

August 1974
Erste Inbetriebnahme des Siemens SL-Prototyp-
Magnetens W VII im IPP

W. Amenda *, D. Kullmann +, P. Krüger *,
M. Pillsticker *

IPP 4/120

August 1974

MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR PLASMAPHYSIK

GARCHING BEI MÜNCHEN

MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR PLASMAPHYSIK
GARCHING BEI MÜNCHEN

Erste Inbetriebnahme des Siemens SL-Prototyp-
Magnetens W VII im IPP

W. Amenda *, D. Kullmann +, P. Krüger *,
M. Pillsticker *

IPP 4/120

August 1974

+ Siemens AG, Forschungslaboratorien Erlangen

* Max-Planck-Institut für Plasmaphysik Garching

*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.*

W. Amenda, D. Kullmann, P. Krüger,
M. Pillsticker

August 1974

Abstract

The first test results with a big superconductive proto-type coil developed for the Garching Stellarator W VII are reported. The main dimensions of the coil are:

bore: 938 mm ϕ

winding cross section: 104 x 101,5 mm

inductance: 4,44 H

Flux jumping at low currents did not start quenching. The critical current of the Nb-Ti coil reaches 91 % of the short sample value. The stored energy at quenching is 1,83 MJ and the maximum value of the magnetic field in the winding region is 61,5 kG. The mechanical stresses did not damage the windings. Degradation was not observed. A training of the coil was not necessary.

Altogether the test was successful, as important technical problems were satisfactorily solved. Only parts of cryogenic systems should be improved in order to reduce the helium losses.

INHALTSVERZEICHNIS

1. Einleitung	Seite	1
2. Geplanter Testumfang	"	1
3. Beschreibung der Versuchsanordnung und der Spule	"	2
4. Tests und Abkühlung	"	3
5. Messungen im stromlosen Zustand	"	4
6. Messungen am erregten Magneten	"	7
7. Künftige Versuche und Arbeiten am Magneten	"	9
8. Zusammenfassung	"	10

1. Einleitung

Der Siemens SL-Prototyp-Magnet wurde für die supraleitende Version des W VII Stellaratorexperimentes entwickelt. Nach erfolgreicher Abnahmeprüfung beim Hersteller, der Siemens AG in Erlangen ⁺, wurde der SL Magnet in Garching installiert und im Mai 1974 im Beisein von zwei Mitarbeitern der Firma Siemens in Betrieb genommen ⁺⁺.

Dieser Bericht ergänzt und berichtigt in einigen Punkten die Siemens-Aktennotiz FLSL 12 von D. Kullmann über den Test in Garching vom 21.5.1974, die vor der endgültigen Nacheichung der Meßeinrichtungen und der vollständigen Auswertung aller Meßergebnisse verfaßt worden ist.

2. Geplanter Testumfang

Bei der ersten Inbetriebnahme des SL Magneten in Garching galt es, die in Erlangen erzielten magnetischen, elektrischen und thermischen Ergebnisse bei teilweise geänderten Betriebsbedingungen zu bestätigen. Daher wurde folgendes Versuchsprogramm erstellt:

- 1) Überprüfung aller Vakuumeinrichtungen
- 2) Überprüfung aller Versorgungs- und Überwachungseinrichtungen
- 3) Test der Meßsysteme
- 4) Abkühlung, dabei Messung
der Temperaturverteilung,
des Spulenwiderstandes,
der Spulendehnung,
des Vakuumdruckes,
des Kühlmitteldurchsatzes und -verbrauches.

⁺ Hierzu Prüfprotokoll vom 8.12.1972 von Elsner, Martinelli, Wipf, Kullmann

⁺⁺ D. Kullmann; Pohl

5. Messungen bei stromlosem Zustand

Temperaturverteilung
He-Verbrauch in Verbindung mit Druckwerten

6. Messungen bei erregter Spule

Erprobung der Sicherheitseinrichtungen bei 100 A
Mehrmales Erregen bis zum Nennstrom
Erregen bis zum Quench
Überprüfung der Spule auf Schäden

7. Temperaturmessungen beim Aufwärmen

Spezielles Interesse galt dem Abkühlverfahren. Bei Abkühlversuchen in Erlangen wurde für den Temperaturbereich von 295 K bis ca. 70 K, bzw. 50 K ein Refrigerator eingesetzt. Unterhalb 70 K, bzw. 50 K wurde mit Flüssighelium (LHe) aus einem Vorratstank abgekühlt. In Garching erfolgte die Abkühlung im gesamten Temperaturbereich durch Kaltgas und Flüssighelium aus einem Vorratstank. Hierbei lagen andere Druckverhältnisse im Helium-Kühlsystem vor wie in Erlangen, so daß man allgemeinere Aussagen über das Betriebsverhalten erwarten konnte.

3. Beschreibung der Versuchsanordnung und der Spule

Einen Gesamtüberblick des Versuchsaufbaues vermittelt Bild 1. Erkennlich ist der Magnetkryostat (1) mit Spannjochen an den Druckstützen (2) und das 6 Ltr-Flüssig-He-Vorratsgefäß (3), das Bestandteil der Spule ist. Vorratstank (4) war ein 4000 Ltr-Gefäß der Firma Gardner. Im Vordergrund befinden sich die N₂-Versorgungstanks (5). Rechts im Bild sieht man noch zum Teil die Überwachungs- und Versorgungseinheiten (6) und die Heliumabgasverteilung und -meßstellen (7). Links ist die Hydraulikanlage für die Druckstützen (8) und die Vakuumpumpe (9) sichtbar. Bild 2 und 3 zeigen vom Hersteller vorgelegte Prinzipskizzen des Kryostaten mit Flüssighelium-Vorratsgefäß und einer Positionsangabe der

Meßfühler, Widerstände und Dehnungsmeßstreifen. Als Supraleiter wurde für die Spule ein getwisteter NbTi-Multifilamentleiter vom Typ VACRYFLUX 5001, F 567 (Vacuumschmelze) mit rechteckförmigem Querschnitt benutzt, dessen kritischer Kurzprobenstrom bei 4,2 K und einer äußeren magnetischen Induktion ($\otimes \uparrow B$) von 6,65 T bei 1000 A liegt.

Der Spulenkörper besteht aus 12 Doppel-pan cake Wickeln, die durch radial angeordnete Stege voneinander getrennt sind, so daß Helium zur Kühlung an die Leiter gelangt (Edge cooling).

Die Spule hat 1644 Wdg.

Die Abmessungen des Spulenkörpers sind:

äußerer Durchmesser	1141 mm
innerer Durchmesser	938 mm
Breite der Wicklung	104 mm

Die Induktivität ergibt sich zu 4,44 H.

4. Tests und Abkühlung

Nach Behebung eines Transportschadens am Kryostaten-Abgasturm erfolgt die Überprüfung der Meß- und Versorgungsanlagen sowie ein Vakuumtest. Nennenswerte Mängel wurden nicht festgestellt.

Die Spuljustierung sowie die Inbetriebnahme der Hydraulik für die Spulenabstützung verliefen ohne Komplikation.

Die Abkühlkurve in Abhängigkeit von der Zeit zeigt Bild 4 (dazu Bilder 2 und 3). Dargestellt werden Temperaturen am kältesten und wärmsten Punkt des Spulen-

körpers (Heliumbereich), die Temperatur des mit Stickstoff gekühlten Schildes und der Spulenwiderstand. Eine Verkürzung der Abkühlzeit um 2,5 - 3 h scheint risikolos erreichbar, falls sofort mit LHe gekühlt wird. Die maximale Temperaturdifferenz betrug beim durchgeführten Abkühlvorgang ca. 270 K. Es ergab sich eine mittlere Abkühlgeschwindigkeit von 30 K/h. Die Spule hielt der mechanischen Beanspruchung schadlos stand.

Der gemessene Heliumverbrauch für die Abkühlphase betrug 460 dm³ flüssiges Helium, wobei der Gasverbrauch während der ersten 3,5 h entsprechend berücksichtigt wurde. Damit ergibt sich bei Beachtung des Spulengewichtes ein spezifischer Heliumverbrauch von 0,9 dm³/kg (theoretischer Minimalwert 0.8 dm³/kg).

Die Auswertung der Vakuumkontrollmessung zeigt, daß sich während der Abkühlphase Mängel im Vakuumsystem einstellten. Plötzliche Druckerhöhungen um zwei Zehnerpotenzen wurden registriert, die, wie eine nachträglich vorgenommene Lecksuche ergab, auf Undichtigkeiten im Stickstoffsystem beruhten (undichte Swedgelog- und Lötverbindungen). Da die Saugleistung der Pumpe sowie die vakuumerzeugende Wirkung der Kaltflächen hinreichend groß und die Lecks nur klein waren, konnte der Test trotzdem fortgeführt werden.

5. Messungen im stromlosen Zustand

Die Temperaturverteilung, gemessen mit Germanium-Widerständen, zeigt im abgekühlten Zustand 0,05 K Unterschied zwischen kältestem und wärmstem Punkt der Spule, was im Rahmen der Genauigkeit vernachlässigbar ist. Die Messung der Heliumverluste im stromlosen Zustand ergab 70 W, wobei der Druck im Vorratsgefäß der Spule auf etwa 1,15 bar, die Druckdifferenz zwischen Vorratsgefäß und

und Abgasturm auf etwa 0,03 bar und der Heliumstand im Abgasturm auf maximales Niveau (Standanzeige ca. 12.5 cm) eingeregelt waren. Demgegenüber stehen Herstellerangaben von ca. 20 W, die während der Tests in Erlangen gemessen wurden.

Bei geringfügiger Erhöhung des Druckes im Vorratsgefäß über 1.15 bar hinaus stiegen die Verluste stark an, da in diesem Fall der Heliumpegel im Abgasturm zu dicht am warmen Bereich lag. Bei geringer Druckverminderung im Vorratsgefäß konnte der Betrieb nicht aufrecht erhalten werden, da der Heliumpegel dann weit unterhalb des zulässigen Niveaus lag. Der obere Spulenteil wurde hierbei nur gasgekühlt.

Die Dosierung des nachzuliefernden Heliums erfolgte mit einem Dosierventil am Heliumvorratstank (4000 dm³ Inhalt, 1.6 bis 1.8 bar Druck). Laufende manuelle Nachregelung dieses Dosierventiles am Einlaß, des Ventiles am Abgasauslaß vom Behälterkühlsystem und des Dosierventils im Bypass zwischen Abgasturm und Vorratsbehälter waren erforderlich, wenn die oben angegebenen Werte im Vorratsbehälter und Abgasturm eingehalten werden sollten. Die Einstellung eines Dauerbetriebs auf optimale Bedingungen (Heliumverluste \leq 20 W) war nicht möglich. Den zunächst vom Hersteller vermuteten Grund, daß das Dosierventil nicht empfindlich genug einstellbar sei, kann man bei genauerer Betrachtung nicht allein als Ursache für die Betriebsschwierigkeiten (Regelbarkeit) und die hohen Gesamtverluste gelten lassen:

1. Das Spulenkryosystem wird mit der Gasmenge durch Verluste im Heber und den Tankleitungen des Großtanks (Gardner 4000 Ltr.) belastet. Die Verluste der Tankleitungen mit dem dort fest installierten Dosierventil sind hoch (schlechte Isolation und Entspannung von ca. 1.7 bar auf 1.15 bar) und wurden mitgemessen, da separate Verlustmessung nicht möglich war.

2. Die unter 1. genannten Zusatzverluste müssen über einen Bypass mit Dosierventil abgeleitet werden, damit das Gas nicht in den Spulenraum gelangt. Der begrenzte Querschnitt des Bypasses verursacht bei hohem Gaseinfall eine große Druckdifferenz zwischen Spulenraum und dem 6 dm^3 -Heliumvorratsgefäß, die oberhalb der Solldruckdifferenz liegt^{*)}. Der Pegelstand im Abgasturm steigt dadurch unzulässig hoch an. Im Extremfall befindet sich im Vorratsgefäß (6 dm^3) kein Helium, während im Abgasturm der maximal zulässige Pegel erreicht bzw. überschritten wird. Dies ergibt zusätzliche Verluste.

3. Die hohen Verluste in den Großtankleitungen und dem Einlaßdosierventil erfordern einen Mindestöffnungsquerschnitt dieses Ventiles, um neben dem durch die Verluste bedingten Gas auch flüssiges Helium transferieren zu können. Der Flüssigheliumdurchsatz läßt sich so auf keinen konstanten Wert einstellen, weil temperatur- und druckbedingte Gasdurchsatzschwankungen auftreten. Durch kurzfristige manuelle Verstellungen am Dosierventil muß versucht werden, den Flüssigheliumdurchsatz annähernd konstant zu halten. Dies hat Rückwirkungen auf die Dosierventile im Bypass und am Abgaskühlsystem des Spulenvorratsbehälters, die deswegen auch verstellt werden müssen. Eine befriedigende Regelung des trägen Systems ist in dieser Weise nicht möglich.

Um die genannten Schwierigkeiten zu beheben und einen optimalen und sicheren Betrieb zu gewährleisten, werden folgende Veränderungen am Kryosystem vorgeschlagen:

*) Der Solldruck ergibt sich, wenn die Verdampfungsrate des Spulenkryosystems durch Nachschub von Flüssighelium ergänzt werden kann, ohne daß nennenswerte Pegelschwankungen und -unterschiede im Abgasturm und Vorratsgefäß auftreten.

1. Das Kaltgasvolumen sowie der Abstand zwischen max. He-Pegel und warmem Bereich des Gasablaßturmes sollten vergrößert werden.
2. Der Vorratsbehälter an der Spule sollte einen Stickstoffkühlschild erhalten (leichtere Regelbarkeit).
3. Der Vorratsbehälter sollte ebenfalls vergrößert werden.
4. Der Vorratsbehälter sollte über ein druckgesteuertes Abgasventil mit der Heliumabgasleitung verbunden werden (einfache automatische Regelung).
5. Ferner sollte erwogen werden, ob man nicht eine zweite He-Transfer-Leitung zur Oberkante der Spule durch den Gasablaßturm verlegt, die benutzt werden könnte nachdem die Spule gefüllt ist.
6. Ohne die Änderungen 1 bis 5 sollte die Heliumversorgung aus einem Hochdruck-Helium-Vorratstank durch Zwischenschalten eines Niederdruck-Vorratstanks vorgenommen werden, so daß man 2 Dosierventile benutzen und das Abgas separieren kann.

Die vorstehenden Erläuterungen erklären die Abweichung zwischen den vom Hersteller gemessenen Verlusten von 20 W und dem in Garching gemessenen Wert von 70 W. Bei den Messungen in Erlangen wurden Niederdruck-He-Vorratstanks verwendet. Ein optimaler Betrieb der Spule ohne Zwischenspeicher (Niederdruck-Tank) unmittelbar aus einem Großtank ist beim vorliegenden Kryosystem der Prototyp-Spule nicht möglich.

6. Messungen am erregten Magneten

Detaillierte Heliumverlustmessungen kamen nicht in Frage, da die zusätzlichen Verluste durch die Stromzuführungen gegenüber den Grundverlusten (70 W) vernachlässigbar waren.

Bei kleinem Strom (ca. 100 A) erfolgte die Überprüfung der Schnellabschaltung. Da keine Störungen auftraten, wurde der Magnet mit 0.86 A/s bis etwa zum Torusnennstrom (630 A) auferregt und längere Zeit bei dem Wert betrieben. Beim Auferregen traten zahlreiche Flußsprünge auf, die die Spulenüberwachung registrierten, die jedoch nicht zum Quench der Spule führten. Die Verläufe des zentralen Magnetfeldes der Spule und des Spulenstroms bei absichtlich ausgelöster Schnellabschaltung zeigt Bild 6. Die Einflüsse der Abschirmungen (L He-gekühlte Cu-Abschirmung um Spulenwickel und LN₂-gekühltes Cu-Strahlungsschild) gehen aus dem abweichenden Verlauf des Spulenstromes von dem des Zentralmagnetfeldes hervor.

Darüber hinaus erfolgte ein Spulenquenchttest, den die Spule unbeschadet überstand. Mechanisch verbogen wurden Teile des Abgasturms, der auch aus diesem Grunde verbessert und zudem mit einem besseren Überdruckventil versehen werden sollte. Der Quenchstrom betrug 908 A. Während der letzten Phase der Auferregung war ein Stromanstieg von 0.62 A/s eingestellt. Nach dem Quench und der Wiederauffüllung mit Helium wurde die Spule erneut bis 800 A auferregt und für längere Zeit betrieben. Der Zentral-Magnetfeldverlauf der Spule beim Quench ist im Bild 7 angegeben.

In Tabelle I folgt eine Zusammenstellung der wichtigsten Daten im Vergleich zum Torusbetrieb, die beim insgesamt positiv verlaufenen Test der W VII-SL-Prototypspule in Garching erreicht wurden.

Besonders beeindruckend und für den risikolosen Einsatz im Torusverband spricht, daß die Lorentzkraft und die effektive Stromdichte des Torus bei gleichem Maximalfeld um ca. 50 % überschritten werden konnte, bevor die Spule quenchte.

TABELLE I

Betriebsart Betriebsdaten		Torus	Nennbetrieb einzel	Quench einzel
B_0	(T)	4,0	1,25	1,8 (1,83 gem.)
B_{max}	(T)	6,2	4,27	6,15 (gerechnet)
I_s	(A)	630	630	908
j	(A/mm ²)	98	98	141,5
$I \times B_{max}$	(TA)	$3,9 \cdot 10^3$	$2,69 \cdot 10^3$	$5,58 \cdot 10^3$
E_L	(MJ)	1,62	0,888	1,83
$I_{CB_{max}}$	(A)	725	1000	1000
I_s / I_c		0,87	0,63	0.91

I_s Spulenstrom
 I_c kritischer Kurzprobenwert
 B_0 zentrales Magnetfeld
 B_{max} maximales Magnetfeld an der Wicklung
 j effektive Gesamtstromdichte
 E_L gespeicherte magnetische Energie

7. Künftige Versuche und Arbeiten am Magneten

1. Das Vakuumleck des Stickstoffsystems wird vor dem nächsten Testversuch beseitigt.
2. Durch Veränderung der Heliumgasmessung sollen die Verluste detailliert bei verschiedenen Bedingungen bestimmt werden.

3. Die im vorgehenden Text aufgeführten Verbesserungen am Kryosystem der Spule sind geplant.
4. Tests mit normalleitenden Zusatzspulen zur Torus- und Helixfeldsimulation werden vorbereitet.
5. Die konstruktive Auslegung der Spule läßt Heliumbadkühlung und auch Zwangskühlverfahren zu. Versuche mit Gaskühlung bzw. Kühlung durch überkritisches Helium werden erwogen.

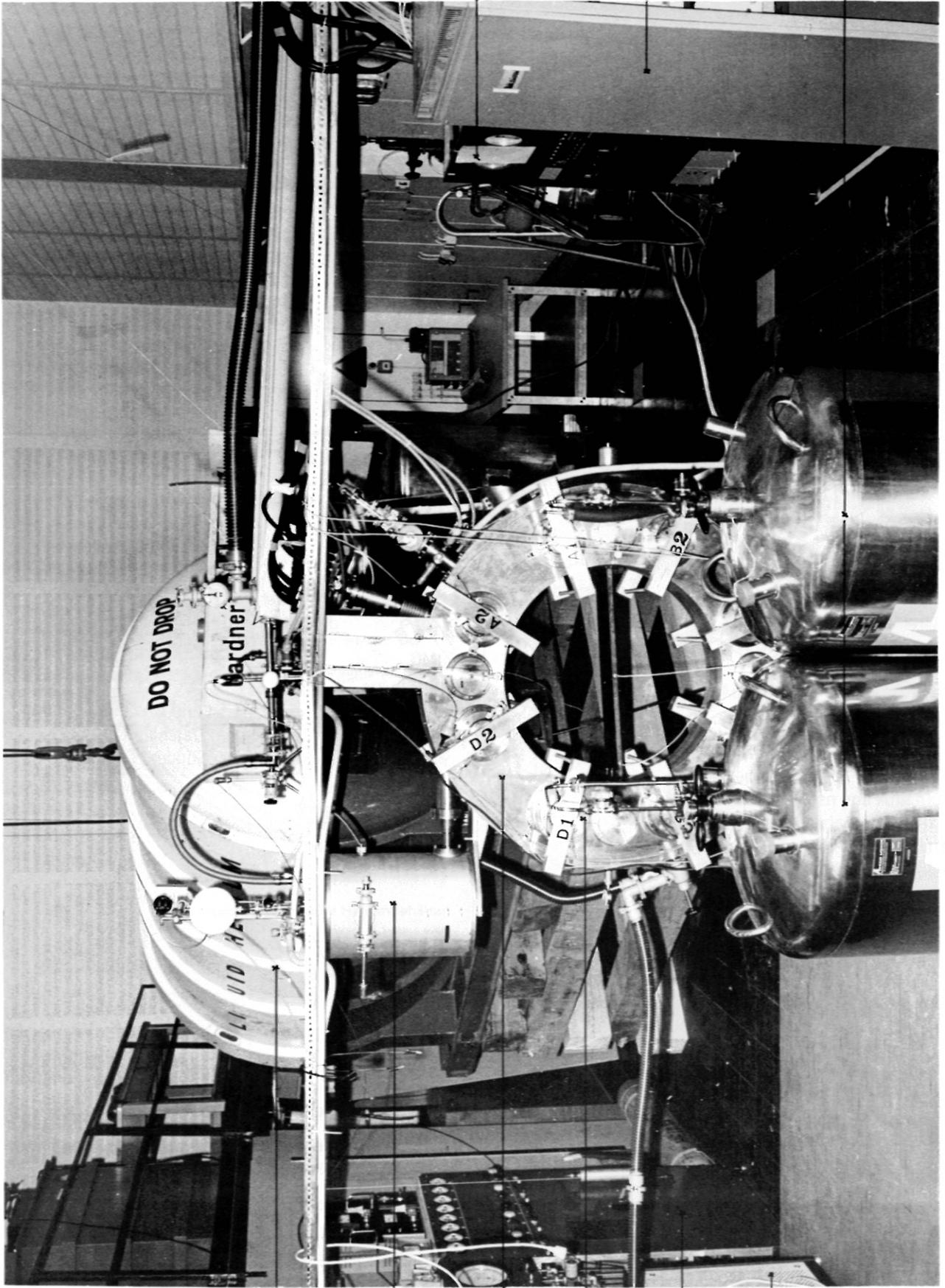
8. Zusammenfassung

Die Ergebnisse des Spulentests gaben wichtige Aufschlüsse über die Betriebseigenschaften des SL-Prototypmagneten:

Flußsprünge bei niedrigeren Strömen führen nicht zum Quenchen. Der kritische Spulenstrom beträgt ca. 91 % des Kurzprobenwertes. Die gespeicherte Energie beim Spulenquenchen ist 1.83 MJ (s. Tabelle). Die Spule hält den mechanischen Beanspruchungen stand. Degradationserscheinungen wurden nicht beobachtet. Ein Training der Spule war nicht erforderlich.

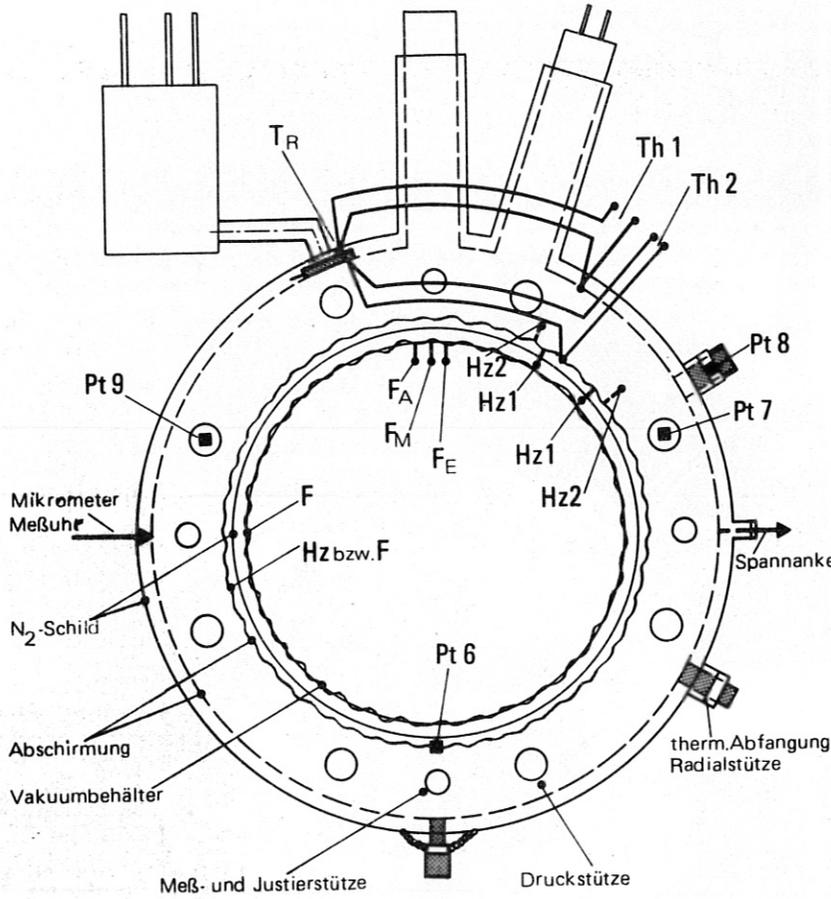
Das Kryosystem der Spule sollte verbessert werden, damit ein Anschluß des Magneten an jeden Vorratstank möglich ist. Kleine Mängel am Vakuumsystem liegen vor und müssen behoben werden.

Insgesamt gesehen, verlief die Inbetriebnahme erfolgreich, da die entscheidenden Entwicklungen technisch einwandfrei durchgeführt sind.



- 4
- 3
- 1
- 2
- 8
- 9
- 7
- 6
- 5

Bild 1 Versuchsaufbau



Sondenbezeichnungen

Th Differenzthermoelement
Au Fe-Chromel

TR Referenztemp. am He-Zulauf
Th1, Th2 Meßstellen an der Abschirmg.

HZ Heizung, bzw. F-Flußmeßspule-Abschirmung Philips-Mantelheizleiter Typ 1Nc Ac 20

HZ1 2 Windungen $R(300K)=17,7\Omega$
HZ2 2 Windungen $R(300K)=17,5\Omega$

■Pt- Platinwiderstände N₂-Schild

F Flußmeßspule am Vakuuminnenrohr

F_A F_M 2 Windungen

F_M F_E 2 Windungen

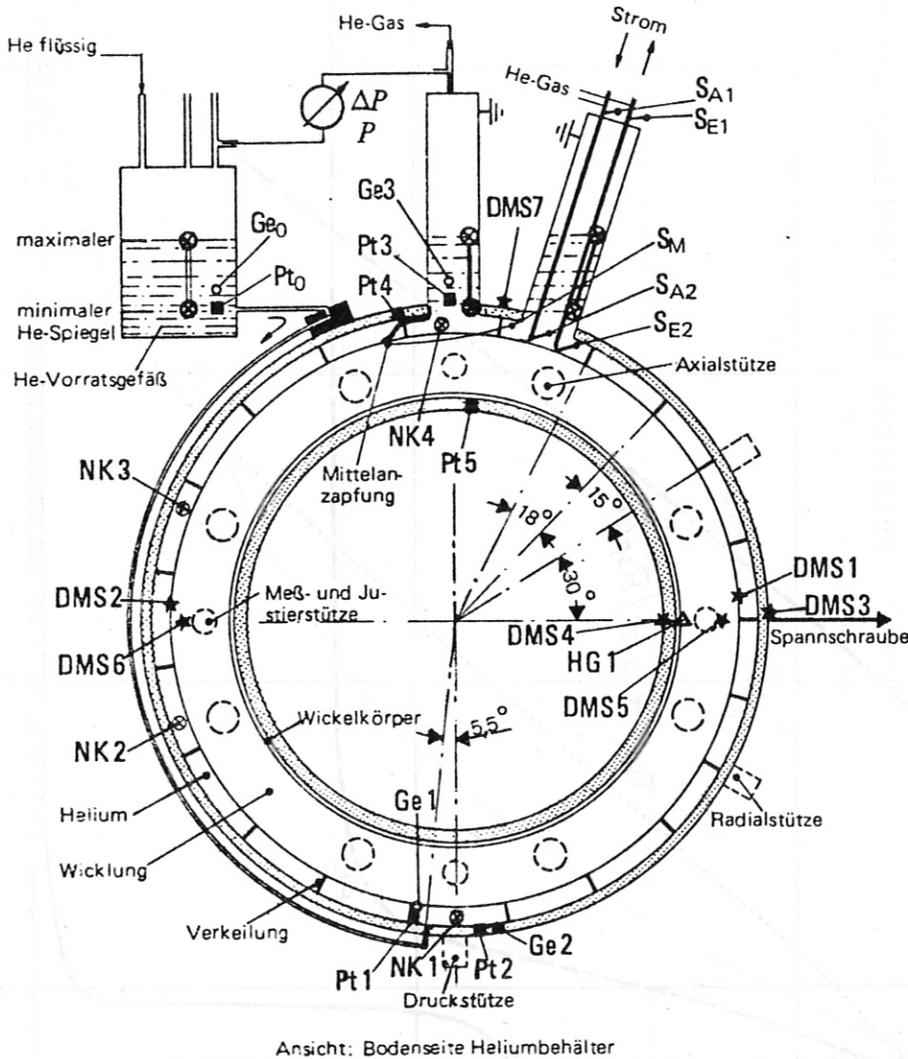
F_M Mittelabgriff

elektr. Daten und Anschlußkontakte der Sonden: **Datenblatt**

Position der Sonden: **Datenblatt**

Bild 2

Prinzipskizze der Spule zur Ortsangabe der Meßfühler an Abschirmung, N₂-Schild, Vakuumbehälter



Sondenbezeichnungen

- ⊗ He-Min.-Max. Niveausonde verschiebbar
- ⊙ mit eigenem Steckeranschluß
- ⊗ NK-Niveausonde
- Pt-Platinwiderstand
- Ge-Germaniumwiderstand
- ★ DMS-Dehnungsmeßstreifen
- △ HG-Hallgenerator für Radialfeld
- S-Spannungssonden Wicklung bzw. Stromzuführungen
- P-Absolut- und Differenzdruck
- Ge₀, Pt₀ mit eigenem Steckeranschluß
- elektrische Daten und Anschlußkontakte der anderen Sonden: Datenblatt
- Position der Sonden: Datenblatt

Bild 3

Prinzipskizze der Spule zur Ortsangabe der Meßfühler an Wicklung und Heliumgehäuse

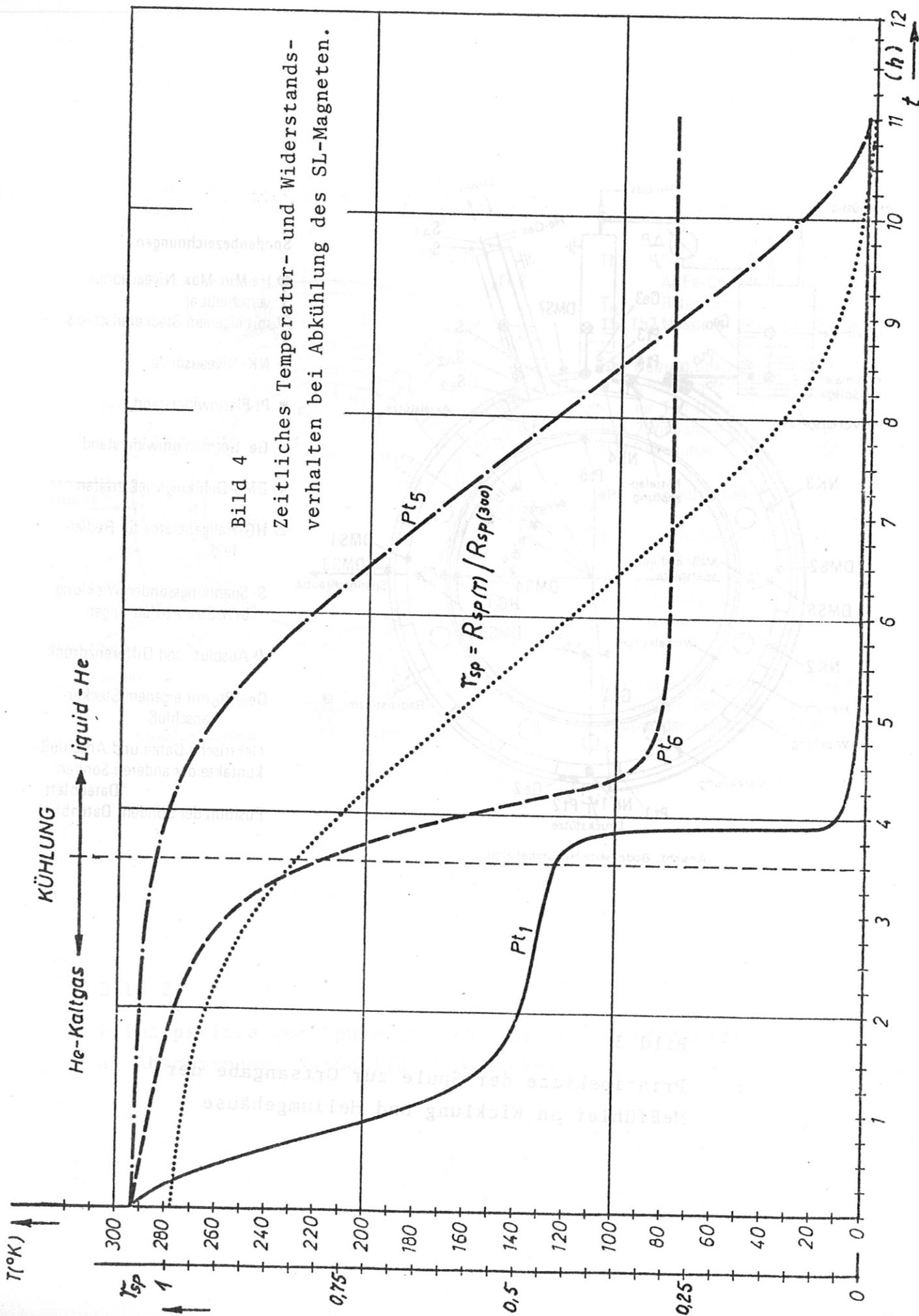


Bild 4

Zeitliches Temperatur- und Widerstandsverhalten bei Abkühlung des SL-Magneten.

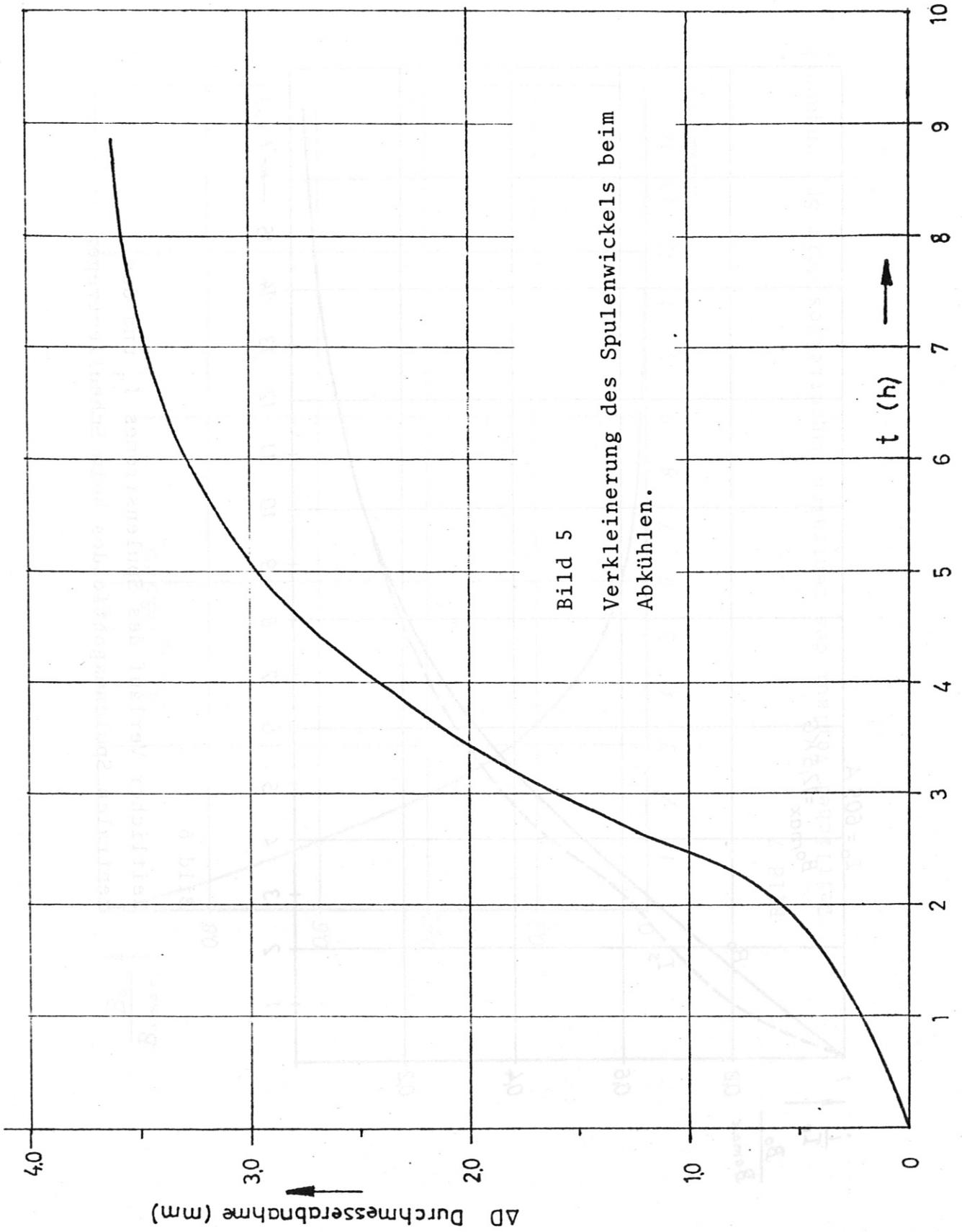


Bild 5
Verkleinerung des Spulenwickels beim
Abkühlen.

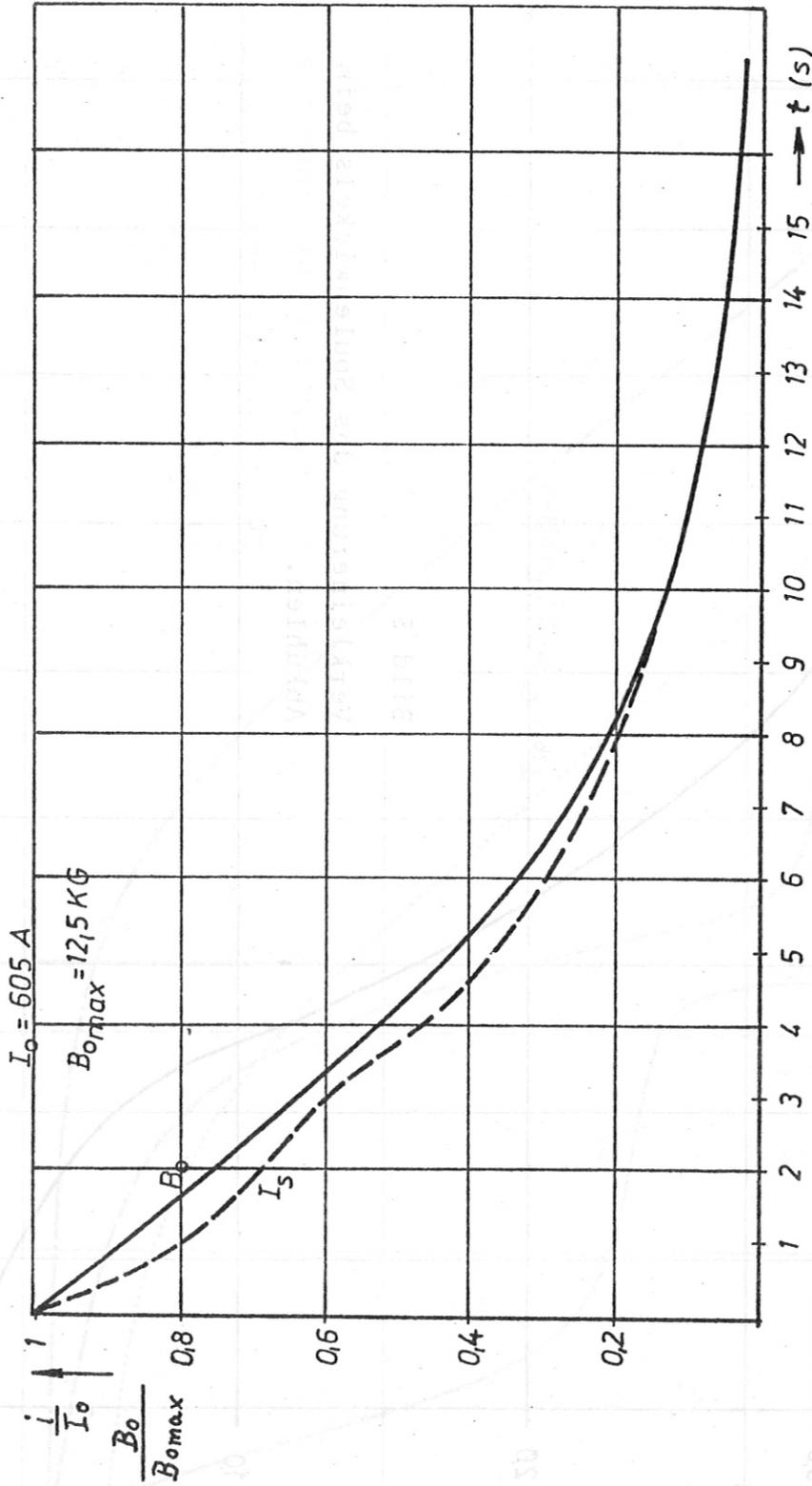


Bild 6

Zeitlicher Verlauf des Spulenstromes I_s und des zentralen Spulenmagnetfeldes beim Schnellentregen.

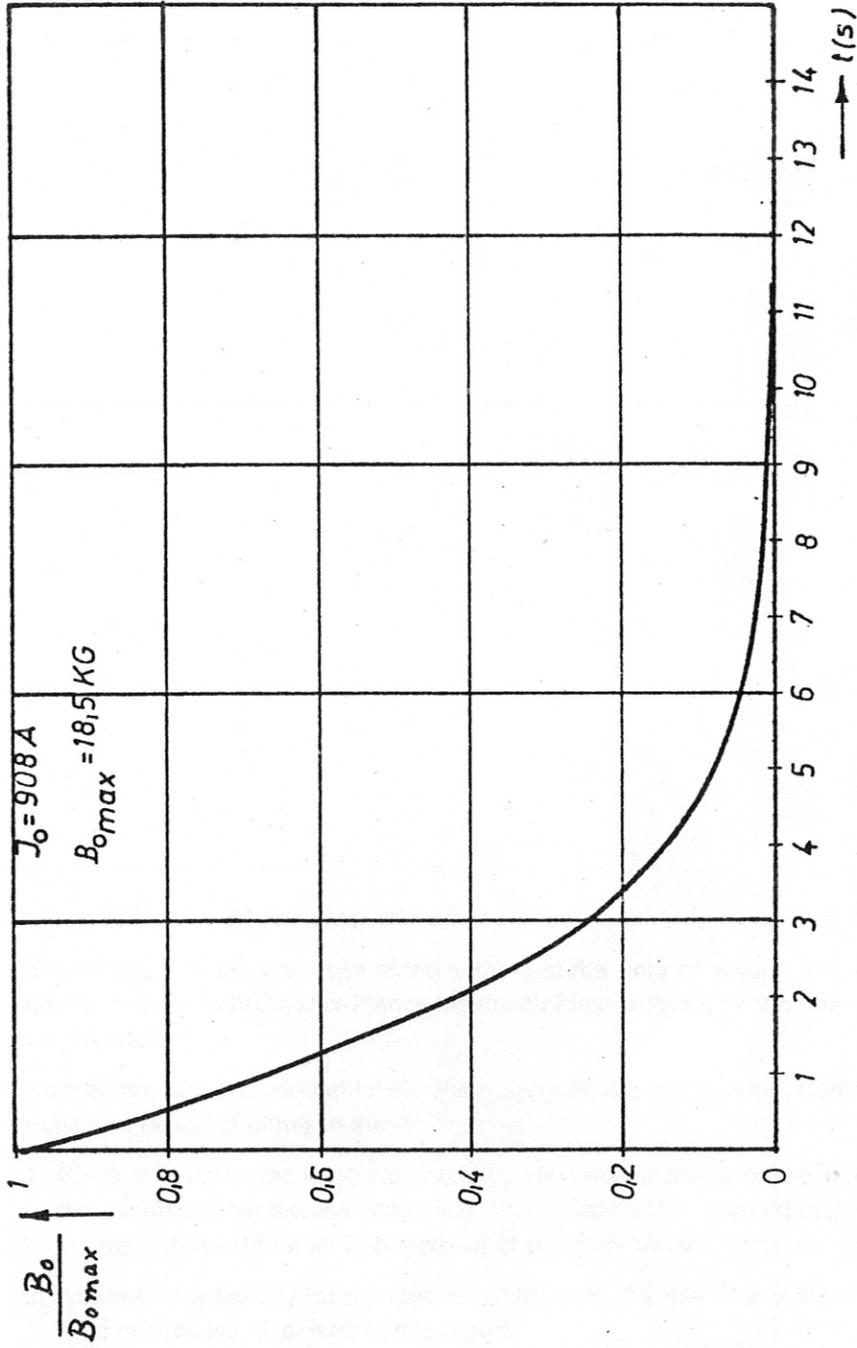


Bild 7

Zeitlicher Verlauf des zentralen Magnetfeldes beim Spulenquench