



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN

Vienna University of Technology

DIPLOMARBEIT

**Aufbau eines Anisotropie-Messplatzes für Zugversuche an
YBCO-Bandleitern**

Ausgeführt am

Atominstitut der Technischen Universität Wien

unter der Anleitung von

Prof. DDr. Harald WEBER

durch

**Ventsislav Mishev
Klimschgasse 13/7, 1030 Wien**

Matr.-Nr.: 0527209

24.05.2011..... Ventsislav MISHEV

Danksagung

Ohne die Unterstützung vom Herrn Prof. Weber wäre der erfolgreiche Abschluss dieser Arbeit (und auch meines Studiums) nicht vorstellbar. Seitdem ich die erste Vorlesung über Supraleitung von ihm hörte, habe ich nach den sämtlichen Projektarbeiten, nach dem Praktikum sowie einigen Seminarvorträgen eine Faszination für Supraleitung entwickelt, die mich noch lang nicht verlassen wird. Für diese Faszination möchte ich mich bei Herrn Prof. Weber herzlichst bedanken!

Während meiner Zeit im Labor habe ich mich wie zu Hause gefühlt, da ich mit offenen Armen in die Arbeitsgruppe aufgenommen wurde. Daher möchte ich mich bei allen Kollegen bedanken, für die Hilfe, für die Vorschläge, die Diskussionen und die Unterstützung! Ich danke euch, Franz, Michi, Tomas, Martin, Florian, Tom und Martin K! Vor allem möchte ich mich speziell bei Johann für seine Geduld, seine Hilfsbereitschaft und seine Anweisungen im Laufe meiner Arbeit bedanken.

Ein weiteres Dankeschön geht an den zwei Menschen, die ich bereits in 1998 bei meinem ersten Besuch im Atominstitut kennengelernt habe: an Prof. Vana, der mir am Anfang meines Aufenthalts in Österreich sehr viel geholfen hat sowie an Manfred, der immer zu interessanten Gesprächen da war.

Ohne die Unterstützung meiner Eltern seit meiner Jugend wäre dieser Erfolg nicht möglich. Danke euch, liebe Eltern! Auch meiner Schwester ein Dankeschön!

In meinem Leben blieben wenige Sachen so konstant und positiv wie meine Großeltern und deren Interesse an meinem Studium und meiner Arbeit. Ich bedanke mich bei euch herzlichst!

Und meine liebe Freunde! Ihr seid eigentlich das Schönste, was es in meinem Leben gibt, denn ohne treue Freunde, die immer bereit sind, einander zu helfen, sieht nicht nur das Studium, sondern das ganze Leben komplett anders aus! Also, jeder von euch, auch wenn hier nicht namentlich genannt, ist ein Bestandteil meines Erfolges! Danke euch, Lorenz, Josef, Bernie, Wolfi, Maxi, Ramona, Georgi, Vladi, Sasho, Stef, Melli, Jana, Megi, Ani! Ihr habt mich auf diesem schwierigen, aber interessanten Weg bis zum Ende begleitet. Dafür bedanke ich mich bei euch!

INHALTSVERZEICHNIS:

<u>1. Motivation</u>	<u>4</u>
<u>2. Messplatz</u>	<u>5</u>
2.1 Bestehendes System	5
2.2 Änderungen	8
2.2.1 Messrechner und Programme	8
2.2.2 GPIB Kontroller	9
2.2.3 LabJack U6	10
2.2.4 Magnetdrehung	13
2.2.5 Messshunt	16
<u>3. Experimente</u>	<u>20</u>
3.1 Proben	20
3.2 Grundlagen der Messungen	21
3.2.1 Transportstrommessung	21
3.2.2 Anisotropie von I_c in externen Magnetfeldern	23
3.2.3 Spannungs-Dehnungs-Charakteristik und Irreversibilitätszug	26
3.2.4 Temperatur- und Kraftänderungen während der Messungen	28
3.3 Ergebnisse	32
3.3.1 Kritischer Strom in Abhängigkeit vom angelegten Zug	32
3.3.2 Spannungs-Dehnungs-Charakteristik	39
3.3.3 Anisotropie des kritischen Stromes im externen Magnetfeld	40
3.3.4 Neigung der ab -Ebenen	42
3.3.5 Normierter kritischer Strom in Abhängigkeit vom externen Magnetfeld	44
3.3.6 Auswirkung des axialen Zuges auf den normierten kritischen Strom bei angelegtem externem Magnetfeld	48
<u>4. Zusammenfassung</u>	<u>59</u>
<u>5. Literaturverzeichnis</u>	<u>60</u>
<u>6. Abbildungsverzeichnis</u>	<u>61</u>

1. Motivation

Das Ziel dieser Diplomarbeit ist die Vereinigung des bestehenden Anisotropiemessplatzes und des bestehenden Zugversuchsmessplatzes. Dabei muss die Anbindung des Elektromagneten in bestehende Software durchgeführt werden. Weiters soll die Magnetdrehung und das Setzen des Magnetfelds in das bestehende Python Framework¹ hinzugefügt werden. Eine neue Kalibrierung der Drehung und des Magnetfeldes sind ebenfalls nötig. Nach der Vereinigung der beiden Messplätze sollen Versuche an YBCO-Bandleitern durchgeführt werden, um die Funktionalität des Systems zu zeigen. Zwei YBCO-Bandleiter der Firma SuperPower sollen bei unterschiedlichen Magnetfeldern und axialen Zügen untersucht werden. Mit Hilfe dieser Messungen ist es möglich, eine wesentliche Größe der YBCO-Bandleiter zu bestimmen, nämlich die Irreversibilitätsgrenze unter Zugbelastung („Irreversibilitätszug“). Diese Größe ist vor allem bei technologischen Anwendungen von großer Bedeutung, da die Supraleiter von Kräften, die von umgebenden Magnetfeldern verursacht werden, immer eine Beanspruchung erleiden. Daher ist es interessant, Zugmessungen an YBCO-Bandleiter sowohl im Selbstfeld, als auch im externen Magnetfeld durchzuführen.

¹ Projektarbeit Hronek M

2. Messplatz

2.1 Bestehendes System



Abbildung 1: Bestehende Messplätze: Anisotropie Messplatz (links) und Zugversuch (rechts)

Im Laufe dieser Arbeit wurde der bestehende Anisotropiemessplatz umgebaut und mit dem Zugversuch vereinigt. Die zwei Messanordnungen sind in Abbildung 1 dargestellt. Der Anisotropiemessplatz wurde bisher mit einem alten Windows 95-Rechner angesteuert. Die Drehung des Magneten erfolgte durch einen Servomotor.

Das Steuern des magnetischen Feldes wurde durch Vergleichen der Hallspannung einer im Magneten eingebauten Hallsonde mit einer Referenzspannung realisiert. Die Schnittstelle zwischen den Geräten und dem Rechner war die „Graue Box“². In der „Grauen Box“ befanden sich die Steuerung des Servomotors sowie die Spannungsquelle für das Magnetventil des Kühlwassers vom Magneten. Außerdem wurde die Referenzspannung für die Steuerung des Magnetfeldes von einer PCI-Karte im Rechner über die „Graue Box“ bereitgestellt.

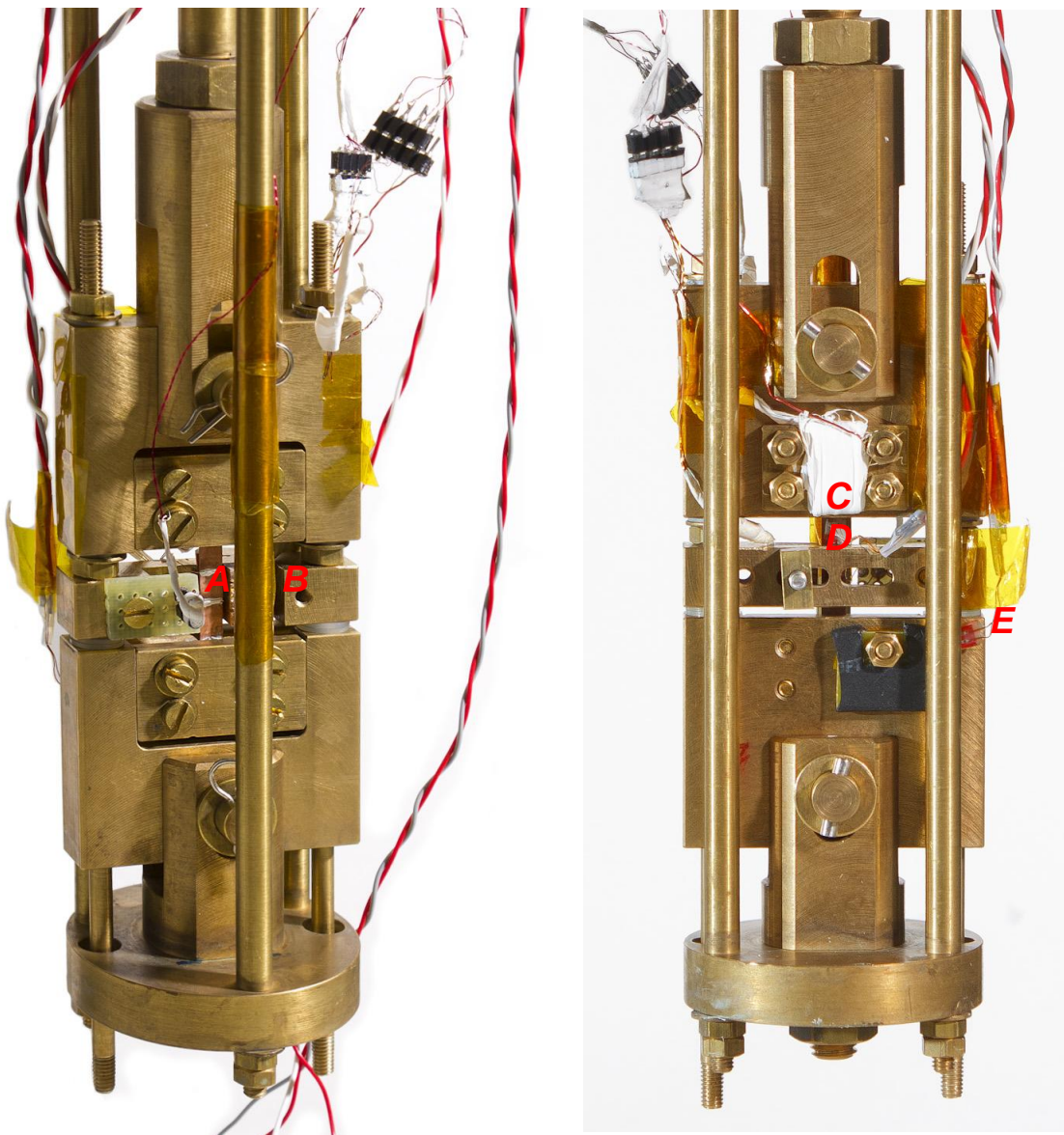


Abbildung 2: Probenhalter: Vorderseite (links) und Rückseite (rechts)

Der Probenhalter des Zugversuchs ist in

² Vostner A: *Transportstrommessplatz-Elektromagnet*

Abbildung 2 zu sehen. Die Probe (A) und der Temperatursensor (B) sind auf der Vorderseite sichtbar, hingegen sind die Hallsonde (C), der Proben- (D) und Referenzdehnmessstreifen (E) auf der Abbildung erkennbar. Der Strom fließt in die Probe durch die innere, massivere Zugstange von oben nach unten und wird durch die drei dünneren, äußeren Stangen wieder abgeleitet.

Die Kraft an der Probe wird mit einem Schrittmotor über eine Feder mit maximaler Belastung von 1194 N realisiert. Die Abhängigkeit der angelegten Kraft von der Position des Schrittmotors ist in Abbildung 3 dargestellt. Diese Abhängigkeit lässt sich grob in drei lineare Bereiche teilen, die zum Setzen einer Kraft benutzt wurden.

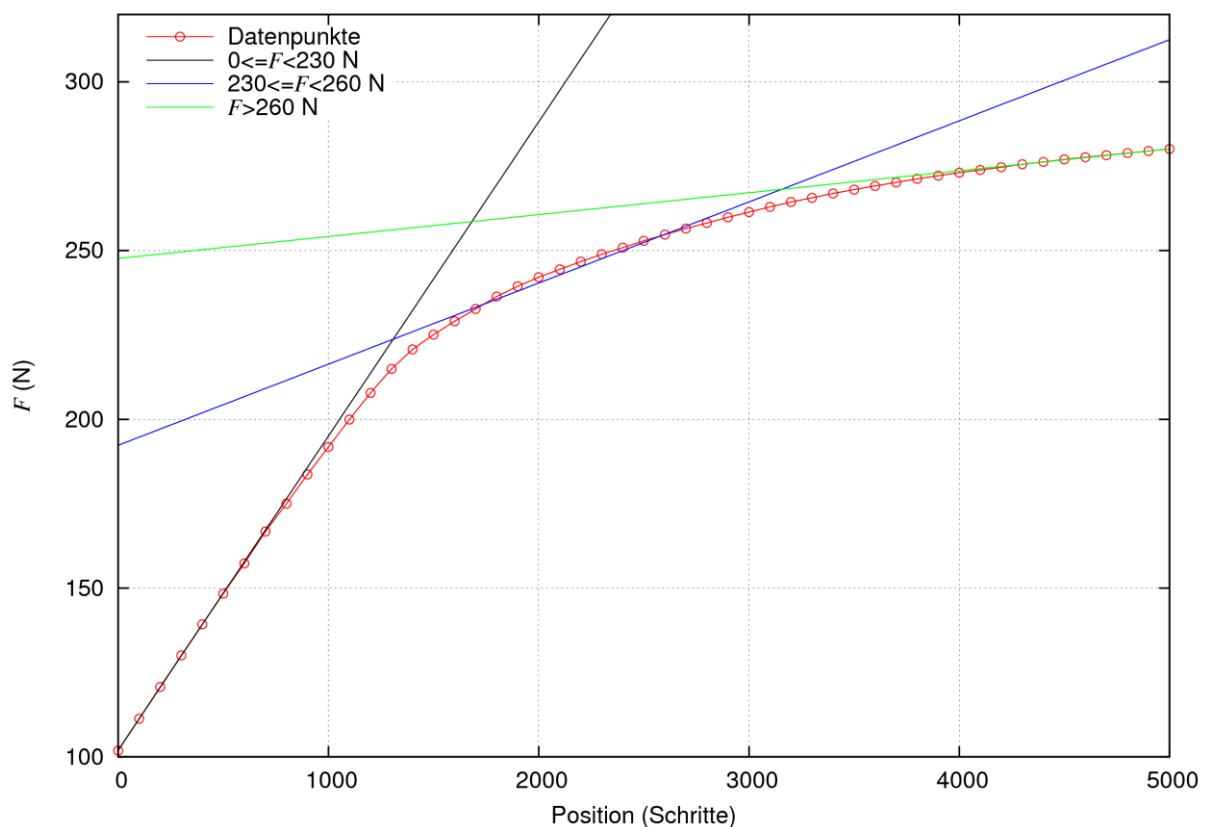


Abbildung 3: Abhängigkeit der angelegten Kraft von der Schrittmotorposition

Die Kraft wird mit einer Kraftmessdose gemessen. Der Position entspricht die Schrittzahl am Schrittmotor. Ein Drift der Kraft wurde festgestellt: 0.4 N innerhalb 1000 s. Da die Kraft regelmäßig während der Messung gemessen und gegebenenfalls nachgestellt wurde, kann diese Drift vernachlässigt werden.

2.2 Änderungen

2.2.1 Messrechner und Programme

Als Steuerungsgerät für das gesamte Experiment wird ein Ubuntu-Linux Rechner verwendet, der neu aufgesetzt wurde. Die notwendigen Softwareprogramme werden mit der Programmiersprache Python programmiert.

Die Software-Anbindung in Python für die meisten Messgeräte und für die 300 A Stromquelle waren bereits vorhanden und wurden im Laufe einer Projektarbeit¹ überarbeitet. Sämtliche Programme werden vor dem Start der Messung mittels einer Initialisierungsdatei importiert. Diese enthält auch wichtige Informationen, wie zum Beispiel die Anfangswerte für die Messungen des kritischen Stroms. Die im Laufe dieser Diplomarbeit entwickelten Sequenzen lassen sich in drei Gruppen unterteilen: Mess- und Auswertungssequenzen, Geräteinitialisierung und graphische Darstellung.

Zu den Mess- und Auswertungssequenzen zählen die Programme, mit denen der kritische Strom bei unterschiedlichen Zügen und Magnetfeldern bestimmt wird. Die Ansteuerung des Magneten, sowie das genaue Setzen der Kraft erfolgt auch über eigene Sequenzen. Die graphische Darstellung der Messdaten während der Messung wird mit einer Anbindung³ des Programms gnuplot ermöglicht.

³ <http://gnuplot-py.sourceforge.net/>

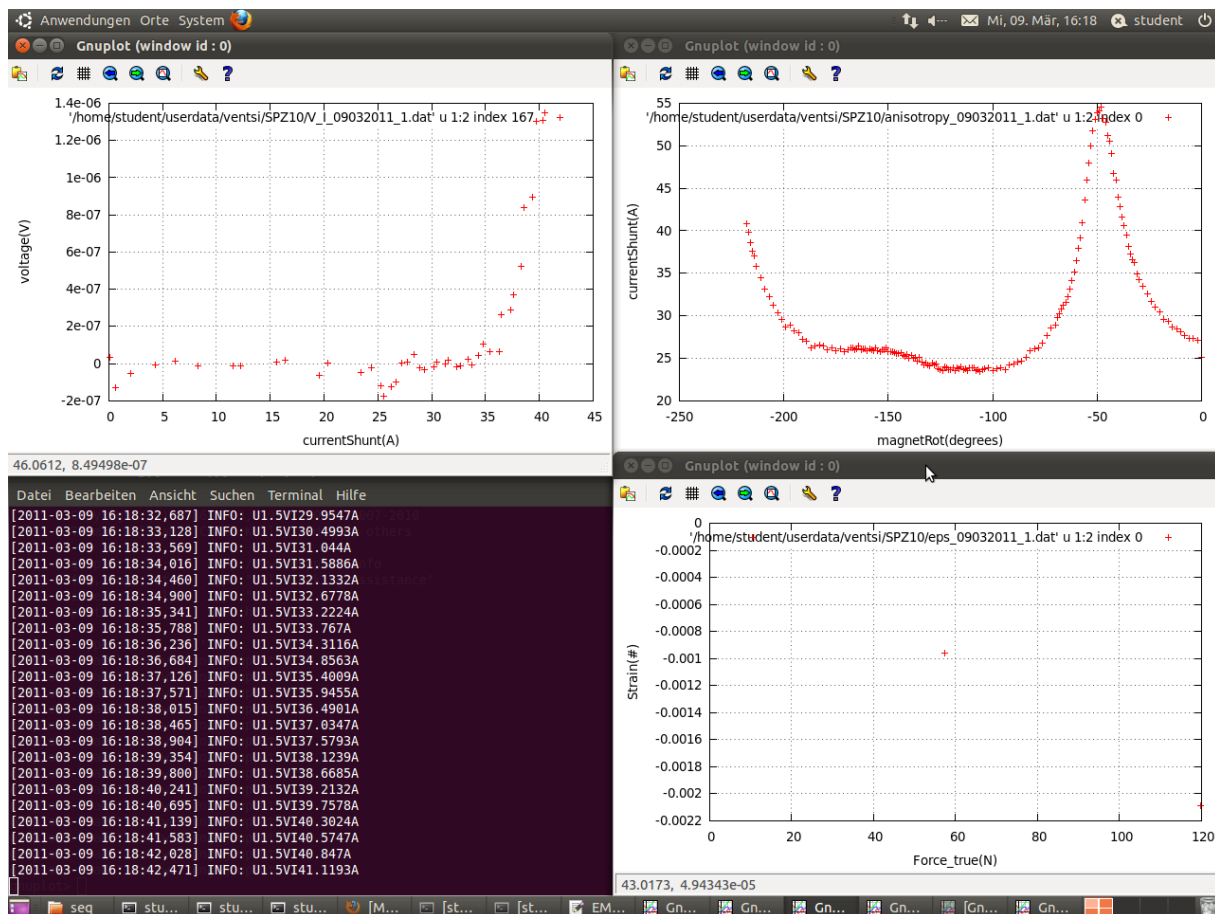


Abbildung 4: Screenshot vom Messrechner während einer Messung

Mit der entwickelten Software wird es möglich, sämtliche Messdaten (Temperatur, Kraft, Strom, Magnetfeld usw.) und deren Änderungen gleichzeitig in unterschiedlichen gnuplot-Fenstern darzustellen und dadurch zu veranschaulichen. Welche Messdaten tatsächlich graphisch dargestellt werden sollen, wird vom Benutzer des Systems in der Initialisierungsdatei selbst definiert. Abbildung 4 zeigt einen Screenshot vom Messrechner während einer Messung und soll als Beispiel der graphischen Darstellung derselben dienen. Die drei Kurven, die zu sehen sind, sind eine Strom-Spannung-Kurve (links oben), eine Stromanisotropiekurve (rechts oben) und eine Kraft-Dehnungs-Kurve (rechts unten). Der Linux-Terminal, wo die Befehle eingegeben werden, ist unten links zu sehen.

2.2.2 GPIB Kontroller

Im ursprünglichen Setup ist die Kommunikation zwischen dem Messrechner und den Messgeräten über eine ISA-Bus-GPIB-Karte gelaufen. Die meisten gängigen Rechner verfügen über keinen ISA-Bus, da dieser Standard veraltet und durch PCI ersetzt worden ist. Daher war es notwendig, einen Ersatzkontroller für den neuen

Linux-Rechner zu finden. Es wurde ein USB-GPIB-Kontroller der Firma Prologix⁴ gewählt. Die Schnittstelle zwischen dem GPIB-Kontroller und Python wird durch das Pythonmodul PySerial⁵ zur Verfügung gestellt.

2.2.3 LabJack U6

Das Herz des neuen Aufbaus ist das USB-I/O-Modul U6⁶ der Firma LabJack, das im folgenden Text als „LabJack“ bezeichnet wird. Es hat viele unterschiedliche Funktionen, die für die Ansteuerung und Kontrolle des Experiments verwendet werden. Die wichtigste Funktion des Geräts ist die Ansteuerung des Elektromagneten. Der LabJack U6 hat zwei analoge Spannungsausgänge, die jeweils 5 Volt mit 12 bit Auflösung liefern können. Der Elektromagnet der Firma Drusch wird über eine Referenzspannung angesteuert. Diese wird an der hinteren Seite der Magnetsteuerung angeschlossen und mit der Spannung einer im Magneten montierten Hallsonde verglichen. Das Magnetfeld wird dementsprechend hochgesetzt, bis die Hallspannung gleich der gesetzten Referenzspannung ist. Früher ist die Referenzspannung für die Hallsonde durch eine PCI-Karte und einen Spannungsteiler bereitgestellt worden. Diese Funktion wurde vom LabJack U6 übernommen. Da die PCI-Karte 10 Volt lieferte und der analoge Ausgang vom LabJack U6 5 Volt, musste der Spannungsteiler entsprechend angepasst werden. Die genaue Kalibrierung des Magneten erfolgte durch eine Messung des Feldes mit einem F.W.Bell 7010 Gaußmeter bei bestimmten LabJack-Spannungen. Dabei wurde die vom LabJack gelieferte Spannung in 0.025 V Schritten erhöht, bis das maximale Feld erreicht wurde. Es ist wichtig zu vermerken, dass die Referenzspannung nicht ident ist mit der vom LabJack gelieferten Spannung, da sich dazwischen der bereits erwähnte Spannungsteiler befindet. Das Verhältnis zwischen der Referenzspannung, die an der Magnetsteuerung hängt und der Spannung, die vom LabJack geliefert wird, lautet:

$$\frac{U_{ref}}{U_{LabJack}} \approx 0.0282$$

⁴ <http://prologix.biz/gpib-usb-controller.html>

⁵ <http://pyserial.sourceforge.net/>

⁶ <http://labjack.com/u6>

Das Ergebnis der Abhängigkeit zwischen angelegter Spannung und gemessenem Magnetfeld ist in Abbildung 5 dargestellt.

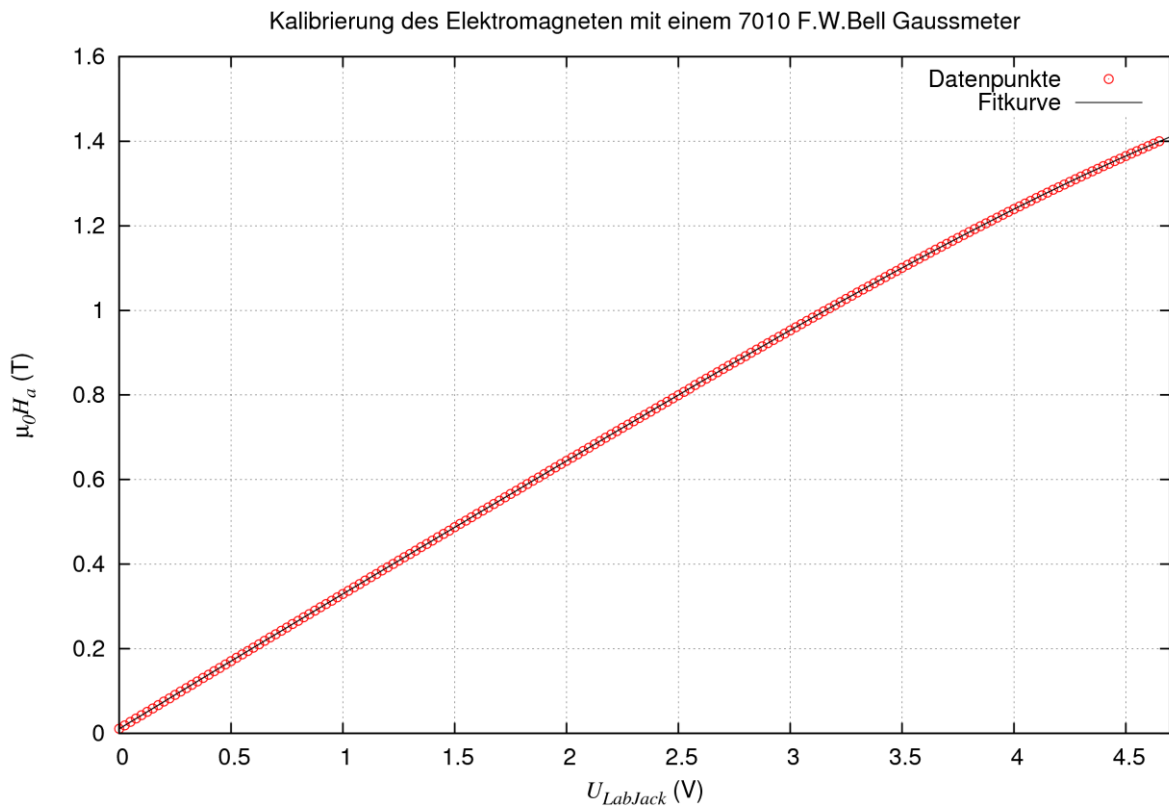


Abbildung 5: Kalibrierung des Elektromagneten

Damit ein bestimmtes Magnetfeld eingestellt werden kann, muss die entsprechende Referenzspannung berechnet werden. Zu der Einstellung eines bestimmten Magnetfelds mit Hilfe der gemessenen Daten gab es zwei Ideen. Die erste beruhte auf dem Fitten der gemessenen Daten mit Hilfe eines Polynoms vierten Grades, was auch im früheren Aufbau benutzt wurde (entspricht der Fitkurve in Abbildung 5). Die zweite Idee war, eine lineare Interpolation zwischen zwei benachbarten Punkten zu benutzen, um die richtige Referenzspannung zu berechnen und das Feld einzustellen. Die zweite Methode hat sich als genauer erwiesen und wurde schlussendlich implementiert. Mit einer Routine wird das gewünschte Magnetfeld schrittweise erreicht, da bei sofortigem Setzen der für das eingegebene Feld nötigen Referenzspannung das Feld überschwingen würde. Vor allem bei hohen Feldern könnte das zum Überlasten der Stromversorgung führen. Das magnetische Feld kann derzeit mit einer absoluten Genauigkeit von 1 mT gesetzt werden. Eine Änderung des Magnetfelds auf ein Wert ungleich Null dauert ungefähr 1 Minute. Eine Zurücksetzung des Felds auf Null dauert hingegen nur wenige Sekunden, da die

Referenzspannung in einem Schritt auf Null gesetzt werden kann. Das ist nützlich, falls supraleitende Proben im Elektromagneten aufmagnetisiert werden müssen. Der eingegebene Wert des Magnetfeldes wird kontrolliert (nur positive Werte ≤ 1.4 T sind erlaubt) und bei einem gültigem Wert und überstandener Durchflusskontrolle wird das Magnetfeld auf den gewünschten Wert hochgefahren.

Der LabJack hat außer der Steuerung des Magneten auch andere Funktionen:

- Ein- und Ausschalten des Kühlwassers
- Kontrolle des Durchflusses des Kühlwassers

Der Magnet hat eine Leistung bis zu 15 kW, was auch einer hohen Abgabe an thermischer Energie entspricht. Damit das System nicht überhitzt, wird Kühlwasser verwendet. Der Kühlkreislauf wird mit einem mechanischen und einem magnetischen Ventil kontrolliert. Der Durchfluss wird mit einem Durchflussmessgerät kontrolliert, das im Prinzip wie ein Schalter funktioniert: Falls Wasser durchfließt, ist er geschlossen, ansonsten ist er offen. Der LabJack verfügt über zwei Stromausgänge mit je $10 \mu\text{A}$ und $200 \mu\text{A}$. Mit Hilfe des $10 \mu\text{A}$ Ausgangs wird Strom durch den Durchflussmesser geschickt. Gleichzeitig wird die Spannung wiederum mit dem LabJack an einem analogen Eingang (4 solche sind vorhanden) gemessen. Mit diesen Überlegungen und einem entsprechenden Python-Programm wurde die Kontrolle des Wasserdurchflusses realisiert. Diese Kontrolle wird dann mit dem Ein- und Ausschalten des Wassers gekoppelt und direkt im Programm zum Setzen eines Magnetfeldes integriert. Wenn der Benutzer des Systems ein Feld ungleich Null anlegen möchte, wird das Kühlwasser automatisch eingeschaltet. Über den Durchflusssensor wird kontrolliert, ob Wasser tatsächlich fließt.

2.2.4 Magnetdrehung

Der zweite Schrittmotor ist für die präzise Drehung des Magneten verantwortlich. Die Drehung wurde mit Hilfe einer Hallsonde der Firma AREPOC kalibriert und getestet. Das Funktionsprinzip einer Hallsonde ist in Abbildung 6⁷ veranschaulicht.

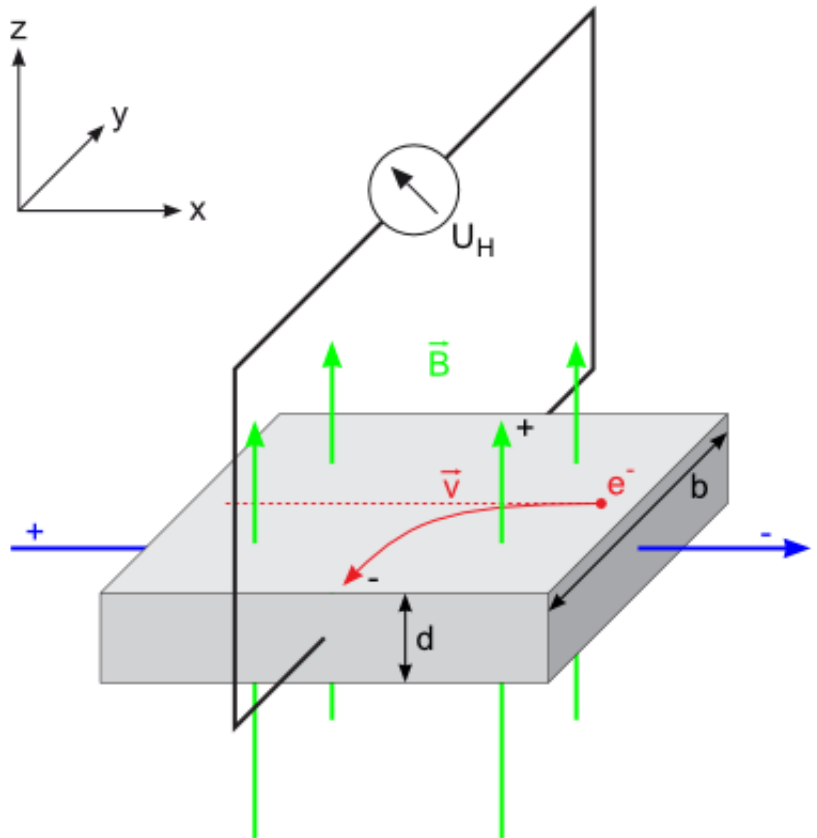


Abbildung 6: Funktionsprinzip einer Hallsonde

Gemessen wird die Hallspannung U_h . Mit Hilfe eines konstanten Faktors ist es möglich, aus dem gemessenen U_h direkt das Magnetfeld B auszurechnen. In diesem Fall wird aber eine weitere Eigenschaft der Hallsonde ausgenutzt und zwar das erwartete Sinusverhalten bei rotierendem Magnetfeld. Falls das Hallsondensignal sich wie eine Sinusfunktion verhält, kann es benutzt werden, um eine sehr genaue Drehung des Magneten zu ermöglichen. Der Test des Sinusverhaltens der Hallsonde ist in Abbildung 7 graphisch dargestellt. Die verwendete Fitfunktion hatte die Form:

⁷ <https://lp.uni-goettingen.de/get/text/4364>

$$(1) \quad U_h(\varphi) = B_0 \cdot q \cdot \sin(\varphi + \varphi_0) + U_{Offset}$$

Die physikalische Bedeutung der unterschiedlichen Parameter ist intuitiv verständlich: B_0 ist die Amplitude des Magnetfeldes, $q \approx 1018 \text{ mV/T}$ ist der Hallfaktor bei 10 mA, φ_0 gibt die Anfangsorientierung der Sonde gegenüber dem Magnetfeld an und U_{Offset} ist der Offset der Hallsonde. Der Fit hat als Offset $13.96 \text{ } \mu\text{V} \pm 8.532 \%$, wobei die Messung desselben $\approx 15 \text{ } \mu\text{V}$ ergab, was gut mit dem ausgerechneten Wert zusammenpasst.

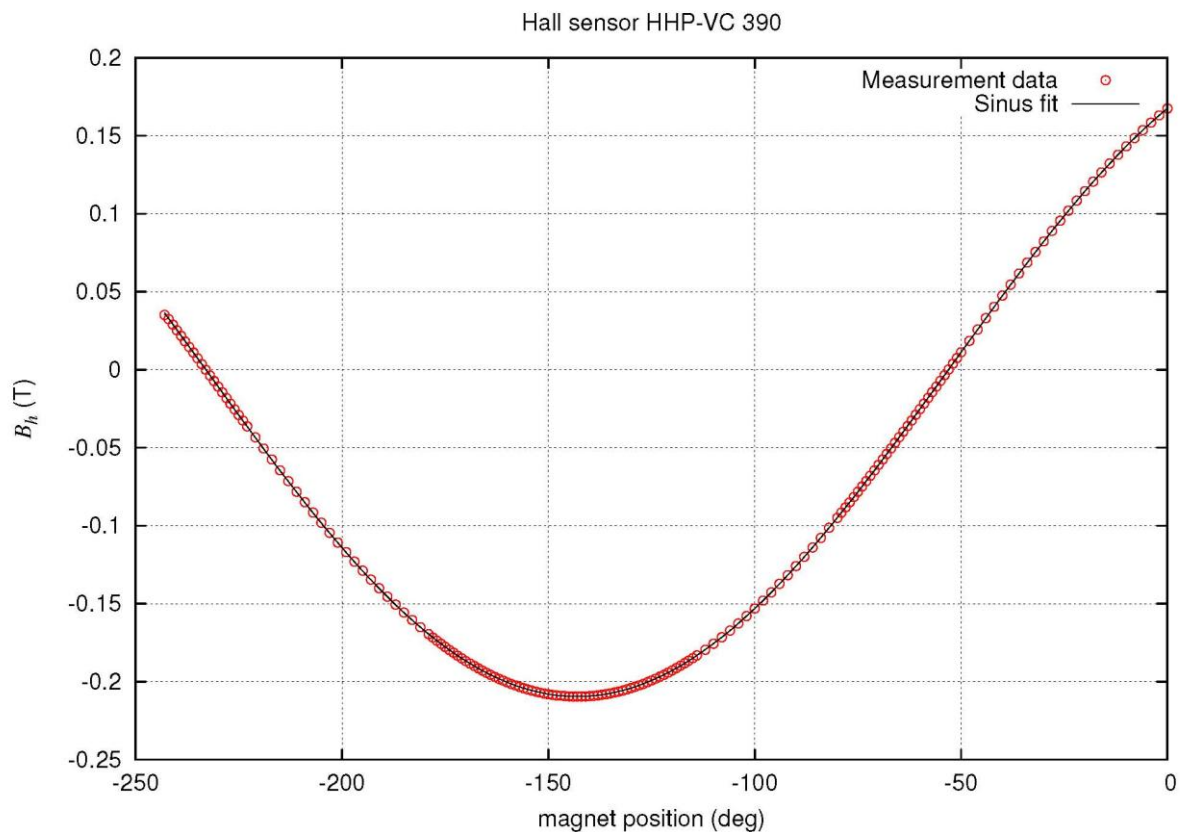


Abbildung 7: Sinusverhalten der Hallsonde

Mit diesen Kenntnissen kann darauf geschlossen werden, dass die Ausrichtung der Hallsonde um genau $N \cdot \pi$ (N ist eine natürliche Zahl) Grad geändert wurde, falls gilt:

$$U_h(\varphi_1) = U_h(\varphi_2) = 0$$

Diese Gleichung wird für die Kalibrierung der Drehung des Magneten verwendet. Es werden die Positionen des Schrittmotors bei $U_h(\varphi_1)$ und $U_h(\varphi_2)$ notiert. Danach wird aus deren Differenz die Distanz in Schritten berechnet, die genau 180° entspricht. Das Ergebnis lautet **144190** Schritte. Mit diesem Ergebnis ist eine Umrechnung

zwischen Grad und Schritten möglich. Diese Umrechnung wurde im Python Framework implementiert und für die Drehung des Magneten verwendet.

Als nächstes wurde die Reproduzierbarkeit der Drehung bei höheren Geschwindigkeiten des Schrittmotors getestet. Die Geschwindigkeit ist wie folgt definiert:

$$v = 1000/(v^\# + 1) \text{ Schritte pro Sekunde}$$

wobei $v^\#$ der Wert ist, der der Schrittmotorsteuerung übergeben wird. In den nachfolgenden Tabellen sind die gemessenen U_h Werte bei einer Drehung von 180° hin und retour angegeben und verglichen. Es ist ersichtlich, dass die Erhöhung der Geschwindigkeit keine Auswirkung auf die Drehgenauigkeit hatte. Die Änderungen ΔU_h sind in der Größenordnung von $3 \mu\text{V}$. Am Schluss wurde die Wahl getroffen, die Geschwindigkeit für die Magnetrotation auf **6** zu setzen, da bei höheren Geschwindigkeiten starke Geräusche zustande kamen, möglicherweise wegen Resonanzen zwischen dem Motor und dem Getriebe einerseits und dem Magneten andererseits.

Nr. der Messung	$v^\#(\#)$	$U_{h1} (\mu\text{V})$	$U_{h2} (\mu\text{V})$	Anfangsposition (schritte)	Endposition (schritte)
1	7	-4	14	0	-144190
2	7	14	-6	-144190	0
3	6	-6	15	0	-144190
4	6	15	-3	-144190	0
5	5	-4	12	0	-144190
6	5	12	-5	-144190	0

Tabelle 1: Geschwindigkeitstests des Magnetmotors

Bei der genauen Umrechnung Schritte/Grad für die Drehung des Magneten muss auch der Offset der Hallsonde = $15 \mu\text{V}$ berücksichtigt werden. Der Spitzenwert der Hallspannung bei den in Tabelle 1 durchgeführten Messungen war $U_h = 40.49 \text{ mV}$ (entspricht in etwa $B_0 = 0.4 \text{ T}$ Magnetfeld). Mit Hilfe dieses Wertes und (1) ist es möglich, den Betrag von φ bei einer gewissen Hallspannung auszurechnen (die

Parameter a und U_{Offset} sind konstant). Mit ΔU_h ergibt sich auch die Genauigkeit $\Delta\varphi$ der Drehroutine aus Tabelle 1.

$$\Delta\varphi = \arcsin\left(\frac{\Delta U_h}{B_0 \cdot q}\right) \approx 1 \cdot 10^{-4} \text{ Grad}$$

Es ist möglich, dass der Schrittmotor aus mechanischen Gründen Schritte verliert und die vorgegebene Drehung nicht vollständig ausführt. Als Kontrolle sollte immer die Hallsondenspannung mitgemessen werden, da aus dieser die Position zum Magnetfeld immer bestimmt werden kann. Es ist auch möglich zu kontrollieren, ob eine gewisse eingegebene Drehung, z.B. 90 Grad, tatsächlich richtig durchgeführt worden ist.

Die Schnittstelle zwischen dem Motor und dem Rechner ist die Schrittmotorsteuerung⁸ des Zugversuchsaufbaus der Firma Robotikhardware. Die Initialisierung in Python war bereits vorhanden.

2.2.5 Messshunt

Es werden Messungen des kritischen Stromes von verschiedenen supraleitenden Proben bei unterschiedlichen Magnetfeldern, Magnetfeldausrichtungen und axialen Zügen durchgeführt. Die Ausrichtung des Magneten, so wie das genaue Setzen von Magnetfeldern wurde bereits im vorigen Unterkapitel diskutiert. Auch die Methode zum Einstellen einer bestimmten Kraft bzw. eines axialen Zuges wurde bereits erklärt. Die letzte wesentliche Komponente der Messungen ist die Bestimmung des kritischen Stromes. Dazu wird über einen Messshunt der tatsächliche Strom gemessen, der über die Probe fließt.

Der gewählte Messshunt kann Ströme bis zu 600 A aushalten, was für das geplante Experiment durchaus ausreichend ist. Die maximalen Ströme, die bei diesen Experimenten erwartet werden, sind in der Größenordnung von maximal 150 A. Der Shunt hat einen Nennwiderstand von 100 $\mu\Omega$. Um diesen Wert zu kontrollieren, sowie einen möglichen Offset des Messsystems herauszufinden, wurde eine sehr genaue Stromquelle der Firma Lakeshore verwendet. Mit dieser Stromquelle wurden

⁸ <http://www.robotikhardware.de/download/rnschrittmotor.pdf>

unterschiedliche Ströme durch den Shunt geschickt und die entsprechenden Spannungen an den Spannungsabgriffen am Shunt mit einem Keithley-2000 Voltmeter gemessen. Um die Auswirkung des Rauschens zu minimieren, wurde ein Mittelwert aus 300 Spannungsmessungen berechnet. Dann wurde die Richtung des Stroms geändert und der gleiche Messvorgang wiederholt. Die Ergebnisse der Messungen sind in Tabelle 2 eingetragen. Zusätzlich sind die Ergebnisse einer Kontrollmessung der angelegten Ströme mit einem Fluke Multimeter in derselben Tabelle eingetragen.

I_{ang} (mA)	I_{shunt} (mA)	I_{Fluke} (mA)
30	32.37	30.02
-30	-27.4	-30.01
100	101.59	100.02
-100	-98.3	-100.02

Tabelle 2: Test der Genauigkeit und des Offsets des Shuntwiderstands

Aus diesen Ergebnissen lässt sich ein kleines Offset des Shunts bestimmen. Dieser wurde im Messprogramm implementiert und berücksichtigt.

Ein weiterer Test wurde durchgeführt, um die thermische Stabilität des Messshunts zu kontrollieren. Da große Ströme durch den Shunt geleitet werden müssen, kann es sein, dass sich dieser nach einiger Zeit aufwärmt und daher eine Widerstandsänderung stattfindet, was zu einer Verfälschung der Messdaten führen würde. Daher muss die thermische Stabilität des Shunts bei hohen Strömen kontrolliert werden. Abbildung 8 zeigt den bei Raumtemperatur vom Shunt gemessenen Strom, normiert auf die Anzeige der Stromquelle, in Abhängigkeit von der Zeit. Der Sollwert des Stroms betrug 150 A, was auch in etwa dem maximal erwarteten Strom in den geplanten Experimenten entspricht.

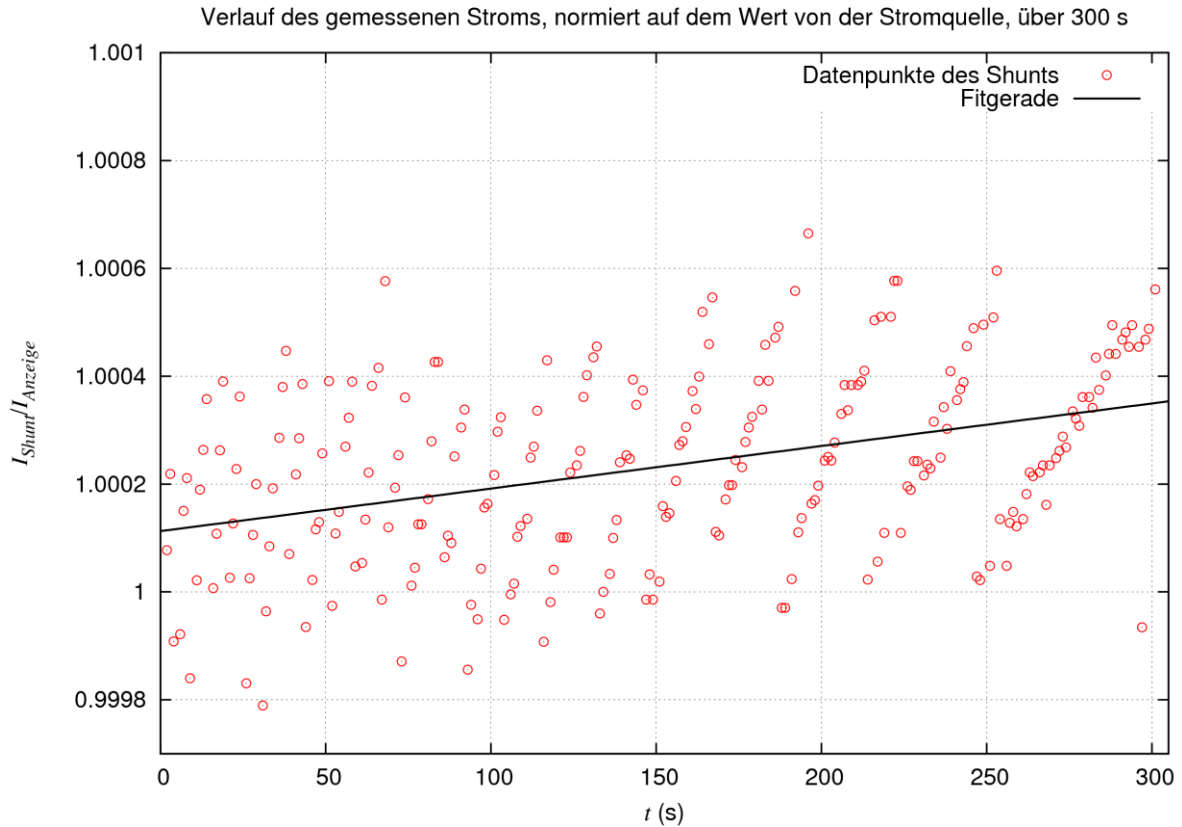


Abbildung 8: Änderungen beim gemessenen Strom

Der Strom wurde für 5 min eingeschaltet. Nach dem Beenden der Messung wurde eine lineare Funktion der Form

$$R(t) = R^*(t) \cdot t + R_0$$

verwendet, um die Widerstandsänderung zu berechnen. Aus der Steigung $R^*(t) \approx 1 \cdot 10^{-4}$ wird ersichtlich, dass sich der Widerstand nur insignifikant über diesen Zeitraum geändert hat. Weiters soll erwähnt werden, dass bei den späteren Experimenten der Strom keinesfalls so lang über den Shunt fließen wird (erwartete Dauer einer Messung des kritischen Stroms ≈ 30 s), daher kann geschlossen werden, dass der vorliegende Shunt für die Experimente geeignet ist.

Während der durchgeführten Versuche hat sich herausgestellt, dass die Anzeige der Stromquelle eine Genauigkeit von ca. 70 mA hat. Außerdem erreicht die Quelle den angegebenen Sollwert des Stroms asymptotisch, was in Abbildung 9 dargestellt ist.

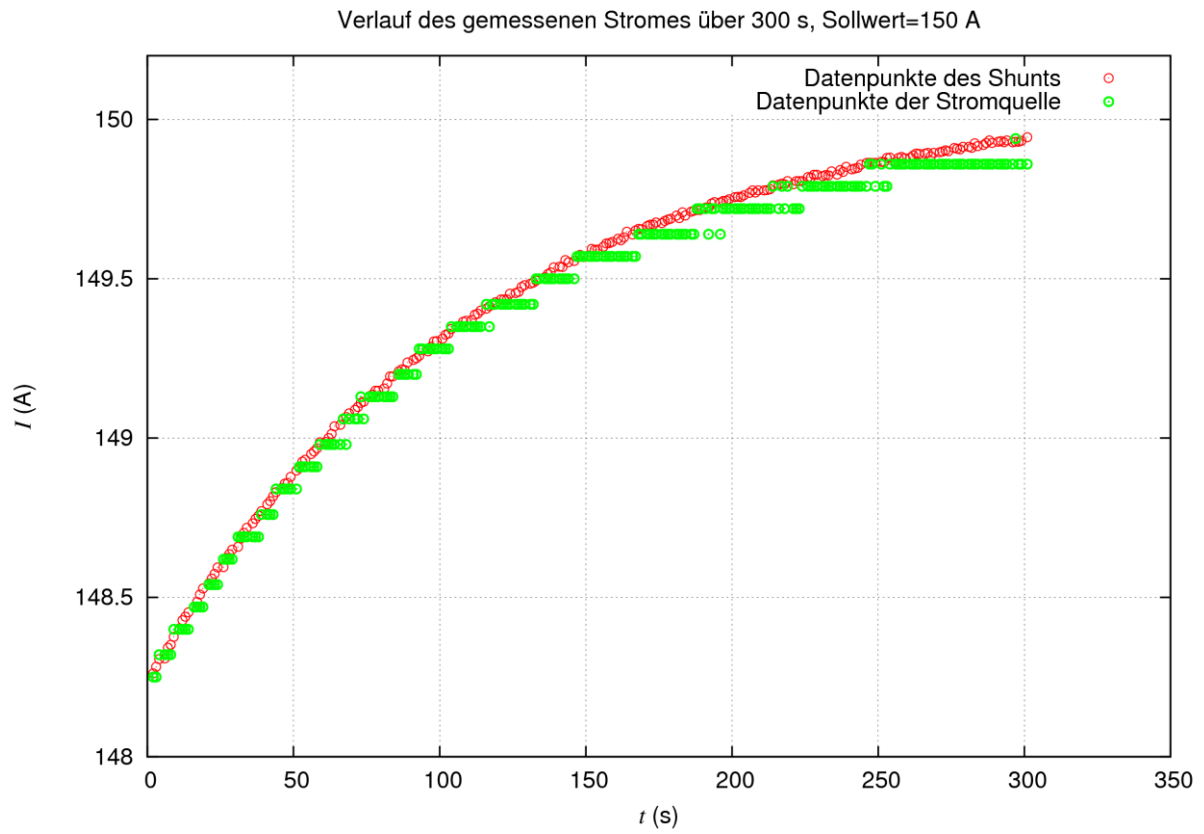


Abbildung 9: Vergleich zwischen Shunt und Anzeige der Stromquelle

3. Experimente

3.1 Proben

Im Rahmen dieser Diplomarbeit wurden mehrere YBCO-Bandleiter und deren physikalischen Eigenschaften untersucht. Die Proben haben eine mehrschichtige Struktur (Abbildung 10), wobei die supraleitende Schicht (bestehend aus $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$) nur 1 μm Dicke hat. Die Kupferschicht umgibt die ganze Probe und dient als mechanischer und elektrischer Schutz für den spröden, keramischen Hochtemperatursupraleiter.

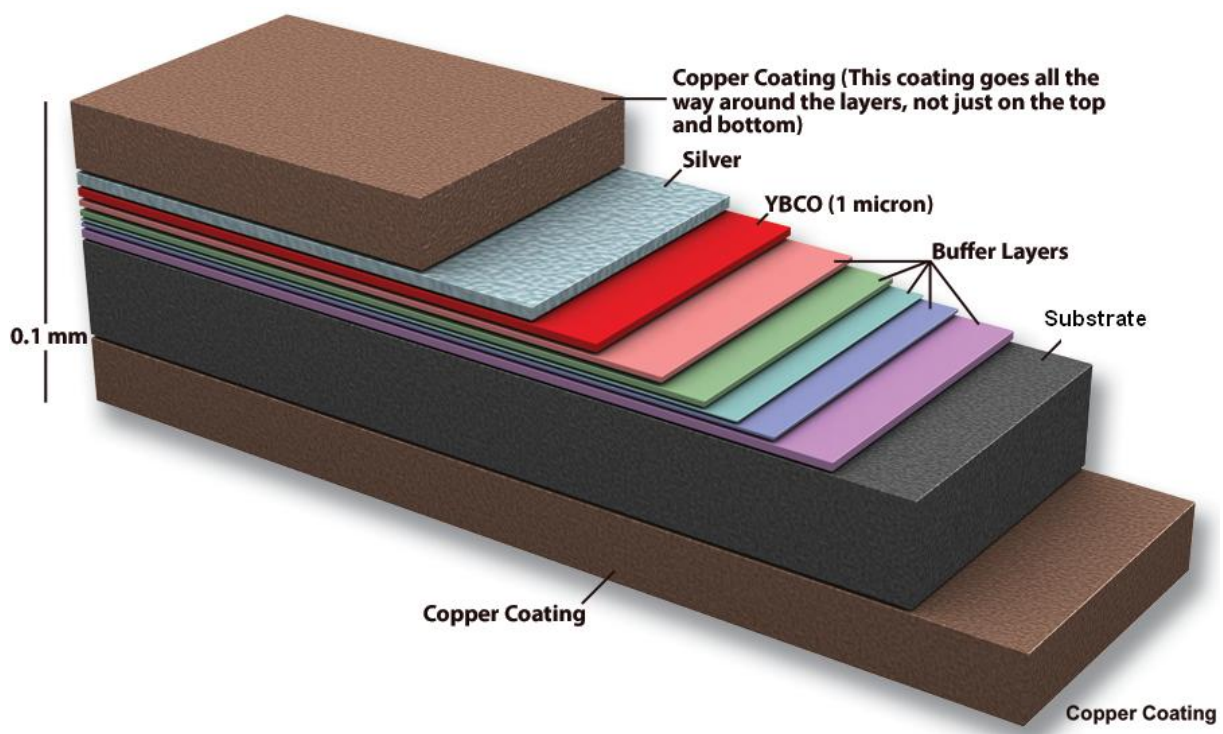


Abbildung 10: Struktur eines Hochtemperatursupraleiterbands⁹

Die Proben sind empfindlich gegen Knicke, die durch Überbiegen entstehen können, da der Supraleiter spröde ist. Andere wichtige Eigenschaften von Hochtemperatursupraleitern sind die Feuchtigkeits- und Wärmeempfindlichkeit. Temperaturen über ca. 200 ° verursachen irreversible Schaden. Andererseits ist Feuchtigkeit auch unerwünscht, da es möglicherweise die Performance des Supraleiters reduziert. Daher wurde die jeweilige Probe nach dem Ende der Messungen für den jeweiligen Tag sorgfältig bei einer Temperatur zwischen 40 und

⁹ <http://www.magnet.fsu.edu/mediacenter/publications/flux/vol3issue2/sctape.html>

60 °C geföhnt, um die Bildung von Kondenswasser zu vermeiden, ohne den Supraleiter durch Überhitzung zu zerstören. Gearbeitet wurde in Summe mit zwei Proben, mit den Bezeichnungen SPZ8 und SPZ10.

3.2 Grundlagen der Messungen

3.2.1 Transportstrommessung

Bei dieser Diplomarbeit ist vor allem der kritische Strom I_c bei verschiedenen Außenbedingungen von Interesse. Diese Außenbedingungen sind die externe Kraft, das angelegte Magnetfeld und die Ausrichtung der Probe dazu, sowie die Temperatur. Im Rahmen dieser Arbeit werden die Auswirkungen von externen Feldern und axialen Zügen auf I_c untersucht. Die Grundmessung ist eine Transportstrommessung, bei der Strom mit Hilfe einer externen Stromquelle durch die Probe geleitet wird. Dabei wird die Temperatur konstant gehalten, da sich die Probe ständig im flüssigen Stickstoff befindet. Die Spannung wird an der Supraleiterseite der Probe abgegriffen und gemessen. Der Strom wird kontinuierlich erhöht, bis die Abbruch-Spannung erreicht wird. Nach dem Erreichen dieser Spannung ist die jeweilige Transportstrommessung abgeschlossen. Im supraleitenden Zustand ist der normaleitende Anteil des spezifischen Widerstandes $\rho_n=0$. Die Bewegung der Flusslinien im Supraleiter verursacht allerdings ein weiterer Term des spezifischen Widerstandes. Auf die Flusslinien wirkt eine Lorenzkraft, die im Gleichgewicht von der Verankerungskraft kompensiert wird. Wegen thermischer Aktivierung können Flusslinien trotzdem aus ihren Verankerungsorten hinaustreten und verursachen somit den Term $\rho_{TAFF} \ll \rho_n$ (gilt bei $I \ll I_c$). Bei $I \leq I_c$ sind Sprünge der Flusslinien in Richtung der Lorenzkraft dominant und es kommt zu einem exponentiellem Anstieg der Spannung. Dieser Anstieg wird bei den Messungen benutzt, um auf einen Wert für I_c zu kommen. Für diesen Zweck wird eine Spannung mit Hilfe eines elektrischen Feldes E_{krit} definiert. Bei dieser Arbeit wurde $E_{krit}= 1 \mu\text{V/cm}$ gewählt. Auf U_c kommt man, indem das Kriterium mit dem Abstand zwischen den Spannungsabgriffen auf der Probe multipliziert wird. Die Abbruchspannung wurde auf ungefähr das Fünffache von U_c gesetzt. Das ist wichtig, weil die Auswertung der Messergebnisse mit einem Fit erfolgte. Daher sind einige Datenpunkte nach Erreichen von U_c notwendig, um einen physikalisch vertretbaren Fit durch die Datenpunkte legen zu können. Die Formel, die für den Fit verwendet wird, lässt sich aus der Beziehung

$$\frac{U}{U_c} = \left(\frac{I}{I_c} \right)^n$$

herleiten. Eine Beispielskurve ($\mu_0 H_a = 0$, $T \approx 78$ K) der SPZ10-Probe ist zur Veranschaulichung der obigen Überlegungen in Abbildung 11 dargestellt.

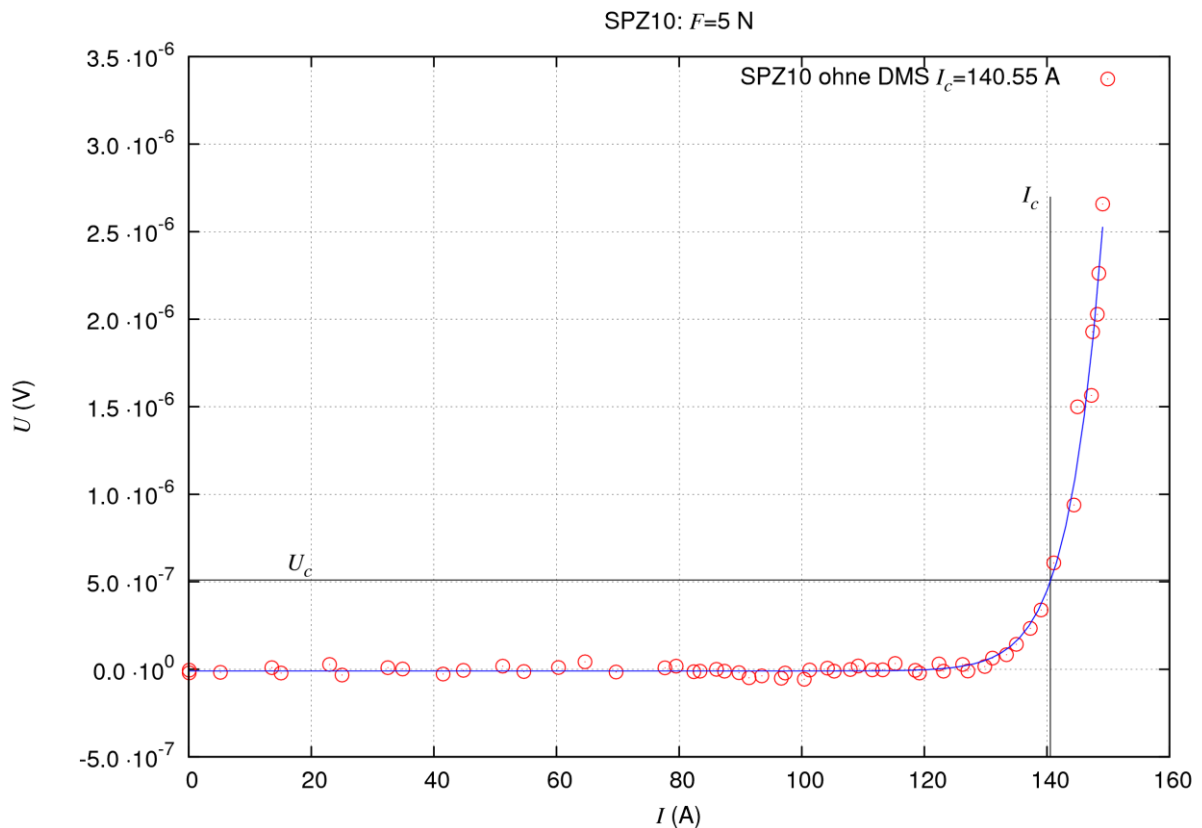


Abbildung 11: SPZ10 ohne Dehmmessstreifen

Aus dem dargestellten Fit ergibt sich ein Wert für $I_c = 140.55$ A, was gut mit dem erwarteten Wert des kritischen Stromes für diese Art von Probe bei der vorgegebenen Temperatur im Selbstfeld zusammenpasst. Der Fehler des Fits, 0.22 %, ist sehr klein und kann vernachlässigt werden. Auf dieser Art und Weise wurden sämtliche gemessene $U(I)$ Kurven ausgewertet und somit I_c bestimmt.

3.2.2 Anisotropie von I_c in externen Magnetfeldern

Eine spezifische Charakteristik von Hochtemperatursupraleitern ist die Anisotropie des kritischen Stroms in externen Magnetfeldern. Das bedeutet, dass I_c der Probe mit deren Ausrichtung zum externen Magnetfeld stark variiert. Abbildung 12 soll diese Unterschiede qualitativ veranschaulichen.

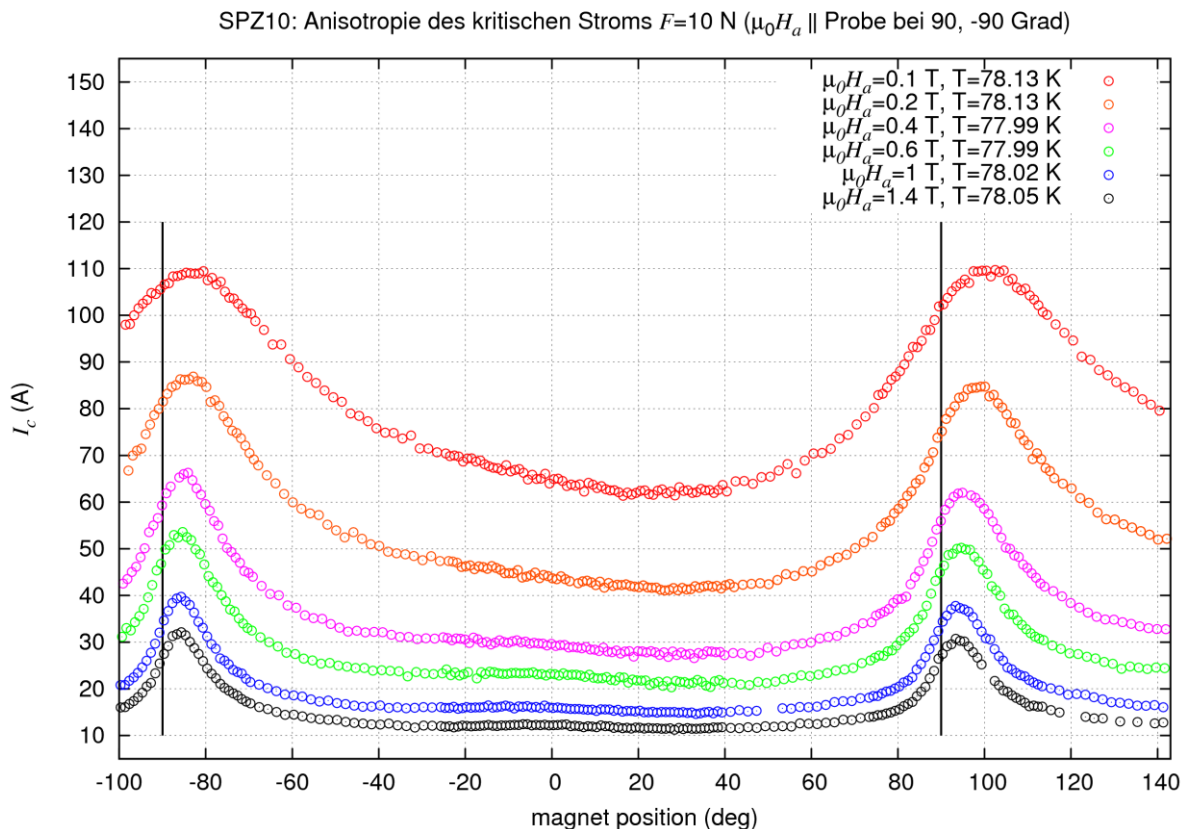


Abbildung 12: Anisotropie des kritischen Stromes

In der Abbildung sind die Werte des kritischen Stromes I_c bei unterschiedlichen Ausrichtungen zum externen Magnetfeld zu sehen. Die Temperaturunterschiede kommen durch unterschiedliche Stickstofftemperaturen sowie Druckunterschiede im Stickstoffdewar während der Messung zustande. Dieser Effekt wird später etwas genauer analysiert. Jedoch ist der stärkste und interessanteste Effekt die Variation von I_c mit der Ausrichtung zum Feld. Die Ursache für die zwei Maxima ist die intrinsische Verankerung der Flusslinien zwischen den ab -Ebenen. Auf der Abbildung sind die Maxima nicht wie erwartet bei 90° und -90° , sondern ändern ihre Position in Abhängigkeit von dem angelegten externen Magnetfeld. Dieses Verhalten lässt sich mit vorhandenen Y_2O_3 Ausscheidungen erklären, die als zusätzliche Verankerungszentren fungieren.

Der Winkelbereich der Messungen betrug 243 Grad. Die Anfangsposition wurde so gewählt, dass beide *ab*-Peaks gemessen werden konnten. Die Schrittweite der Drehung des Magneten wurde auf 1 Grad in den Bereichen der *ab*-Peaks und des *c*-Peaks, sonst auf 2 Grad gestellt. Die Messungen sind sehr zeitaufwendig, bei einem Feld und Zug dauert eine Messung in etwa zwei Stunden. Die ausgewählten Felder und Züge für SPZ10 sind in Tabelle 3 dargestellt. Mit einem Haken sind die durchgeführten Messungen markiert, mit einem X diejenigen, die wegen des Ablösens des DMS nicht durchgeführt werden konnten.

Damit eine Abschätzung der Neigung der *ab*-Ebenen im Supraleiter zur Probenebene gemacht werden kann, müssen die Position bekannt sein, an der das externe Magnetfeld parallel zur Probe ist. Diese Positionen wurden mit Hilfe der im Probenhalter parallel zur Probe eingebauten Hallsonde analog zu dem in 2.2.4 beschriebenen Vorgang bestimmt und befanden sich bei 90 und -90 Grad.

$\mu_0 H_a$ (T) \ σ (MPa)	0.1	0.2	0.4	0.6	1	1.4
25	✓	✓	✓	✓	✓	✓
100	✓	✓	✓	✓	✓	✓
200	✓	✓	✓	✓	✓	✓
300	✓	✓	✓	✓	✓	✓
400	✓	✓	✓	✓	✓	✓
500	✓	✓	✓	✓	✓	✓
600	✓	✓	✓	✓	✓	✓
700	✓	✓	x	x	x	x

Tabelle 3: Durchgeführte Anisotropiemessungen an SPZ10

Wie bereits im vorigen Unterkapitel erklärt wurde, fanden die Messungen an mehreren Tagen statt. Daher variiert auch die Stickstofftemperatur. Deshalb wird die Temperatur bei jeder Auswertung angegeben. Der genaue Ablauf der Messungen und deren Auswertungen wird in den nächsten Absätzen näher beschrieben.

Die Anisotropiemessungen wurden mit Zugmessungen kombiniert. Nachdem ein axialer Zug angelegt wurde, sind die Anisotropiemessungen für sämtliche Magnetfelder durchgeführt worden.

Bei den Messungen hatte der Magnet nicht immer die gleiche Anfangsposition. Um sicherzustellen, dass die angegebenen Positionen nach den Auswertungen miteinander übereinstimmen, wurden die Hallsondensignale von allen Messungen verglichen. Wie bereits in 2.2.4 erläutert wurde, liefert die Hallsonde ein Nullsignal falls das externe Magnetfeld parallel zu ihr ist. Bei jeder Messung wurde das Hallsignal mitgemessen. Die Messsignale wurden dann so verschoben, dass die Nullsignale bei der gleichen Position auftreten. Die Größe des Winkels, um den jedes einzelne Messsignal verschoben wurde, wurde notiert und als „Offset“-Winkel für die entsprechende Messung verwendet. Somit wurde sichergestellt, dass jeder angegebene Winkel der gleichen Ausrichtung zum externen Magnetfeld entspricht. Ein Vergleich zwischen den Daten vor dem Anpassen und nach dem Anpassen ist in Abbildung 13 sichtbar. Die Offsetwinkel φ' sind für jedes Feld angegeben.

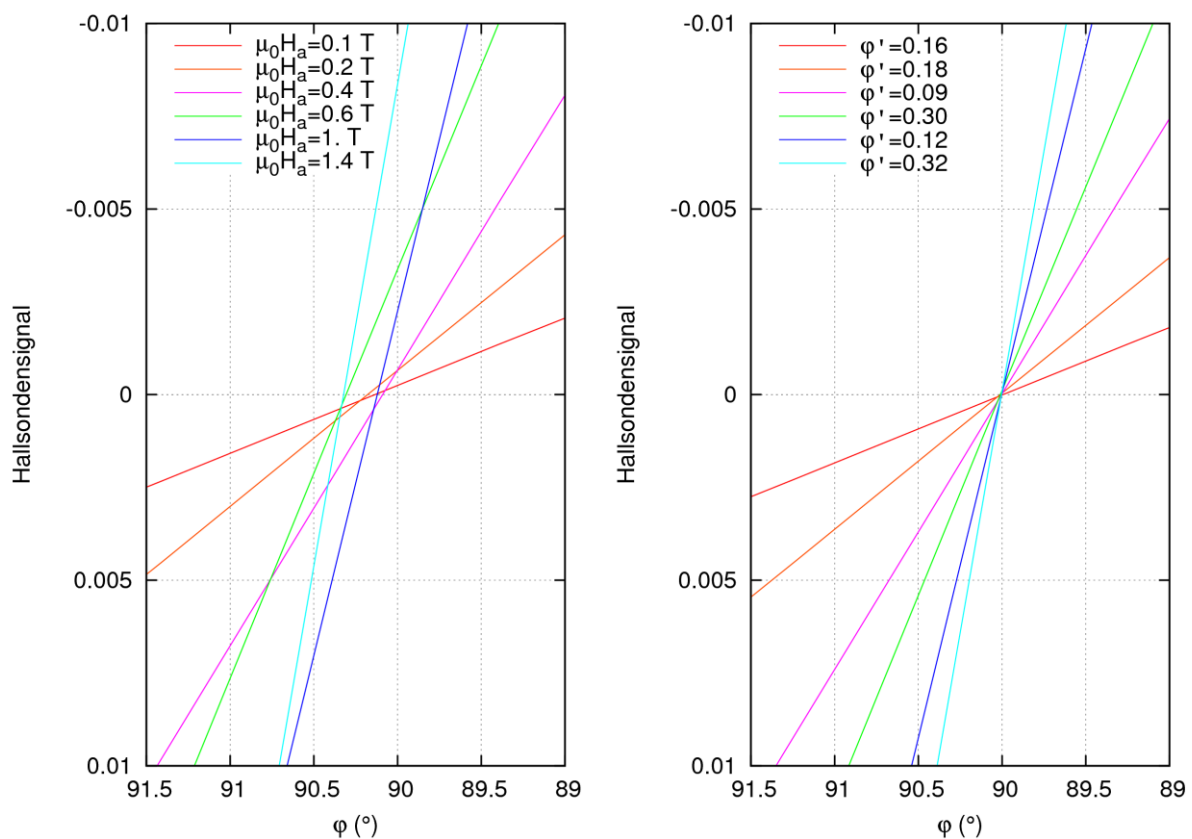


Abbildung 13: Links: Signal vor dem Anpassen des Winkels, rechts: nach dem Anpassen

3.2.3 Spannungs-Dehnungs-Charakteristik und Irreversibilitätszug

Wie bereits erwähnt wurden in Summe **zwei Proben der Firma Superpower** im Zugversuchsmessplatz untersucht. Diese haben die Kurzbezeichnungen **SPZ8 und SPZ10**. Mit jeder dieser Probe wurden unterschiedliche Messungen durchgeführt, deren Ergebnisse in den weiteren Unterkapiteln präsentiert und erläutert werden.

Als erstes wurde ein Dehnmessstreifen auf die Probe geklebt. Es wurden Dehnmessstreifen der Firma Tokyo Sokki Kekujo Co., Ltd bei den Messungen verwendet. Der Nennwiderstand eines DMS ist als $350 \pm 1.5 \Omega$ angegeben. Die Ausdehnung der Probe wird über die Ausdehnung des DMS und die entsprechende Änderung von deren elektrischem Widerstand gemessen. Um auf eine relative Längenänderung zu kommen, wird ein Referenzdehnmessstreifen auf eine Probe aus derselben Charge angeklebt. Die beiden DMS und ein Drehpotentiometer werden in einer Wheatstone'sche Brücke geschaltet. Die Brücke wird mit Strom von der Motorsteuerung versorgt ($U_{ver} = \text{const.} \approx 10 \text{ V}$). Diese Brücke wird dann abgeglichen ($U_{br} = 0$). Solange keine Längenunterschiede zwischen den beiden DMS auftreten, bleibt die Brückenspannung U_{br} Null. Falls einer der beiden DMS gedehnt, beziehungsweise gestaucht wird, kann diese Längenänderung über die Änderung der Brückenspannung gemessen werden. Das Rauschen des Messsignals verursacht einen geringen relativen Fehler des Messergebnisses

$$\delta\left(\frac{\Delta L}{L}\right) \approx 0.02\%$$

Die DMS wurden mit einem Zweikomponenten-Epoxidklebstoff auf der Probe befestigt, der laut Hersteller für tiefe Temperaturen geeignet ist.

Wie bereits erwähnt, werden die supraleitenden Proben im Rahmen dieser Diplomarbeit gezogen und die Änderungen ihrer Eigenschaften in Folge dieses angewandten Zuges untersucht. Einerseits ist die Variation des kritischen Stromes von Interesse, andererseits wird auch die Änderung des Zusammenhangs zwischen Spannung und Dehnung der Probe untersucht. Die Grundlage einer solchen Untersuchung ist die Erstellung eines Spannungs-Dehnungs-Diagramms mit Hilfe der gemessenen angewandten Kraft.

Für die eigentliche Messung wurde die Kraft, die auf die Probe gesetzt wird, schrittweise in 5 N-Schritten erhöht. Nach der Messung von I_c bei jeder neuen Kraft, wurde die ursprüngliche „Nullkraft“ wieder eingestellt und wieder I_c gemessen. Damit aus einer Kraft ein Zug errechnet werden kann, ist die Fläche der Probe nötig. Diese Fläche ergibt sich aus der Dicke $d=0.1$ mm und der Breite $b = 4$ mm und beträgt $A= 4 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2$. Aus der Grundbeziehung für einen Druck, bzw. Zug

$$p = \frac{F}{A}$$

ergibt sich der Umrechnungsfaktor von der Kraft zum Zug für die vorliegenden Proben als 2.5 MPa/N. In sämtlichen Abbildungen wird der Zug in MPa angegeben.

Eine interessante Größe, die bei Hochtemperatursupraleiterbändern eine bedeutende Rolle spielt, ist der so genannte Irreversibilitätszug σ_{irr} . Mit diesem Zug wird der Punkt bezeichnet, ab dem bei Entlasten der Probe gilt:

$$I_{c0}^{irr} < 0.98 \cdot I_{c0},$$

wobei mit I_{c0} der kritische Strom im unbelasteten Zustand bezeichnet wird. Dieser Punkt ist für technologische Anwendungen interessant, weil sich Leitungen oft unter axialem Zug befinden. Daher ist eine ausführliche Charakteristik der gängigen, kommerziell erhältlichen Hochtemperatursupraleiterbänder sowohl mit der Bestimmung von I_c als auch mit der Bestimmung von σ_{irr} verbunden.

Die in diesem Unterkapitel beschriebenen Grundlagen sollten die durchgeführten Experimente, deren Grundideen, Ziele und Ergebnisse verständlich machen. Im nächsten Unterkapitel werden Ergebnisse aus begleitenden Messungen an den einzelnen Proben vorgestellt und ausführlich diskutiert.

3.2.4 Temperatur- und Kraftänderungen während der Messungen

Während der Messungen an SPZ8 wurden zwei wichtige Effekte beobachtet. Erstens wurde festgestellt, dass die Temperatur während der Messung langsam abnimmt und zweitens, dass die Kraft ebenso abnimmt. Beide Effekte sind auf die Auswirkung der Menge des flüssigen Stickstoffs im Dewar zurückzuführen und werden in diesem Unterkapitel qualitativ erklärt und danach quantifiziert.

Die Temperatur, die gemessen wird, ist vom Druck abhängig. Der mit flüssigem Stickstoff gefüllte Dewar stellt eine Drucksäule dar. Wenn der Dewar voll ist, ist auch der Druck an der Probe, bzw. am Temperatursensor am größten. Mit fortschreitender Zeit dampft der Stickstoff ab, bis es nötig wird, den Dewar nachzufüllen. Dieses Abdampfen verursacht eine Reduktion des Drucks, bzw. eine Absenkung des flüssigen Stickstoffs. Abbildung 14 zeigt die Abhängigkeit der Temperatur von der Zeit.

Die Temperatur nimmt langsam ab, bis eine Nachfüllung nötig wird, zum Beispiel bei $t \approx 1700$ s, dann erfolgt eine Erhöhung der Temperatur nach der Nachfüllung. Quantitativ nimmt die Temperatur in der näheren Umgebung der Probe während der Messung um circa 0.09 K ab.

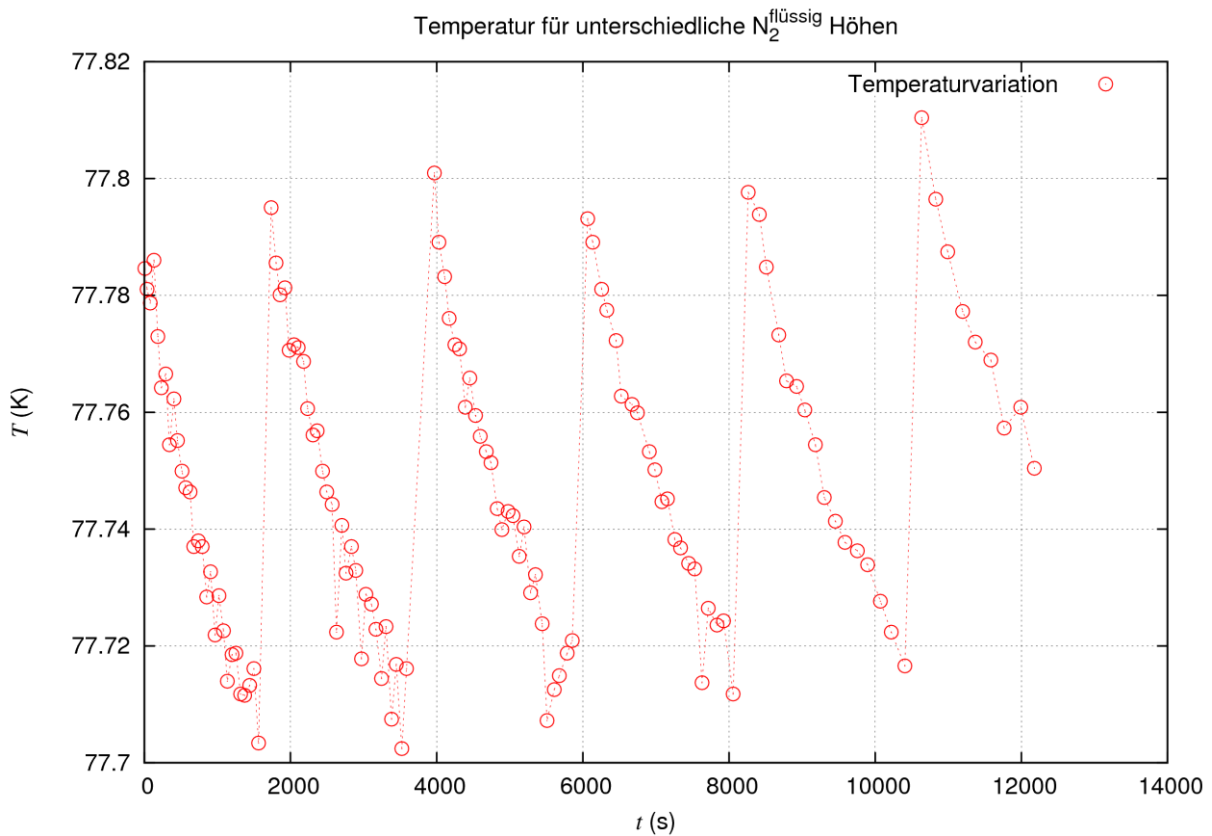


Abbildung 14: Temperaturverlauf mit fortschreitender Zeit

Der Schweredruck kann für Flüssigkeiten bestimmt werden über

$$p = p_0 + \rho \cdot g \cdot h,$$

wobei p_0 der Luftdruck, ρ die Dichte der Flüssigkeit, g die Erdbeschleunigung und h die Höhe der Flüssigkeit sind. Mit $\rho = 807 \text{ kg/m}^3$, $g = 9.81 \text{ m/s}^2$, $h \approx 32 \text{ cm}$ und $p_0 \approx 99.33 \text{ kPa}$ ¹⁰ ergibt sich $p \approx 101,86 \text{ kPa}$ bei vollem Dewar. Durch Interpolation der tabellarischen Werte für $p^1 (T_N=78.059)=110 \text{ kPa}$ und $p^2(T_N = 77.659 \text{ K})=105 \text{ kPa}$ ¹¹ (angenommen es wurde reiner Stickstoff verwendet) ergibt sich für $T=77.8 \text{ K}$

$$p_{\text{int}} = p^2 + (p^1 - p^2) \cdot \left| \frac{77.8 - 77.659}{78.059 - 77.659} \right| \approx 106.76 \text{ kPa}$$

Dieses Ergebnis weicht stark vom berechneten p -Wert ab, wobei $T(p) \approx 77.4 \text{ K}$ entsprechen würde für reinen N_2 . Die Ursache für diese Diskrepanz ist die Sauerstoffverunreinigung, die höhere Temperaturen bei niedrigeren Drücken

¹⁰ <http://www.wien.gv.at/statistik/lebensraum/rtf/luftsonne.rtf>

¹¹ Ekin J W: „Experimental Techniques for low-temperature measurements“, S. 549

verursacht. Diese Sauerstoffverunreinigung war nicht immer gleich. Die Unterschiede resultieren in einer Variation der Stickstofftemperatur von Messung zu Messung. Diese Variation wird bei den Anisotropiemessungen von großer Bedeutung, da diese an mehreren Tagen durchgeführt werden.

Das unterschiedliche Niveau des flüssigen Stickstoffs im Dewar hat auch zufolge, dass die Stromzuleitungen, an denen der Probenhalter befestigt ist, eine mit der Zeit variierende Temperatur hat. Die Stromzuleitungen sind aus Messing. Dieses Material hat einen Ausdehnungskoeffizient $\alpha \approx 12 (10^{-6} \text{K}^{-1})$ ¹² bei 77 K. Das bedeutet, dass sich Messing bei fallender Temperatur zusammenzieht bzw. mit steigender Temperatur ausdehnt. Am Beginn der Messungen sind die Stromzuleitungen komplett bis zum Dewarrand vom flüssigen Stickstoff umgeben. Mit der Zeit wird der Stickstoff im Dewar weniger und ein immer größerer Teil der Zugstange wird wärmer und dehnt sich entsprechend aus. Dieser Effekt verursacht eine Kraft, die der an der Probe angelegten Kraft entgegen wirkt. Eine graphische Darstellung des Effekts ist in Abbildung 15 vorhanden.

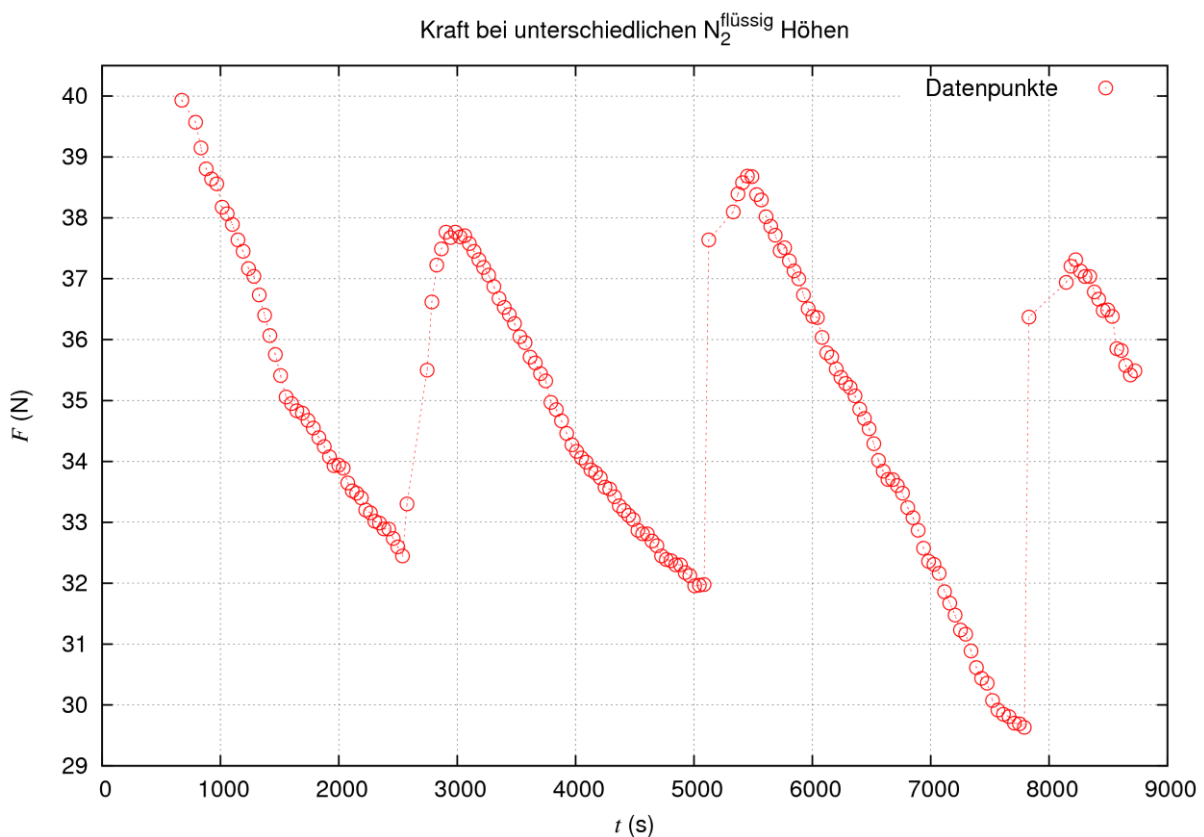


Abbildung 15: Kraftvariation mit fortschreitender Zeit

¹² Ekin J W: „Experimental Techniques for low-temperature measurements“, S. 572

Die Kraft, die an der Probe tatsächlich angelegt ist, nimmt ab, bis der Dewar wieder nachgeföhlt wird. Bei Nachfüllen erfolgt eine Kraftzunahme, wie auch in der Abbildung bei $t \approx 2500$ s, 5100 s, 7850 s ersichtlich ist. Die unterschiedlichen Werte der angelegten Kraft gleich nach dem Abkühlen lassen sich dadurch erklären, dass das Niveau des flüssigen Stickstoffs nach jedem Nachfüllen unterschiedlich ist. Das Füllen des flüssigen Stickstoffs erfolgte händisch.

Die Amplitude der Kraftänderung ist $\Delta F \approx 9.5$ N.

Die zwei beschriebenen Effekte sind für die Experimente nicht erwünscht. Die Temperaturänderungen führen zu unterschiedlichen Werten von I_c , was vor allem bei den Anisotropiemessungen an SPZ10 eine Rolle spielte.

Die Kraftvariationen werden vor allem bei höheren Kräften von großer Bedeutung, da I_c sehr stark von σ für $\sigma \approx \sigma_{irr}$ abhängt. Die Abnahme der Kraft kann durch Nachregeln während der Messungen kompensiert werden: Falls die gemessene Kraft von der ursprünglich für die jeweilige Messung angegebenen Kraft um einen bestimmten Betrag abweicht, wird die Differenz durch Aufrufen der Kraftsetzroutine kompensiert. Allerdings ist bei einem solchen Vorgang wichtig, die Kraft unmittelbar vor dem Füllen um mindestens 9.5 N zurückzusetzen, damit diese nicht durch das thermisch bedingte Zusammenziehen von der Zugstange überschritten wird.

3.3 Ergebnisse

3.3.1 Kritischer Strom in Abhängigkeit vom angelegten Zug

Zuerst wird die Probe SPZ8 in Betracht gezogen. Diese Probe sollte nur als erstes Beispiel für die Abhängigkeit des kritischen Stromes vom angewandten axialen Zug dienen, es wurden keine Messungen im Magnetfeld durchgeführt (der Grund wird später erläutert). Eine Spannungs-Dehnungs-Kurve wurde auch gemessen.

Die Ergebnisse für den Verlauf des normierten kritischen Stromes I_c/I_{c0} in Abhängigkeit des axialen Zuges sind in Abbildung 16 graphisch dargestellt. Aus der Abbildung wird ersichtlich, dass nach dem Erreichen von $\sigma=812.5$ MPa und der darauf folgenden Entlastung $I_c/I_{c0} \approx 0.95 < 0.98$ wird. Beim nächsten Schritt, also für $\sigma=825$ MPa wird $I_c/I_{c0} \approx 0.86$, das bedeutet, dass der Supraleiter irreversibel beschädigt worden ist. Mit Hilfe dieser Ergebnisse kann der Irreversibilitätszug für SPZ8 als der letzte Punkt, an dem die Probe noch reversibel ist, abgeschätzt werden:

$$\sigma_{irr} = 800 \text{ MPa}$$

Die Genauigkeit von σ_{irr} ist offensichtlich durch die Schrittweite eingeschränkt. In Wirklichkeit liegt σ_{irr} für diese Probe zwischen 800 und 812.5 MPa.

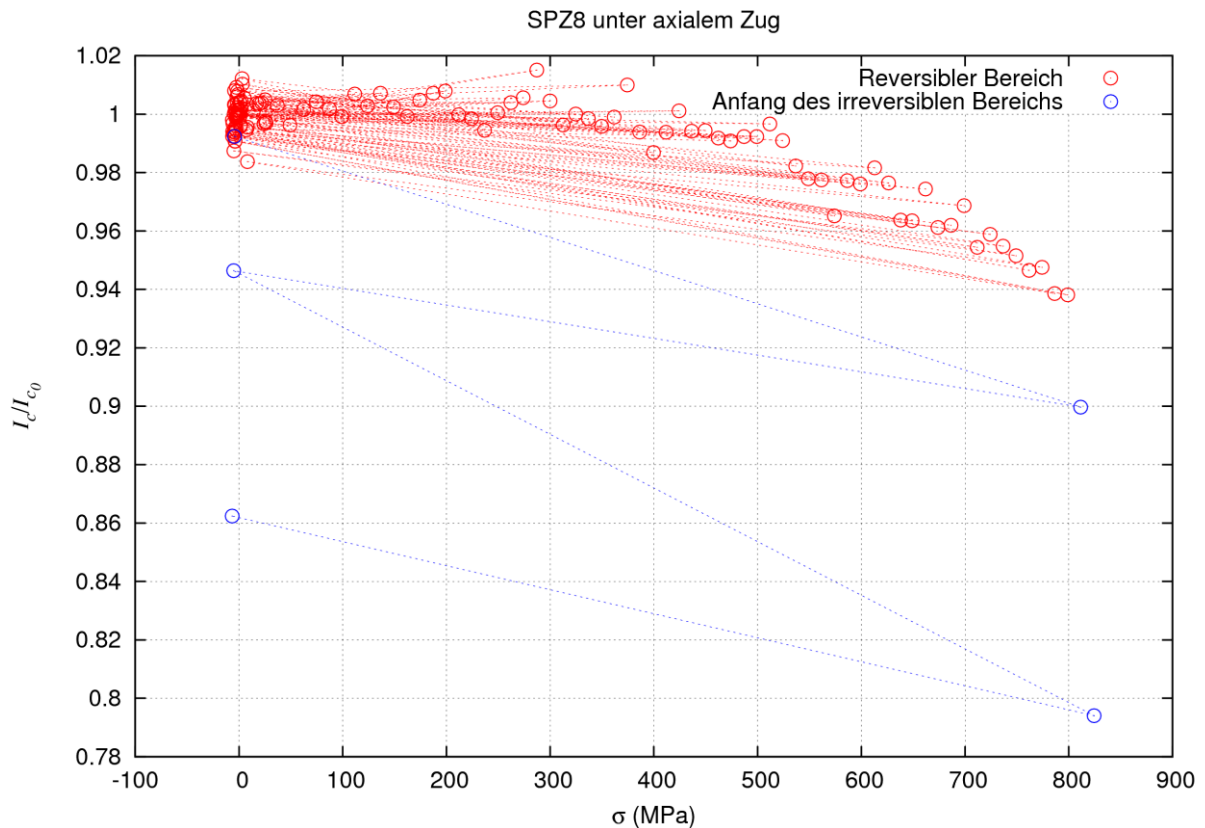


Abbildung 16: Normierter kritischer Strom als Funktion des axialen Zuges, $T = 77.75 \pm 0.05$ K

Die Messergebnisse, ausgenommen die Messungen bei Nullkraft, sind in Abbildung 17 dargestellt.

Zusätzlich wurde eine Potenzfunktion¹³ durch die Daten im reversiblen Bereich gefittet

$$(2) \quad \frac{I_c}{I_{c0}}(\sigma) = 1 - a \cdot \left| \sigma - \sigma_{I_c^{\max}} \right|^b$$

wobei $\sigma_{I_c^{\max}} \approx 200$ MPa den Zug bezeichnet (entspricht $\varepsilon \approx 0.117$ %), bei dem ein Maximum in I_c auftritt und $a \approx 6.5 \cdot 10^{-10}$, $b \approx 2.88$. Als Vergleich werden die Messergebnisse von van der Laan *et al* angegeben: $b \approx 2.2 \pm 0.02$ und $\sigma_{I_c^{\max}} \approx 230$ MPa (nach Umrechnung von $\varepsilon_m \approx 0.13$ %).

¹³ van der Laan D C *et al* *Supercond. Sci. Technol.* **23** (2010) 072001

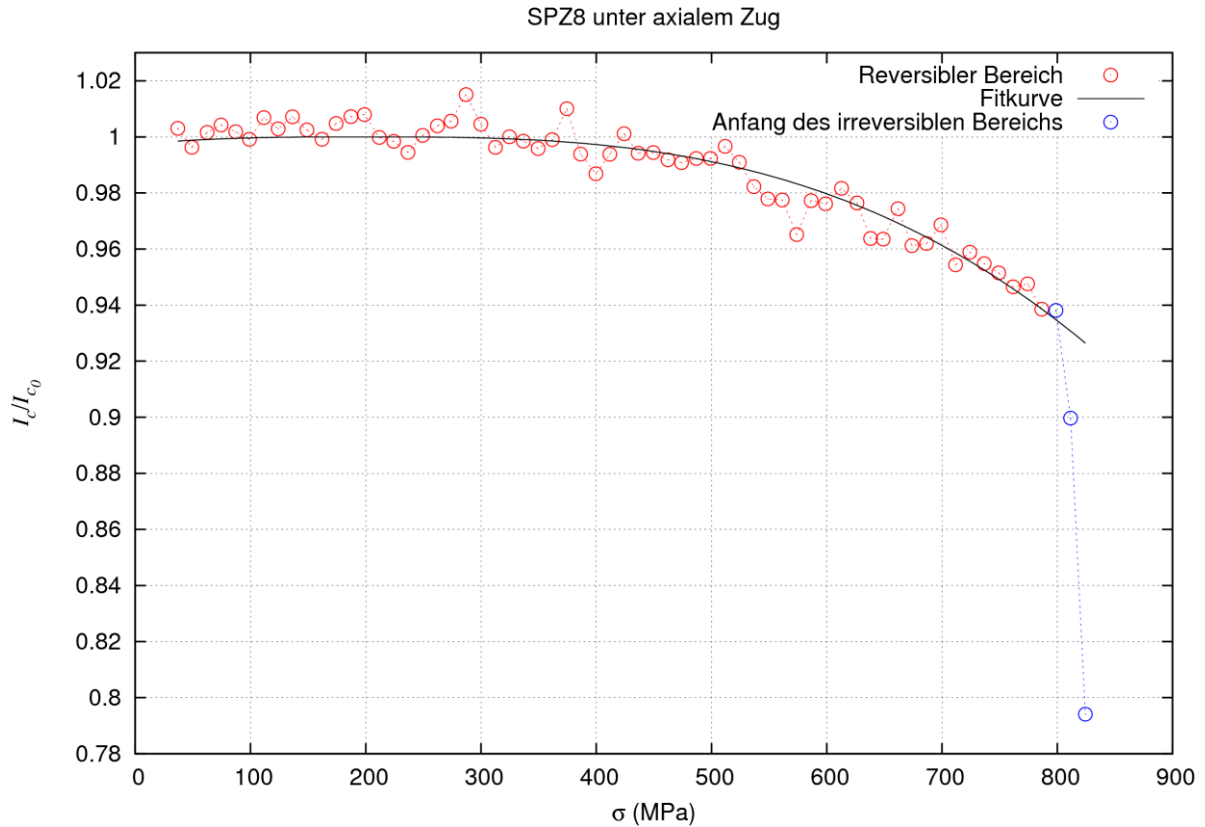


Abbildung 17: $I_c(\sigma)$, $T = 77.75 \pm 0.05$ K

Aus Abbildung 17 können einige interessante Werte abgelesen werden. Diese werden in einer Tabelle zusammengefasst.

$I_c(\sigma_{irr}) / I_{c0}$	0.94
$I_c(0.9 \cdot \sigma_{irr}) / I_{c0}$	0.957

Tabelle 4: Werte für I_c/I_{c0} für Vielfache von σ_{irr}

In der Abbildung sind ein paar gröbere Ausreißer sichtbar. Dies wird auf die Ungenauigkeit der Auswertung, beziehungsweise des Fits zurückgeführt. Als Veranschaulichung soll die Abbildung 18 dienen, die die berechneten n -Werte für die Einzelnen I_c Messungen zeigt. Eine Korrelation zwischen dem Ausreißer I_c/I_{c0} (287.5 MPa) und n (287.5 MPa) > 30 ist ersichtlich, genau so wie bei I_c/I_{c0} (575 MPa) und n (575 MPa).

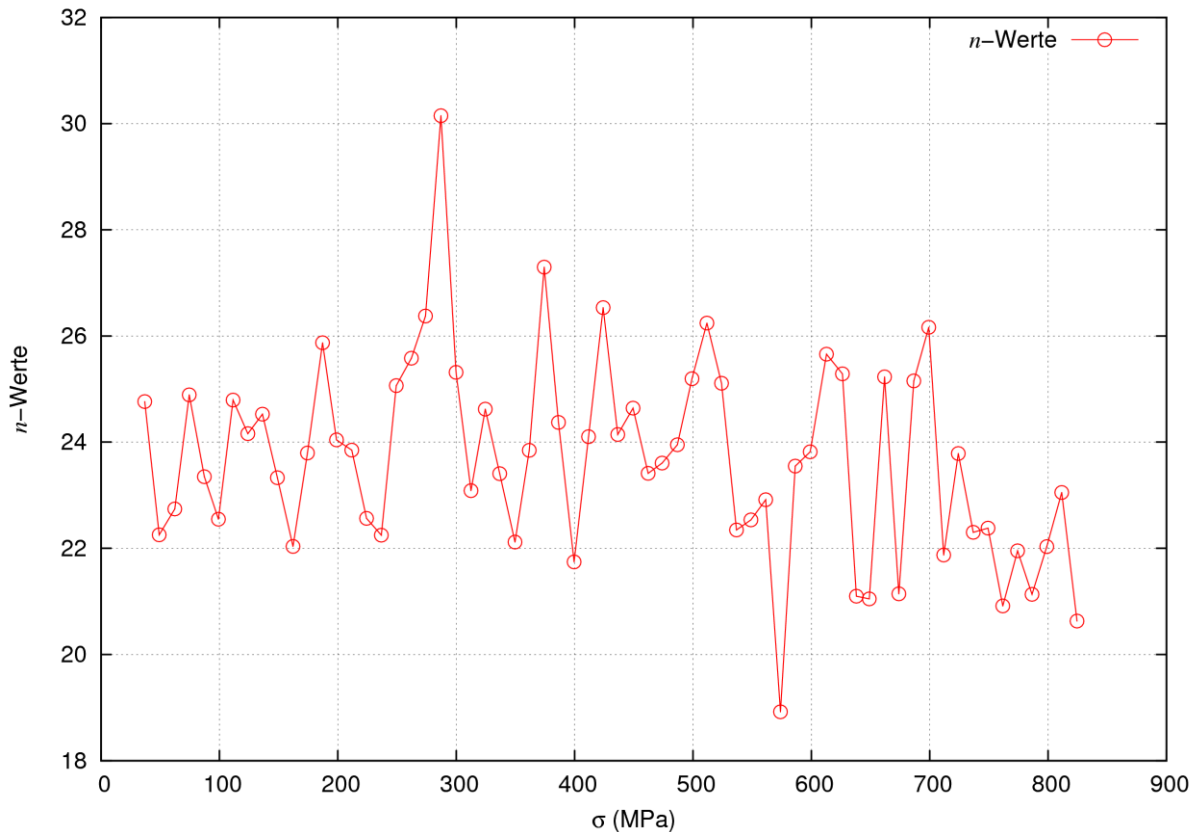


Abbildung 18: n-Werte für SPZ8

Nach dem Abschluss der Messungen an SPZ8 wurde SPZ10 als nächste Probe gewählt. Vor dem Beginn der Messungen wurde die Probe zuerst mittels Magnetoscan auf Defekte kontrolliert, damit ein niedrigeres I_c als erwartet rechtzeitig erkannt werden kann. Dabei wurden keine größeren Defekte festgestellt.

Die Probe wurde anschließend am Elektromagnetmessplatz mittels einer Transportstrommessung im Selbstfeld getestet. Die gleiche Messung wurde nach dem Ankleben des Dehnmessstreifens durchgeführt, um dessen Einfluss auf I_c zu quantifizieren. Die beiden Messungen sind in Abbildung 19 graphisch dargestellt. Es wird ersichtlich, dass eine Änderung von I_c vorliegt. Nach Auswertung ergeben sich $I_c^{o.DMS} = 140.55$ und $I_c^{m.DMS} = 137.46$. Das ist eine Änderung von circa 2.2 %. Eine mögliche Erklärung für diesen Effekt ist die Tatsache, dass der Epoxidklebstoff, mit dem der DMS auf der Probe angeklebt wurde, negative Auswirkung auf die Kühlung der Probe hat und daher eine Abnahme von I_c verursacht. Allerdings entspricht der Betrag von I_c trotz diesem Effekt den Erwartungen für diese Probenart. Deswegen wurde entschieden, für die SPZ10 auch die zeitaufwendigen Anisotropiemessungen des kritischen Stromes im Elektromagneten durchzuführen.

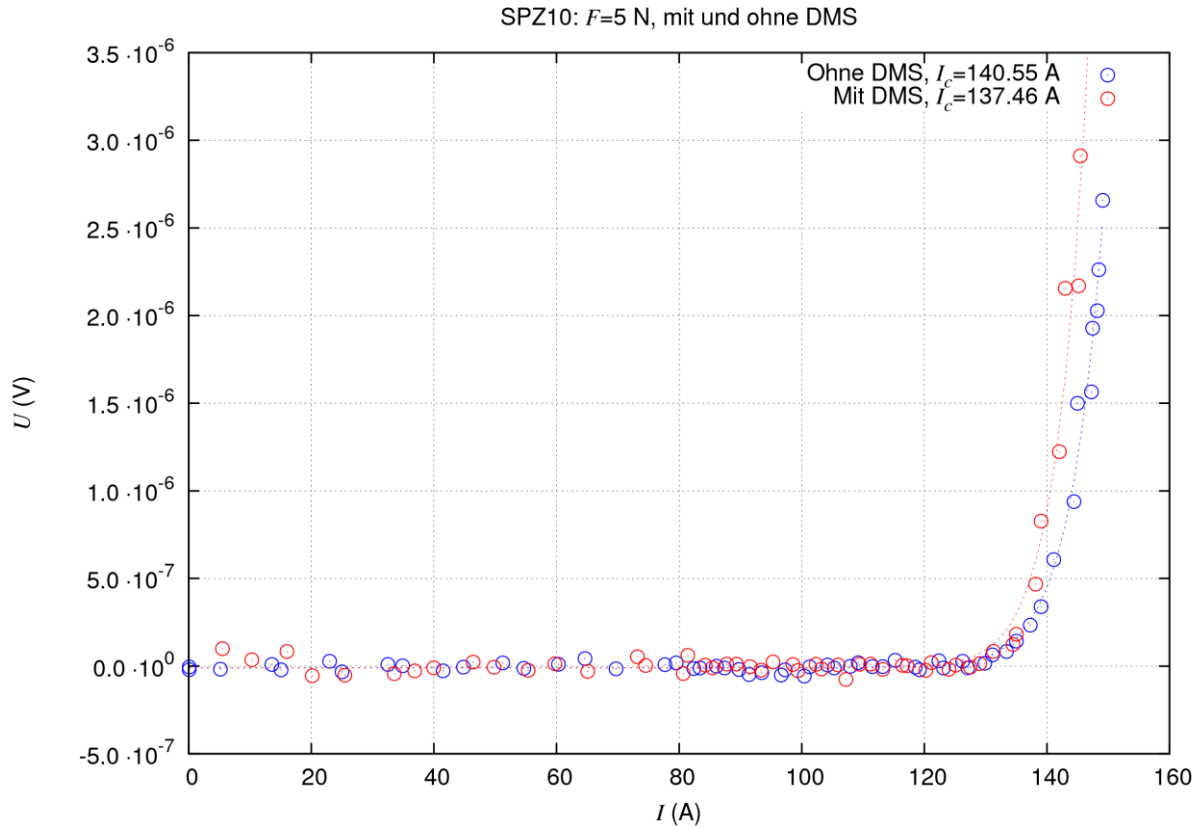


Abbildung 19: SPZ10 mit und ohne Dehnmessstreifen, $T = 77.9$ K

In den folgenden Unterkapiteln werden die einzelnen Experimente und die dazugehörigen Auswertungen näher beschrieben. Es muss bereits am Anfang erwähnt werden, dass infolge einer unbeabsichtigten Stromüberbelastung bei $\sigma \approx 700$ MPa die Probe irreversibel beschädigt wurde und daher alle Messungen nur bis zu diesem Zug durchgeführt wurden.

Die Probe SPZ10 wurde, so wie SPZ8, bei unterschiedlichen axialen Zügen untersucht. Die Ergebnisse für $I_c/I_{c0}(\sigma)$ sind in Abbildung 20 dargestellt. Der Irreversibilitätszug wurde für die SPZ10 aus den obigen Gründen nicht erreicht.

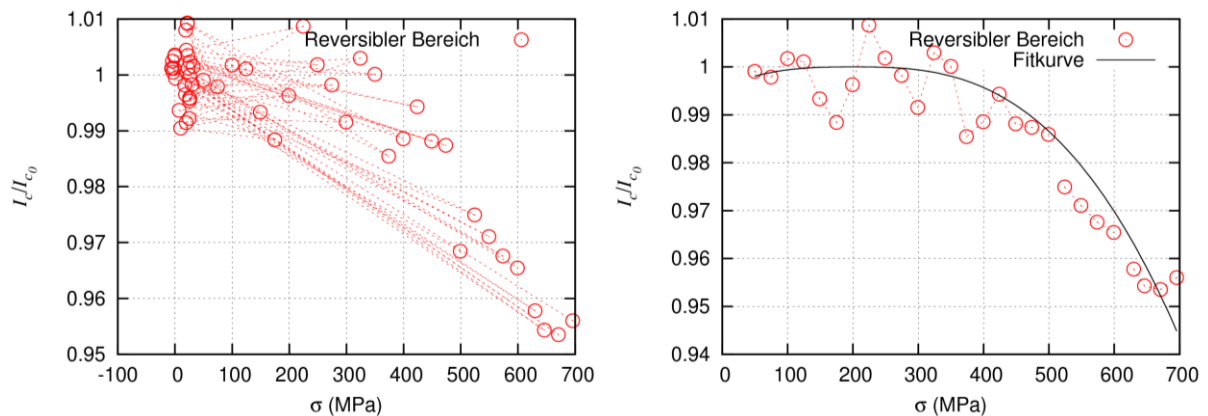


Abbildung 20: $I_c/I_{c0}(\sigma)$ SPZ10, $T = 77,9 \pm 0,85$ K

Die linke Abbildung zeigt die auf I_{c0} normierten kritischen Ströme bei allen σ , in der rechten Abbildung sind nur I_c/I_{c0} ($\sigma \geq 50$ MPa) dargestellt.

Zusätzlich wurde wiederum die Potenzfunktion aus (2) für einen Fit durch die Datenpunkte verwendet. Somit ergaben sich die Größen $\sigma_{I_c}^{max} \approx 199.90$ MPa, bei dem ein Maximum in I_c auftritt, und $a \approx 1.5 \cdot 10^{-9}$, $b \approx 2.81$.

Wiederum wurden die n -Werte (Abbildung 21) aus dem Fit verwendet, um einen Fehler beim Fitten (wie bei SPZ 8) als mögliche Erklärung für die größeren Ausreißer zu argumentieren. Wie aus der Abbildung ersichtlicht wird, gibt es tatsächlich Korrelationen zwischen den größeren Ausreißer bei n und I_c/I_{c0} , zum Beispiel für $\sigma=225, 300$ und 375 MPa.

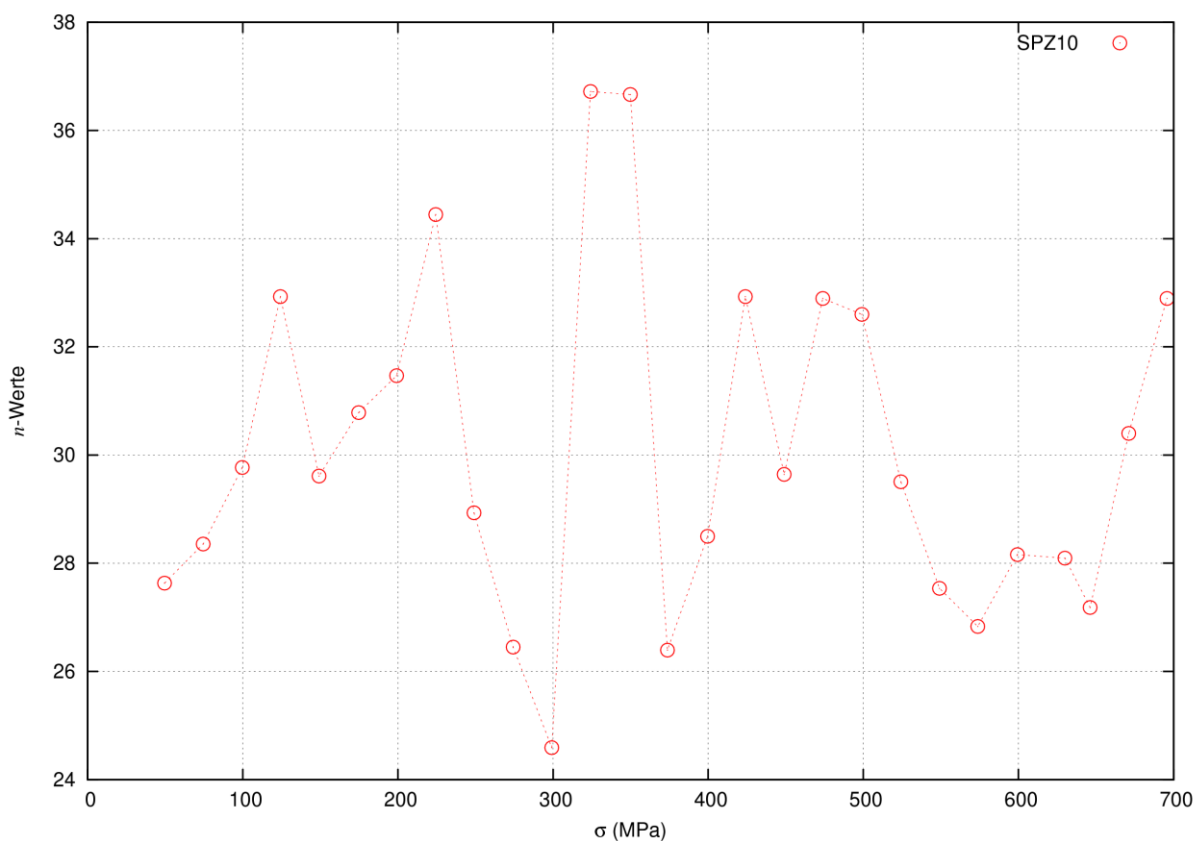


Abbildung 21: n -Werte SPZ10 für $\sigma \geq 50$ MPa

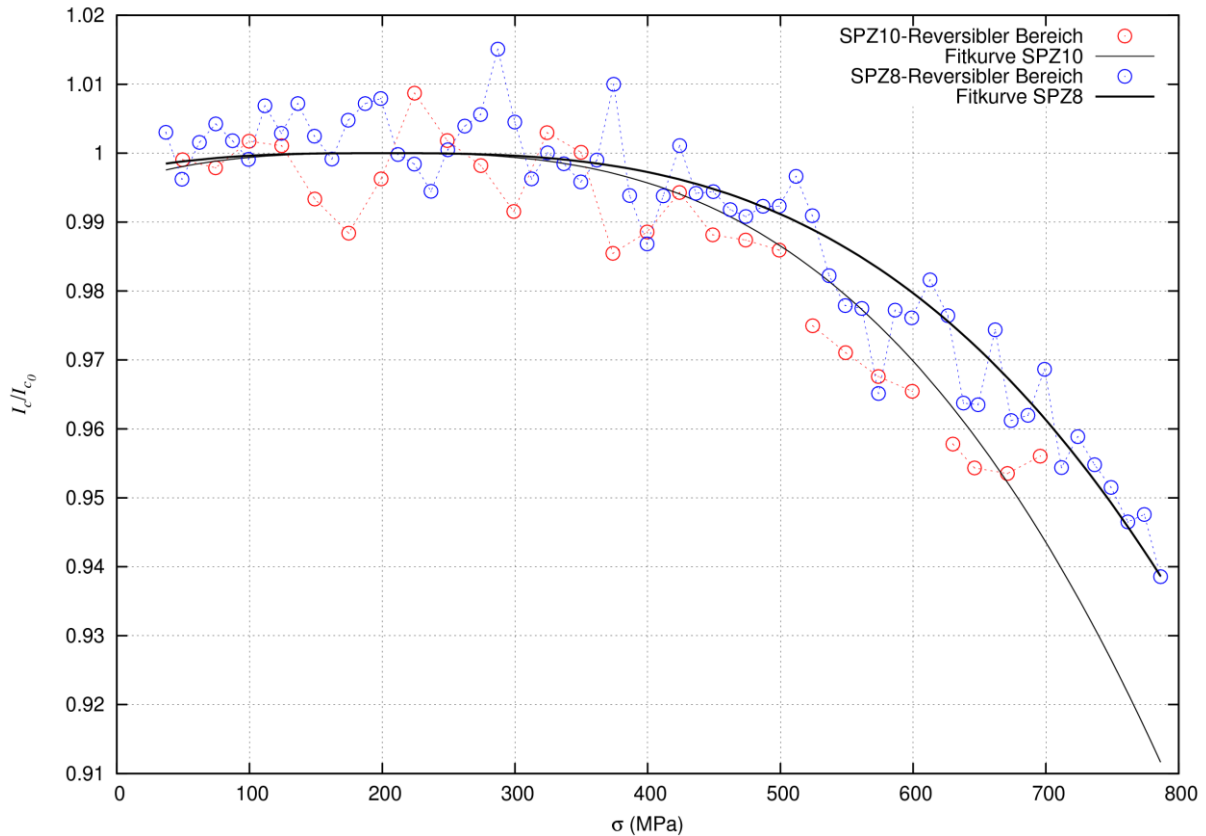


Abbildung 22: Vergleich der $I_d/I_{c0}(\sigma)$ von SPZ8 ($T = 77.75 \pm 0.05$ K) und SPZ10 ($T = 77.9 \pm 0.14$ K)

Die $I_d/I_{c0}(\sigma)$ -Werte von SPZ10 im reversiblen Bereich wurden mit den entsprechenden Werten von SPZ8 verglichen. Die Ergebnisse sind in Abbildung 22 dargestellt. Die Verläufe der zwei Fitfunktionen passen bis zu einem gewissen Zug sehr gut überein. Erst ab $\sigma > 600$ MPa tritt ein deutlicher Unterschied ($> 1\%$) auf, jedoch sind wenige Datenpunkte bei SPZ10 in diesem Bereich, was auch die Genauigkeit des Fits verringert.

Bei SPZ10, im Gegensatz zu SPZ8, wurde kein Spannungs-Dehnungs-Diagramm gemessen. Der Grund dafür war das Ablösen des DMS während der Messungen. Die vermutete Ursache für das Abkleben war die Feuchtigkeit, die sich beim Föhnen auf dem DMS sammelte. Dafür wurden bei SPZ10 Messungen der Anisotropie des kritischen Stromes bei unterschiedlichen angelegten Magnetfeldern $\mu_0 H_a$ und Zügen σ durchgeführt. Die Ergebnisse werden in den folgenden Unterkapiteln dargestellt und erläutert.

3.3.2 Spannungs-Dehnungs-Charakteristik

Zusätzlich zu den Messungen des kritischen Stromes wurde parallel eine Spannungs-Dehnungs-Kurve gemessen. Aus dieser Kurve ist es möglich, den Elastizitätsmodul E der Probe zu bestimmen. Benutzt wurde das Hooke'sche Gesetz:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

Die Abbildung 23 zeigt das gemessene Spannungs-Dehnungs-Diagramm für die SPZ8 Probe.

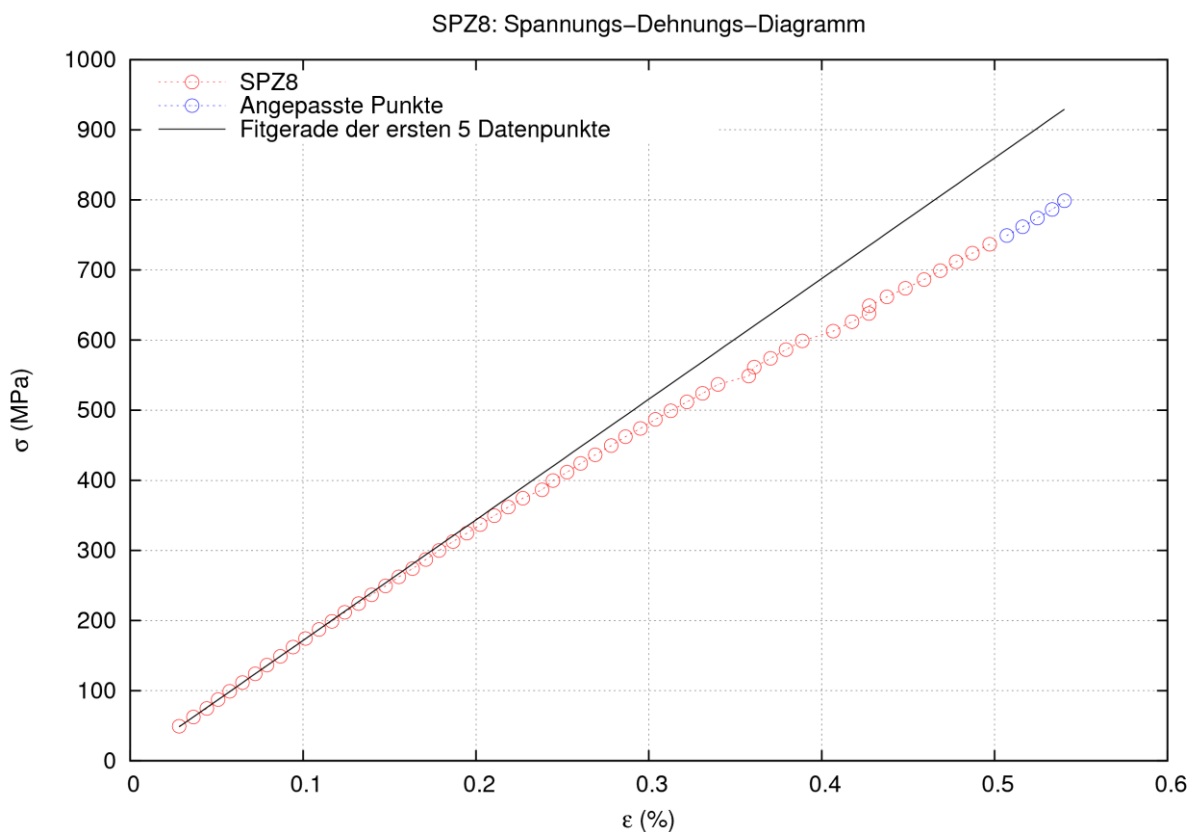


Abbildung 23: Spannungs-Dehnungs-Diagramm, $T = 77.75 \pm 0.05 \text{ K}$

Damit der E -Modul bestimmt werden kann, muss beachtet werden, dass das Hooke'sche Gesetz in dieser Form nur in dem sogenannten elastischen Bereich bis zur Proportionalitätsgrenze gültig ist. Ab der Proportionalitätsgrenze ist der lineare Zusammenhang zwischen Spannung und Dehnung nicht mehr erfüllt. Daher wird bei der Bestimmung vom E -Modul ein linearer Fit nur durch die ersten fünf Datenpunkten durchgeführt.

Der E -Modul ergibt sich aus dem Fit als

$$E = 172 \text{ GPa}$$

Als Vergleich werden die Ergebnisse einer Publikation¹⁴ für die gleiche Probenart verwendet

$$E_{\text{Publ}} = 175 \text{ GPa} .$$

Dieser Wert passt sehr gut mit dem gemessenen Wert für E zusammen.

3.3.3 Anisotropie des kritischen Stromes im externen Magnetfeld

Die Anisotropiemessungen des kritischen Stromes wurden mit SPZ10 gemacht. Als graphisches Beispiel der Auswertung der Daten bei $\sigma=25 \text{ MPa} = \sigma_{\text{init}}$ und $\sigma=500 \text{ MPa}$ wurde Abbildung 24 erstellt. Mit Hilfe dieser Abbildung wurden die ersten qualitativen Aussagen über das Verhalten der SPZ10 unter axialem Zug formuliert. Es wurde ersichtlich, dass die Änderungen in I_c nicht gleich über den ganzen Winkelbereich sind. Bei den ab -Peaks ist eine Abnahme von I_c für alle Felder gemessen worden. Im Gegensatz dazu ist I_c in der Nähe des c -Achsenorientierung bei $\sigma=500 \text{ MPa}$ und $\mu_0 H_a \leq 0.2 \text{ T}$ mindestens gleich groß wie bei σ_{init} und den gleichen Felder.

¹⁴ Clickner C C *et al Cryogenics* **46** (2006) 432-438

SPZ10: $\sigma=25$ MPa (volle Symbole) und $\sigma=500$ MPa (offene Symbole) ($\mu_0 H_a \parallel$ Probe bei 90, -90 Grad)

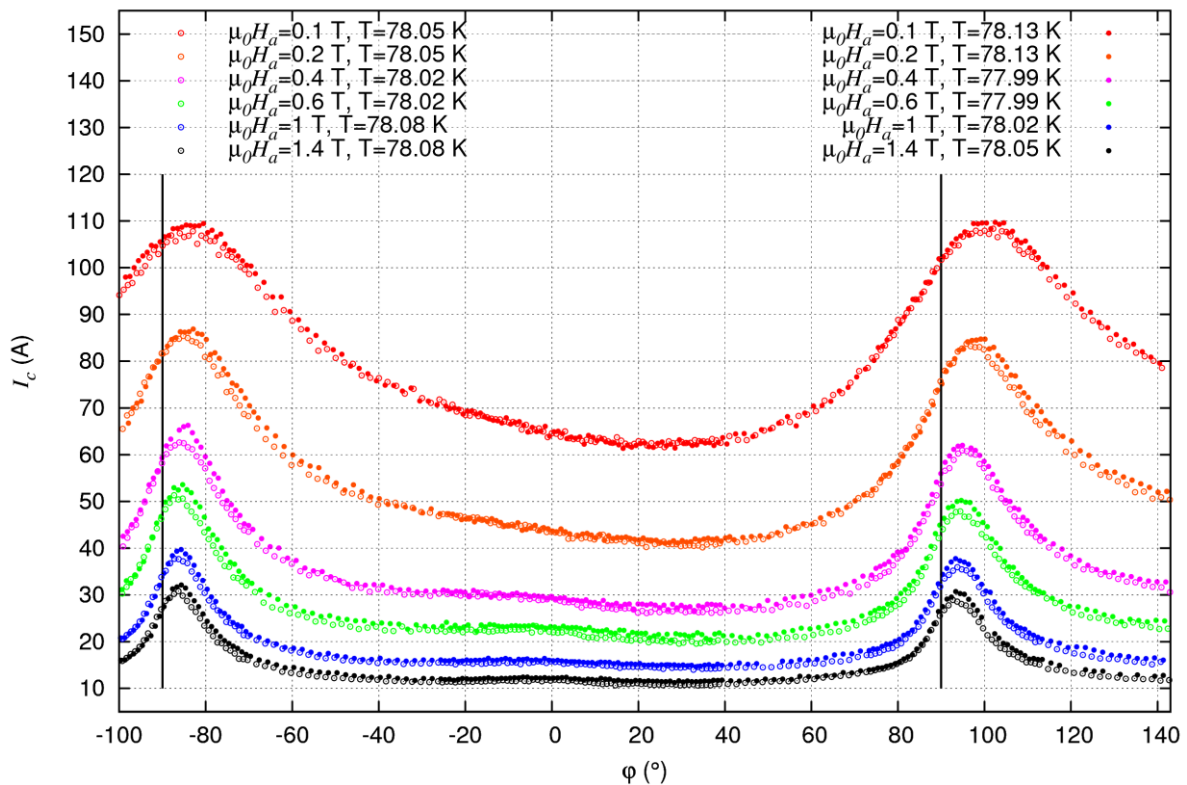


Abbildung 24: I_c als Funktion der Ausrichtung zum externen Magnetfeld

Die Asymmetrie der Anisotropiekurven ist ein bekannter Effekt¹⁵. Eine mögliche Erklärung dafür sind Ausscheidungsstoffe (wie zum Beispiel Y_2O_3), die als Verankerungszentren für die Flusslinien fungieren können. Die Defekte sind zu den ab -Ebenen geneigt. Abbildung 25, die aus einer Publikation¹⁶ entnommen wurde, soll als Beispiel für die Anordnung dieser Defekte dienen. Diese Defekte sind auch für die Winkelverschiebung der beiden Maxima bei steigendem externen Magnetfeld zuständig.

¹⁵ Maiorov B *et al Appl. Phys. Lett.* **86** (2005) 132504

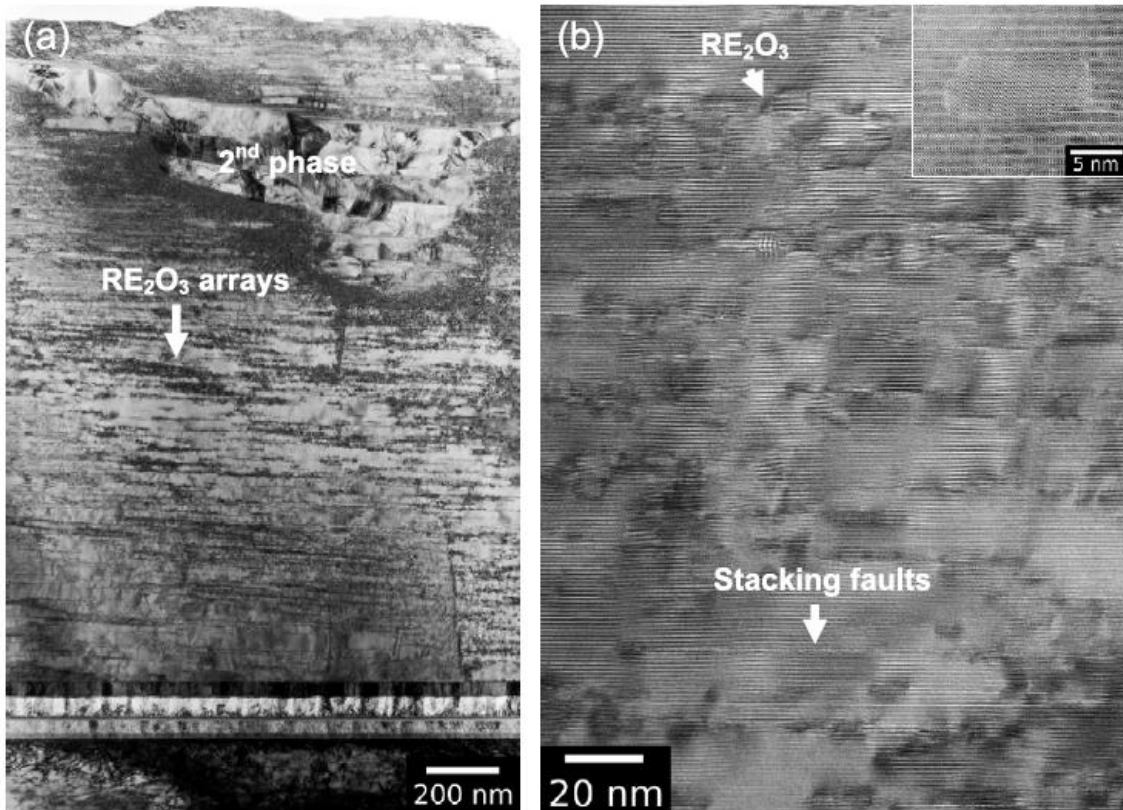


Abbildung 25: TEM Bild, Bildebene $\parallel ab$ -Ebenen von einem SuperPower YBCO-Bandleiter¹⁶

3.3.4 Neigung der ab -Ebenen

Um eine Abschätzung der Neigung der ab -Ebenen zu machen, wurde die Verschiebung der Maxima mit steigendem externen Magnetfeld ausgewertet. Berechnet wurden der Abstand zwischen dem jeweiligen Maximum und der Position $\mu_0 H_a \parallel$ Probe, sowie $I_c^{ab1,2}(\mu_0 H_a, \sigma) / I_c(\mu_0 H_a = 0, \sigma = 25 \text{ MPa})$. I_c^{ab1} entspricht dem Peak bei ca. 90° , I_c^{ab2} dem Peak bei ca. -90° .

In der nächsten Abbildung sind die Abstände $\Delta\phi$ der zwei Maxima von der Position $\mu_0 H_a \parallel$ Probe als Funktion des externen magnetischen Feldes für drei unterschiedliche Züge abgebildet.

¹⁶ Xu A *et al* *Supercond. Sci. Technol.* **23** (2010) 014003

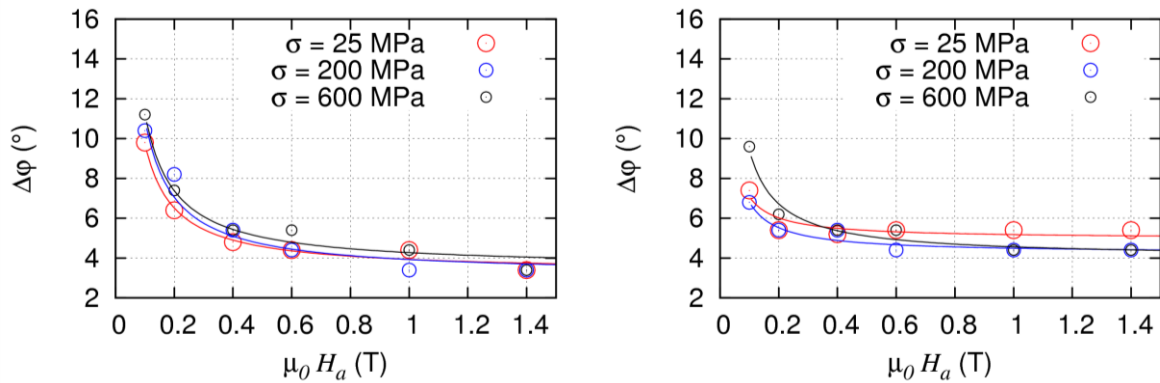


Abbildung 26: Abstand zwischen $\mu_0 H_a \parallel$ Probe und I_c^{ab1} (links), I_c^{ab2} (rechts) in Grad

Damit eine Abschätzung der Neigung der ab -Ebenen gegenüber der Probenebene gemacht werden kann, wurde eine Funktion der Form

$$\Delta\varphi(\mu_0 H_a) = a / \sqrt{\mu_0 H_a} + \Delta\varphi^{ab}$$

für die dargestellten Daten gefittet mit $0 < a < 1$, wobei a von der Defektdichte im Supraleiter abhängt. Die physikalische Erklärung für dieser Fit ist, dass bei sehr hohen externen Feldern $\mu_0 H_a \gg \mu_0 H_{self}$ die intrinsische Verankerung die bestimmende Rolle spielt und der Strom parallel zu den ab -Ebenen fließt. Bei niedrigen Feldern fließt der Strom vermutlich parallel zu den Y_2O_3 Ausscheidungen. Aus diesem Grund ist es möglich, die Neigung der ab -Ebenen als $\Delta\varphi^{ab} = \Delta\varphi(\mu_0 H_a = 1.4 \text{ T})$ anzugeben:

$$\Delta\varphi^{ab} = \sum_i^n \frac{\Delta\varphi_i}{n} \Big|_{\mu_0 H_a = 1.4} \approx 3.86^\circ$$

3.3.5 Normierter kritischer Strom in Abhängigkeit vom externen Magnetfeld

Als Nächstes werden die Auswertungen der Änderung von I_c mit steigenden externen Magnetfeld und Zug dargestellt. Zuerst werden die beiden Maxima in $I_c(\mu_0 H_a, \varphi, \sigma)$ und die Werte von I_c für $\mu_0 H_a \parallel c$ -Achse als Spezialfälle in Betracht gezogen. Die Auswertung erfolgte durch eine Normierung des gemessenen I_c -Wertes auf den Wert von $I_c(\mu_0 H_a = 0, \sigma = 25 \text{ MPa})$. Die Ergebnisse für die beiden Maxima bei unterschiedlichen Zügen ist in Abbildung 27 dargestellt.

Als analytische Funktion für den in der Abbildung dargestellten Fit wurde eine Abhängigkeit des kritischen Stromes von der magnetischen Flussdichte B der Form:

$$\frac{I_c^{ab}(\mu_0 H_a, \sigma)}{I_c(\mu_0 H_a = 0, \sigma = 25)} \propto a \cdot (\mu_0 H_a)^{\alpha}$$

mit $\alpha=0.5$ angenommen, wobei der Koeffizient a von der Dichte der Verankerungszentren im Supraleiter abhängt. Für das erste Maximum ergab sich aus dem Fit $a \approx 0.27$ bzw. für das zweite Maximum $a \approx 0.28$.

Ein weiteres Phänomen, das beobachtet wurde, ist die unterschiedliche Höhe der zwei I_c -Maxima. Eine quantitative Darstellung dieses Unterschieds für die unterschiedlichen externen Felder und axialen Züge ist in Abbildung 28 ersichtlich. Dieser Effekt ist auch aus der Differenz der jeweiligen Fitparameter a abzulesen. Eine mögliche Erklärung für das Auftreten dieser Höhendifferenz sind die zu den ab -Ebenen geneigten Y_2O_3 Ausscheidungen und deren Funktion als zusätzliche, korrelierte Verankerungszentren. Weiters sollte angemerkt werden, dass der magnetische Fluss bei I_c^{ab1} von der Seite des Supraleiters in die Probe eindringt und bei I_c^{ab2} von der Seite des Substrats.

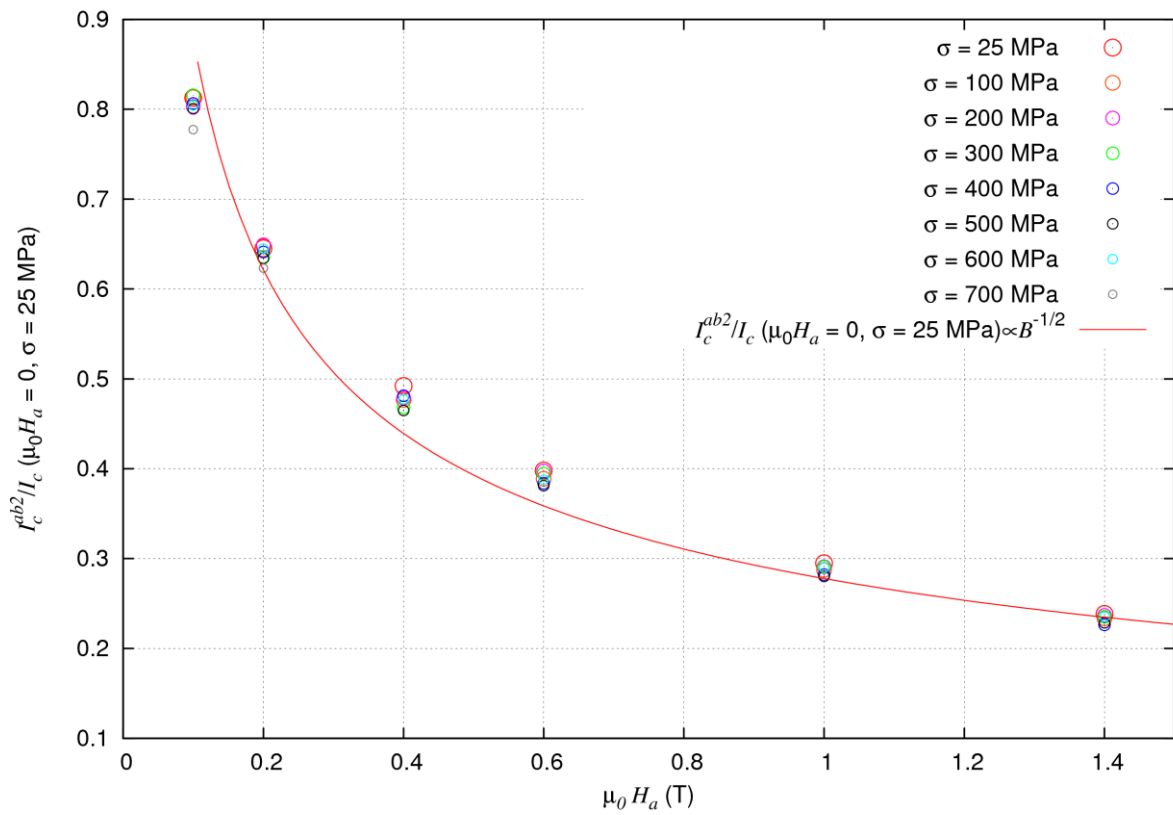
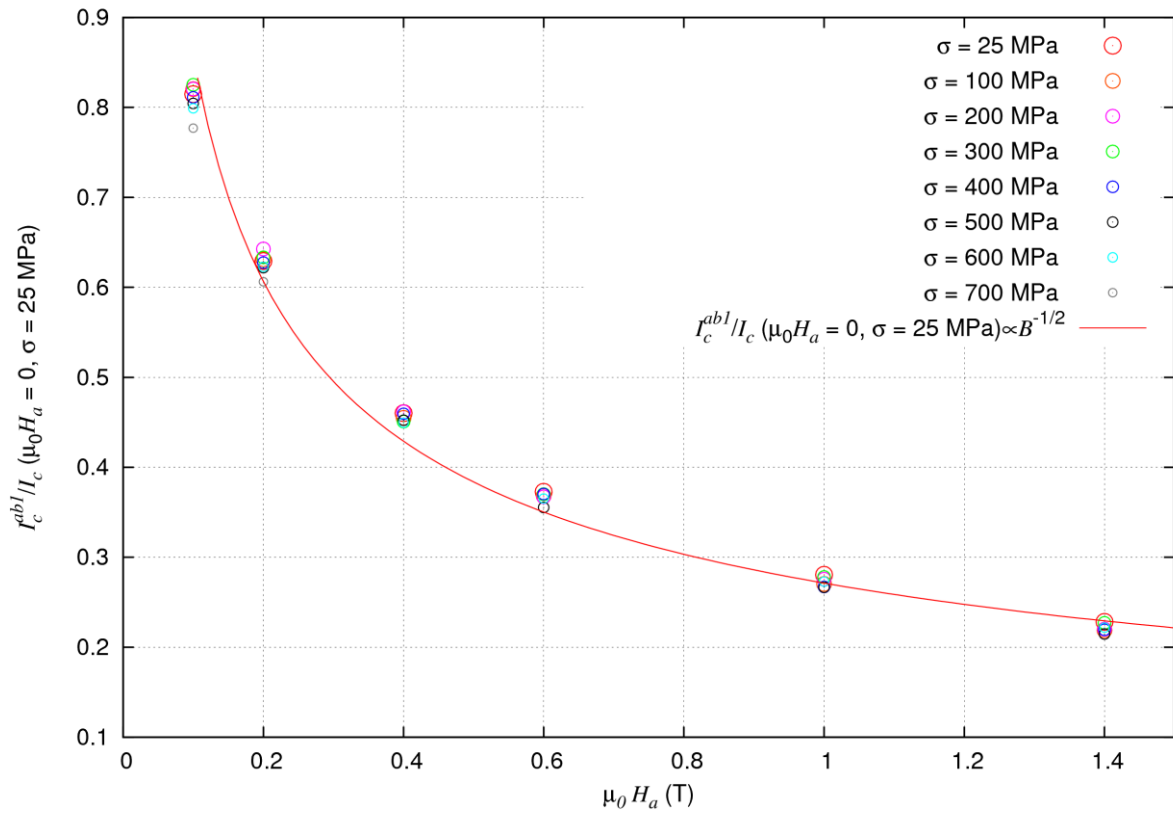


Abbildung 27: Normierte I_c -Werte beim ersten (oben) und zweitem (unten) Maximum

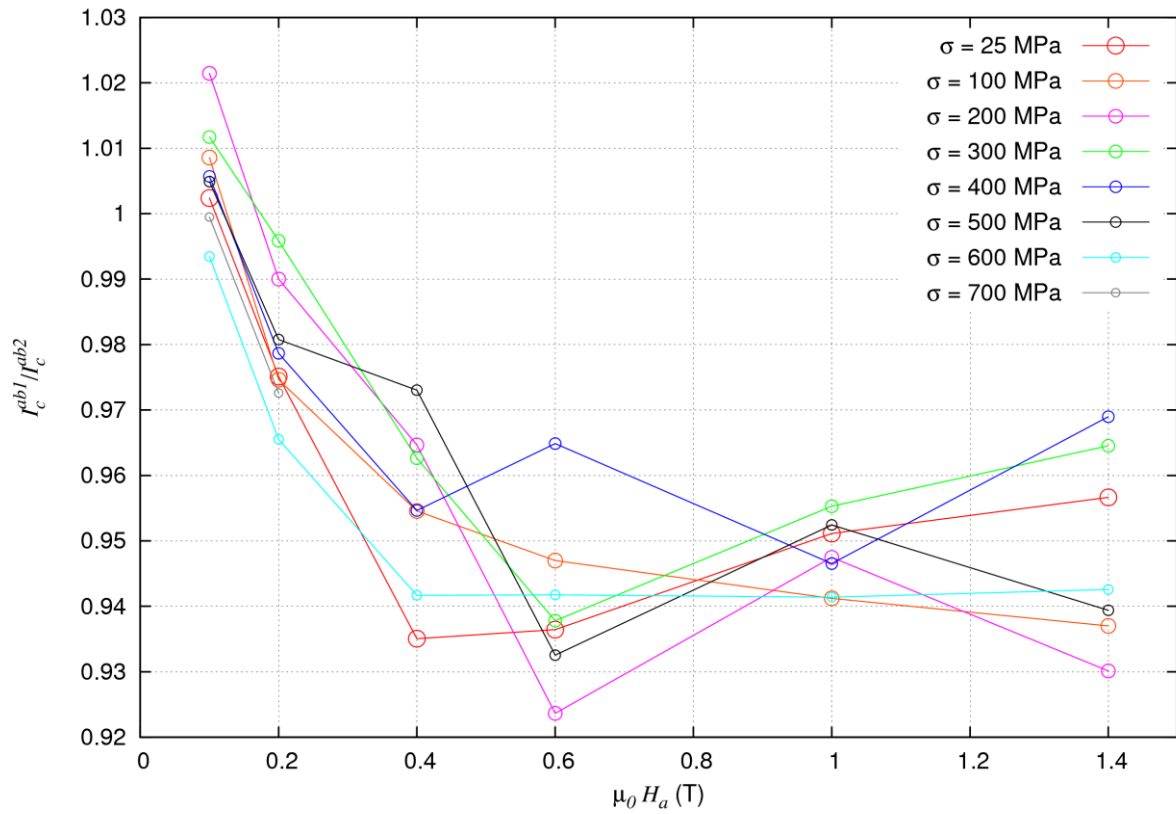


Abbildung 28: Höhendifferenz der zwei I_c -Maxima

Die Auswertung der Position für $\mu_0 H_a \parallel c$ -Achse (entspricht dem vermuteten c -Peak) erfolgte mit einer etwas modifizierten Abhängigkeit ($\alpha = 0.68$) des kritischen Stromes von $\mu_0 H_a$. Die Ergebnisse sind graphisch in den nächsten zwei Abbildungen zusammengefasst und $a \approx 0.11$ für $\mu_0 H_a \parallel c$.

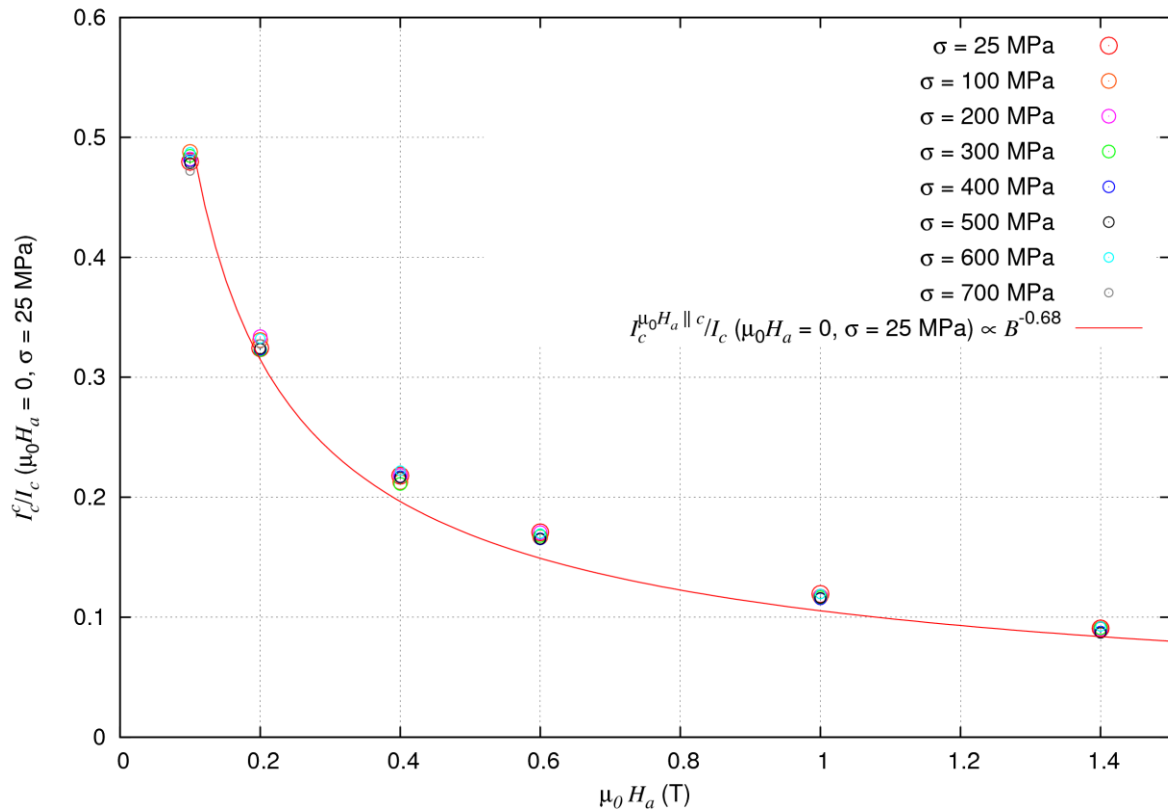


Abbildung 29: Normierte I_c -Werte für $\mu_0 H_a \parallel c$ -Achse

Die bisher dargestellten Auswertungen zeigen die Wirkung des externen Magnetfeldes auf den kritischen Strom bei unterschiedlichen Zügen im Supraleiter bei den beiden Maxima und $\mu_0 H_a \parallel c$. Als nächstes wird die Wirkung des axialen Zuges mit steigendem Magnetfeld auf den ganzen Messbereich im Detail besprochen und ausgewertet.

3.3.6 Auswirkung des axialen Zuges auf den normierten kritischen Strom bei angelegtem externem Magnetfeld

Um jedem Winkel aus dem Messspektrum einen I_c -Wert zuordnen zu können, wurden die ausgewerteten Ergebnisse, wie in der Abbildung 24 dargestellt, als Ausgangspunkt verwendet. Das Ziel war, durch eine Interpolationsfunktion für jeden beliebigen Winkel im vorgegebenen Messbereich einen I_c -Wert pro Zug und Magnetfeld angeben zu können. Die verwendete Funktion ist unter (3) angegeben mit $\varphi \in [\varphi_{mess.}^i : \varphi_{mess.}^{i+1}]$, wobei $\varphi_{mess.}^i, \varphi_{mess.}^{i+1}$ zwei nacheinander folgende Messpunkte sind.

$$(3) \quad I_c^1(\varphi) = I_c(\varphi_{mess.}^i) + \left[(I_c(\varphi_{mess.}^{i+1}) - I_c(\varphi_{mess.}^i)) \cdot \left| \frac{\varphi_{mess.}^i - \varphi}{\varphi_{mess.}^i - \varphi_{mess.}^{i+1}} \right| \right]$$

Somit werden die I_c Werte für alle Winkel in 0.01 Grad Schritten für die entsprechende Messung berechnet. Die obige Formel hat den Nachteil, dass die Ausreißer bei den Messungen eine wesentliche Rolle bei der Bestimmung der ihnen nahe liegenden Werte spielen. Um die Auswirkung der Ausreißer auf die Endergebnisse der Auswertungen zu reduzieren, wurde ein weiterer Term in der Interpolationsfunktion hinzugefügt:

$$(4) \quad I_c^2(\varphi) = I_c(\varphi_{mess.}^{i-1}) + \left[(I_c(\varphi_{mess.}^{i+2}) - I_c(\varphi_{mess.}^{i-1})) \cdot \left| \frac{\varphi_{mess.}^{i-1} - \varphi}{\varphi_{mess.}^{i-1} - \varphi_{mess.}^{i+2}} \right| \right]$$

Dieser zweite Term ist zulässig, da die Datenpunkte dicht genug liegen (1 Grad Auflösung bei den *ab*-Peaks und in der Nähe des vermuteten *c*-Peaks). Das Interpolationsprogramm berechnet nun den I_c -Wert für einen bestimmten Winkel als Mittelwert der beiden Interpolationsterme. Abbildung 30 zeigt den Vergleich zwischen den direkten Auswertungen und den interpolierten I_c -Werten. Das Inset zeigt, dass die Verwendung der Interpolation die Rolle der Ausreißer vermindert hat.

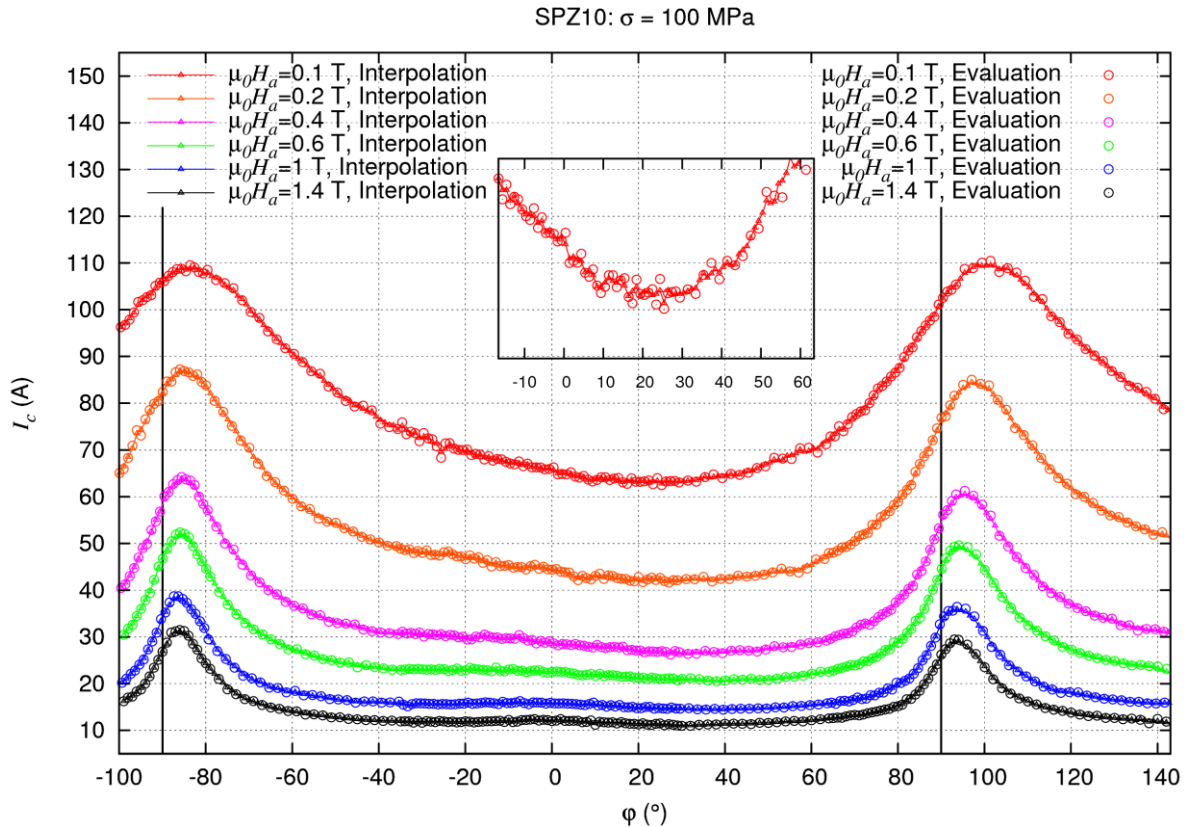


Abbildung 30: Vergleich zwischen den ausgewerteten und interpolierten I_c Werte für $\sigma=100 \text{ MPa}$

Alle ausgewertete Messergebnissen bis 600 MPa wurden mit Hilfe der obigen Formeln in 0.01° Schritten im gesamten Messbereich interpoliert. Jeder $I_c(\mu_0 H_a, \sigma)$ wurde auf das entsprechende $I_c(\mu_0 H_a, \sigma = 25 \text{ Pa})$ normiert. Die normierten Daten wurden für alle Magnetfelder graphisch dargestellt. Die Graphiken für die Felder zwischen 0.1 T und 1.4 T sind in Abbildung 31 bis Abbildung 36 sichtbar, wobei das obere Bild die absoluten Werte zeigt und das untere die normierten Werte. Die schwarzen vertikalen Linien entsprechen den Stellen, an denen das externe Magnetfeld zu der Probe parallel ausgerichtet war. Es wurden zusätzlich drei Bereiche definiert: $[-100^\circ:-60]$, $[80^\circ:120^\circ]$ und $[-20^\circ:20^\circ]$, die ungefähr den beiden ab -Peaks und dem c -Peak entsprechen. Durch jeden Bereich wurde eine Konstante gefittet. Zusätzlich wurde eine Konstante durch den gesamten Bereich gefittet als Mittelwert des normierten kritischen Stromes für das bestimmte Feld und den bestimmten Zug.

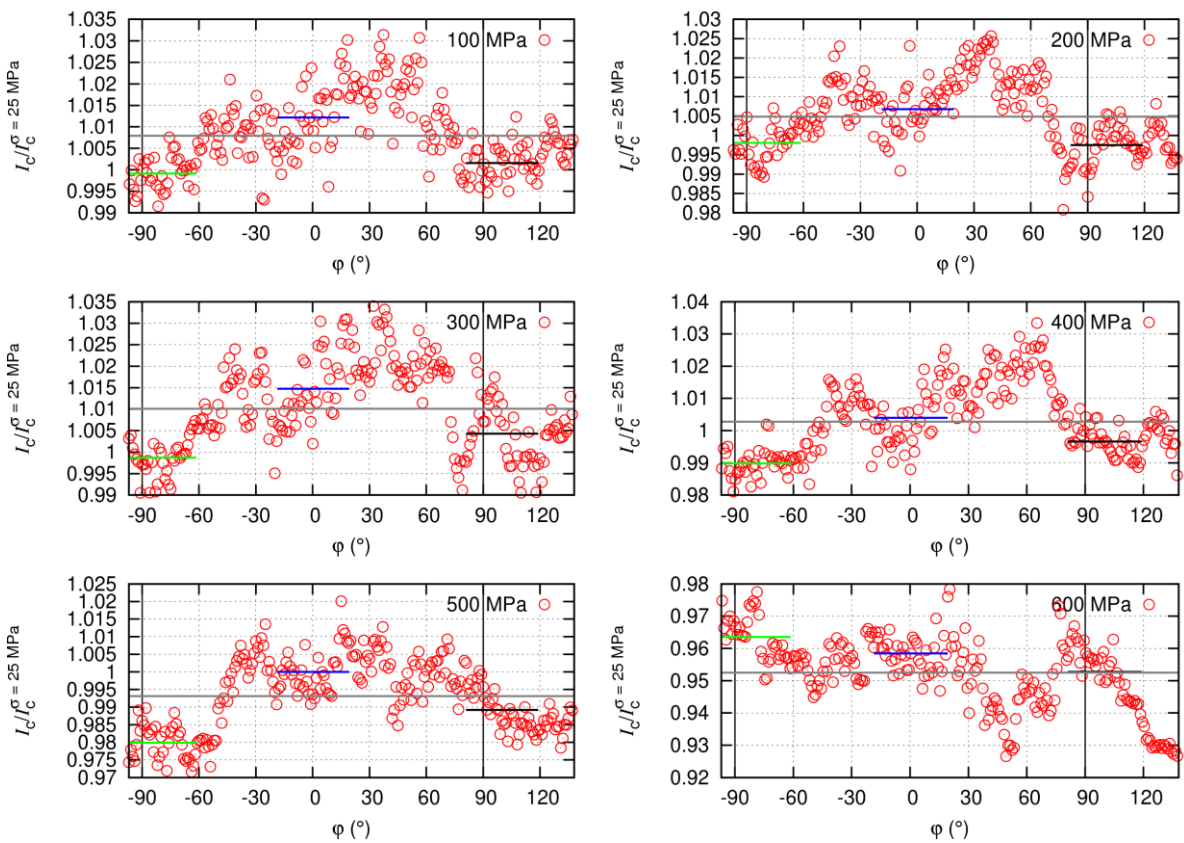
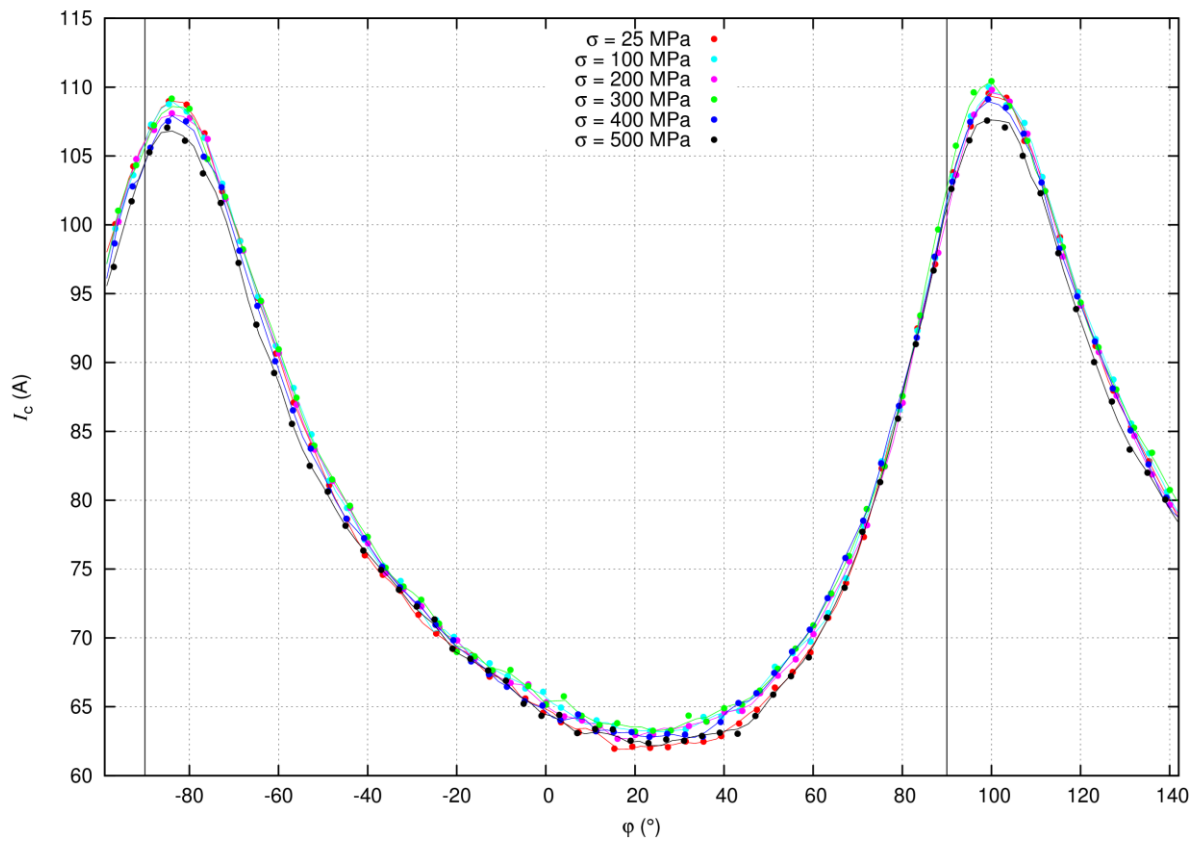


Abbildung 31: $\mu_0 H_a = 0.1 \text{ T}$

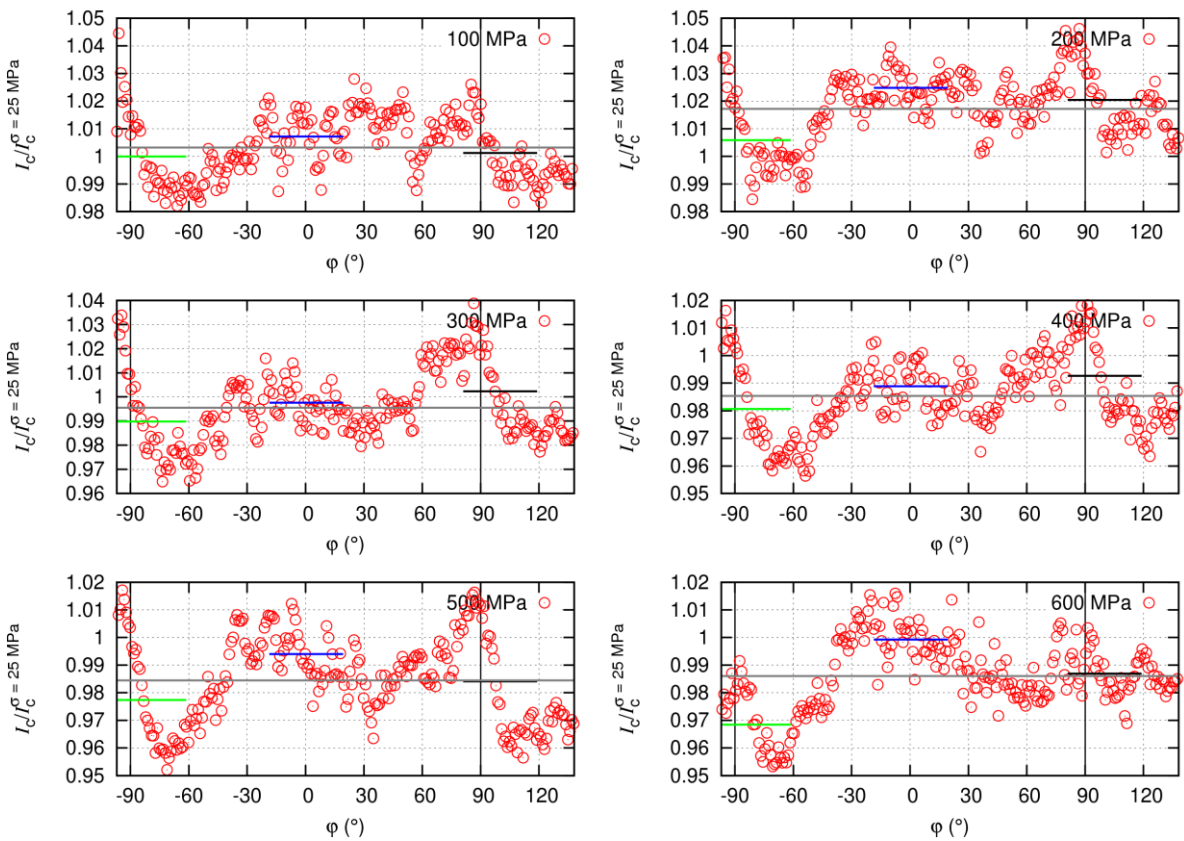
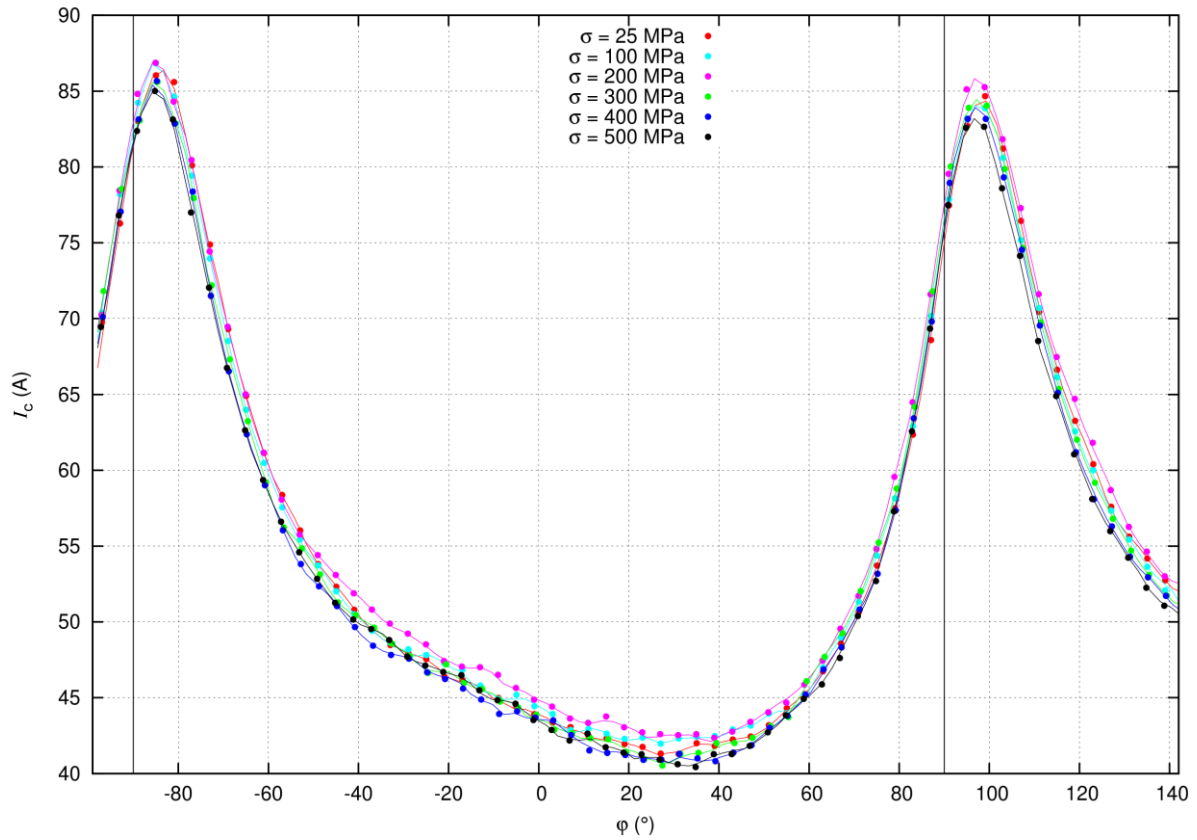


Abbildung 32: $\mu_0 H_a = 0.2 \text{ T}$

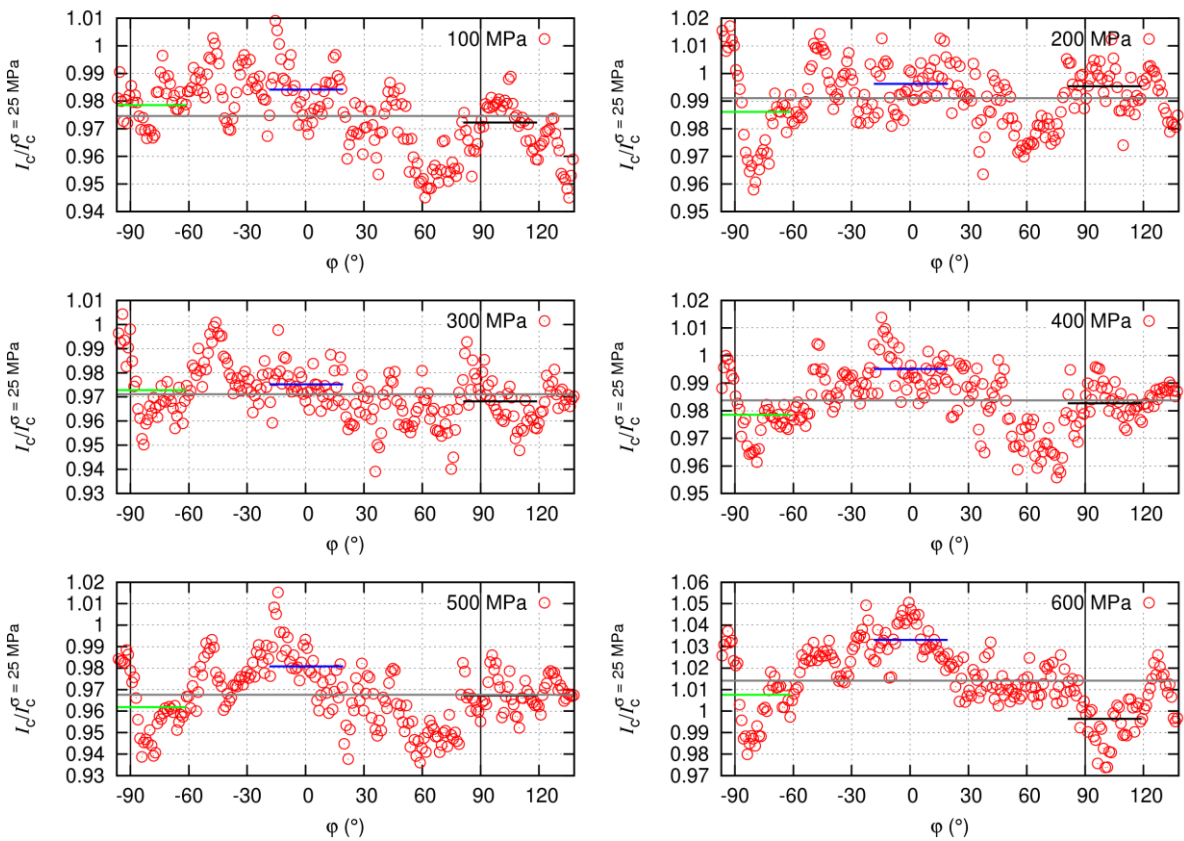
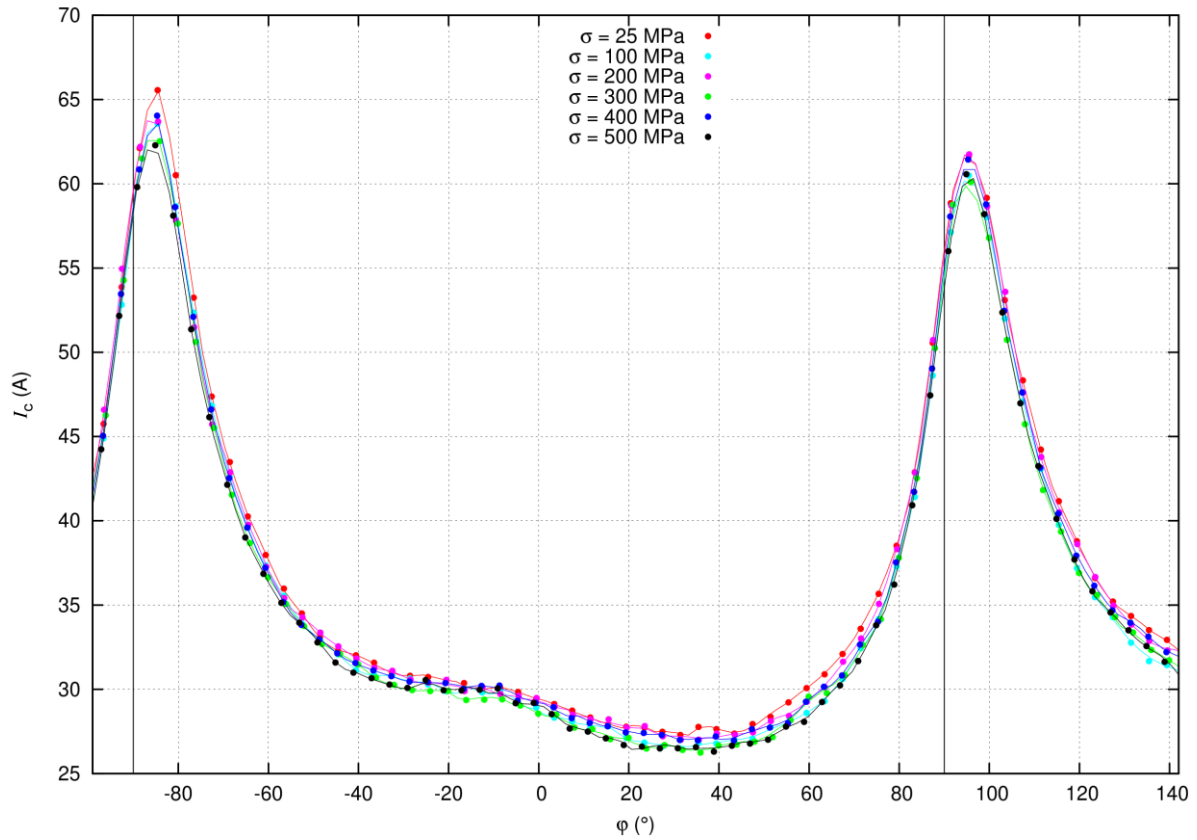


Abbildung 33: $\mu_0 H_a = 0.4 \text{ T}$

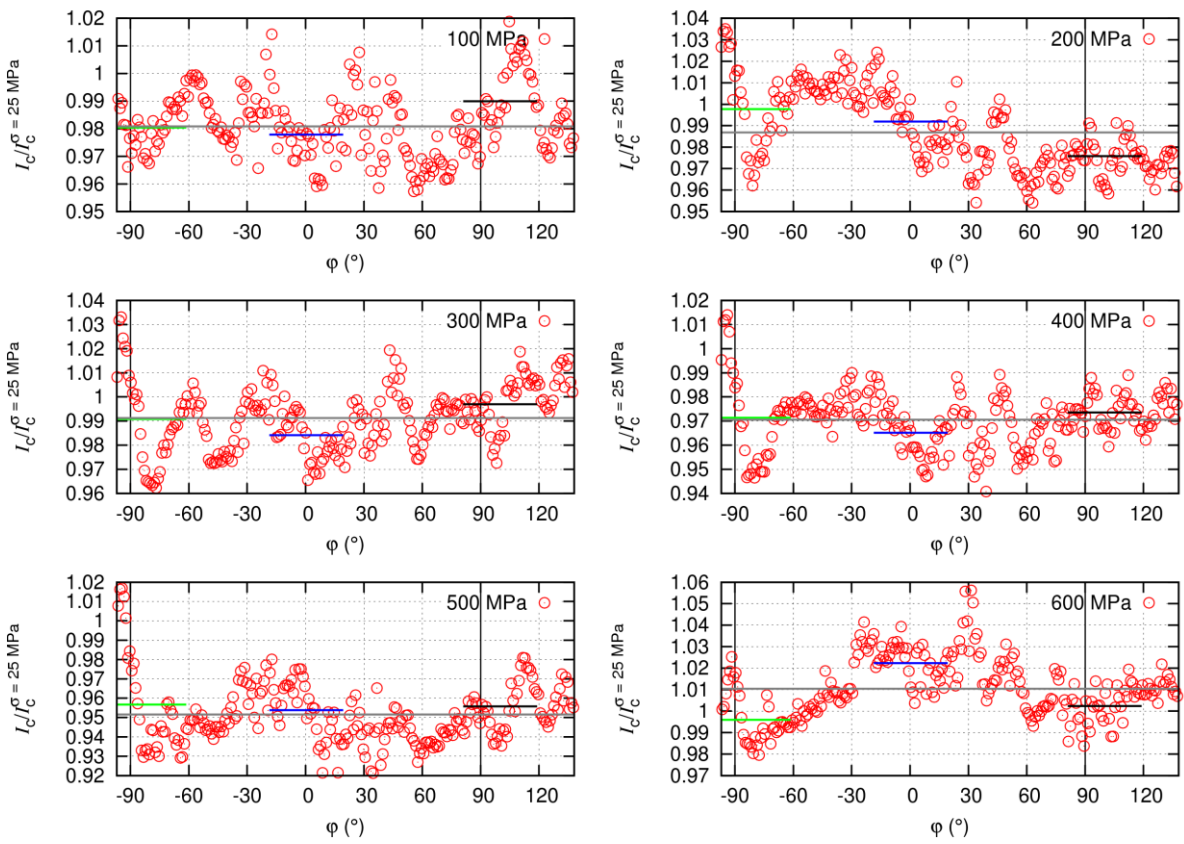
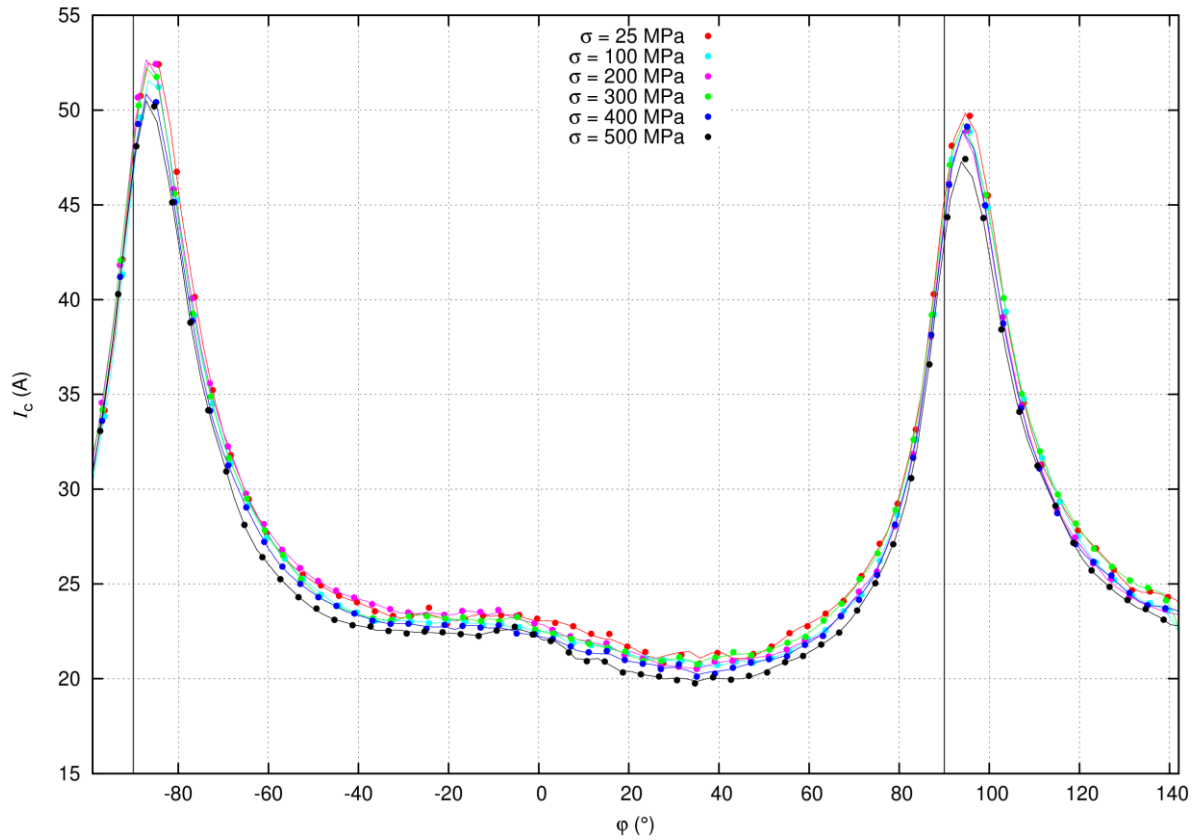


Abbildung 34: $\mu_0 H_a = 0.6$ T

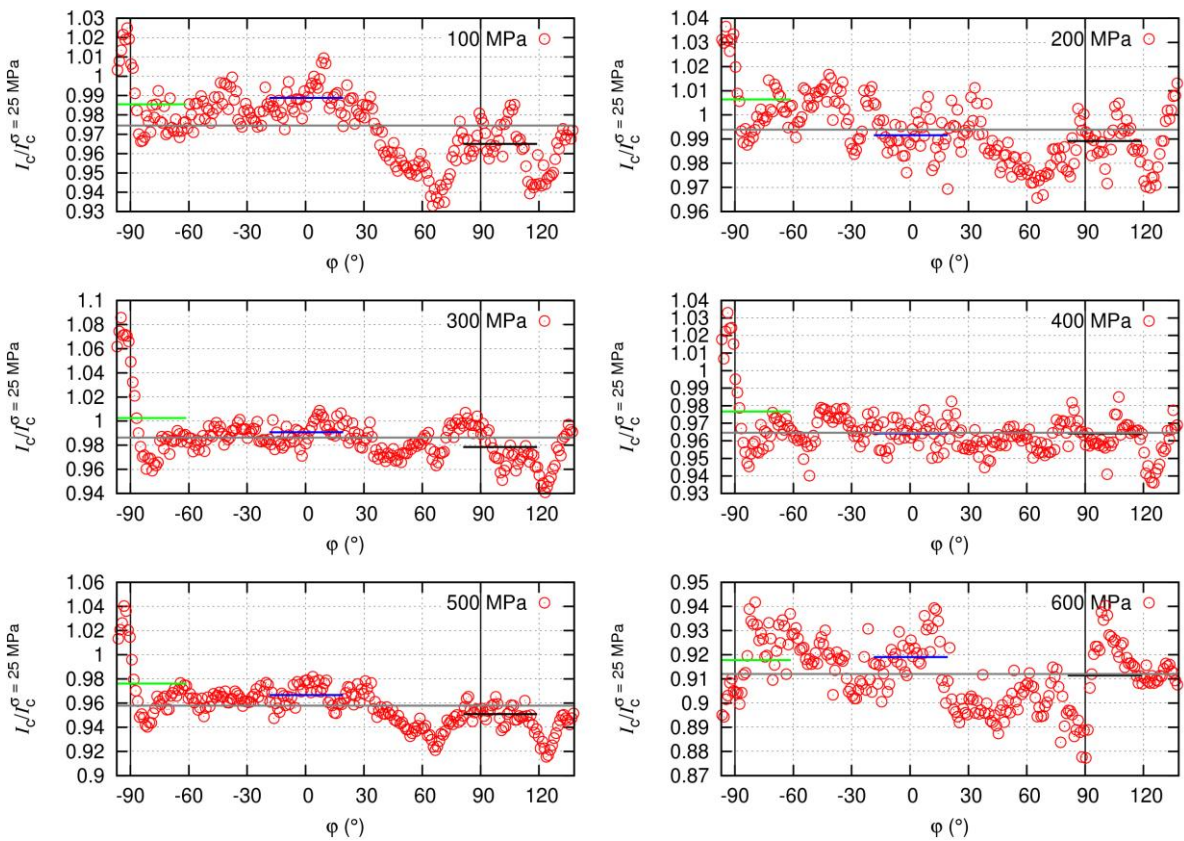
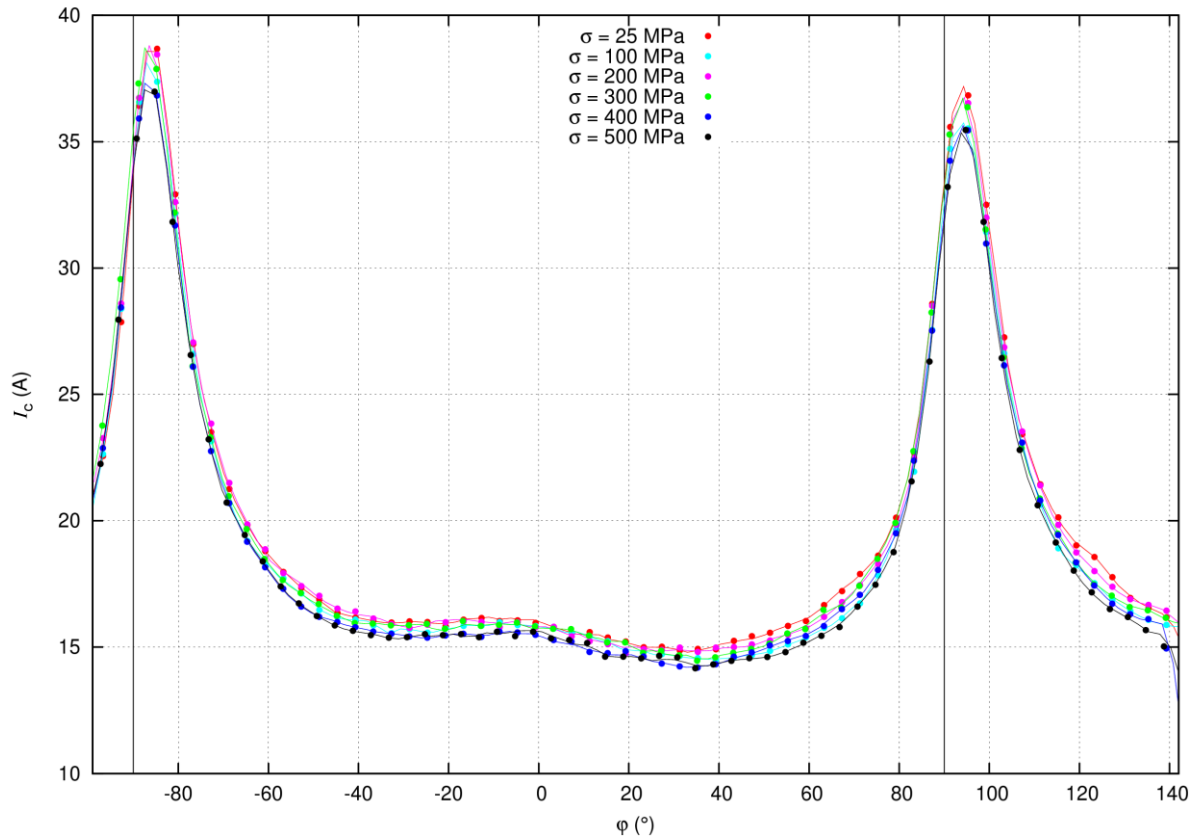


Abbildung 35: $\mu_0 H_a = 1 \text{ T}$

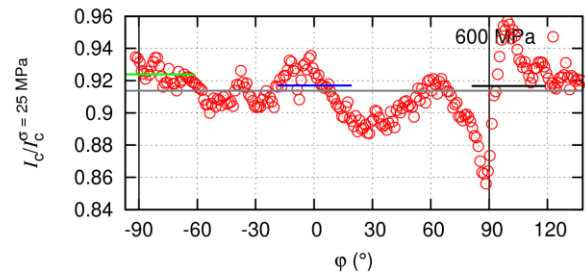
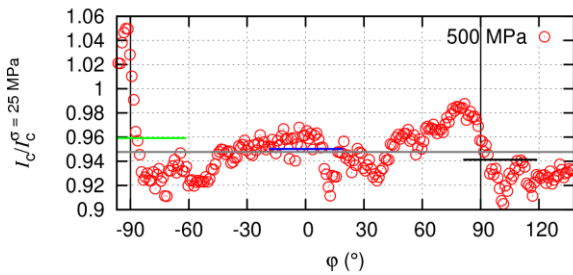
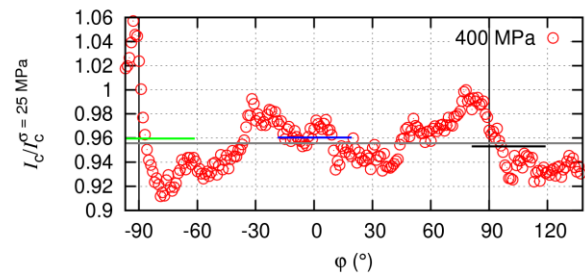
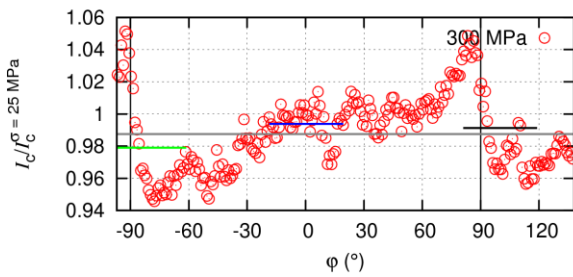
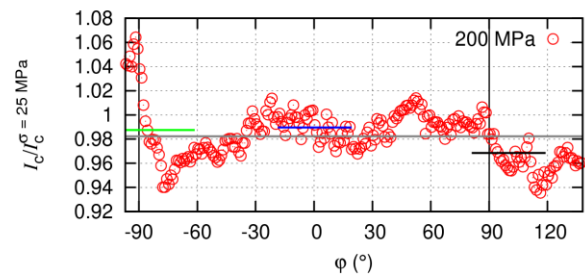
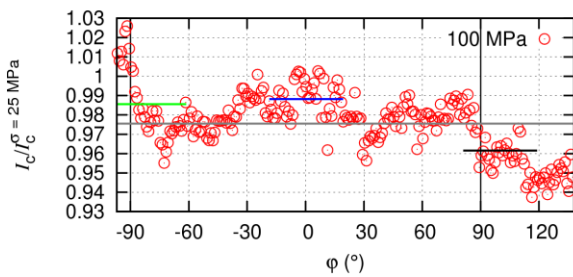
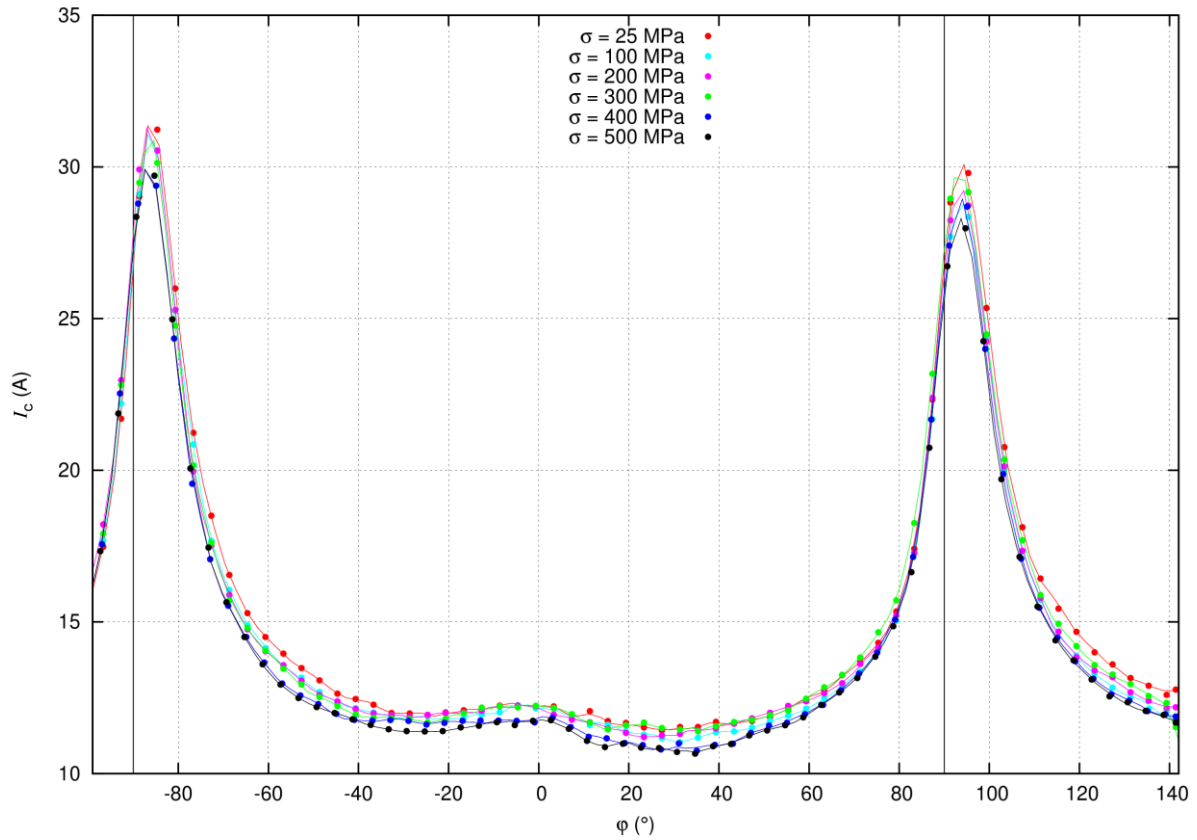


Abbildung 36: $\mu_0 H_a = 1.4 \text{ T}$

Aus diesen Ergebnissen wurden einige interessante Schlussfolgerungen gezogen. Bei niedrigen Feldern (0.1 T und 0.2 T) war eine Verbesserung von $I_d/I_c^{\sigma=25 \text{ MPa}}$ für $\sigma=100 \text{ MPa}$ und 200 MPa beobachtbar, wobei bei 0.1 T dieser Effekt auch für $\sigma=300 \text{ MPa}$ und 400 MPa beobachtbar war. Diese Vergrößerung ist vor allem im Bereich $-20 < \varphi < 20$ ausgeprägt. Mit steigendem externen Magnetfeld ($\leq 0.4 \text{ T}$) wurde eine Umkehr des Effektes gemessen: $I_d/I_c^{\sigma=25 \text{ MPa}} < 1$ für $\sigma \leq 500 \text{ MPa}$, wobei der Wert von $I_d/I_c^{\sigma=25 \text{ MPa}}$ eine steigende Tendenz für $\sigma \leq 300 \text{ MPa}$ aufweist. Interessant sind die Ergebnisse für $\sigma=600 \text{ MPa}$ bei 0.4 T und 0.6 T, wo eine unerwartete Vergrößerung von $I_d/I_c^{\sigma=25 \text{ MPa}}$ auftritt. Bei den zwei höchsten Feldern, 1 T und 1.4 T, wird wiederum eine leichte Steigerung von $I_d/I_c^{\sigma=25 \text{ MPa}}$ für $\sigma=300 \text{ MPa}$ beobachtet.

Bei fast allen Messungen wurde ein interessanter Effekt im Bereich $-100 < \varphi < -60$ (entspricht I_c^{ab2}) beobachtet. Der normierte Strom steigt um ca. 10 % an, wobei dieser Effekt bei den Feldern 1 T und 1.4 T besonders stark war. Im Bereich von $-20 < \varphi < 20$ (entspricht I_c^c) wurde für $\mu_0 H_a = 0.1 \text{ T}$, 0.2 T , 0.4 T und 1.4 T ein meistens höherer Wert des normierten kritischen Stromes festgestellt.

Alle diese Ergebnisse zeigen, dass der Wert von $I_c(\mu_0 H_a, \varphi, \sigma) / I_c(\mu_0 H_a, \varphi, \sigma = 25 \text{ MPa})$ wohl nicht konstant bezüglich der Ausrichtung zum Magnetfeld ist.

Abschließend werden die normierten Werte der Größen $I_c^{ab1,2}$, sowie I_c^c in Abhängigkeit von dem axialen Zug graphisch dargestellt.

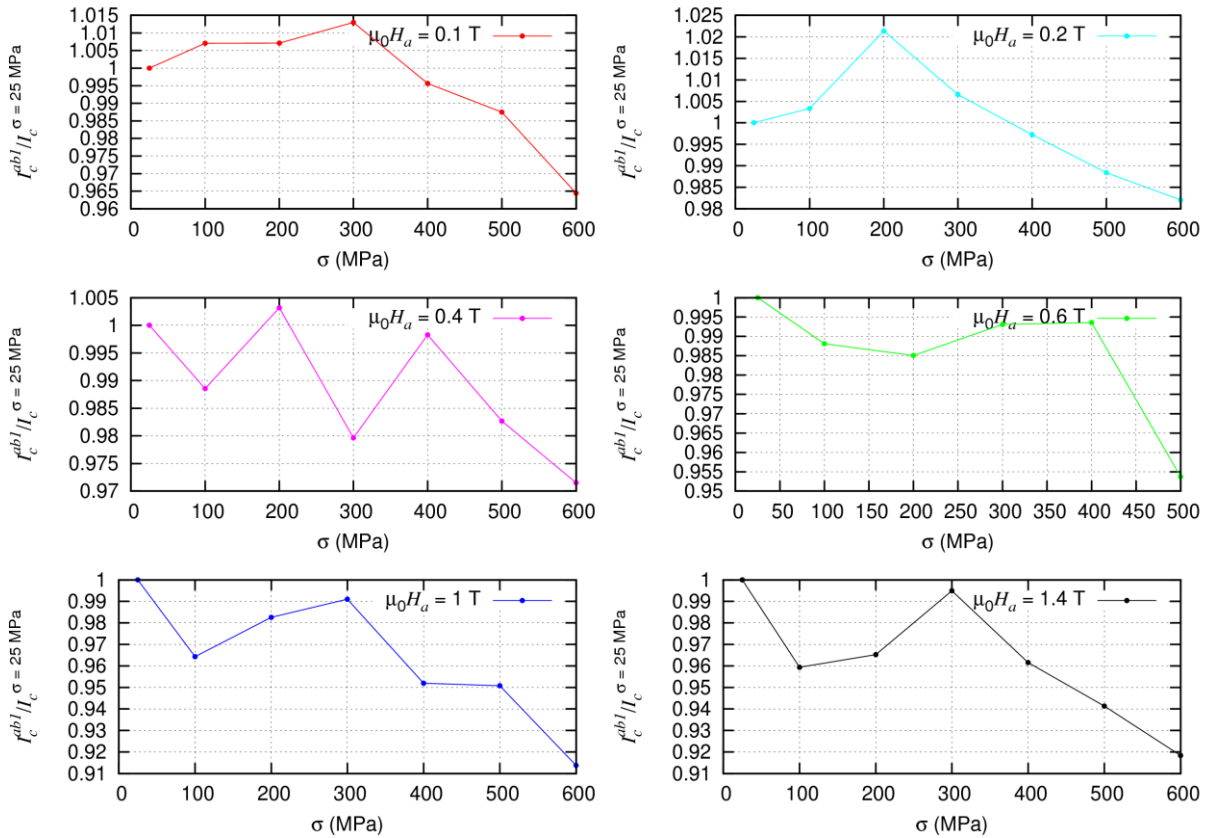


Abbildung 37: Normierte I_c^{abl} -Werte

Ein interessanter Effekt ist, dass bei höheren Feldern und Zügen ($\mu_0 H_a = 1$ T und 1.4 T, $\sigma \geq 400$ MPa) der Wert des normierten kritischen Stroms stärker abfällt im Vergleich zu den entsprechenden Zügen bei $\mu_0 H_a \leq 0.6$ T. Diese Erscheinung ist bei allen drei Graphen zu sehen. Weiters wurde bei $\mu_0 H_a = 0.1$ T bzw. $\mu_0 H_a = 0.2$ T bei $\sigma \leq 200$ MPa für alle drei Positionen eine Erhöhung des normierten kritischen Stroms gemessen, wobei dieser Effekt am stärksten bei dem c-Peak ist.

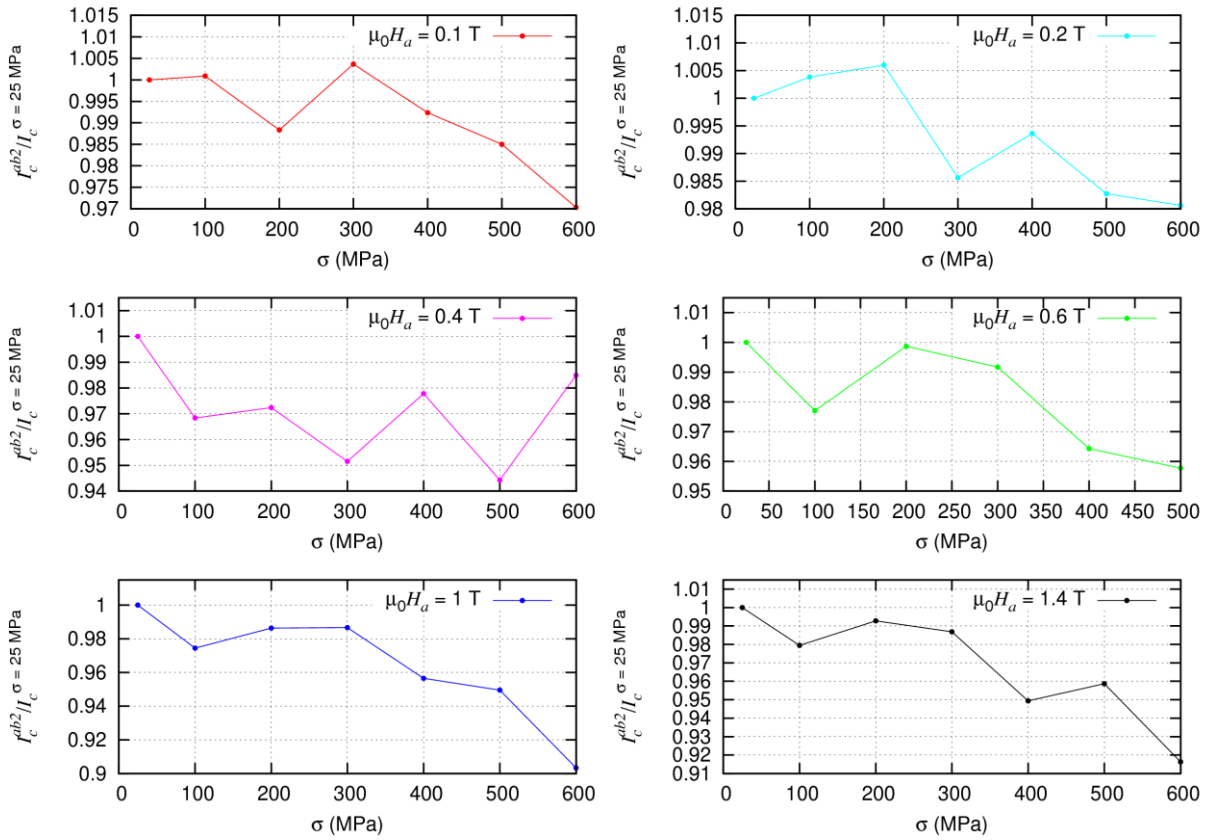


Abbildung 38: Normierte I_c^{ab2} -Werte

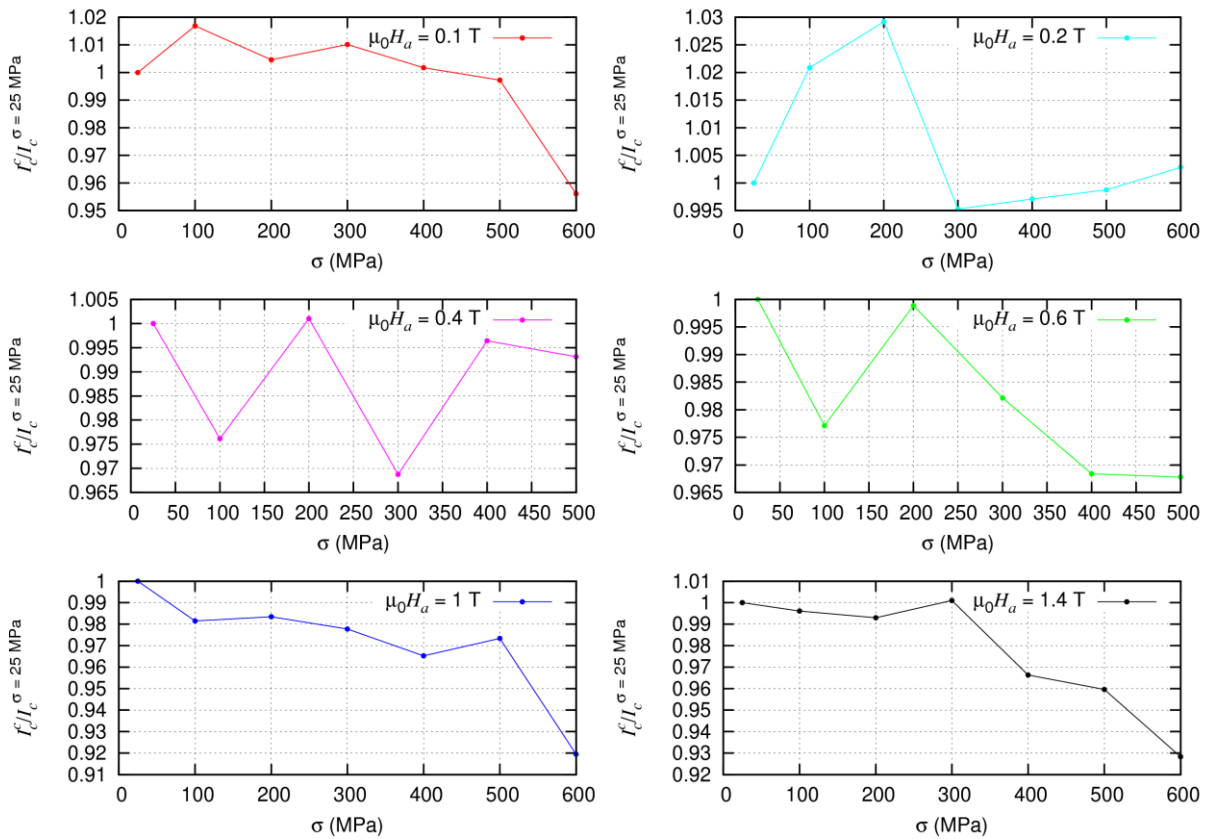


Abbildung 39: Normierte I_c^c -Werte

4. Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Diplomarbeit wurde die Vereinigung zweier bestehender Messplätze erfolgreich durchgeführt. Die Drehung des Elektromagneten und das Setzen des Magnetfeldes wurde in das Python Framework des Zugversuches eingebunden und mit den dafür verantwortlichen Programmen angesteuert. Für die graphische Darstellung wurde Gnuplot in das Messsystem eingebunden. Es wurden Effekte wie die Temperatur des flüssigen Stickstoffs in Abhängigkeit vom Schweredruck sowie die Kraftänderung infolge der unterschiedlichen Ausdehnung der Zugstange gemessen und quantifiziert. Zur Darstellung der Funktionalität des Geräts wurden Messungen des Irreversibilitätszuges an zwei SuperPower-Proben durchgeführt. Bei SPZ10 wurden zusätzlich die Auswirkungen eines externen magnetischen Feldes und axialen Zuges auf den kritischen Strom der Probe mittels Anisotropiemessungen untersucht. Eine Erhöhung des kritischen Stroms wurde bis zum Erreichen eines bestimmten Zugs $\sigma_{I_c}^{max} \approx 200$ MPa ausgerechnet. Der Irreversibilitätszug $\sigma_{irr}=800$ MPa von SPZ8 wurde bestimmt. Eine Fitkurve¹³ wurde erfolgreich durch die $I_c(\sigma)$ -Werte gelegt. Ein Vergleich mit der Publikation¹³ von van der Laan *et al* zeigte eine Übereinstimmung der Fitparameter. Außerdem wurde der E -Modul $E=172$ GPa aus der Spannungs-Dehnungs-Kurve für SPZ8 bestimmt. Dieser Wert stimmt gut mit dem Wert aus der Literatur¹⁴ überein. Mit Hilfe der Messungen der Anisotropie des kritischen Stroms im externen Magnetfeld wurden Argumente für die Existenz von Y_2O_3 -Ausscheidungen (korreliert zu den ab -Ebenen im Supraleiter) gefunden. Zusätzlich wurde die Neigung der ab -Ebenen $\Delta\varphi^{ab} \approx 3.86^\circ$ im Supraleiter berechnet. Die durchgeführten Stromanisotropiemessungen unter Zugspannung weisen darauf hin, dass der axiale Zug unterschiedliche Wirkung auf die Verankerungsmechanismen für $\mu_0 H_a \parallel ab$ und $\mu_0 H_a \parallel c$ hat. Mit den angeführten Messergebnissen wurde die Funktionalität der Apparatur bestätigt.

5. Literaturverzeichnis

- [1] Projektarbeit Hronek M
- [2] Vostner A: *Transportstrommessplatz-Elektromagnet*
- [3] <http://gnuplot-py.sourceforge.net/>
- [4] <http://prologix.biz/gpib-usb-controller.html>
- [5] <http://pyserial.sourceforge.net/>
- [6] <http://labjack.com/u6>
- [7] <https://lp.uni-goettingen.de/get/text/4364>
- [8] <http://www.robotikhardware.de/download/rnschrittmotor.pdf>
- [9] <http://www.magnet.fsu.edu/mediacenter/publications/flux/vol3issue2/sctape.html>
- [10] <http://www.wien.gv.at/statistik/lebensraum/rtf/luftsonne.rtf>
- [11] Ekin J W: „*Experimental Techniques for low-temperature measurements*“, S. 549
- [12] Ekin J W: „*Experimental Techniques for low-temperature measurements*“, S. 572
- [13] van der Laan D C *et al* *Supercond. Sci. Technol.* **23** (2010) 072001
- [14] Clickner C C *et al* *Cryogenics* **46** (2006) 432-438
- [15] Maiorov B *et al* *Appl. Phys. Lett.* **86** (2005) 132504
- [16] Xu A *et al* *Supercond. Sci. Technol.* **23** (2010) 014003

6. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Bestehende Messplätze: Anisotropie Messplatz (links) und Zugversuch (rechts)	5
Abbildung 2: Probenhalter: Vorderseite (links) und Rückseite (rechts)	6
Abbildung 3: Abhängigkeit der angelegten Kraft von der Schrittmotorposition	7
Abbildung 4: Screenshot vom Messrechner während einer Messung	9
Abbildung 5: Kalibrierung des Elektromagneten	11
Abbildung 6: Funktionsprinzip einer Hallsonde	13
Abbildung 7: Sinusverhalten der Hallsonde	14
Abbildung 8: Änderungen beim gemessenen Strom	18
Abbildung 9: Vergleich zwischen Shunt und Anzeige der Stromquelle	19
Abbildung 10: Struktur eines Hochtemperatursupraleiterbands	20
Abbildung 11: SPZ10 ohne Dehnmessstreifen	22
Abbildung 12: Anisotropie des kritischen Stromes	23
Abbildung 13: Links: Signal vor dem Anpassen des Winkels, rechts: nach dem Anpassen	25
Abbildung 14: Temperaturverlauf mit fortschreitender Zeit	29
Abbildung 15: Kraftvariation mit fortschreitender Zeit	30
Abbildung 16: Normierter kritischer Strom als Funktion des axialen Zuges, $T = 77.75 \pm 0.05$ K	33
Abbildung 17: $I_c(\sigma)$, $T = 77.75 \pm 0.05$ K	34
Abbildung 18: n-Werte für SPZ8	35
Abbildung 19: SPZ10 mit und ohne Dehnmessstreifen, $T = 77.9$ K	36
Abbildung 20: $I_c/I_{c0}(\sigma)$ SPZ10, $T = 77,9 \pm 0,85$ K	36
Abbildung 21: n-Werte SPZ10 für $\sigma \geq 50$ MPa	37
Abbildung 22: Vergleich der $I_c/I_{c0}(\sigma)$ von SPZ8 ($T = 77.75 \pm 0.05$ K) und SPZ10 ($T = 77.9 \pm 0.14$ K)	38
Abbildung 23: Spannungs-Dehnungs-Diagramm, $T = 77.75 \pm 0.05$ K	39
Abbildung 24: I_c als Funktion der Ausrichtung zum externen Magnetfeld	41
Abbildung 25: TEM Bild, Bildebene $\parallel ab$ -Ebenen von einem SuperPower YBCO-Bandleiter	42
Abbildung 26: Abstand zwischen $\mu_0 H_a \parallel$ Probe und I_c^{ab1} (links), I_c^{ab2} (rechts) in Grad	43
Abbildung 27: Normierte I_c -Werte beim ersten (oben) und zweitem (unten) Maximum	45
Abbildung 28: Höhendifferenz der zwei I_c -Maxima	46
Abbildung 29: Normierte I_c -Werte für $\mu_0 H_a \parallel c$ -Achse	47
Abbildung 30: Vergleich zwischen den ausgewerteten und interpolierten I_c Werte für $\sigma = 100$ MPa	49
Abbildung 31: $\mu_0 H_a = 0.1$ T	50
Abbildung 32: $\mu_0 H_a = 0.2$ T	51
Abbildung 33: $\mu_0 H_a = 0.4$ T	52
Abbildung 34: $\mu_0 H_a = 0.6$ T	53
Abbildung 35: $\mu_0 H_a = 1$ T	54
Abbildung 36: $\mu_0 H_a = 1.4$ T	55
Abbildung 37: Normierte I_c^{ab1} -Werte	57
Abbildung 38: Normierte I_c^{ab2} -Werte	58
Abbildung 39: Normierte I_c^c -Werte	58