Arbeit sehr erleichtert.

Herr B. Fleischer wußte stets in allen Systemfragen der verschiedenen Rechenanlagen Rat.

Durch zügige Anfertigung von Einzelteilen der Versuchsanordnung sorgte Herr R. Singer und alle Mitarbeiter der Werkstatt für einen raschen Fortgang der Arbeiten.

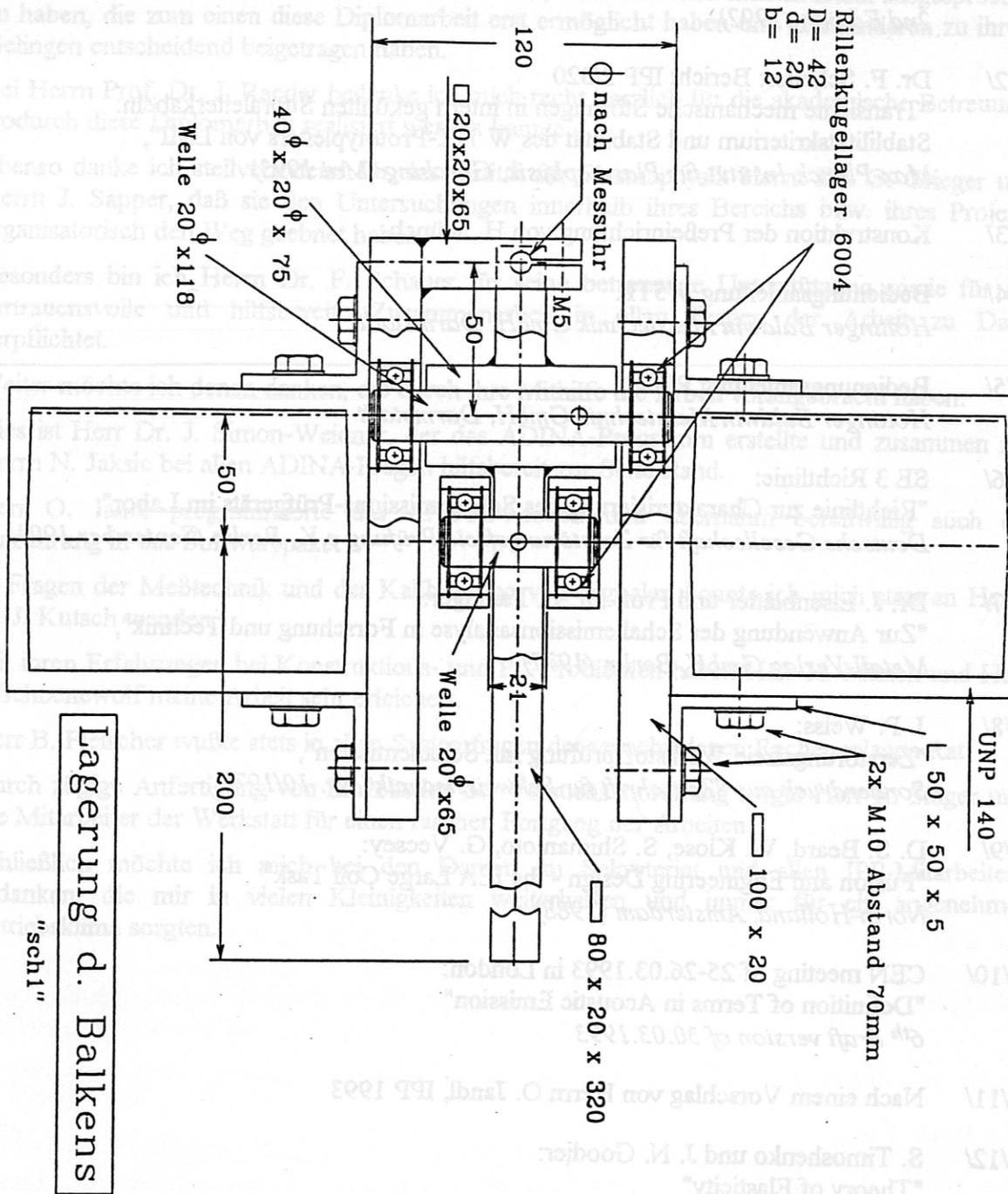
Schließlich möchte ich mich bei den Damen im Sekretariat und allen IPP-Mitarbeitern bedanken, die mir in vielen Kleinigkeiten weiterhalfen und immer für ein angenehmes Betriebsklima sorgten.

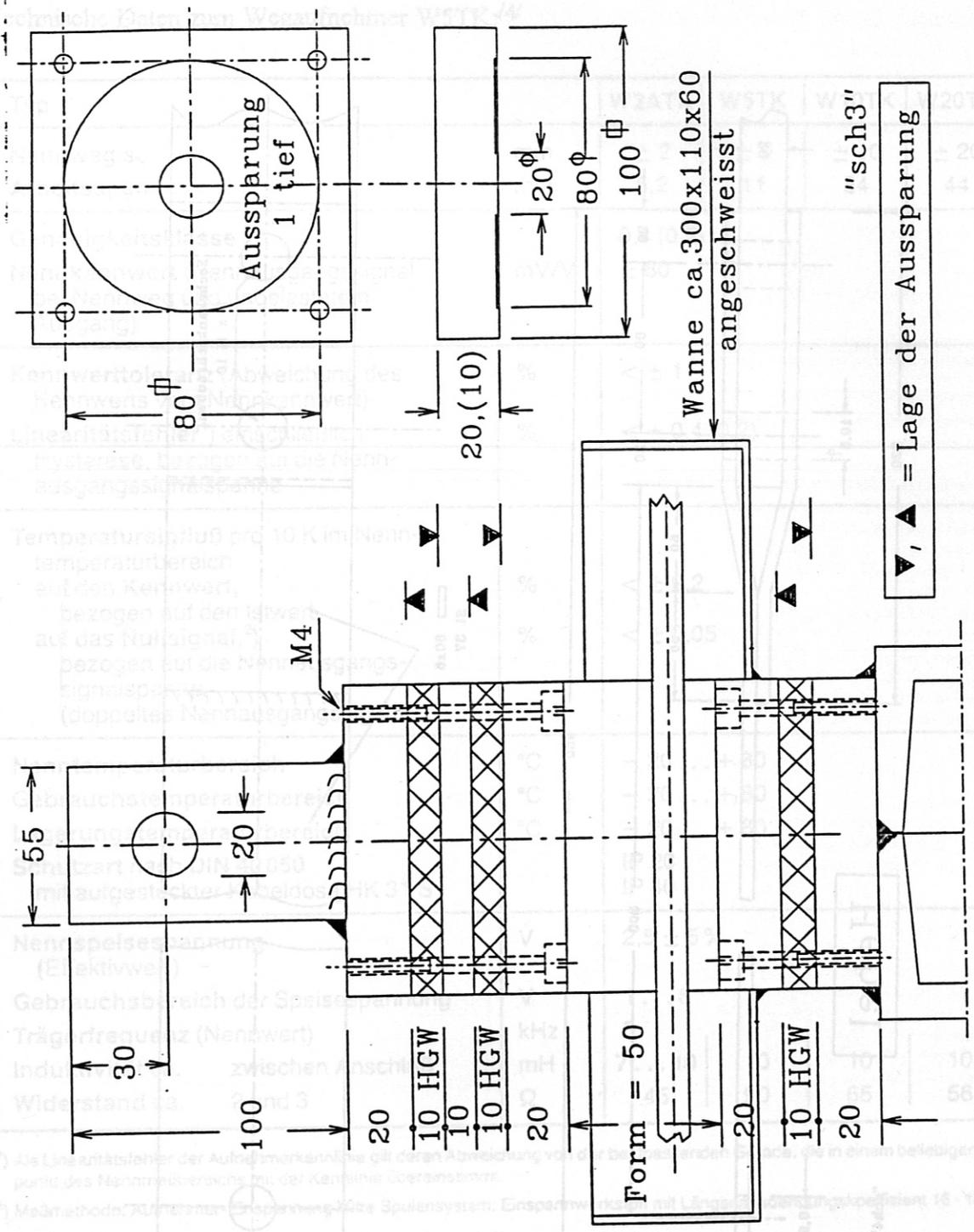
Quellenverzeichnis

- /1/ Seite 8,
Informationsproschüre "Max-Planck-Institut für Plasmaphysik",
2nd Edition (1992)
- /2/ Dr. F. Schauer: Bericht IPP 2/320
"Transiente mechanische Störungen in intern gekühlten Supraleiterkabeln:
Stabilitätskriterium und Stabilität des W 7-X-Prototypeleiters von LMI",
Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, Garching (Mai 1993)
- /3/ Konstruktion der Preßeinrichtung von H. Münch
- /4/ Bedienungsanleitung W5TK
Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Darmstadt
- /5/ Bedienungsanleitung PW2-2
Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Darmstadt
- /6/ SE 3 Richtlinie:
"Richtlinie zur Charakterisierung des Schallemissions-Prüfgeräts im Labor",
Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V., Berlin (September 1991)
- /7/ Dr. J. Eisenblätter und Prof. Dr. G. Faninger:
"Zur Anwendung der Schallemissionsanalyse in Forschung und Technik",
Metall-Verlag GmbH, Berlin (1977)
- /8/ J. P. Weiss:
"Zerstörungsfreie Werkstoffprüfung mit Schallemission",
Sonderdruck aus "Zeitschrift für Schweisstechnik" Nr. 10/1978
- /9/ D. S. Beard, W. Klose, S. Shimamoto, G. Vecsey:
"Fusion and Engineering Design - the IEA Large Coil Task"
North-Holland, Amsterdam (1988)
- /10/ CEN meeting of 25-26.03.1993 in London:
"Definition of Terms in Acoustic Emission"
6th draft version of 30.03.1993
- /11/ Nach einem Vorschlag von Herrn O. Jandl, IPP 1993
- /12/ S. Timoshenko und J. N. Goodier:
"Theory of Elasticity"
McGraw-Hill Book Company, Inc. (1951)
- /13/ Dr. J. Simon-Weidner, IPP 1993
- /14/ W. Beitz, K.-H. Küttner:
Dubbel "Taschenbuch für den Maschinenbau", 15. Auflage
Springer-Verlag, Berlin (1986)
- /15/ O. Jandl, IPP 1993

Anhang A1

Weitere Zeichnungen der Preßvorrichtung: /3/





Anhang A2

Technische Daten zum Wegaufnehmer W5TK:^{4/}

Typ		W2ATK	W5TK	W10TK	W20TK
Nennweg s_N Arbeitsspanne	mm	± 2	± 5	± 10	± 20
	mm	5,2	11	24	44
Genauigkeitsklasse Nennkennwert (Nennausgangssignal bei Nennweg und unbelastetem Ausgang)	mV/V	0,4 (0,2) ± 80			
Kennwerttoleranz (Abweichung des Kennwerts vom Nennkennwert)	%	$< \pm 1$			
Linearitätsfehler ¹⁾ einschließlich Hysterese, bezogen auf die Nenn- ausgangsspanne	%	$< \pm 0,4$ (0,2)			
Temperatureinfluß pro 10 K im Nenn- temperaturbereich auf den Kennwert, bezogen auf den Istwert auf das Nullsignal, ²⁾ bezogen auf die Nennausgangs- spanne (doppeltes Nennausgangssignal)	%	$< \pm 0,2$			
	%	$< \pm 0,05$			
Nenntemperaturbereich	°C	- 20 ... + 80			
Gebrauchstemperaturbereich	°C	- 20 ... + 80			
Lagerungstemperaturbereich	°C	- 20 ... + 80			
Schutzart nach DIN 40050 mit aufgesteckter Kabeldose HK 31 S		IP 20 IP 40			
Nennspeisespannung (Effektivwert)	V	2,5 \pm 5%			
Gebrauchsbereich der Speisespannung	V	1 ... 6			
Trägerfrequenz (Nennwert)	kHz	5			
Induktivität ca. zwischen Anschluß	mH	7 ... 10	10	10	10
Widerstand ca. 2 und 3	Ω	45	90	65	56

¹⁾ Als Linearitätsfehler der Aufnehmerkennlinie gilt deren Abweichung von der bestpassenden Gerade, die in einem beliebigen Endpunkt des Nennmeßbereichs mit der Kennlinie übereinstimmt.

²⁾ Meßmethode: Aufnehmer-Einspannung Mitte Spulensystem; Einspannwerkstoff mit Längenausdehnungskoeffizient $16 \cdot 10^{-6}/K$.

Anhang A3

Technische Daten zum Kraftaufnehmer PW2-2.^{1/5}

Typenreihe Genauigkeitsklasse		PW1AE3 E3	PW2C3 C3	PW2-2 0,05
Nennlast	kg	18	18 36 72	18 36 72
Bei eichpflichtiger Anwendung				
Anwendungsbereich 0 ...	kg	15	15 30 60	15 30 60
Teilungswert	g	5	5 10 20	-
Anzahl der Teilungswerte	d	3000	3 000	-
Plattformgröße, max.	mm		380 x 380	
Nennkennwert	mV/V		2,4	
Kennwertbereich	mV/V		2,16...2,64	
Eingangswiderstand	Ohm		300...500	
Ausgangswiderstand	Ohm		300...500	
Referenzspeisespannung	V		5	
Nennbereich der Speisespannung	V		1...10	
Isolationswiderstand	GOhm		>1	
Nenntemperaturbereich	°C		-10...+40	
Gebrauchstemperaturbereich	°C		-10...+50	
Lagerungstemperaturbereich	°C		-25...+70	
Klimatische Anwendungsklasse nach DIN 40040"		JYD	JYH	JYH
Nennmaßweg +15%	mm	0,27	0,24 0,30 0,46	0,24 0,30 0,46
Resonanzfrequenz (+15%) mit Nennlast	Hz	20	20 16,5 12	20 16,5 12
Zusammengesetzter Fehler	x	<+0,017	<+0,017	<+0,023
Kriechfehler über 30 min	x	<+0,017	<+0,017	<+0,05
Abweichung durch außermittige Belastung	x	<+0,017 gemäß E09	<+0,02 gemäß IE3	<+0,05 bei 50% Nenn- last und 100mm Exzentrizität
Nullsignal	mV/V	<+0,1	<+0,1	<+0,1
Temperaturkoeffizient des Kennwerts pro 10 K				
im Temperaturbereich +20°C...+40°C	x	<+0,017	<+0,017	<+0,05
-10°C...+20°C	x	<+0,012	<+0,012	<+0,05
Temperaturkoeffizient des Vorlastsignals pro 10 K	x	<+0,047	<+0,047	<+0,1
Mechanische Werte, bezogen auf Nennlast				
Gebrauchslast	x		100	
Grenzlast bei max. 100mm Exzentrizität	x		150	
Lastwechselbeständigkeit bei 80% Schwingbreite und zentrischer Belastung			>10 ⁶	
Gewicht, ca.	kg	0,35	0,25	0,25

Anhang B1

Auszug aus dem Inputdatenfile für die ADINA-Rechnung:

```

LIST
HALF SYMMETRY OF WIRE TEST FACILITY
2061001110 0 3 1 800.10000000 .0 0 0 0 0 2 0
C*** MASTER CONTROL
1 0 0 0 0 0 1 0 0 1 9000 3000 0 0
C*** 3 LOAD CONTROL
0 11 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
C*** 4 MASS AND DAMPING CONTROL
1 0 0 0 .0 .0
C*** 5 EIGENVALUE SOLUTION CONTROL
0 0 0 0 0 0
C*** 6 TIME INTEGRATION METHOD CONTROL
0 20.500000000.50000000 0 0 0 0 0
C*** 7 INCREMENTAL SOLUTION CONTROL
ATS 3 1 122 15.001000000.010000000.0050000000.50000000.001000000.100000E-3
10 0.001000000
C*** 8 PRINT-OUT CONTROL
1 1 1 1 1 1 0 0
C*** 9 PORTHOLE SAVE CONTROL
1 1 1 60 60 1 1 1 1 1
C*** STIFFNESS REFORMATION TIME STEP BLOCKS
1 80 1
C*** EQUILIBRIUM ITERATION TIME STEP BLOCKS
1 80 1
C*** RESULT PRINTOUT TIME STEP BLOCKS
1 80 1
C*** NODAL QUANTITIES PRINTOUT NODE BLOCKS
1 206 1
C*** NODAL RESPONSE SAVE TIME STEP BLOCKS
1 30 1
C*** ELEMENT RESPONSE SAVE TIME STEP BLOCKS
1 80 1
C*** NODAL QUANTITIES SAVE NODE BLOCKS
1 206 1
C*** TIME FUNCTIONS
1 2
1 2 1 .0 .0
.0 .0 40.0000000 1.0000000
C*** NODAL POINT DATA
1 1 0 0 1 1 1 .0.000588000.0003390001 0 00 0
2 1 0 0 1 1 1 .0.000679000.0011750001 0 00 0
3 1 1 0 1 1 1 .0.000000000.0006790001 0 00 0
4 1 1 0 1 1 1 .0.000000000.0000000001 0 00 0
5 1 0 0 1 1 1 .0.000527000.0019660001 0 00 0
6 1 1 0 1 1 1 .0.000000000.0013570001 0 00 0
7 1 0 0 1 1 1 .0.000703000.0026220001 0 00 0
8 1 1 0 1 1 1 .0.000000000.0027140001 0 00 0
9 1 0 0 1 1 1 .0.001357000.0023510001 0 00 0
10 1 0 0 1 1 1 .0.000443000.0033640001 0 00 0
11 1 1 0 1 1 1 .0.000000000.0033930001 0 00 0
12 1 0 0 1 1 1 .0.001298000.0031350001 0 00 0
13 1 0 0 1 1 1 .0.001054000.0039330001 0 00 0
14 1 0 0 1 1 1 .0.001696000.0029380001 0 00 0
15 1 0 0 1 1 1 .0.000616714.0046840421 0 00 0
16 1 1 0 1 1 1 .0.000000000.0047248251 0 00 0
17 1 0 0 1 1 1 .0.001222486.0045636841 0 00 0
18 1 0 0 1 1 1 .0.001508365.0043647441 0 00 0
19 1 0 0 1 1 1 .0.002362413.0040921961 0 00 0
20 1 0 0 1 1 1 .0.001175000.0006790001 0 00 0
21 1 0 0 1 1 1 .0.001439000.0014390001 0 00 0
22 1 0 0 1 1 1 .0.001919000.0019190001 0 00 0
23 1 0 0 1 1 1 .0.002351000.0013570001 0 00 0
24 1 0 0 1 1 1 .0.002065000.0026920001 0 00 0
25 1 0 0 1 1 1 .0.002692000.0020650001 0 00 0
26 1 0 0 1 1 1 .0.002379000.0028790001 0 00 0

```


Anhang B2

Auszug aus dem Outputdatenfile der ADINA-Rechnung:

CHS * OUT1 AL C1 28.05.93 11:15:30 PAGE 167

RESTART DATA IS SAVED FOR STEP 79 AT TIME EQUALS 0.790000000000E+01
PREVIOUSLY WRITTEN PESTAT DATA IS CVERWRITTEN

1PROGRAM ADINA - VERSION 6.0.3 HALF SYMMETRY OF WIRE TEST FACILITY
FOR EXCLUSIVE USE BY MAX-PLANCK INSTITUT FUR PLASMAPHYSIK

PRINT OUT FOR TIME (LOAD) STEP 80 (TIME STEP= 0.10000E+00 SCLUTION TIME= 0.80000E+01)

CONDITICNING OF THE COEFFICIENT MATRIX (NOT INCLUDING D.O.F. WITH PRESCRIBED DISPLACEMENTS)

LARGEST ELEMENT OF THE UNFACTORED STIFFNESS MATRIX = 0.26739E+13 EQUATION NO. = 257
SMALLEST ELEMENT OF THE UNFACTORED STIFFNESS MATRIX = 0.00000E+00 EQUATION NO. = 269
LARGEST DIAGONAL ELEMENT OF THE FACTORIZED MATRIX = 0.20553E+13 EQUATION NO. = 257
SMALLEST DIAGONAL ELEMENT OF THE FACTORIZED MATRIX = -0.44675E+11 EQUATION NO. = 269

INTERMEDIATE PRINTOUT DURING EQUILIBRIUM ITERATIONS

OUT-OF-BALANCE ENERGY	NORM OF OUT-OF-BALANCE FORCE (EQ MAX)	NORM OF INCREMENTAL DISP. (EQ MAX)	NORM OF INCREMENTAL ROTN. (EQ MAX)	CFORCE	CFORCE	CONVERGENCE RATIO ENERGY	CONVERGENCE RATIO FOR OUT-OF-BALANCE FORCE	CONVERGENCE RATIO FOR INCREMENTAL CISP.	CONVERGENCE RATIO FOR INCREMENTAL CFORCE	CUT-CF-BALANCE VECTOR CALCULATION BETA RATIO (ITERNS)
VALUE	VALUE	VALUE	VALUE	VALUE	VALUE	ETOL (NOT USED)	RTOL (NOT USED)	DTOL	FCTCL	
FOR ITE=0 0.10E+01										
SUBINCREMENT NO. = 1	TIME STEP SUBINCREMENT = 0.100000E+00									
ITE= 1 0.83E+07	0.38E+05 (81)	0.70E+00 (0)	0.76E-04 (106)	0.70E+00 (0)	0.12E+05 (0)	0.80E+00 (0.00E+00)	0.00E+00 (0.00E+00)	0.76E-01 (0.00E+00)	0.23E+00 (0.00E+00)	0.10E+01 (1)
ITE= 2 0.80E-01	0.36E+05 (81)	0.00E+00 (0)	0.26E-04 (102)	0.70E+00 (0)	0.52E+05 (0)	0.77E-01 (0.00E+00)	0.00E+00 (0.00E+00)	0.26E-01 (0.00E+00)	0.19E+00 (0.00E+00)	0.10E+01 (1)
ITE= 3 -0.15E-03	0.37E+05 (81)	0.00E+00 (0)	0.43E-06 (145)	0.00E+00 (0)	0.37E+04 (0)	-0.14E-03 (0.00E+00)	0.00E+00 (0.00E+00)	0.43E-03 (0.00E+00)	0.69E-01 (0.00E+00)	0.10E+01 (1)
ITE= 4 0.58E-07	0.37E+05 (81)	0.00E+00 (0)	0.49E-08 (130)	0.00E+00 (0)	0.95E+02 (0)	0.56E-07 (0.00E+00)	0.00E+00 (0.00E+00)	0.49E-05 (0.00E+00)	0.18E-02 (0.00E+00)	0.10E+01 (1)

ITERATION TIME LOG

SOLUTION TIME (SECONDS) = 0.51E+00
 PERCENT TIME SPENT IN LINE SEARCHING = 0.0DE+00
 MAIRIX CALCULATION = 0.84E+02
 PERCENT TIME SPENT FOR SOLUTION OF EQUATIONS
 (LULIT) FACTORIZATION AND VECTOR SOLUTION . . . = 0.16E+02

4 EQUILIBRIUM ITERATIONS PERFORMED IN THIS TIME STEP TO REESTABLISH EQUILIBRIUM
 STIFFNESS REFORMED FOR EVERY ITERATION OF THIS STEP
 NUMBER OF SUBINCREMENTS IN THIS TIME STEP = 1
 PROGRAM ADINA - VERSION 6.3.3 HALF SYMMETRY OF WIRE TEST FACILITY
 FOR EXCLUSIVE USE BY MAX-PLANCK INSTITUT FUR PLASMAPHYSIK
 D I S P L A C E M E N T S

NUDE	X-TRANSLATION	Y-TRANSLATION	Z-TRANSLATION	X/Y1-ROTATION	Y/V2-ROTATION	Z/VN-ROTATION	FLUID PH1/P0*	REF SYST TRAN-CCF	REF SYST RCT1-CCF
1	0.000000E+00	0.284787E-05	-0.173517E-04	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	GLOBAL	GLOBAL
2	0.000000E+00	0.403720E-05	-0.235734E-04	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	GLOBAL	GLOBAL
3	0.000000E+00	0.000000E+00	-0.206802E-04	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	GLOBAL	GLOBAL
4	0.000000E+00	0.000000E+00	-0.153814E-04	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	GLOBAL	GLOBAL
5	0.000000E+00	0.299225E-05	-0.313246E-04	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	GLOBAL	GLOBAL
6	0.000000E+00	0.000000E+00	-0.264364E-04	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	GLOBAL	GLOBAL
7	0.000000E+00	0.385092E-05	-0.370413E-04	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	GLOBAL	GLOBAL
8	0.000000E+00	0.000000E+00	-0.382723E-04	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	GLOBAL	GLOBAL
9	0.000000E+00	0.785678E-05	-0.327563E-04	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	GLOBAL	GLOBAL
10	0.000000E+00	0.120657E-05	-0.430069E-04	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	GLOBAL	GLOBAL
11	0.000000E+00	0.000000E+00	-0.436554E-04	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	GLOBAL	GLOBAL
12	0.000000E+00	0.463642E+00	-0.391465E-04	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	GLOBAL	GLOBAL
13	0.000000E+00	0.859977E-06	-0.445318E-04	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	GLOBAL	GLOBAL
14	0.000000E+00	0.721178E-05	-0.357681E-04	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	GLOBAL	GLOBAL
15	0.000000E+00	-0.644399E-06	-0.486778E-04	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	GLOBAL	GLOBAL
16	0.000000E+00	0.000000E+00	-0.459038E-04	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	GLOBAL	GLOBAL
17	0.000000E+00	-0.105292E-05	-0.467202E-04	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	GLOBAL	GLOBAL
18	0.000000E+00	-0.307156E-06	-0.428262E-04	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	GLOBAL	GLOBAL
19	0.000000E+00	0.123165E-05	-0.385893E-04	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	GLOBAL	GLOBAL
20	0.000000E+00	0.597327E-05	-0.186147E-04	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	GLOBAL	GLOBAL
21	0.000000E+00	0.359707E-05	-0.238701E-04	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	GLOBAL	GLOBAL
22	0.000000E+00	0.121094E-04	-0.252914E-04	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	GLOBAL	GLOBAL
23	0.000000E+00	0.142453E-04	-0.190512E-04	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	GLOBAL	GLOBAL
24	0.000000E+00	0.102042E-04	-0.315684E-04	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	GLOBAL	GLOBAL
25	0.000000E+00	0.161502E-04	-0.221598E-04	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	GLOBAL	GLOBAL
26	0.000000E+00	0.122056E-04	-0.263117E-04	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	GLOBAL	GLOBAL
27	0.000000E+00	0.174955E-04	-0.177140E-04	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	GLOBAL	GLOBAL

CONTACT TRACTION CALCULATION FOR SURFACE GROUP 1 (2-D CONTACT SURFACES)

SURFACE NUMBER 1
 PRINTOUT OF AVERAGE SEGMENT TRACTION (CONTACT FORCE/UNIT LENGTH)
 AND ADDITIONAL SOLITARY CONTACT NODAL FORCES

NODES BOUNDING THE SEGMENT (NA)	LENGTH OF SEGMENT (NB)	TANGENT (Y COMP)	UNIT VECTOR (Z COMP)	COMPONENTS OF AVERAGE TRACTION (TANG.)	
				(NORMAL)	(TANG.)
43	0.6192E-03	-0.18633	0.98249	0.0000E+00	0.0000E+00
42	0.6206E-03	-0.32029	0.94732	0.0000E+00	0.0000E+00
41	0.6194E-03	-0.44306	0.89649	0.0000E+00	0.0000E+00
31	0.6205E-03	-0.56519	0.82701	0.0000E+00	0.0000E+00
30	0.6197E-03	-0.67235	0.74024	0.6750E+07	0.0000E+00
29	0.6202E-03	-0.76046	0.64939	0.2295E+08	0.0000E+00
28	0.6203E-03	-0.83786	0.54588	0.2502E+08	0.0000E+00
19	0.6203E-03	-0.90048	0.43290	0.3034E+08	0.0000E+00
18	0.6215E-03	-0.94891	0.31553	0.2970E+08	0.0000E+00
17	0.6201E-03	-0.98140	0.15197	0.3097E+08	0.0000E+00
16	0.6206E-03	-0.99794	0.06409	0.3206E+08	0.0000E+00

(NO SOLITARY NODAL CONTACT FORCES PRESENT)

SURFACE NUMBER 1
 PRINTOUT OF CONSISTENT NODAL CONTACT FORCES

GLOBAL NODE NUMBER	Y-DIRECTION	CONTACT FORCE	Z-DIRECTION
43	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
42	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
41	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
31	0.11214E+03	0.10185E+03	0.87589E+04
30	-0.81995E+04	-0.10837E+05	-0.15858E+05
28	-0.80679E+04	-0.18376E+05	-0.16862E+05
19	-0.88687E+04	-0.18376E+05	-0.19161E+05
18	-0.68499E+04	-0.18376E+05	-0.26441E+04
17	-0.48152E+04	-0.19161E+05	-0.10086E+05
16	-0.26441E+04	-0.10086E+05	

SURFACE NUMBER 2
 PRINTOUT OF CONSISTENT NODAL CONTACT FORCES

Anhang B3

Batchfile für die ANSYS-Rechnung im Fall der Preßbelastung:

```
/batch
/prep7
resume
plist,all
mp,ex,1,27.e3
mpoata,ex,2,1,50,120
mpdata,nuxy,2,1,0.05,0.4
r,2,2500.
r,3,2500.
mplist,all
rlist,all
pcel,all
fini
/solu
auto,on
prec,on
nsub,50,500
neqi,25
outres,all,all
save
/com,loop_6
nset,s,node,,178
nset,a,node,,132,185
enode
psf,all,,,1.0
alls
tunif,0.
solv
nset,s,node,,178
nset,a,node,,132,135
enode
psf,all,,,2.0
alls
tunif,1.
solv
nset,s,node,,178
nset,a,node,,132,135
enode
psf,all,,,3.0
alls
tunif,2.0
solv
nset,s,node,,178
nset,a,node,,132,135
enode
psf,all,,,4.0
alls
tunif,3.0
solv
nset,s,node,,178
nset,a,node,,132,135
enode
psf,all,,,5.0
alls
tunif,4.0
solv
nset,s,node,,178
nset,a,node,,132,185
enode
psf,all,,,6.190
alls
tunif,5.0
solv
fini
/eof
```

Batchfile für die ANSYS-Rechnung im Fall der Lorentzbelastung:

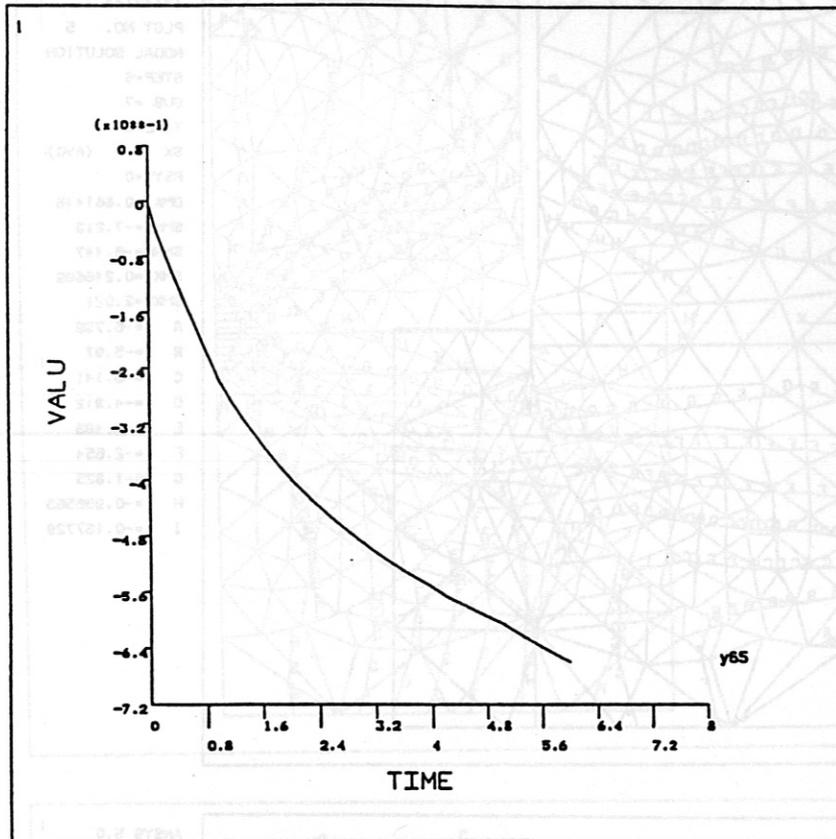
```

/patch
/prep7
/resume
/plist,all
/com,mp,ex,1,210.e3
mp,ex,1,27.e3
/com,mpdata,ex,2,1,100,200
mpdata,ex,2,1,50,120
mpdata,nuxy,2,1,0.05,0.4
/com,r,2,1e7
/com,r,3,1e7
r,2,2500.
r,3,2500.
/com,r,2,1000.
/com,r,3,1000.
mplist,all
rlist,all
/com,wsort,y
/com,arsel,,1,3,2
/com,earea
/com,type,1
/com,real,1
/com,mat,2
/com,emod,all
/com,alls
eall
nall
pdel,all
dens,2,1.
fini
/solu
auto,on
pred,on
/com,nsup,50,500
nsup,50,500
/com,nsup,1,10
/com,neqi,50
/com,neqi,25
neqi,50
outres,all,all
/com,alls
save
/com,loop_6
acel,,.216
tunif,0.
solv
acel,,0.433
tunif,1.
solv
acel,,0.655
tunif,2.
solv
acel,,0.330
tunif,3.
solv
acel,,1.110
tunif,4.
solv
acel,,1.335
tunif,5.
solv
fini
/eof
    
```

Anhang B4

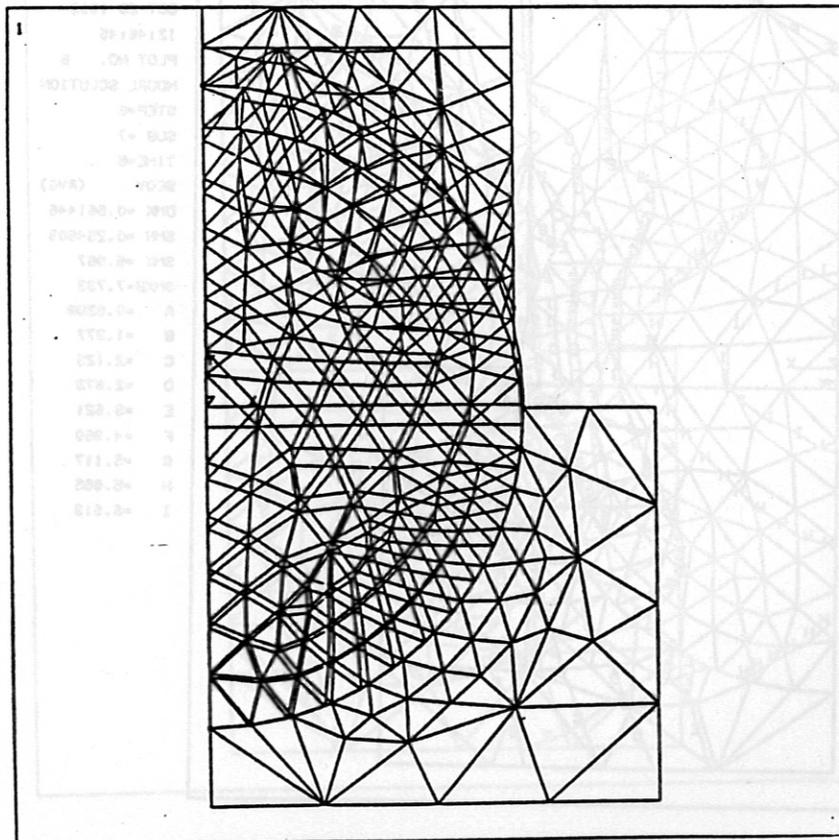
ANSYS-Auswertung der Berechnungen für den Preßfall:

Verschiebungskurve des obersten Kabelpunktes (oben) und die Verformung (unten)



ANSYS 5.0
OCT 26 1993
12:48:37
PLOT NO. 1
POST26

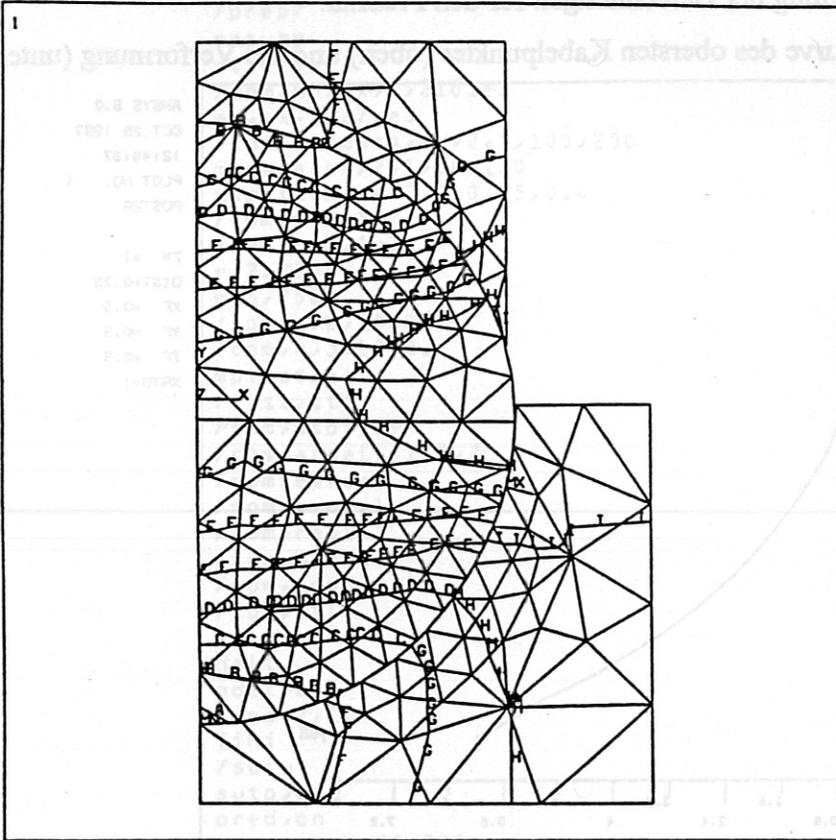
ZV = 1
DIST=0.75
XF =0.5
YF =0.5
ZF =0.5
XRTO=1



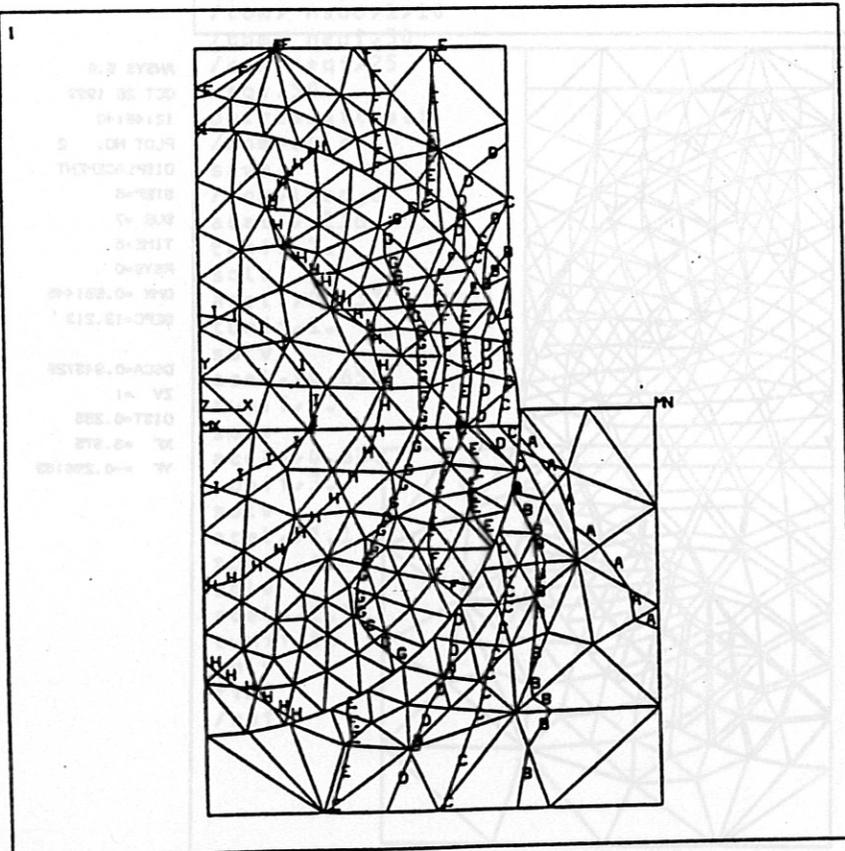
ANSYS 5.0
OCT 26 1993
12:48:40
PLOT NO. 2
DISPLACEMENT
STEP=6
SUB =7
TIME=6
RSYS=0
DPX =0.661446
SEPC=13.213

DSCA=0.945729
ZV = 1
DIST=6.255
XF =3.375
YF =-0.298193

σ_x -Verteilung (oben) und $\sigma_{\text{äquivalent}}$ -Verteilung (unten) bei Maximalbelastung

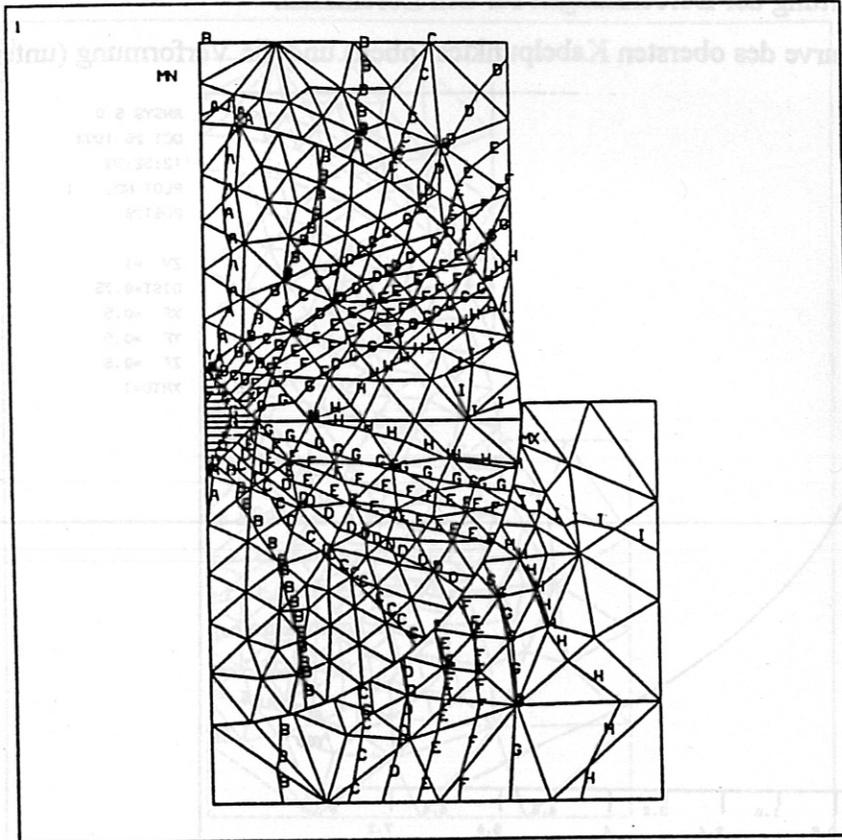


ANSYS 5.0
 OCT 26 1993
 12:48:44
 PLOT NO. 5
 NODAL SOLUTION
 STEP=6
 SUB =7
 TIME=6
 SX (AVG)
 RSYS=0
 DMAX =0.661446
 SMN =-7.213
 SMAX=-8.447
 SMAX =0.246689
 SMAXB=2.021
 A =-6.798
 B =-5.97
 C =-5.141
 D =-4.312
 E =-3.483
 F =-2.654
 G =-1.825
 H =-0.996563
 I =-0.167728

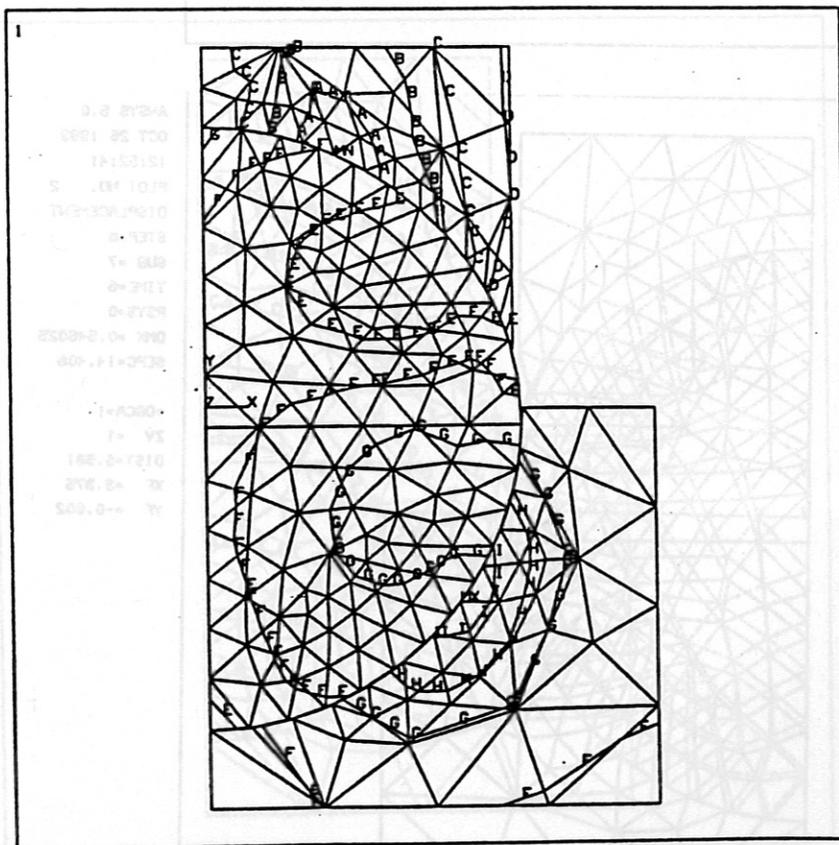


ANSYS 5.0
 OCT 26 1993
 12:48:45
 PLOT NO. 6
 NODAL SOLUTION
 STEP=6
 SUB =7
 TIME=6
 SEQV (AVG)
 DMAX =0.661446
 SMN =0.254803
 SMAX =6.987
 SMAXB=7.733
 A =0.6288
 B =1.377
 C =2.125
 D =2.873
 E =3.621
 F =4.369
 G =5.117
 H =5.865
 I =6.613

σ_x -Verteilung (oben) und τ_{xy} -Verteilung (unten) bei Maximalbelastung



ANSYS 5.0
 OCT 26 1993
 12:48:48
 PLOT NO. 7
 NODAL SOLUTION
 STEP=6
 SUB =7
 TIME=6
 SX (AVG)
 RSYS=1
 DMX =0.661446
 SMN =-7.966
 SMNB=-8.752
 SMX =0.051536
 SMXB=2.038
 A =-7.521
 B =-6.63
 C =-5.739
 D =-4.848
 E =-3.957
 F =-3.067
 G =-2.176
 H =-1.285
 I =-0.393909

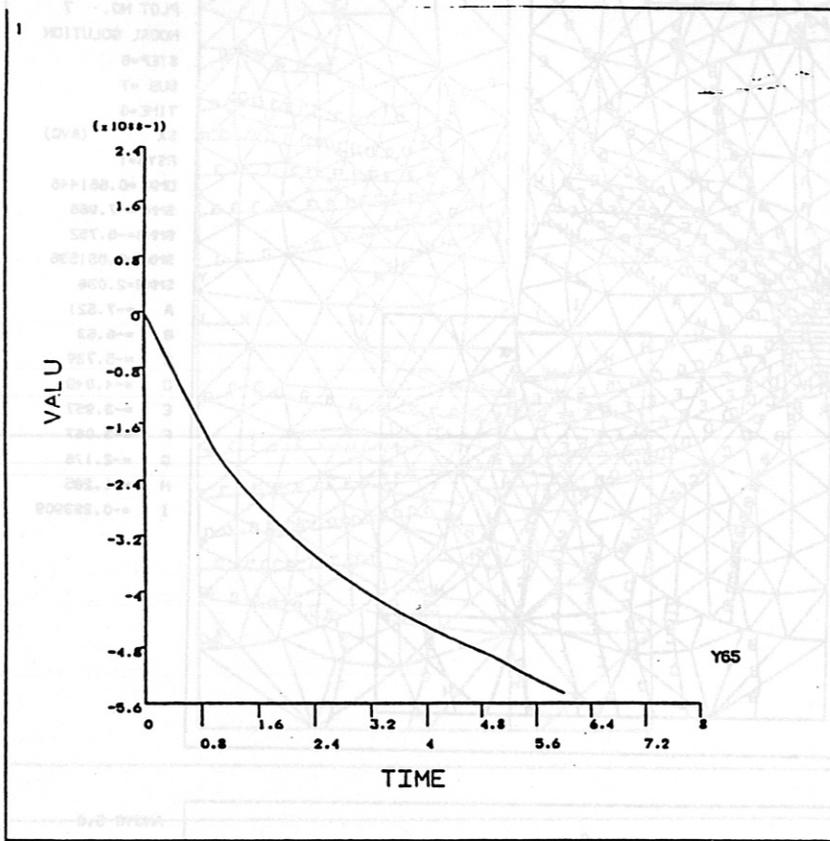


ANSYS 5.0
 OCT 26 1993
 12:48:50
 PLOT NO. 8
 NODAL SOLUTION
 STEP=6
 SUB =7
 TIME=6
 SXY (AVG)
 RSYS=0
 DMX =0.661446
 SMN =-1.952
 SMNB=-2.288
 SMX =1.448
 SMXB=2.439
 A =-1.763
 B =-1.385
 C =-1.007
 D =-0.629584
 E =-0.251818
 F =0.125948
 G =0.503714
 H =0.881479
 I =1.259

Anhang B5

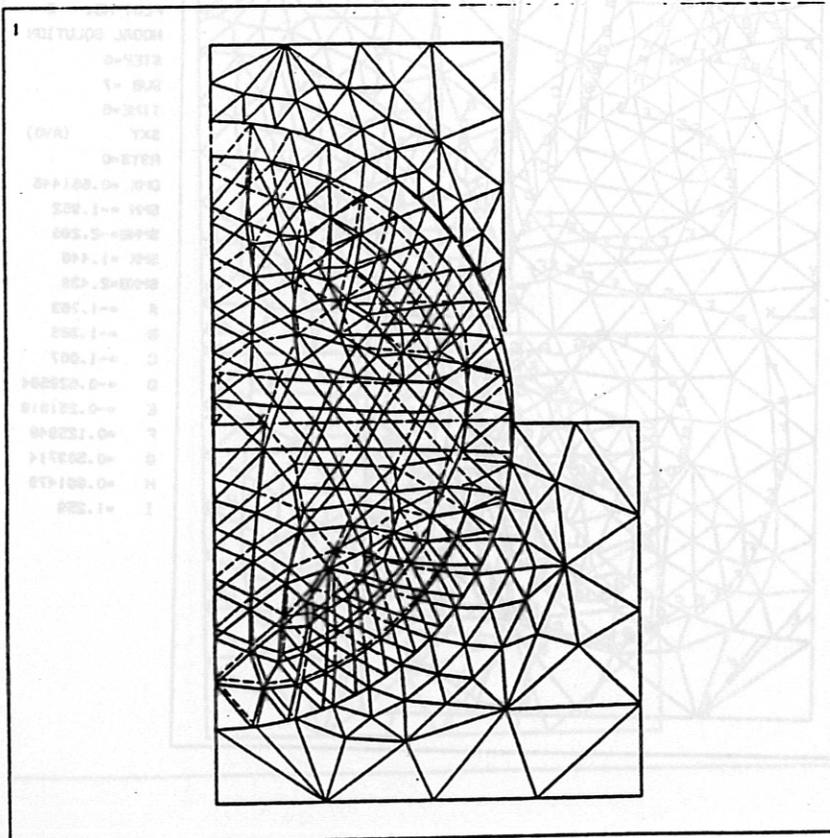
ANSYS-Auswertung der Berechnungen für den Lorentzfall:

Verschiebungskurve des obersten Kabelpunktes (oben) und die Verformung (unten)



ANSYS 5.0
OCT 26 1993
12:52:39
PLOT NO. 1
POST26

ZV =1
DIST=0.75
XF =0.5
YF =0.5
ZF =0.5
XRT0=1

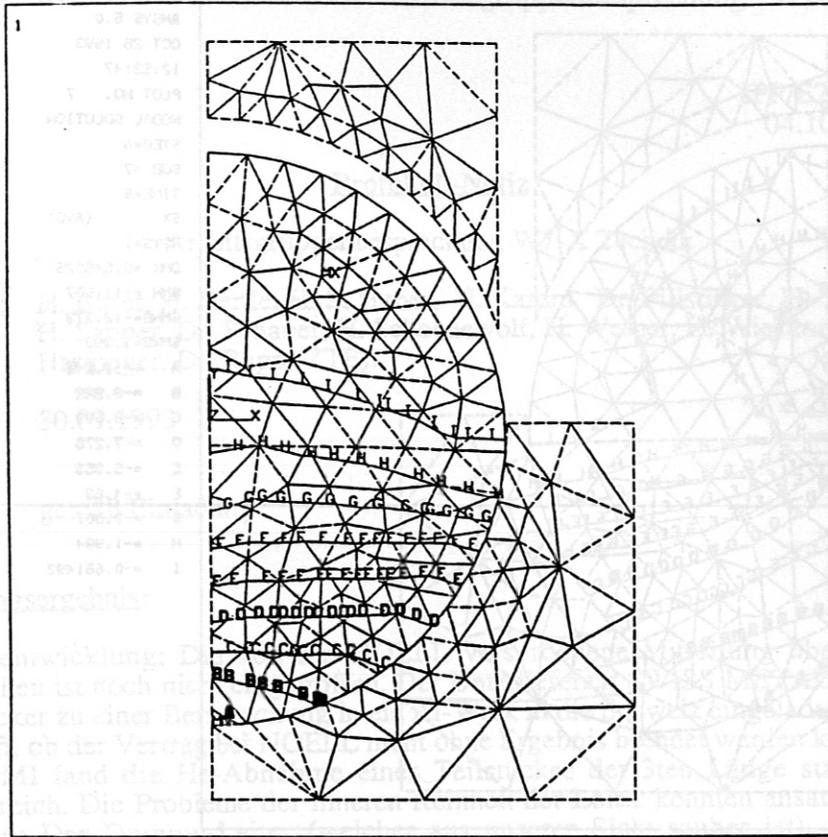


ANSYS 5.0
OCT 26 1993
12:52:41
PLOT NO. 2
DISPLACEMENT
STEP=6
SUB =7
TIME=6
RSYS=0
DMX =0.546025
SEPC=14.406

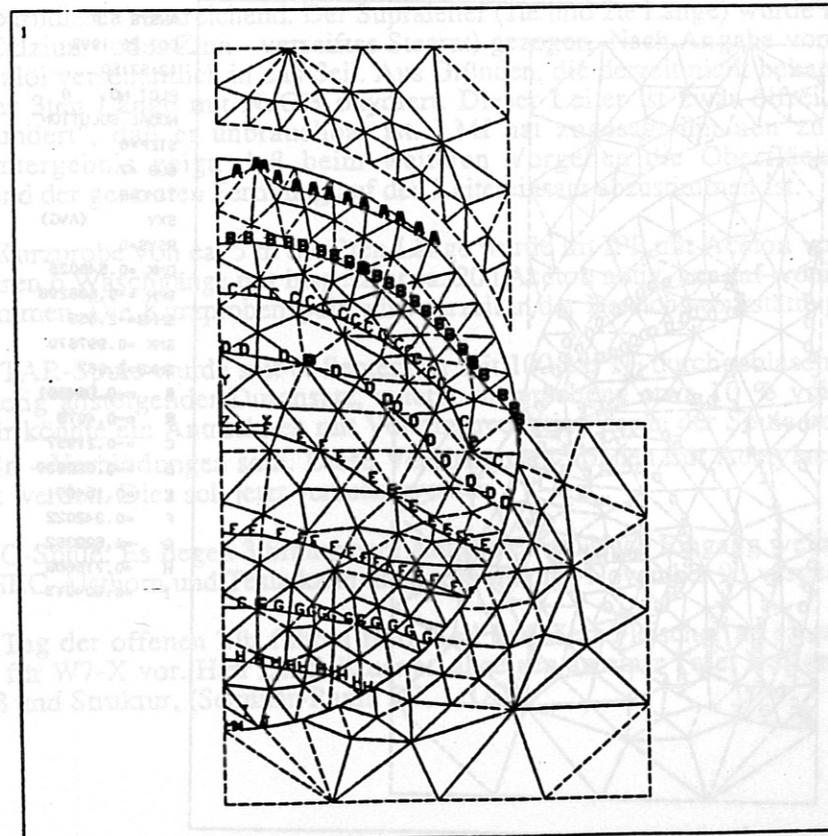
*DSCA=1
ZV =1
DIST=6.581
XF =3.375
YF =-0.002

Anhang σ_x -Verteilung (oben) und $\sigma_{\text{äquivalent}}$ -Verteilung (unten) bei Maximalbelastung

Anzug aus der Druck-Naht
30.09.1993

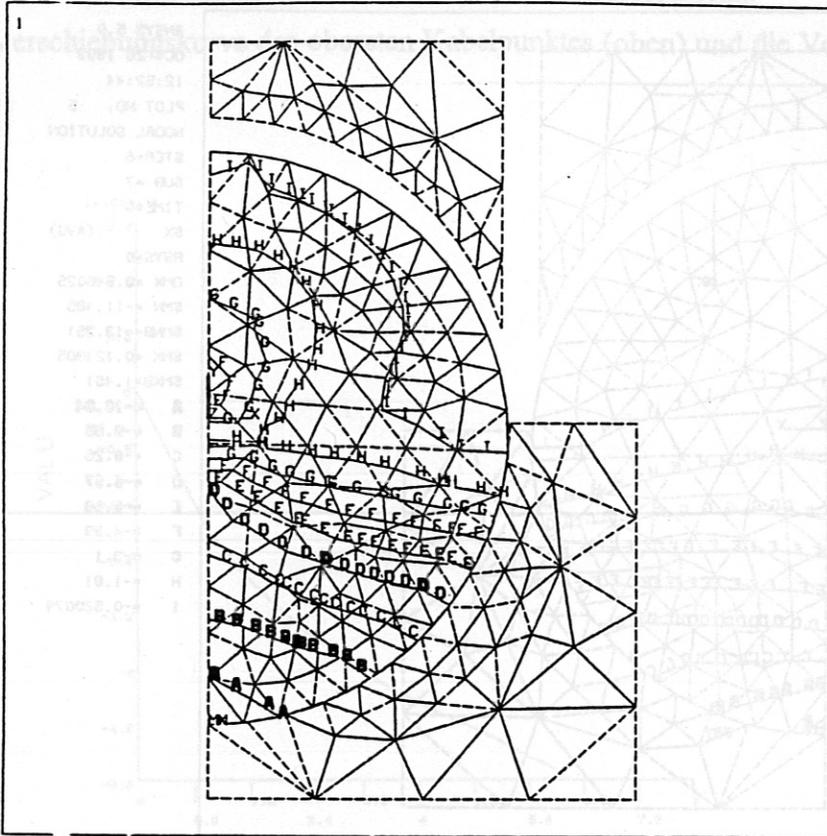


ANSYS 5.0
OCT 26 1993
12:52:44
PLOT NO. 5
NODAL SOLUTION
STEP=6
SUB =7
TIME=6
SX (AVG)
RSYS=0
DMX =0.546025
SMN =-11.485
SMNB=-13.351
SMX =0.124905
SMXB=1.451
A =-10.84
B =-9.85
C =-8.26
D =-6.97
E =-5.68
F =-4.39
G =-3.1
H =-1.81
I =-0.520079

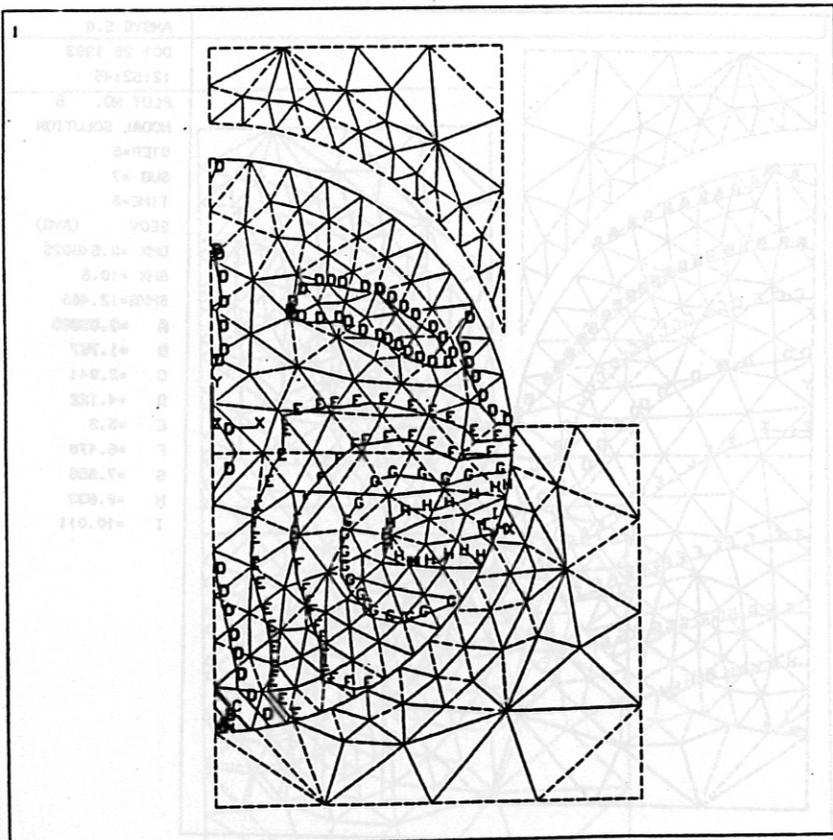


ANSYS 5.0
OCT 26 1993
12:52:45
PLOT NO. 6
NODAL SOLUTION
STEP=6
SUB =7
TIME=6
SEQV (AVG)
DMX =0.546025
SMX =10.6
SMXB=12.466
A =0.88888
B =1.787
C =2.944
D =4.122
E =5.9
F =6.478
G =7.655
H =8.833
I =10.011

σ_r -Verteilung (oben) und τ_{xy} -Verteilung (unten) bei Maximalbelastung



ANSYS 5.0
 OCT 26 1993
 12:52:47
 PLOT NO. 7
 NODAL SOLUTION
 STEP=6
 SUB =7
 TIME=6
 SX (AVG)
 RSYS=1
 DMX =0.516025
 SMN =-11.907
 SMX =-13.773
 SHXB=1.395
A =-11.245
B =-9.922
C =-8.599
D =-7.276
E =-5.953
F =-4.63
G =-3.307
H =-1.984
I =-0.661492



ANSYS 5.0
 OCT 26 1993
 12:52:50
 PLOT NO. 8
 NODAL SOLUTION
 STEP=6
 SUB =7
 TIME=6
 SXY (AVG)
 RSYS=0
 DMX =0.516025
 SMN =-0.698296
 SMX =-2.555
 SHXB=0.997678
 SHXB=2.067
A =-0.994881
B =-0.4078
C =-0.21997
D =-0.032639
E =0.151691
F =0.342022
G =0.529352
H =0.716683
I =0.904013

Anhang C

Auszug aus der Protokoll-Notiz der Arbeitsgruppenbesprechung W7-X Technik vom 30.09.1993:

IPP/E2/Sa/wir
04.10.93

Protokoll-Notiz

Arbeitsgruppenbesprechung W7-X Technik

Teilnehmer: H. Bitter, H. Hertle, H. S. Huber, H. Kamm, Dr. Pillsticker, H. Tretter, H. Sapper, Dr. Schauer, H. Schoenewolf, H. Werner, H. Wieczorek, Dr. Harmeyer, Dr. Rapp (ZTE).

Datum: 30.09.1993

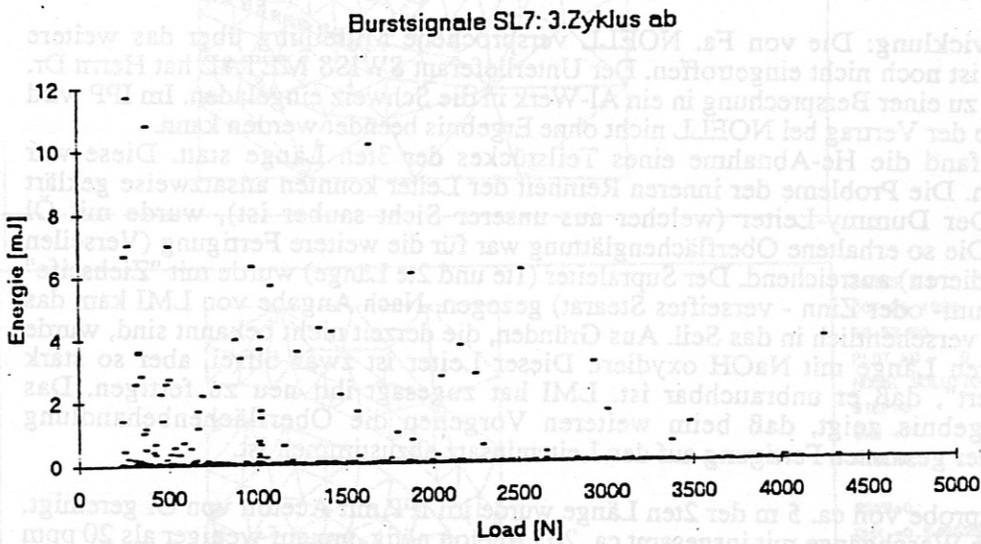
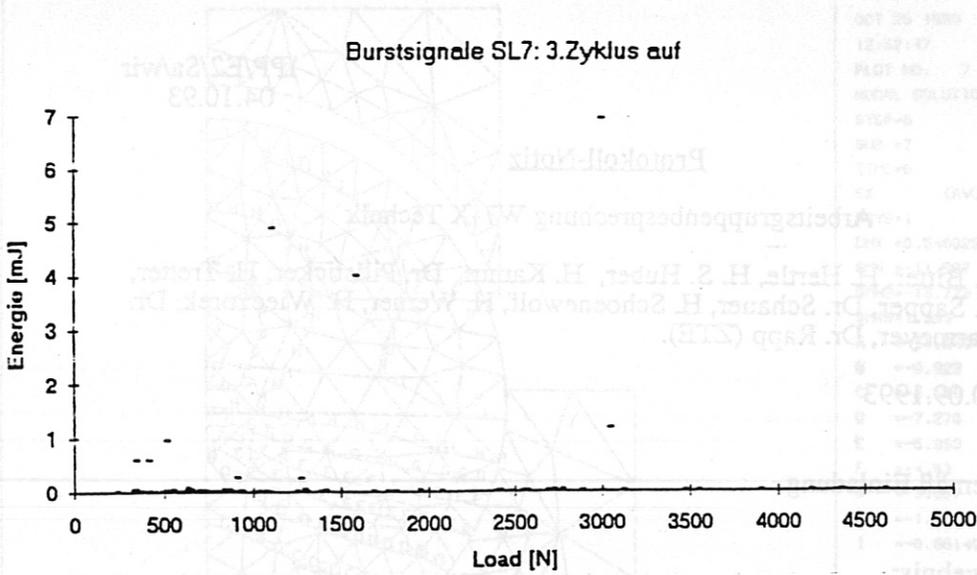
Themen: gemäß Einladung

Besprechungsergebnis:

- 1) Leiterentwicklung: Die von Fa. NOELL versprochene Mitteilung über das weitere Vorgehen ist noch nicht eingetroffen. Der Unterlieferant SWISS METAL hat Herrn Dr. Pillsticker zu einer Bersprechung in ein Al-Werk in die Schweiz eingeladen. Im IPP wird geprüft, ob der Vertrag bei NOELL nicht ohne Ergebnis beendet werden kann.- Bei LMI fand die He-Abnahme eines Teilstückes der 3ten Länge statt. Diese war erfolgreich. Die Probleme der inneren Reinheit der Leiter konnten ansatzweise geklärt werden: Der Dummy-Leiter (welcher aus unserer Sicht sauber ist), wurde mit Öl gezogen. Die so erhaltene Oberflächenglättung war für die weitere Fertigung (Verseilen und Extrudieren) ausreichend. Der Supraleiter (1te und 2te Länge) wurde mit "Ziehseife" (d.i. Calcium- oder Zinn - verseiftes Stearat) gezogen. Nach Angabe von LMI kam das Mineralöl versehentlich in das Seil. Aus Gründen, die derzeit nicht bekannt sind, wurde bei der 3ten Länge mit NaOH oxydiert. Dieser Leiter ist zwar ölfrei, aber so stark "verzundert", daß er unbrauchbar ist. LMI hat zugesagt ihn neu zu fertigen. Das Gesamtergebnis zeigt, daß beim weiteren Vorgehen die Oberflächenbehandlung während der gesamten Fertigung auf den Leitereinsatz abzustimmen ist.
- 2) Eine Kurzprobe von ca. 5 m der 2ten Länge wurde im IPP mit Aceton von Öl gereinigt. Es waren 6 Waschgänge mit insgesamt ca. 20 l Aceton nötig, um auf weniger als 20 ppm zu kommen. Die Kurzprobenspule wird derzeit in der Bereichswerkstätte gefertigt.
- 3) Die STAR-Spule wurde seit 6. September mit 100 bar N₂ durchgeblasen. Es ergab sich ein stetig ansteigender Durchsatz, zuletzt entsprechend etwa 10 % voids. Erklärung hierfür könnte ein Antrocknen mit Volumenreduktion der in der Spule vorhandenen Al- und Sn - Verbindungen sein. Diese Verbindungen können mit Acetylaceton bei 40° C gelöst werden. Dies soll jetzt versucht werden.
- 4) DEMO-Spule: Es liegen 3 brauchbare Angebote vor. Nach Eingang weiterer Unterlagen von GEC-Alsthom und Tesla kann die Spule anfangs November 93 vergeben werden.
- 5) Zum Tag der offenen Tür führen Herr Kerl und Herr Fleischer an einer Work-Station CAD für W7-X vor. Herr Dr. Schauer et. al zeigen an einer Tafel Design-Ergebnisse zu Gefäß und Struktur, (Seminar-Raum D2, 1. OG).

Anhang D1

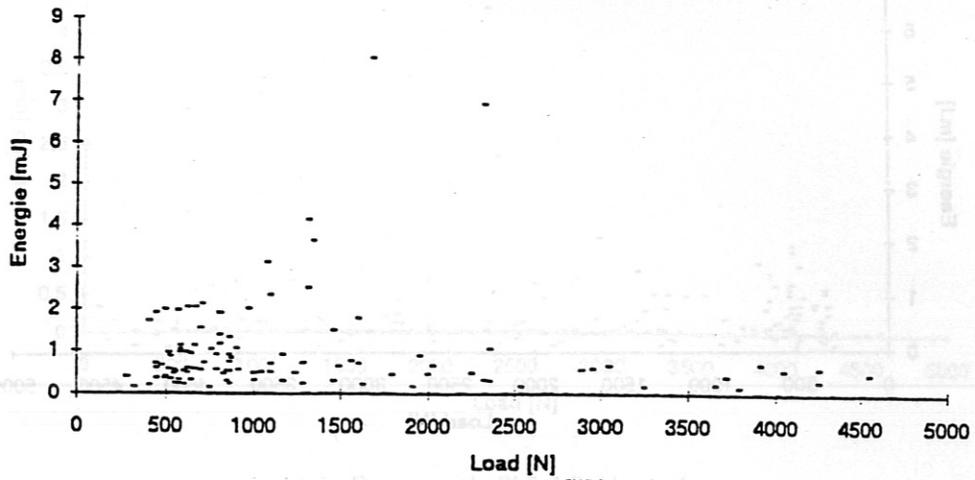
Verteilung der SE-Signale bzgl. der Last für den Normierungszyklus von SL 7:



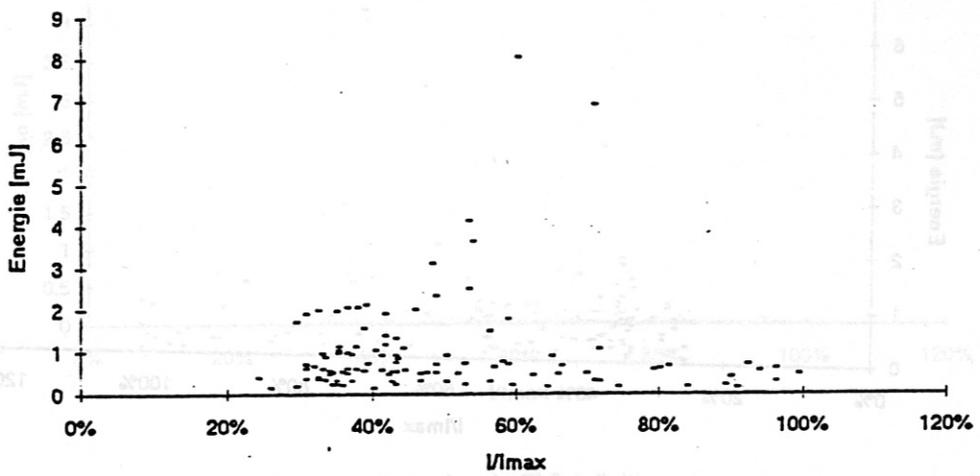
Anhang D2

Weitere Verteilungen der SE-Signale für die gemessenen Kabel:

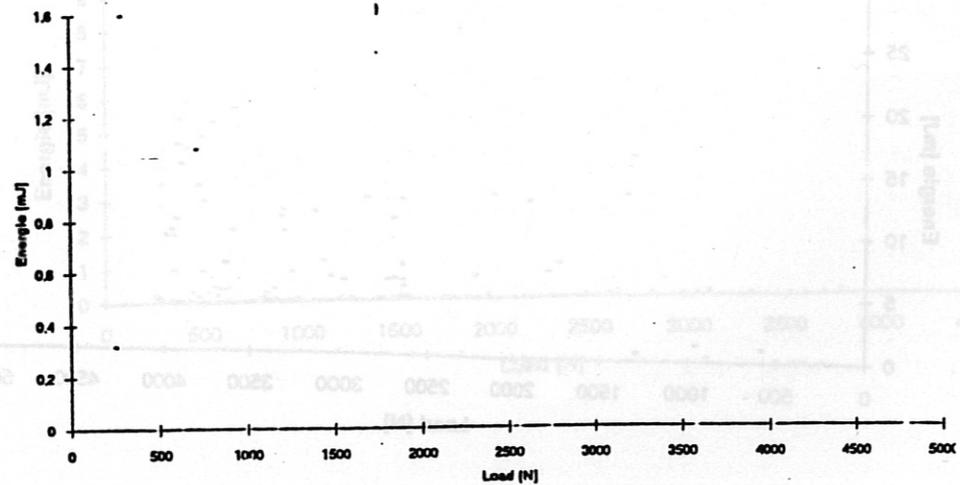
Burstsignale SL4: 1.Zyklus auf



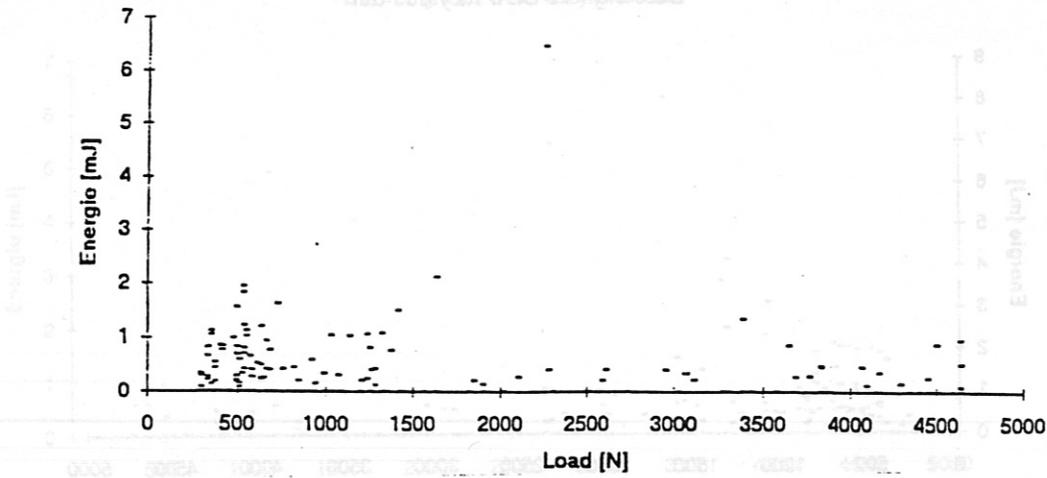
Burstsignale SL4: 1.Zyklus auf



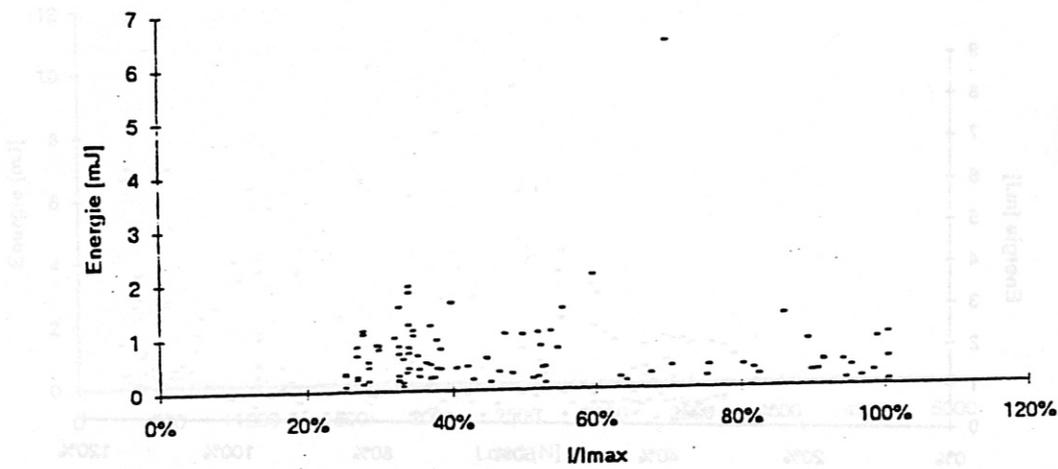
Burstsignale SL4: 1.Zyklus ob



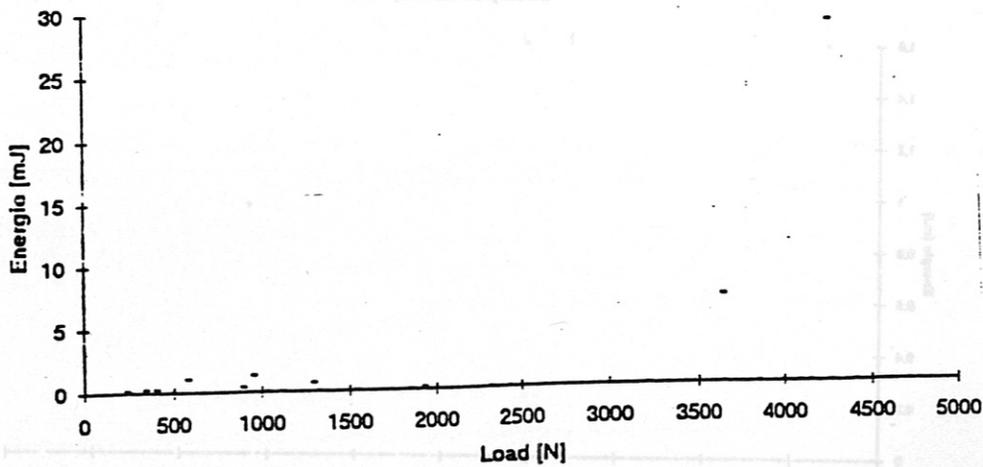
Burstsignale SL6: 1.Zyklus auf



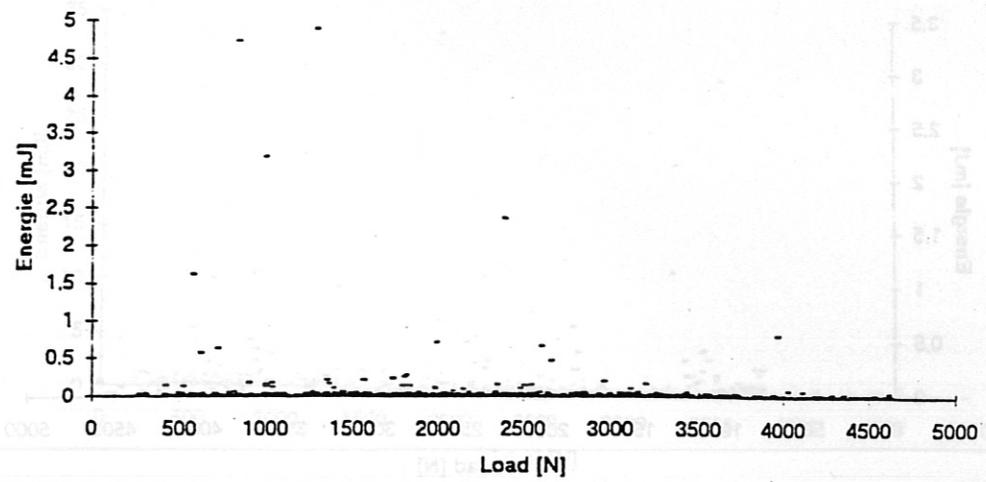
Burstsignale SL6: 1.Zyklus auf



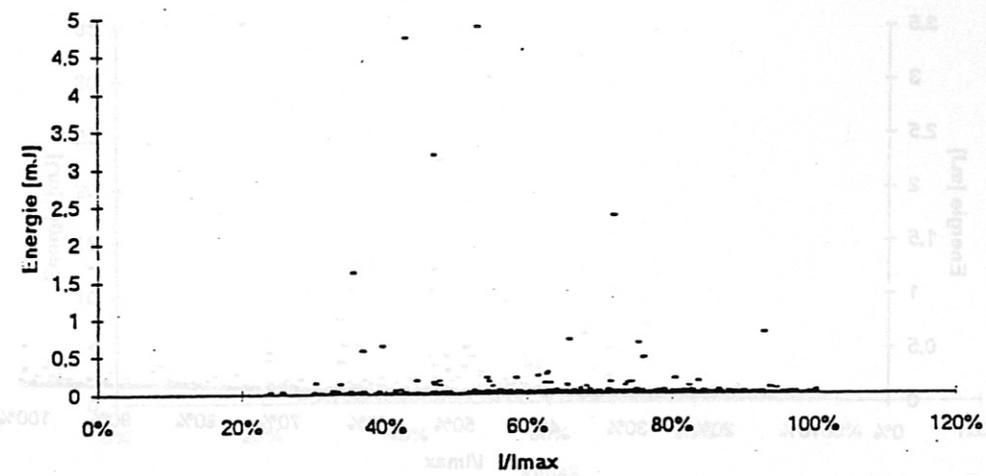
Burstsignale SL6: 1.Zyklus ab



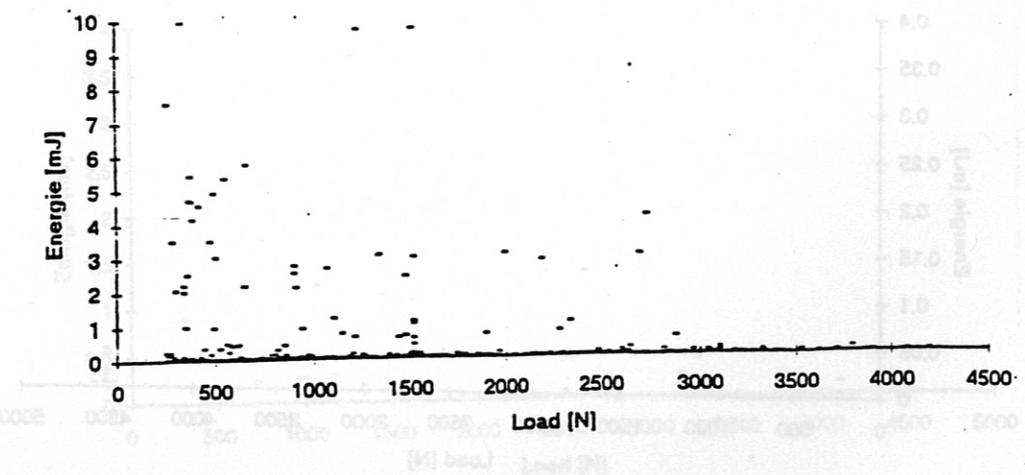
Burstsignale SL7: 1.Zyklus auf



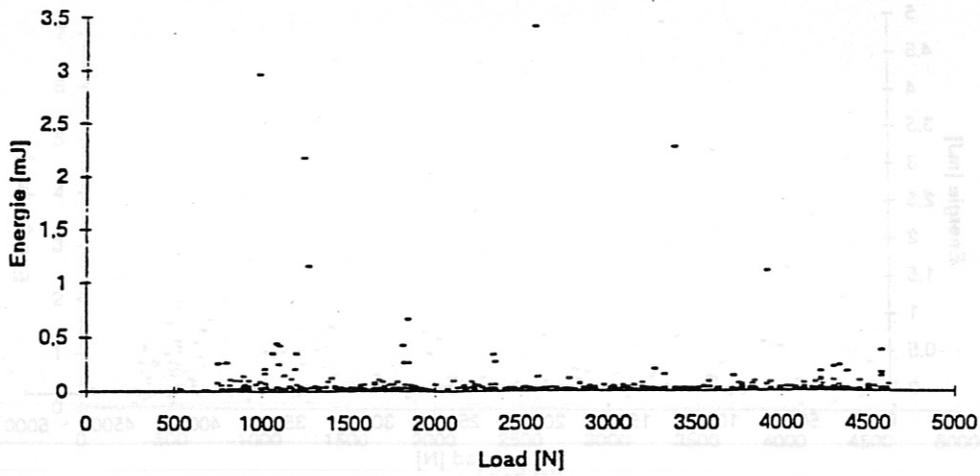
Burstsignale SL7: 1.Zyklus auf



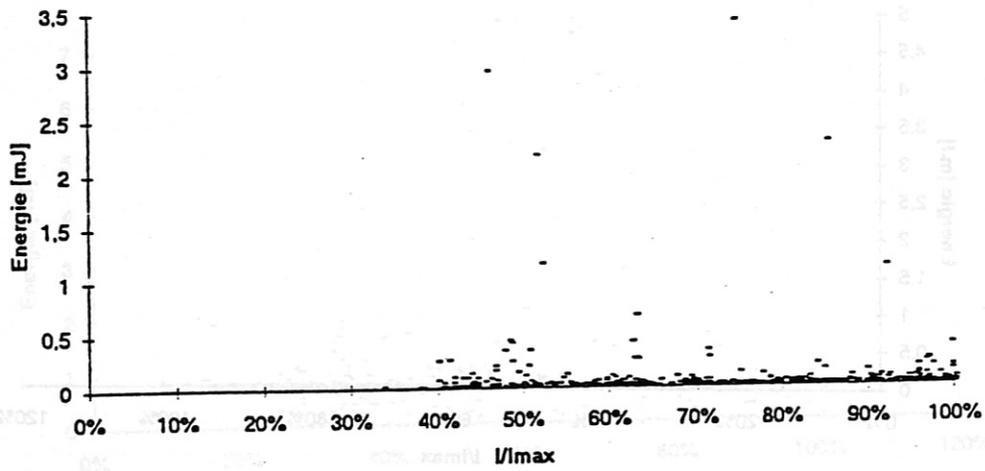
Burstsignale SL7: 1.Zyklus ab



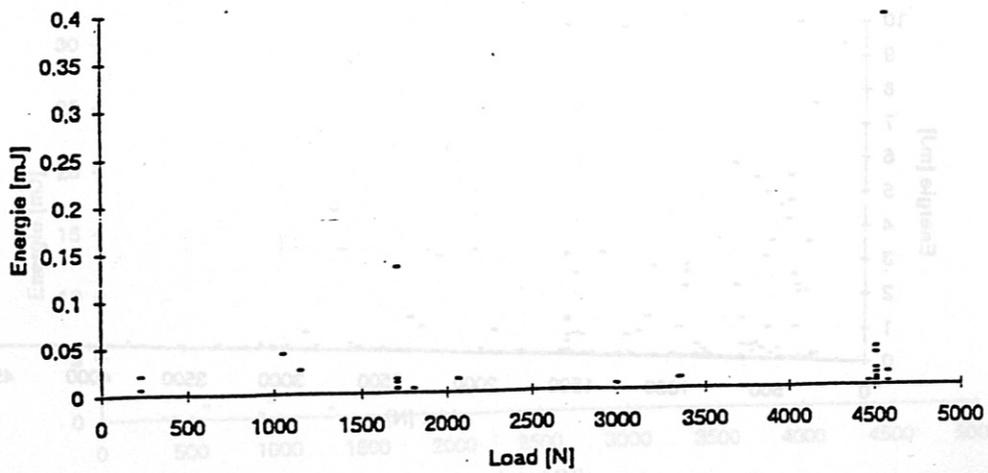
Burstsignale SL11: 1.Zyklus auf



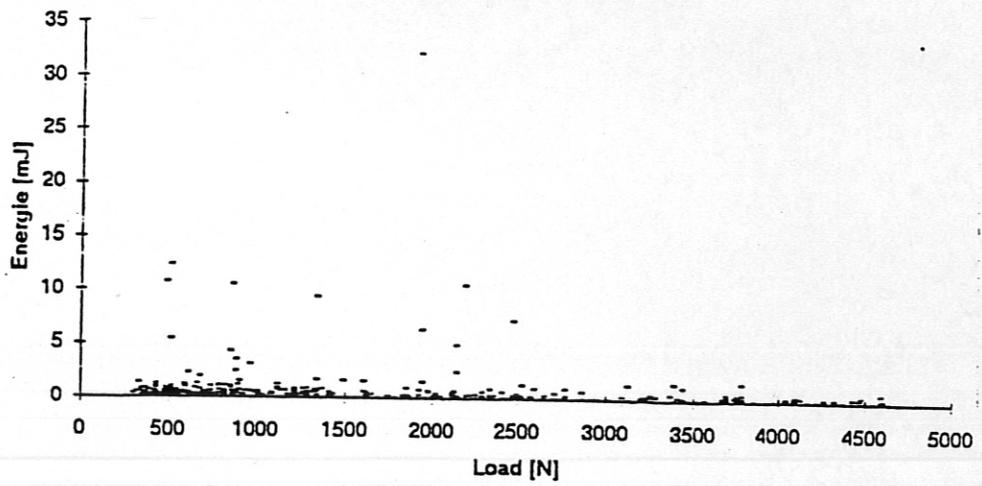
Burstsignale SL11: 1.Zyklus auf



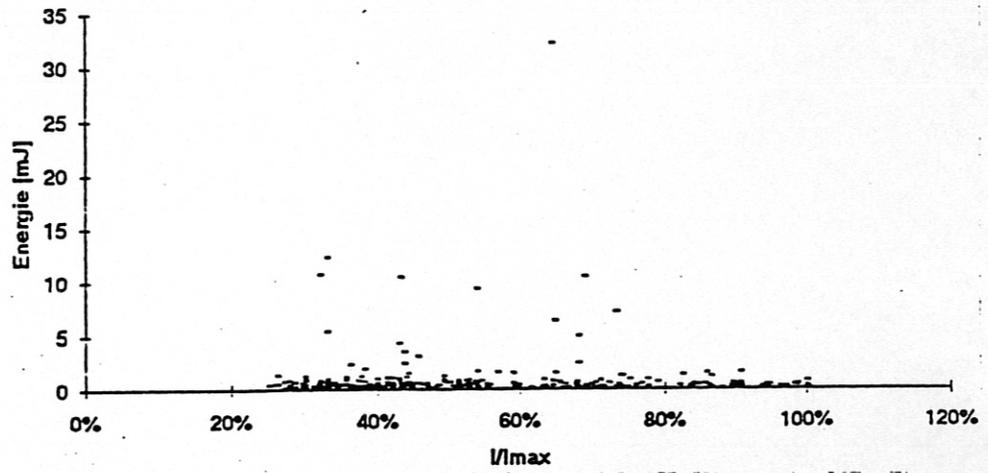
Burstsignale SL11: 1.Zyklus ab



Burstsignale SL14: 1.Zyklus auf



Burstsignale SL14: 1.Zyklus auf



Burstsignale SL14: 1.Zyklus ab

