



Forschungszentrum Karlsruhe
Technik und Umwelt

Wissenschaftliche Berichte
FZKA 6486

Abschlußbericht zum Test der Wendelstein 7-X (W 7-X) Demonstrationsspule in TOSKA

**R. Heller, W. Maurer, A. Ulbricht,
F. Wüchner, G. Zahn**

**Institut für Technische Physik
Projekt Kernfusion**

I. Schoenewolf

**Max-Planck-Institut für Plasmaphysik,
Garching/Greifswald**

Juli 2000

**Forschungszentrum Karlsruhe
Technik und Umwelt**

**Wissenschaftliche Berichte
FZKA 6486**

**Abschlußbericht zum Test der
Wendelstein 7-X (W 7-X)
Demonstrationsspule in TOSKA**

**R. Heller, W. Maurer, I. Schoenewolf*, A. Ulbricht,
F. Wüchner, G. Zahn**

**Institut für Technische Physik
Projekt Kernfusion**

***Max-Planck-Institut für Plasmaphysik,
Garching/Greifswald**

IPP Dokumentennummer KKS-Nr.: 1-FB-T0010.0

**Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe
2000**

Zusammenfassung

Im Rahmen des Projektes supraleitender Stellarator Wendelstein 7-X (W 7-X) des Max – Planck - Instituts für Plasmaphysik, Garching / Greifswald wurde eine Demonstrations-Spule (W 7-X DEMO Spule) der Torusspulen gebaut, um die industrielle Fertigung einer nichtplanaren supraleitenden Torusspule nachzuweisen. Die ausgewählte Torusspule hat die stärkste Nichtplanarität und ist in voller Größe von der Industrie (Noell, Würzburg / Ansaldo, Genua) gebaut worden. Die W 7-X DEMO Spule wurde in der TOSKA-Anlage des Forschungszentrums Karlsruhe im Hintergrundfeld der EURATOM LCT Spule getestet, um vergleichbare mechanische Spannungen in Wicklung und Gehäuse unter Betriebsbedingungen bei 4 K zu erzeugen. Die Testkonfiguration (EURATOM LCT Spule, W 7-X DEMO Spule) ist erfolgreich in zwei Wochen auf Betriebstemperatur abgekühlt worden. Die W 7-X DEMO Spule allein erreichte im Stromtest 19,9 kA, was dem erwarteten kritischen Stromwert der vorhergehenden Leitertests entspricht. Im Hintergrundfeld der LCT-Spule (14 kA) erreichte die W 7-X DEMO Spule (16 kA) den Nennlastfall und konnte unter diesen Betriebsbedingungen stabil betrieben werden. Aufgrund des hohen Druckabfalls über der Wicklung und der unzureichend angebrachten Gehäusekühlung war eine sorgfältige Optimierung der kryogenen Betriebsparameter in den einzelnen Testphasen erforderlich. Das Quenchedetektionssystem arbeitete zuverlässig bei jedem der 10 Übergänge der Spule in die Normalleitung und leitete bei den vorgegebenen Grenzwerten eine Sicherheitsentladung ein. Alle Sicherheitsentladungen wurden voll beherrscht. Die W 7-X DEMO Spule konnte bei ihren Auslegungsdaten sicher betrieben werden. Die gemessenen mechanischen Spannungen sind im Rahmen des vereinfachten finite Elementmodells erklärbar. Auf der Basis der erzielten Ergebnisse konnte die Fertigung der Serienspulen des W 7-X Torus freigegeben werden.

Final Report about the Test of the Wendelstein 7-X (W 7-X) Demonstration Coil in TOSKA

Abstract

In the frame of the project of the superconducting stellarator Wendelstein 7-X (W 7-X) of the Max – Planck - Institut für Plasma Physik , Garching / Greifswald a demonstration coil (W 7-X DEMO coil) of the toroidal field coils was constructed in order to demonstrate the fabrication of a nonplanar superconducting toroidal field coil. The selected coil type was the most difficult one for fabrication. It was fabricated in full size in collaboration of two European companies (Noell, Würzburg / Ansaldo, Genua). The W 7-X DEMO coil was tested in the TOSKA facility of the Forschungszentrum Karlsruhe in the background field of the EURATOM LCT coil in order to generate comparable stresses in winding and coil case under operation conditions at 4 K. The test configuration (EURATOM LCT coil, W 7-X DEMO coil) was successfully cooled down within two weeks. The W 7-X DEMO coil achieved in the single coil current test a quench current of 19.9 kA. This corresponds to the expected critical current of the previous conductor tests. In the background field of the LCT coil (14 kA) the W 7-X DEMO coil (16 kA) achieved the rated load case. The W 7-X DEMO coil was operated stable under this operation conditions. According to the large pressure drop across the winding and the insufficient number of cooling channels at the coil case a careful optimization of the cryogenic operation parameters in the single phases of the test was indispensable. The quench detection system worked reliable for 10 transition of the coil in the normal conducting state. The following safety discharge was mastered. The W 7-X DEMO coil was operated reliable at its design parameters. The measured mechanical stresses were in agreement with the expectations taking in account the simplified finite element model for the calculations. According to the achieved test results the series production of the W 7-X torus coils was released.

Inhaltsübersicht

Vorwort	1
Gesamtinhaltsverzeichnis.....	3
Kurzfassung des Testablaufs und der Ergebnisse	9
Danksagung	12
Detaillierter Bericht Teil 1 – Teil 4	15-288
Teil 1 : Allgemeiner Teil	15
Teil 2 : Kryogenes Verhalten der W 7-X DEMO Spule.....	119
Teil 3 : Elektromagnetisches Verhalten der W 7-X DEMO Spule	171
Teil 4 : Mechanisches Verhalten der W 7-X DEMO Spule....	231

Vorwort

In diesem Bericht sind einige Abkürzungen verwendet worden, die an dieser Stelle kurz erläutert werden sollen.

DEMO Spule: Demonstrationsspule

FZK: Forschungszentrum Karlsruhe

IPP: Max-Planck-Institut für Plasmaphysik

sl: supraleitend

SLS: supraleitende Stromschiene

TOSKA: Toroidale Spulentestanordnung Karlsruhe

CICC: Cable in Conduit Conductor

LCT: Large Coil Task

ITER: International Tokamak Experimental Reactor

TF: Toroidalfeld

Gesamtinhaltsverzeichnis

Kurzfassung des Testablaufs und der Ergebnisse

Danksagung

Detaillierter Bericht Teil 1 - Teil 4

Teil 1: Allgemeiner Teil

1.1: Einleitung	19
1.2: Superconductor	21
<i>1.2.1 Materials data</i>	<i>21</i>
<i>1.2.2 Measurement of mechanical quantities (Al jacket)</i>	<i>22</i>
<i>1.2.3 Composition of the winding</i>	<i>23</i>
<i>1.2.4 Production of the strands</i>	<i>24</i>
<i>1.2.5 Cable production</i>	<i>26</i>
<i>1.2.6 Data of unit lengths of the conductor</i>	<i>27</i>
<i>1.2.7 Mass flow measurements</i>	<i>28</i>
<i>1.2.8 Measurement of the critical current on samples of the ready-to-wind superconductor</i>	<i>30</i>
<i>1.2.9 Temperature dependence of the critical current</i>	<i>33</i>
1.3: Coil data	37
<i>1.3.1 Main parameters of W 7-X DEMO coil</i>	<i>38</i>
<i>1.3.2 Visualisation of the 64 elements of the winding</i>	<i>39</i>
<i>1.3.3 Main parameters of the W 7-X DEMO coil</i>	<i>40</i>
<i>1.3.4 Flow test results of the W 7-X DEMO coil at RT</i>	<i>43</i>
<i>1.3.5 Inductance and stored energy</i>	<i>44</i>
<i>1.3.6 Magnetic field information</i>	<i>45</i>
1.4: Ablauf des Testes	46
<i>Literatur zu 1.4</i>	<i>48</i>
<i>Anhang zu 1.4, Tagesprotokolle</i>	<i>51</i>
1.5: Zusammenstellung der Stromtests	99

Teil 2: Kryogenes Verhalten der W 7-X DEMO Spule

2.1: Abkühlung von W 7-X DEMO Spule und LCT Spule	124
2.2 Stationäres Verhalten und Strombetrieb.....	128
<i>2.2.1 Füllen vom Kontrollkryostat B250 und Umstellen auf Pumpenbetrieb.....</i>	<i>131</i>
<i>2.2.2 Betrieb der W 7-X DEMO Spule ohne LCT-Spule (Lastfall A).....</i>	<i>132</i>
<i>2.2.2.1 Betrieb der W 7-X DEMO Spule bei 4,5 K.....</i>	<i>132</i>
<i>2.2.2.2 Betrieb der W 7-X DEMO Spule bei 3,8 K (Lastfall A)</i>	<i>139</i>
<i>2.2.3 Betrieb der W 7-X DEMO Spule mit LCT Spule (Lastfall B und C).....</i>	<i>145</i>
<i>2.2.4 Druckverlust der Doppellagen der W 7-X DEMO Spule.....</i>	<i>149</i>
<i>2.2.5 Thermische Verluste und Restgaswärmeleitung</i>	<i>149</i>
<i>2.2.5.1 Thermische Verluste der W 7-X Wicklung</i>	<i>149</i>
<i>2.2.5.2 Thermische Verluste vom W 7-X Gehäuse</i>	<i>150</i>
<i>2.2.5.3 Thermische Verluste des Zwischenrahmens</i>	<i>152</i>
<i>2.2.5.4 Thermische Verluste auf die Einspeisezone</i>	<i>153</i>
<i>2.2.5.5 Restgaswärmeleitung durch bestehende Leckagen.....</i>	<i>153</i>
2.3 Sicherheitsentladung und Quenchverhalten	159
<i>2.3.1 Quenchverhalten und Rückkühlung der W 7-X DEMO Spule im Lastfall A.....</i>	<i>159</i>
<i>2.3.2 Quenchverhalten und Rückkühlung der W 7-X DEMO Spule im Lastfall C.....</i>	<i>164</i>
2.4 Erwärmung der Testanordnung	168
2.5 Zusammenfassung	170

Teil 3: Elektromagnetisches Verhalten der W 7-X DEMO Spule

3.1 Quenchergebnisse der W 7-X DEMO Spule.....	175
3.1.1 Literatur.....	182
3.A Anhang	183
3.2 Das Quenchdetektions-System der W 7-X DEMO Spule	197
3.2.1 Das Quenchdetektions-System der Wicklung der W 7-X DEMO Spule.....	197
3.2.2 Das Quenchdetektions-System der supraleitenden Stromschienen der W 7-X DEMO Spule.....	199
3.2.3 Literatur	199
3.3 Sicherheitsentladung	202
3.3.1 Die Stromversorgung der W 7-X DEMO Spule beim Test in TOSKA.....	203
3.3.2 Die Stromversorgung der LCT DEMO Spule beim Test der W 7-X DEMO Spule in TOSKA	204
3.3.3 Literatur	205
3.4 Genauigkeit der Strommessung	209
3.4.1 Literatur	209
3.5 Ergänzende Untersuchungen.....	210
3.5.1 Bestimmung der Wärmeleitung Gehäuse – Wicklung.....	210
3.5.2 Bestimmung der Stabilitätsgrenze durch AC – Verluste der Wicklung	213
3.6 Bestimmung der Kontaktwiderstände.....	219
3.6.1 Doppellagenkontakte	219
3.6.2 Kontaktwiderstände zwischen den SL-Stromschienen und der W 7-X DEMO Spule bzw. den Stromzuführungen	220
3.6.3 Diskussion der Kontaktwiderstände.....	221
3.B Abschätzung der Kontaktwiderstände	223
3.7 Zusammenfassung	229

Teil 4: Mechanisches Verhalten

4.1:	Bewertung der Meßgenauigkeit der mechanischen Sensoren GDI und GRI	235
4.2:	Bewertung der horizontalen Abstützung	239
4.3.	Mechanisches Verhalten der Testanordnung	243
4.3.1.	Abstützkonzept und Belastungen.....	243
4.3.2.	Verformungsmessung	244
4.3.2.1.	Meßaufbau	244
4.3.2.2.	Meßvorbereitungen.....	244
4.3.2.3.	Abkühlung und Lastfall A	245
4.3.2.4.	Lastfall B und C.....	247
4.3.2.5.	Zusammenfassung zur Verformungsmessung.....	248
4.3.3.	Dehnungsmessung	249
4.3.3.1.	Meßaufbau	249
4.3.3.2.	Abkühl- und Aufwärmvorgang.....	250
4.3.3.3.	Lastfall A	252
4.3.3.4.	Lastfall B und C.....	254
4.3.3.5.	Zusammenfassung zur Dehnungsmessung.....	255
	Anlagen zu Teil 4.3.....	257

Kurzfassung des Testablaufs und der Ergebnisse

Allgemeines

Im Rahmen des Forschungsprogrammes der IPP-EURATOM-Assoziation wurde der Aufbau des Fusionsexperimentes Wendelstein 7-X (W 7-X) beschlossen.

Zum Nachweis der Herstellbarkeit der dafür erforderlichen komplexen, nichtplanaren supraleitenden Magnetspulen hat das Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, Garching / Greifswald eine 1:1 Demonstrationspule (W 7-X DEMO Spule) von der Firma Preussag Noell GmbH, Würzburg (Hauptunterauftragnehmer ANSALDO, Genua) bauen lassen.

Der dafür ausgewählte Torusspulentyp hat die größte Nichtplanarität und enthält alle erwarteten, wesentlichen Fertigungsschwierigkeiten.

Um die komplexe Wicklungsgeometrie realisieren zu können, wurde ein Supraleiterkabel in eine weiche Hülle aus einer speziellen Al-Legierung eingebettet. Diese wird nach dem Wickelvorgang ausgehärtet, um die notwendige Festigkeit des Wickelpaketes gegenüber den beim Betrieb auftretenden Lorentz-Kräften zu gewährleisten. Die Stromtragfähigkeit des Leiters ist mit einer Serie von Testspulen zuvor abgesichert worden. Das harzprägnierte Wickelpaket (Glas-Epoxydharz) ist kraftschlüssig in ein massives Edelstahlgehäuse eingebettet. Für die Realisierung der im Test notwendigen kraftschlüssigen Verbindung zwischen der W 7-X DEMO Spule und der LCT Spule (Hintergrundfeld) bedurfte es einer speziellen Abstützstruktur.

Die fertige Testanordnung (W 7-X DEMO Spule und Abstützstruktur) wurde für den Test elektrisch, thermohydraulisch und mechanisch instrumentiert, um das integrale Verhalten im Test mit den Erwartungswerten der Auslegung vergleichen zu können.

Für den Test der W 7-X DEMO Spule wurde die TOSKA-Anlage und die LCT Spule verwendet. Die Kryoversorgung mußte speziell für die Anforderungen der Kühlkreisläufe der W 7-X Spule ausgelegt werden. Die Stromversorgung erfolgte durch ein 30 kA Netzgerät in Verbindung mit der POLO Schaltanlage. Zwei Stromzuführungen wurden auf der Basis der Betriebserfahrungen beim Test der LCT Spule entsprechend modifiziert und neu gebaut.

Der Test, beginnend mit der Abkühlung am 25. Mai 1999 und gerechnet bis zur Erstinspektion nach dem Aufwärmen am 1. September 1999, dauerte ca. 3 Monate.

Die W 7-X Spule wurde bei bereits installierter LCT Spule eingebaut. Nach der Montage und Instrumentierung konnte im evakuierten Vakuumbehälter der integrale Abschlußtest vor dem Start der Abkühlung durchgeführt werden. Die Installationsarbeiten und Prüfungen wurden gemeinsam mit dem IPP durchgeführt.

Der Abkühlungsvorgang dauerte bis zum Erreichen des supraleitenden Zustandes 13 Tage. Die Stromtests begannen gemäß Testprogramm mit Lastfall A (W 7-X Spule allein), bei einer Vorlauftemperatur von 4,8 K und wurden dann mit 3,8 K fortgesetzt, in Stromstufen von 25 % der bei Nennstrom gespeicherten Energie. Die W 7-X Spule hat während des gesamten Tests mehrfach einer Prüfspannung von 2,4 kV mit gleichbleibend guten Isolationswerten standgehalten. Sie erreichte ihren Nennstrom ohne Probleme.

Die W 7-X Spule erreichte im Lastfall A mit 19,88 kA ihre Betriebsgrenze bei 3,8 K (Quench) Eintrittstemperatur in die Einspeisezone.

Nach einem Quench bei 14,8 kA konnte der Nennlastfall B sicher betrieben und damit der Lastfall B abgeschlossen werden. Die Betriebsgrenze im Lastfall C (W 7-X Stromwert bis zum Quench; LCT Spule konstant bei 14 kA) wurde bei 16,73 kA und einer Eintrittstemperatur in die Wicklung von 4,1 K erreicht.

Durch Wiederholung der Lastfälle A und B mit Vergleich der mechanischen Daten, die gegenüber den früheren Messungen keine Abweichungen zeigten, waren die Stromtests gemäß dem Testprogramm abgeschlossen.

Alle Sicherheitsentladungen konnten von dem kryogenen System der TOSKA Anlage ohne Heliumverluste an die Atmosphäre beherrscht werden. Die Rückkühlung nach Sicherheitsentladungen von höheren Strömen dauerte ca. 3 Stunden.

Das Testprogramm mit Strom war nach 5 ½-wöchiger Testzeit abgearbeitet. Gemeinsam wurde von den Projektverantwortlichen des Forschungszentrums Karlsruhe und des IPP festgestellt, daß die gewonnenen Ergebnisse die grundsätzliche Funktion der eingesetzten Technik bestätigt haben.

Nach einem abschließenden Leck- und Hochspannungstest wurde die gesteuerte Aufwärmung der Testkonfiguration begonnen, wobei die bei der Abkühlung gemachten Erfahrungen bezüglich der zulässigen Temperaturdifferenzen angewendet wurden. Nach einem abschließenden Leck- und Hochspannungstest bei Raumtemperatur konnte der Vakuumbehälter belüftet und geöffnet werden.

Die Spule wurde nach dem Ausbau für den Versand vorbereitet und verließ das Forschungszentrum Mitte Oktober 1999.

Kryotechnisches Verhalten

Die Abkühlung von Wicklung und Gehäuse der W 7-X DEMO Spule war problemlos, die nicht optimal gekühlten Lager des Zwischenrahmens begrenzten die Abkühlgeschwindigkeit bei tieferen Temperaturen. Trotzdem war eine sichere Abkühlung der gesamten Testeinrichtung mit einer Masse von 77 000 kg in 14 Tagen möglich.

Alle Tests der geplanten Lastfälle A, B, und C konnten erfolgreich durchgeführt werden. Während der gesamten Testdauer war der Betrieb aller Kryo- und Vakuumsysteme störungsfrei.

Es ergaben sich folgende Erkenntnisse und Verbesserungsmöglichkeiten:

- Der stationäre Betrieb wurde infolge unzureichender Gehäusekühlung und den damit verbundenen hohen Wärmeeinfall in die Wicklung erschwert. Außerdem verursachte ein Wärmeeinfall in der Einspeisezone eine Temperaturerhöhung des Heliums vor Eintritt in die Wicklung. Beim 3,8 K Betrieb führt zudem eine Entspannung zu einer Temperaturerhöhung auch ohne Wärmezufuhr.
- Bedingt durch die gewählte Doppellagenkühlung ist bei der W 7-X DEMO Spule nicht die niedrigere Eintrittstemperatur sondern die höhere Austrittstemperatur entscheidend für den maximal erreichbaren Spulenstrom. Hierdurch mußte der Betrieb auf eine möglichst niedrigere He- Austrittstemperatur optimiert werden.
- Die zum Teil während des gesamten Versuches offenen Rückschlagventile im Bypass zu den Venturis, verhinderten eine exakte Massenstrommessung in diesen Kühlkanälen. Dies erschwerte beim Betrieb die Beurteilung des Verhaltens der W 7-X DEMO Spule und bei der Auswertung die genaue Ermittlung der thermischen Last.

Das Quenchverhalten war problemlos und ohne He-Verluste beherrschbar und die Rückkühlung nach einem Quench ohne wesentliche Störung des Kühlsystems in 2-3 Stunden möglich.

Die kryogene Eigenschaften der W 7-X DEMO Spule zeigten keine Veränderungen während der gesamten Tests von der Abkühlung, über den Testbetrieb mit entsprechenden Lastwechseln und Erwärmung nach dem Testbetrieb. Die Dichtheit wurde vor der Abkühlung, bei Betriebstemperatur vor und nach den Tests sowie im wieder erwärmten Zustand geprüft. Die gemessene Leckrate war immer besser als der spezifizierte Wert.

Elektrodynamisches Verhalten

- Das Quenchdetektionssystem der W 7-X Demo Spule hat problemlos gearbeitet, wobei die dem Leiter eigene sehr hohe Quenchausbreitungsgeschwindigkeit zu recht kurzen Detektionszeiten führte.
- Im Lastfall A erreichte die W 7-X Demo Spule knapp 90% des kritischen Stromes, der sich durch Extrapolation aus dem mittleren kritischen Strom der Supraleiterdrähte ergeben würde, wie sie der Hersteller angegeben hat. Unter der Annahme, dass der gemessene Quenchstrom nicht kraftbegrenzt ist, kann man die bei Austrittstemperaturen zwischen 5 K und 5,4 K gemessenen Quenchströme für 6,2 T, bei 4,2 K umrechnen und erhält einen Erwartungswert von knapp 30 kA.
- Im Lastfall C hat die Spule trainiert. Sie erreichte im dritten Anlauf 16,73 kA bei einer Austrittstemperatur von 5,02 K, was den nach dem Lastfall A erreichten kritischen Werten entspricht. Nach Unterbrechung durch die Sweep-Tests (Einzelspulentest, d.h. Lastfall A) bis zum Quench erreichte die Spule trotz abgesenkter Eintrittstemperatur nur noch 16,13 kA. Wahrscheinlich erscheint eine Bewegung des gesamten Wicklungspakets oder ein Teil desselben. Durch die gute thermische Ankopplung des Supraleiterkabels an die gut leitende Leiterhülle ergibt sich eine hohe Empfindlichkeit des Kabels gegen äußeren Energieeintrag. Abschätzungen der Stabilitätsgrenze haben ergeben, dass die Energiemarge des Supraleiterkabels zwischen 1 und 5 mJ/cm³ betragen hat.
- Eine Extrapolation der erzielten Ergebnisse auf die Serienspulen (Annahme: gleiche Temperatur- und Magnetfeldverteilung) ergab für den Standardfall eine genügend große Energiemarge, was für den "low shear" Fall nicht gesagt werden kann. Abhängig von der erwarteten Temperatur am Ort der kleinsten Marge, d.h. Austritt der DL 1, erhält man 14 mJ/cm³ (4,8 K) bzw 25 mJ/cm³ (4,3 K).
- Der Widerstand der Doppellagenverbindungen mußte kalorimetrisch bestimmt werden, da eine direkte elektrische Messung nicht vorgesehen war. Die gemessenen Widerstände streuten zwischen 1 nOhm und 14,3 nOhm und zeigen somit eine ungenügende Reproduzierbarkeit. Die stromschienseitigen Klemmkontakte der Spule zeigten noch erheblich höhere Widerstandswerte (zwischen 19 und 34 nOhm), was dazu führte, dass die Stromschienen genausoviel He-Massenstrom benötigten wie die gesamte Wicklung.
- In Erweiterung des eigentlichen Testprogramms wurden Untersuchungen zur Wärmeleitung durch die Wicklungsbettung durchgeführt und zur AC-Stabilität durchgeführt.

Mechanisches Verhalten

Die gemessene **Verformung** des Gehäuses an den ausgewählten Meßstellen der W 7-X DEMO Spule liegt unter den aus der FEM – Berechnungen abgeleiteten Erwartungswerten. Insgesamt liegen, unter Berücksichtigung der gegebenen Meß- und Rechengenauigkeiten, die Abweichungen aber innerhalb eines akzeptablen Bereiches.

Eine Erklärung für die niedrigeren Meßwerte liegt, ohne Zweifel, an der im FEM – Modell nicht berücksichtigten Versteifungswirkung der drei großen Lagerstützen auf das Gehäuse.

Der „scheinbare Ausfall“ von fünf Meßstrecken, kann auf eine nichtlineare Bettungscharakteristik zurückgeführt werden, die durch eine nicht ganz auf Null abgebaute Vorspannung des Wickelpaketes im Gehäuse begründet ist. Diese kann – je nach Meßlage – zusammen mit dem Bestreben der Spule bei zunehmenden Strom größer, eben sowie kreisförmig (Kesselkraft) werden zu wollen, die Verformungen teilweise kompensieren. Hierbei handelt es sich um einen 10 % - Effekt, der keine negative Auswirkungen auf die Funktionalität der

Bettung hat, sondern nur die vorspannungsfrei berechneten Verformungen in geringfügig beeinflusst.

Die gemessenen **Dehnungen** und die daraus berechneten Spannungen liegen an den meisten Meßstellen des W 7-X DEMO Spulengehäuses im Erwartungsbereich der FEM – Berechnung.

Es gibt drei nennenswerte Abweichungen (-62 bis +71%) im Lastfall A zum Rechenwert, die sich aus vereinfachenden Annahmen im FEM – Modell erklären lassen.

Zur Ermittlung der mechanischen Reserve war im Lastfall C vorgesehen, die W 7-X DEMO Spule im Hintergrundfeld der LCT Spule bis zu einem Strom von 18,3 kA zu erregen.

Im Test erreicht wurde – quenchbedingt – nur ein max. Strom von 16,7 kA (91 %). Kraftmäßig bedeutet dieses Limit 83,3 % der geplanten integralen mechanischen Beanspruchung.

Für die Auswertung wurde Lastfall B mit 14,7 kA in der W 7-X DEMO Spule und 14,0 kA in der LCT Spule ausgewählt. Die Vergleichsspannung liegt hier an 6 Meßstellen im Erwartungsbereich. Bei den restlichen 4 Meßstellen kommt es zu größeren Abweichungen (-98 bis +31%).

Die Erklärung ist sehr wahrscheinlich wiederum in den vorgenannten, gewählten Vereinfachungen zu finden.

Während aller Tests war die Stromquadrat – Proportionalität der Dehnungen sowie Spannungen bis zum Maximalstrom erfüllt. Allerdings konnten insbesondere in den berechneten Hauptspannungen kleinere Linearitätsabweichungen nachgewiesen werden, die die bereits bei den Verformungen entwickelte Hypothese hinsichtlich einer nichtlinearen Bettungscharakteristik stützen.

Insgesamt betrachtet und mit Blick auf die komplexe Spulengeometrie, kann von einer guten Übereinstimmung von Messung und Rechnung gesprochen werden.

Die generelle Eignung des gewählten Bettungskonzeptes der W 7-X DEMO Spule, welches auch bei den Serienspulen zur Anwendung kommen soll, wird durch den Test in jedem Fall voll bestätigt.

Zum Schluß sei noch erwähnt, daß nach dem Ausbau, im Rahmen einer sorgfältigen Inspektion, äußerlich keine nennenswerten Beschädigungen an der W 7-X DEMO Spule, den Lagern, dem Zwischenrahmen und der LCT Spule festgestellt wurden.

Danksagung

Die Arbeiten wurden im Rahmen der Entwicklungsgemeinschaft "Kernfusion" und darüber hinaus im Rahmen der vereinbarten speziellen Zusammenarbeit zum Stellaratorprojekt W 7-X zwischen dem Forschungszentrum Karlsruhe und dem Max-Planck-Institut für Plasmaphysik in Garching durchgeführt. Sie sind Teil des EURATOM – Fusionsprogramms.

Die Autoren danken den Herren Prof. Dr. Hennies, Prof. Dr. Komarek und Dr. Vetter für die Unterstützung bei der Durchführung des Projektes in dem vorgegebenen Rahmen.

Den Mitarbeitern des Instituts für Technische Physik, den Hauptabteilungen Prozeßdatenverarbeitung u. Elektronik und Versuchstechnik sowie den Werkstätten des Forschungszentrums Karlsruhe wird für die engagierte Arbeit bei der Vorbereitung der Testanlage, Installation der W 7-X DEMO Spule und der erfolgreichen Durchführung des Tests gedankt.

Die tatkräftige Unterstützung der Werkstätten des Max-Planck-Instituts für Plasmaphysik bei den vorbereitenden Arbeiten, dem Ein- und Ausbau der DEMO Spule in die TOSKA-Anlage,

die durch die W 7-X Projektleitung, insbesondere von den Herren Dr. Wanner und Sapper ermöglicht wurde, hat wesentlich zur zügigen Durchführung des Test beigetragen. Die Autoren danken der Projektleitung und den betreffenden Mitarbeitern für ihren engagierten Einsatz.

Teil 1: Allgemeiner Teil

Teil 1: Allgemeiner Teil	
1.1: Einleitung	19
1.2: Superconductor	21
<i>1.2.1 Materials data</i>	21
<i>1.2.2 Measurement of mechanical quantities</i>	22
<i>1.2.3 Composition of the winding</i>	23
<i>1.2.4 Production of the strands</i>	24
<i>1.2.5 Cable production</i>	26
<i>1.2.6 Data of unit lengths of the conductor</i>	27
<i>1.2.7 Mass flow measurements</i>	28
<i>1.2.8 Measurement of the critical current on samples of the ready-to-wind superconductor</i>	30
<i>1.2.9 Temperature dependence of the critical current</i>	33
1.3: Coil data	37
<i>1.3.1 Main parameters of W 7-X DEMO coil</i>	38
<i>1.3.2 Visualisation of the 64 elements of the winding</i>	39
<i>1.3.3 Main parameters of the W 7-X DEMO coil</i>	40
<i>1.3.4 Flow test results of the W 7-X DEMO coil at RT</i>	43
<i>1.3.5 Inductance and stored energy</i>	44
<i>1.3.6 Magnetic field information</i>	45
1.4: Ablauf des Testes	46
Literatur zu 1.4	48
Anhang zu 1.4, Tagesprotokolle	51
1.5: Zusammenstellung der Stromtests	99

1.1 Einleitung

Das **allgemeine Entwicklungsziel** der W 7-X DEMO Spule ist:

- **Verifikation des Herstellungsprozesses von Spule und Komponenten. (Aufgabe der beteiligten Industriepartner)**
- **Nachweis der Leistungsfähigkeit der Spule durch Testen**

Der Test in TOSKA erfolgt mit kombinierten elektrischen, magnetischen und mechanischen Parametern. Diese sollen möglichst nahe an den Standardbetriebsbedingungen liegen, so dass Wechselwirkungseffekte, die aus Komponententests nicht erkannt werden können, erfasst werden. Zusätzlich sollen Tests mit Überlastbedingungen die Sicherheitsabstände zu den Grenzbedingungen aufzeigen, um das Gesamtverhalten des Magneten besser einschätzen zu können.

Der aktuelle Test muss die **Funktionsfähigkeit der W 7-X DEMO Spule nachweisen**, d. h. im einzelnen:

- **Das kryogene Verhalten muss überprüft werden.**
- **Die Stromtragfähigkeit muss überprüft werden.**
- **Die mechanischen Beanspruchungen bzw. die Verformungen als Folge der Abkühlung auf Betriebstemperatur und der elektromagnetischen Kräfte sind zu messen und mit Vorausberechnungen zu vergleichen.**

Um das Gesamtziel zu erreichen, ist es erforderlich, die Spule im Hintergrundfeld der LCT Spule zu betreiben.

Die Funktionsfähigkeit der W 7-X DEMO Spule gilt als gesichert, wenn die vom IPP festgelegten Sollwerte der technischen und physikalischen Daten erreicht werden und wenn nach dem Test an der Spule keine Veränderungen (oder Schäden) festgestellt werden.

Das Testprogramm enthält das Messprogramm, das im wesentlichen aus zwei Punkten besteht:

- I. **Nachweis des Nennverhaltens der Spulen für W 7-X.**
- II. **Nachweis des geforderten Überlastverhaltens der Einzelspulen als industrieller Leistungsnachweis (Nachweis der mechanischen Reserve).**

Der Nachweis des Nennverhaltens wird durch die Lastfälle A und B erbracht, während das Überlastverhalten durch den Lastfall C überprüft wird.

Die Definition der zu prüfenden Lastfälle ist:

Lastfall A: DEMO Spule im Eigenfeld bis zum Quenchstrom

Lastfall B: DEMO Spule im kombinierten Feld bei Nennstrom
(Verifikation des Standardbetriebes von W 7-X mit dem zentralen
Plasmafeld B_0)

Lastfall C: DEMO Spule im kombinierten Feld bei erhöhtem Nennstrom
(Nachweis der Auslegungsreserve und der maximalen Kraft)

Tabelle 1.1: Lastfälle für die W 7-X DEMO Spule				
Überblick				
Parameter	Einheit	Lastfall A	Lastfall B	Lastfall C
LCT Spule				
Leiterstrom	kA	0.0	14.0 bei 3.8 K	14.0 bei 3.8 K
Spulenstrom	MA	0.0	8.232	8.232
W 7-X DEMO Spule				
Leiterstrom	kA	24 bei 3.8 K	14.7 bei 3.8 K	18.3 bei 3.8 K
Aktiver Spulenquerschnitt	mm ²	160 x 200.8		
Spulenstrom	MA	2.88	1.764	2.196
Mittlere Stromdichte	MA/mm ²	89.64	54.90	68.34
Maximales Magnetfeld	T	7.3	6.07	7.06
Mittlere Kraftdichte <k>	MN/m ³	85.1	103.8	138.3
Resultierende Seitenkraft F_y	MN	~ 0	10.6	13.1

1.2 Superconductor

(from the internal „Manual for the DEMO coil test“)

1.2.1 Materials data

This chapter contains useful data for the technical superconductor of W 7-X. It is a so-called “**Cable in Conduit Conductor**” (CCIC). The conductor for W 7-X has a **NbTi/Cu cable** with a **jacket out of an Al-Alloy**.

The **NbTi(46.5)** material is delivered from Teledyne Wah Chang, Alabama, USA.

The stabilisation material is **Cu 99.9 ETP**.

Properties of the **jacket material** are given in the following table Table 1.2.1-1.

Trade name	Uni/9006/1	
Al-Alloy	6060/H Treatment F (T6)	
Yield stress	110 MPa	
Tensile stress	123 MPa	
Elongation	16.3%	
Brinell hardness	41	
Composition	Si	0.415 (?)
	Fe	0.199
	Cu	0.011
	Mn	0.019
	Mg	0.463
	Cr	0.010
	Zn	0.031
	Ti	0.028
	Pb	0.008
	Zr	0.001
	Ni	0.003

1.2.2 Measurement of mechanical quantities (Al jacket)

The following Table 1.2.2-1 contains the results of measurements for some mechanical quantities. These data were received on conductor samples of the different conductor lengths 2/1, 1/3, 2/2, 2/3, 1/1 and 3/1.

Table 1.2.2-1: Results of mechanical tests on conductor samples						
Property	2/1	1/3	2/2	2/3	1/1	3/1
At Room Temperature (RT) before ageing						
Yield stress [MPa]						145
Ultimate Tensile stress [MPa]						182
Elongation [%]						25
HB (Brinell hardness)						40
At Room Temperature after ageing						
Yield stress [MPa]	218 (top) 221 (end)	220 (top) 217 (end)	219 sample 1 216 sample 2	218 (top) 216 (end)	215 (top) 222 (end)	216
Ultimate Tensile stress [MPa]	243 (top) 246 (end)	245 (top) 244 (end)	247 sample 1 243 sample 2	246 (top) 245 (end)	243 (top) 248 (end)	244
Elongation [%]	12 (top) 13 (end)	11 (top) 13 (end)	10 sample 1 12 sample 2	11 (top) 13 (end)	12 (top) 12 (end)	13
HB	73 (top) 74 (end)	74 (top) 71 (end)	70 sample 1 71 sample 2	74 (top) 70 (end)	71 (top) 70 (end)	70
At T = 4.2 K						
Yield stress [MPa]	287	279 sample 1 277 sample 2	279 sample 1 277 sample 2	304	280	290
Ultimate tensile stress [MPa]	461	454 sample 1 453 sample 2	454 sample 1 453 sample 2	486	449	448
Elongation [%]	21	23 sample 1 24 sample 2	23 sample 1 24 sample 2	22.5	23.2	20

1.2.3 Composition of the winding

The winding of the W 7-X DEMO coil consists of **6 double layers** (DL). Each layer is formed by about 200 m of the CICC.

The **conductor identification** for the double layers is given in the following Table 1.2.3-1.

Table 1.2.3-1: Winding composition	
Identification of the conductor length	Number of double layer (DL)
2/1	1 (inner)
1/3	2
2/2	3
2/3	4
1/1	5
3/1	6 (outer)

1.2.4 Production of the strands

Four **ingots** for the production of the strands were used with the numbers 164, 165, 166 and 167.

3 billets were produced from ingot No.164: 164/1, 164/2 and 164/3.

2 billets were produced from ingot No. 165: 165/1 and 165/2.

4 billets were produced from ingot No. 166: 166/1, 166/2, 166/3 and 166/4.

2 billets were produced from ingot No. 167: 167/1 and 167/2.

The **billets** were drawn down to a wire with 0.550 mm diameter (tolerance ± 0.003 mm), 132 filaments with 26 μm diameter and 4 μm distance between the filaments. Samples were taken from the “top” and the “end” of the wire and measured. The results are given in the following Table 1.2.4-1. The n is the index describing the current transfer from the superconductor to the normal conducting stabilizing material Cu. Cu/Sc is the ratio of areas of Cu to the superconducting material. I_c is the critical current and J_c the critical current density. RRR is the ratio of specific resistivity at 295 K to that at 10 K.

Table 1.2.4-1: Measurement results for I_c -measurement at $T = 4.2$ K, 6.2 T, $E = 0.1$ $\mu\text{V}/\text{cm}$ on short samples with 0.55 mm diameter.

Billet No.	n	Cu/Sc	$I_c(E)$ [A]	$J_c(E)$ [A/mm ²]	RRR		
164/1 top	42	2.17	184	2455	156		
164/1 end	39	2.16	185	2460	148		
164/2 top	39	2.16	185	2460	148		
164/2 end	41	2.12	187	2455	139		
164/3 top	41	2.12	187	2455	139		
164/3 end	40	2.16	183	2434	142		
165/1 top	42	2.13	187	2463	153		
165/1 end	40	2.15	184	2439	151		
165/2 top	40	2.15	184	2439	151		
165/2 end	41	2.11	189	2474	147		
166/1 top	39	2.15	185	2452	152		
166/1 end	41	2.12	186	2442	144		
166/2 top	41	2.12	186	2442	144		
166/2 end	40	2.14	183	2418	146		
166/3 top	40	2.14	183	2418	146		
166/3 end	42	2.16	184	2447	155		
166/4 top	42	2.16	184	2447	155		
166/4 end	41	2.17	182	2428	149		
167/1 top	44	2.13	183	2410	138		
167/1 end	42	2.12	188	2468	146		
167/2 top	42	2.12	188	2468	146		
167/2 end	39	2.15	182	2413	153		

The following figure Fig. 1.2.4.1 shows the **cross section of a strand**.

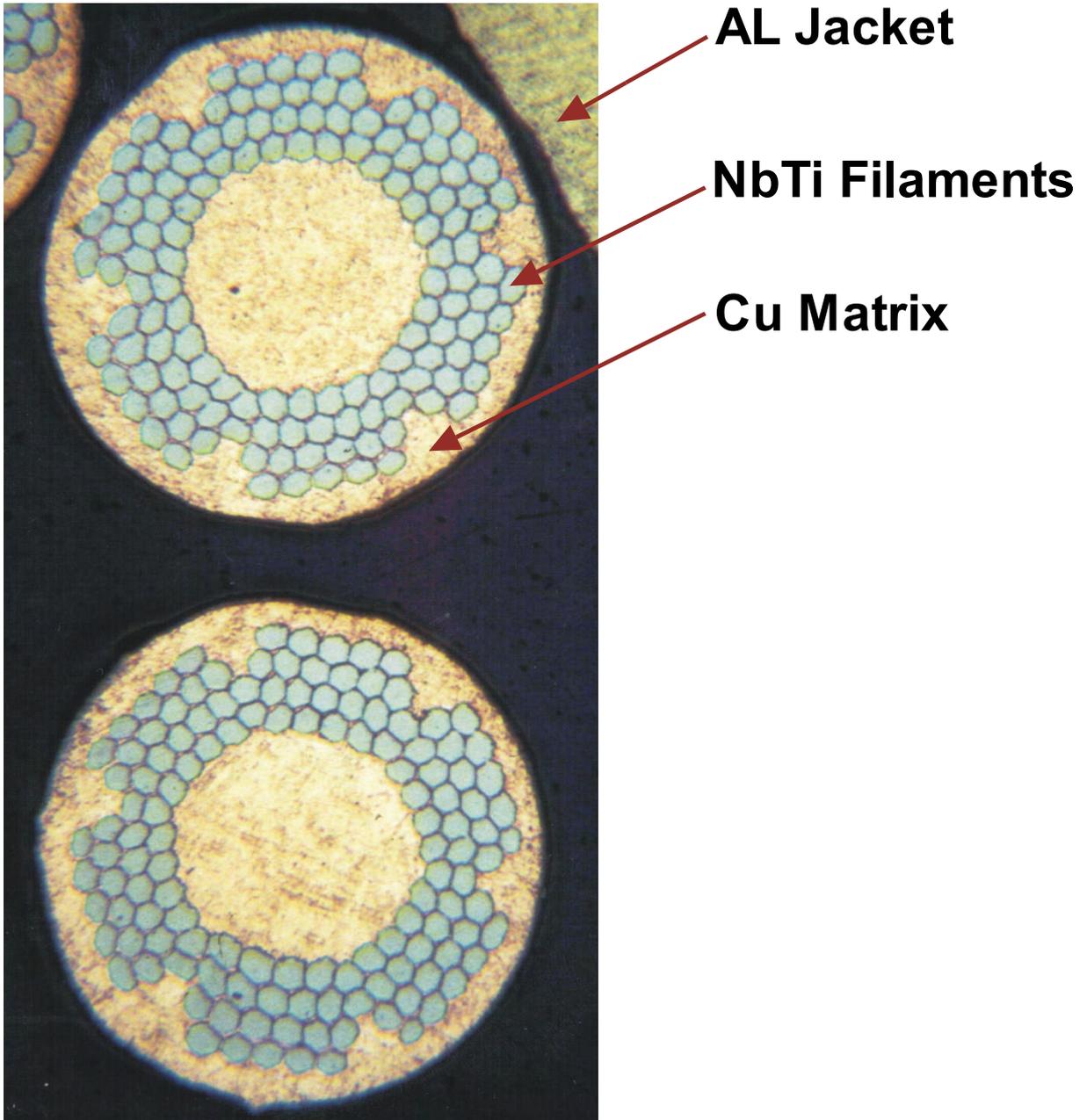


Fig. 1.2.4.1: Cross section of the strand

1.2.5 Cable production

Two cables No. 1 and 2 were produced first.

Cable 1 consists of 192 strands, 96 strands from ingot No. 164 and 96 strands from ingot No. 166.

A number of 64 triplets (3), each of 620 m length, were produced and spooled.

A number of 16 quadruplets (3 x 4) from the 64 triplets were produced, each of 610 m length.

A number of 4 quadruplets (3 x 4 x 4) were produced, each of 605 m length.

The final length of the cable (3 x 4 x 4 x 4) was 600 m.

Cable 2 consists of 192 strands, 96 strands from ingot No. 165 and 96 strands from ingot No.167.

It was produced in the same way as cable 1, but the lengths are different: 650 m for (3), 640 m for (3 x 4), 630 m for (3 x 4 x 4) and 625 m for the final cable (3 x 4 x 4 x 4).

Cable 1 and 2 were cut in three pieces each. These pieces are called unit lengths of the cable. The extrusion process was performed on these unit lengths. The result are the unit lengths of the complete conductor. **One unit length of the conductor is sufficient for one double layer.** Some of their properties are given in the following table Table 1.2.5-1.

Table 1.2.5-1: Properties of the different conductor unit lengths					
Name	Extrusion date	Extruded length [m]	Void fraction [%] (skinpassed)	Width [mm]	Thickness [mm]
1/1	23. 10. 95	205	38.58	14.76 – 14.88	14.75 – 14.92
1/2	23. 10. 95	180	37.70	14.73 – 14.86	14.70 – 14.86
1/3	23. 10. 95	185	38.09	14.72 – 14.84	14.71 – 14.85
2/1	05. 12. 95	183	37.43	14.73 – 14.86	14.74 – 14.86
2/2	05. 12. 95	198	37.22	14.77 – 14.85	14.77 – 14.85
2/3	05. 12. 95	200	37.05	14.79 – 14.85	14.79 – 14.85
The unit length No.1/2, according to customers request, was substituted with unit length 3/1.					
3/1		260			

The unit length 3/1 consists of 192 strands, 94 from ingot No. 164, 29 from ingot No. 165, 40 from ingot No. 166 and 29 from ingot No. 167. The lengths are 270 m for (3), 265 m for (3 x 4), 262 m for (3 x 4 x 4) and 260 m for the final cable (3 x 4 x 4 x 4).

The twist pitches for the cable stages are: for stage (3) 25 mm; for stage (3 x 4) 50 mm; for stage (3 x 4 x 4) 75 mm and for the final cable (3 x 4 x 4 x 4) 150 mm. The twist pitch of the strand is 25 mm.

The extrusion procedure and the quality of the extruded cables No. 1 and 2 are described in the documentation by Noell, Volume 5, last part, page 67 (of 208) up to page 80 (of 208).

1.2.6 Data of unit lengths of the conductor

The unit lengths were heat treated at about 500°C (called homogenisation). The following data in Table 1.2.6-1 are collected from the Noell documentation, Volume 5:

Table 1.2.6-1: Data of the different cables for the double layers						
	2/1(DL 1)	1/3 (DL 2)	2/2 (DL 3)	2/3 (DL 4)	1/1 (DL 5)	3/1 (DL 6)
T _{furnace, initial}	504°C, 504°C	510°C, 509°C	505°C, 505°C	505°C, 506°C	505°C, 505°C	505°C, 506°C
t _{salt bath}	25 s					
t _{transfer}	20 s					
T _{furnace, final}	488°C, 487°C	489°C, 490°C	491°C, 479°C	478°C, 478°C	479°C, 475°C	480°C, 479°C
Void fraction (%)	37.1	37.9	37.30	37.03	38.5	38.52 (top) 38.12 (end)
Pressure test	50 bar on unit length, 500 bar on samples	50 bar on unit length, 500 bar on samples	50 bar on unit length, 500 bar on samples	50 bar on unit length, 500 bar on samples	50 bar on unit length, 500 bar on samples	50 bar on unit length, 500 bar on samples
Leak test	$L < 1.4 \cdot 10^{-9}$ mbar · l/s	$L < 1.0 \cdot 10^{-9}$ mbar · l/s	$L < 9.52 \cdot 10^{-11}$ mbar · l/s	$L < 2.01 \cdot 10^{-9}$ mbar · l/s	$L < 2.05 \cdot 10^{-9}$ mbar · l/s	$L < 2.0 \cdot 10^{-9}$ mbar · l/s
Mass flow measurements	given below					
Results of mechanical tests	given below					
Length [m]	183	176.5	194	201	205	214

1.2.7 Mass flow measurements

The mass flow measurement for the unit length 2/1 was made with Helium and Nitrogen at room temperature. The results are given in Table 1.2.7-1.

Pressure [bar (rel)]	Q [Nℓ/min] Helium	Q [Nℓ/min] Nitrogen
5		4.85
8		9.5
10		13
12		17
13.5		20.5
15	40	> 23.5
20	60	
25	83.5	

Only Helium was used for the measurement of the other 5 unit lengths. The results are shown in Table 1.2.7-2.

	1/3	2/2	2/3	1/1	3/1
Pressure [bar (rel)]	Q [Nℓ/min] Helium				
4	5.5	7.4	7.9	8.7	7.2
5	6.7				
6	8.5	8.5	12.3	13.0	10.1
8	13.7	17.0	17	18.1	13.8
10	20.4	22.4	21.6	23.1	18.5
12	26.6	27.8	27.5	30.4	22.8
14	32.5	33.9	34.0	36.5	27.9
15	36.8	37.2	36.8	41.2	31.1
19		51.0	52.0	57.8	42.7
20		56.4	56.7	63.2	46.0

The following picture Fig. 1.2.7.1 shows the results.

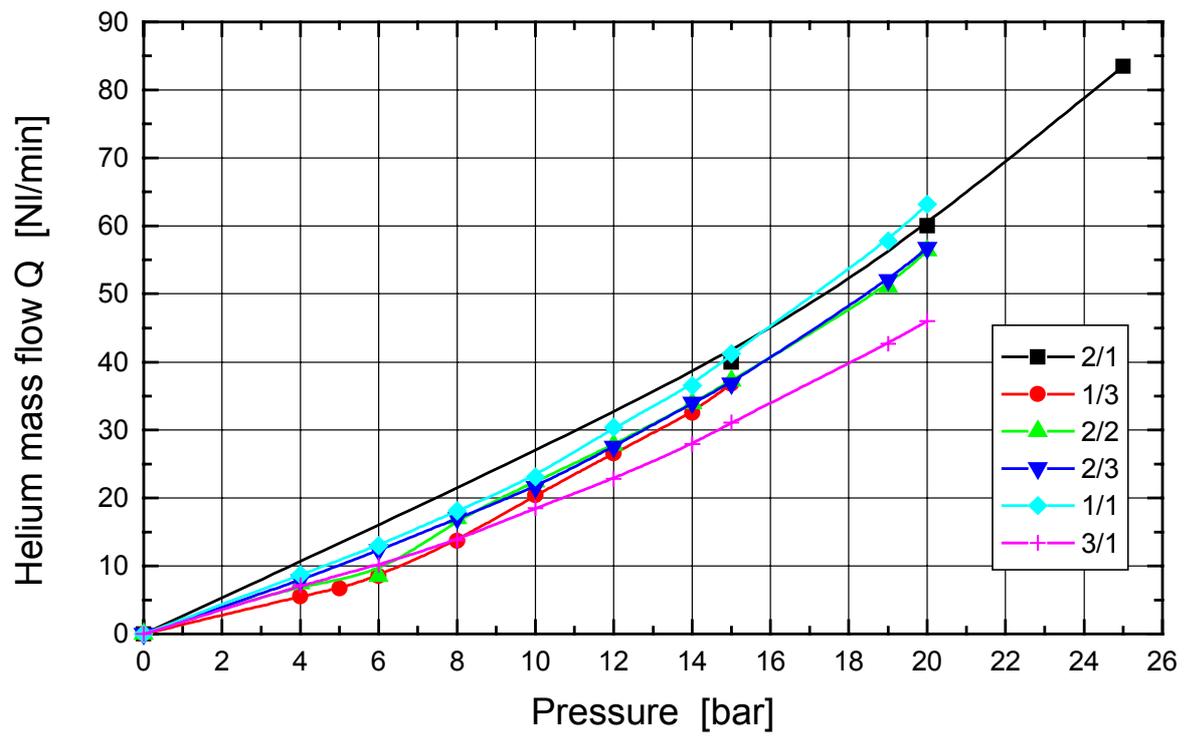


Fig. 1.2.7.1: Results of mass flow measurement at room temperature.

1.2.8 Measurement of the critical current on samples of the ready-to-wind superconductor

The following 6 tables Table 1.2.8-1 to Table 1.2.8-6 contain the measured quantities of the 6 unit lengths which are used for the Demonstration coil. The average values are used for the pre-calculation of the critical current for the superconductor.

Table 1.2.8-1: Critical current measurement: T = 4.2 K; B = 6.2 T; E = 0.1 μV/cm on W 7-X strand, diameter 0.55 mm, extracted from unit length 2/1 after 500°C treatment (homogenisation)				
Identification	n	Cu/Sc	I_c(E) [A]	J_c(E) [A/mm²]
2-1 top1	45	2.12	172	2259
2-1 top2	43	2.16	175	2328
2-1 top3	36	2.14	173	2286
2-1 top4	40	2.17	171	2282
2-1 top5	41	2.12	172	2259
2-1 end1	37	2.13	174	2292
2-1 end2	44	2.14	173	2286
2-1 end3	39	2.15	172	2280
2-1 end4	38	2.14	171	2260
2-1 end5	41	2.12	176	2311
Average value	40.4	2.139	172.9	

Table 1.2.8-2: Critical current measurement: T = 4.2 K; B = 6.2 T; E = 0.1 μV/cm on W 7-X strand, diameter 0.55 mm, extracted from unit length 1/3 after 500°C treatment (homogenisation)				
Identification	n	Cu/Sc	I_c(E) [A]	J_c(E) [A/mm²]
1-3 top1	41	2.1	177.2	2312
1-3 top2	43	2.12	178.8	2349
1-3 top3	38	2.13	176.1	2320
1-3 top4	40	2.1	178.1	2324
1-3 top5	43	2.12	178.5	2344
1-3 end1	43	2.11	176.5	2311
1-3 end2	53	2.13	177.1	2333
1-3 end3	42	2.12	178.8	2348
1-3 end4	54	2.14	177.5	2346
1-3 end5	48	2.13	177	2332
Average value			177.56	

Table 1.2.8-3: Critical current measurement: T = 4.2 K; B = 6.2 T; E = 0.1 μV/cm on W 7-X strand, diameter 0.55 mm, extracted from unit length 2/2 after 500°C treatment (homogenisation)				
Identification	n	Cu/Sc	$I_c(E)$ [A]	$J_c(E)$ [A/mm²]
2-2 top1	44	2.12	178.4	2343
2-2 top2	40	2.12	177.5	2332
2-2 top3	47	2.11	175.1	2292
2-2 top4	43	2.12	178.9	2350
2-2 top5	44	2.12	177.9	2336
2-2 end1	46	2.13	173.4	2284
2-2 end2	49	2.11	174.3	2281
2-2 end3	47	2.11	173.2	2268
2-2 end4	41	2.11	176.7	2313
2-2 end5	43	2.11	178.2	2332
Average value			176.06	

Table1.2.8-4: Critical current measurement: T = 4.2 K; B = 6.2 T; E = 0.1 μV/cm on W 7-X strand, diameter 0.55 mm, extracted from unit length 2/3 after 500°C treatment (homogenisation)				
Identification	n	Cu/Sc	$I_c(E)$ [A]	$J_c(E)$ [A/mm²]
2-3 top1	52	2.11	176.3	2307
2-3 top2	45	2.13	174.3	2297
2-3 top3	56	2.10	177.3	2314
2-3 top4	43	2.12	172.8	2270
2-3 top5	38	2.11	176.1	2305
2-3 end1	39	2.12	173.1	2274
2-3 end2	43	2.10	176.1	2297
2-3 end3	38	2.13	173.6	2288
2-3 end4	46	2.12	176.1	2313
2-3 end5	41	2.11	172.5	2258
Average value			174.82	

Table 1.2.8-5: Critical current measurement: T = 4.2 K; B = 6.2 T; E = 0.1 μV/cm on W 7-X strand, diameter 0.55 mm, extracted from unit length 1/1 after 500°C treatment (homogenisation)				
Identification	n	Cu/Sc	$I_c(E)$ [A]	$J_c(E)$ [A/mm²]
1-1 top1	51	2.14	177	2339
1-1 top2	48	2.12	174.5	2291
1-1 top3	47	2.11	175.1	2293
1-1 top4	47	2.15	173.8	2304
1-1 top5	47	2.15	172.8	2292
1-1 end1	42	2.12	172.0	2258
1-1 end2	49	2.11	177.3	2322
1-1 end3	50	2.13	176.3	2323
1-1 end4	43	2.13	173.8	2289
1-1 end5	43	2.15	173.6	2303
Average value			174.62	

Table 1.2.8-6: Critical current measurement: T = 4.2 K; B = 6.2 T; E = 0.1 μV/cm on W 7-X strand, diameter 0.55 mm, extracted from unit length 3/1 after 500°C treatment (homogenisation)				
Identification	n	Cu/Sc	$I_c(E)$ [A]	$J_c(E)$ [A/mm²]
3-1 top1	49	2.11	174.6	2286
3-1 top2	42	2.13	172.6	2274
3-1 top3	45	2.14	174.8	2310
3-1 top4	46	2.15	173.6	2302
3-1 top5	48	2.12	174.1	2286
3-1 end1	42	2.15	173.3	2298
3-1 end2	43	2.13	176.6	2327
3-1 end3	43	2.14	175.1	2314
3-1 end4	51	2.12	173.6	2280
3-1 end5	48	2.14	174.8	2310
Average value			173.83	

The average I_c -values for the unit lengths are collected in Table 1.2.8-7.

Table 1.2.8-7: Average I_c-values for the unit lengths		
Unit length	Unit	Average I_c
2/1	A	172.9
1/3	A	177.56
2/2	A	176.06
2/3	A	174.82
1/1	A	174.62
3/1	A	173.83
Average for strands	A	174.965
Average for cable	A	33593.28 (33.6 kA)

An averaging over these 6 average values gives an overall value of 174.965 A for the strands at 6.2 T and 4.2 K.

The number of strands is 192. The pre-calculated value for the cable is therefore 33.6 kA (exact 33593.28 A) at 6.2 T and 4.2 K. This value is the base for the following calculation.

1.2.9 Temperature dependence of the critical current

(Calculated values in 1.2.9 are not rounded, because they are used for further calculations)

The empirical general temperature dependence is given by:

$$J_{\text{cable}}(\mathbf{B}, T) = J_{\text{cable},0}(\mathbf{B}) \cdot (1 - T/T_c(\mathbf{B})),$$

where $J_{\text{cable},0}(\mathbf{B})$ is the expected value for the cable current density and T the actual temperature. It is:

$$J_{\text{cable},0}(\mathbf{B}) = J_{\text{c}00} \cdot (1 - \mathbf{B}/\mathbf{B}_{\text{c}20})$$

with the empirical value $J_{\text{c}00} = 7300 \text{ A/mm}^2$.

The dependence is approximately linear in the region from 4 T up to 8 T, which is common knowledge.

$T_c(\mathbf{B})$ is given by:

$$T_c(\mathbf{B}) = T_{\text{c}0} \cdot (1 - \mathbf{B}/\mathbf{B}_{\text{c}20})^{0.59}$$

with $T_{\text{c}0} = 9.3 \text{ K}$ and $\mathbf{B}_{\text{c}20} = 14.5 \text{ T}$. The $T_c(\mathbf{B})$ -values are given in the following table Table 1.2.9-1.

Table 1.2.9-1: $T_c(\mathbf{B})$ for NbTi (calculated values, therefore not rounded for further calculations)	
Magnetic field \mathbf{B} in [T]	T_c in [K]
0.0	9.3
1.0	8.916055
2.0	8.520258
3.0	8.1112461
4.0	7.6873651
5.0	7.2465748
6.0	6.7862992
6.2	6.6916299
7.0	6.3032126
8.0	5.7928825

For a constant cross section, one may use the formula above for the current. At a given field, we have for two different temperatures:

If the values

$$I_{\text{cable}}(\mathbf{B}, T_1) = I_{\text{cable},0}(\mathbf{B}) \cdot (1 - T_1/T_c(\mathbf{B}))$$

and

$$I_{\text{cable}}(\mathbf{B}, T_2) = I_{\text{cable},0}(\mathbf{B}) \cdot (1 - T_2/T_c(\mathbf{B}))$$

The division of both equations and rearrangement and if $T_c(B)$ and $I_{cable}(B, T_1)$ are known, then it is easy to calculate $I_{cable}(B, T_2)$. The following tables for different temperatures contain the relevant values for the cable of the winding of the DEMO coil. The value $I_{cable}(B, T_1)$ (= 33,6 kA) is valid for $B = 6.2$ T and $T_1 = 4.2$ K. Therefore:

$$I_{cable}(B, T_2) = I_{cable}(B, T_1) \cdot (T_c(B) - T_2)/(T_c(B) - T_1)$$

This formula is valid for one value of the magnetic field, but for two different temperatures. Only one value for the magnetic field is known. It is :

$$I_{cable}(B, T_1) = 33.6 \text{ kA at } 6.2 \text{ T and } 4.2 \text{ K.}$$

Using these values, it is possible to calculate in the general equation for $I_c(B, T)$ the quantity I_{c00} to be 157.644 kA. Therefore, it follows:

$$I(B, T) = 157.644 \text{ kA} \cdot (1 - B/14.5 \text{ Tesla}) \cdot [1 - T/(9.3 \text{ K} \cdot (1 - B/14.5 \text{ Tesla})^{0.59})]$$

With this equation, (Tesla (T) is fully written in order to avoid a misunderstanding with the temperature T), it is possible to calculate the values of the magnetic field for 4.2 K. These values are seen in the next table Table 1.2.9-2.

Table 1.2.9-2: Data for $I_c(B; 4.2 \text{ K})$			
Magnetic field [T]	$T_c(B) - 4.2$ [K]	$(T_c(B) - 4.2 \text{ K})/(T_c(B) - 4.2 \text{ K})$	$I_{cable}(B; 4.2 \text{ K})$ [kA]
5	3.0465748	1.0	43.422235
6	2.5862992	1.0	35.218773
6.2	2.4916299	1.0	33.6
7	2.1032126	1.0	27.207699
8	1.5928825	1.0	19.431751

Using the values in this table for 4.2 K, it is possible to calculate all magnetic fields for different temperatures. The following tables Table 1.2.9-3 to Table 1.2.9-10, each for a certain temperature, contain the relevant values for the cable of the winding of the DEMO coil.

Table 1.2.9-3: Data for $I_c(B; 3.6 \text{ K})$			
Magnetic field [T]	$T_c(B) - 3.6$ [K]	$(T_c(B) - 3.6 \text{ K})/(T_c(B) - 4.2 \text{ K})$	$I_{cable}(B; 3.6 \text{ K})$ [kA]
5	3.6465748	1.1969422	51.973905
6	3.1862992		43.389228
6.2	3.0916299		42.990848
7	2.7032126		34.969452
8	2.1928825		26.751217

Table 1.2.9-4: Data for $I_c(B; 3.8 \text{ K})$			
Magnetic field [T]	$T_c(B) - 3.8$ [K]	$(T_c(B) - 3.8 \text{ K})/(T_c(B) - 4.2 \text{ K})$	$I_{cable}(B; 3.8 \text{ K})$ [kA]
5	3.4465748	1.1312949	49.123354
6	2.9862992	1.1546611	40.665747
6.2	2.8916299	1.1605374	38.994056
7	2.5032126	1.1901852	32.382201
8	1.9928825	1.251117	24.311394

Table 1.2.9-5: Data for $I_c(B; 4.0\text{ K})$			
Magnetic field [T]	$T_c(B) - 4.2\text{ K}$	$(T_c(B) - 4.0\text{ K})/(T_c(B) - 4.2\text{ K})$	$I_{\text{cable}}(B; 4.2\text{ K})\text{ [kA]}$
5	3.2465748	1.0656472	46.272783
6	2.7862992		37.942253
6.2	2.6916299		37.428623
7	2.3032126		29.79495
8	1.7928825		21.871572

Table 1.2.9-6: Data for $I_c(B; 4.4\text{ K})$			
Magnetic field [T]	$T_c(B) - 4.4\text{ K}$	$(T_c(B) - 4.4\text{ K})/(T_c(B) - 4.2\text{ K})$	$I_{\text{cable}}(B; 4.4\text{ K})\text{ [kA]}$
5	2.8465748		40.571664
6	2.3862992		32.495279
6.2	2.2916299		31.866386
7	1.9032126		24.620447
8	1.3928825		16.210483

Table 1.2.9-7: Data for $I_c(B; 4.6\text{ K})$			
Magnetic field [T]	$T_c(B) - 4.6\text{ K}$	$(T_c(B) - 4.6\text{ K})/(T_c(B) - 4.2\text{ K})$	$I_{\text{cable}}(B; 4.6\text{ K})\text{ [kA]}$
5	2.6465748		37.721103
6	2.1862992		29.771791
6.2	2.0916299		29.085287
7	1.7032126		22.033195
8	1.1928825		14.552106

Table 1.2.9-8: Data for $I_c(B; 4.8\text{ K})$			
Magnetic field [T]	$T_c(B) - 4.8\text{ K}$	$(T_c(B) - 4.8\text{ K})/(T_c(B) - 4.2\text{ K})$	$I_{\text{cable}}(B; 4.8\text{ K})\text{ [kA]}$
5	2.4465748		34.870543
6	1.9862992		27.048304
6.2	1.8916299		26.304174
7	1.5032126		19.445944
8	0.9928825		12.112283

Table 1.2.9-9: Data for $I_c(B; 5.0\text{ K})$			
Magnetic field [T]	$T_c(B) - 5.0\text{ K}$	$(T_c(B) - 5.0\text{ K})/(T_c(B) - 4.2\text{ K})$	$I_{\text{cable}}(B; 5.0\text{ K})\text{ [kA]}$
5	2.2465748		32.019983
6	1.7862992		24.324816
6.2	1.6916299		23.523062
7	1.3032126		16.858693
8	0.7928825		9.6724616

Table 1.2.9-10: Data for $I_c(B; 5.2\text{ K})$			
Magnetic field [T]	$T_c(B) - 5.2\text{ K}$	$(T_c(B) - 5.2\text{ K})/(T_c(B) - 4.2\text{ K})$	$I_{\text{cable}}(B; 5.2\text{ K})\text{ [kA]}$
5	2.0465748		29.169423
6	1.5862992		21.601329
6.2	1.4916299		20.74195
7	1.1032126		14.271441
8	0.5928825		7.2326394

The following picture Fig. 1.2.9.1 shows these curves including the load line for the coil in its self-field.

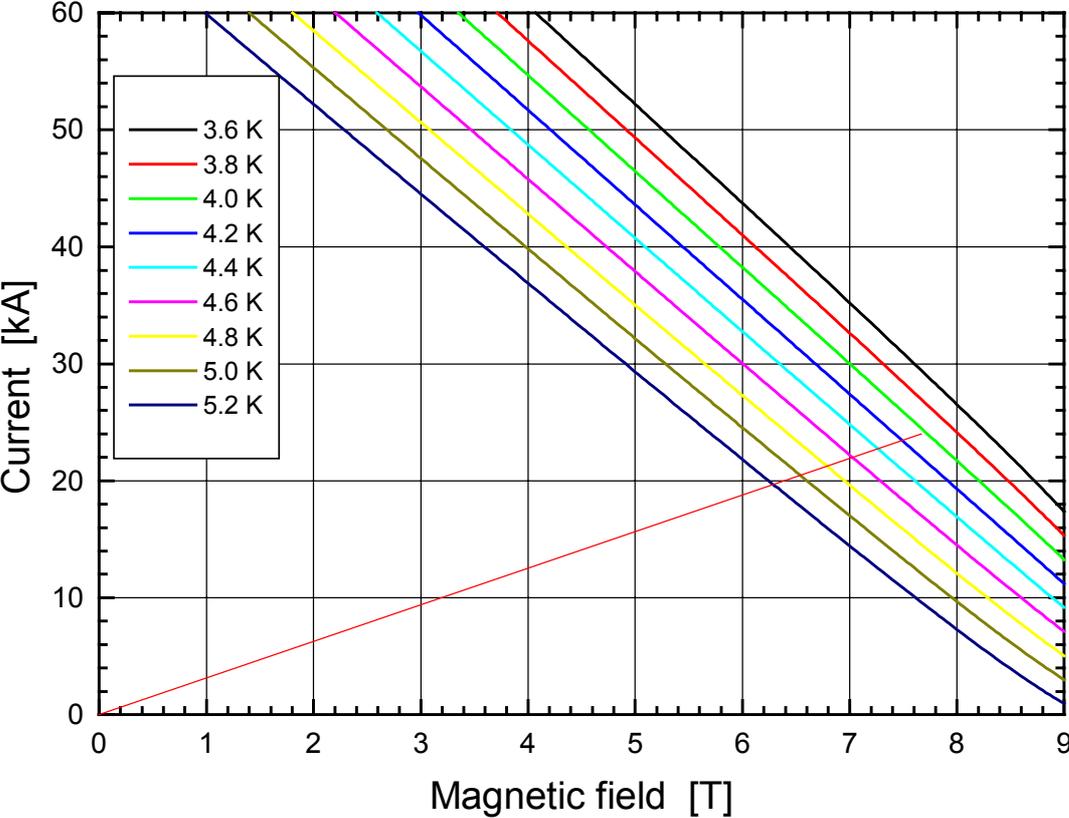


Fig. 1.2.9.1: Load line and expected $I_c(B, T)$ for the DEMO coil in its self-field.

1.3. Coil data

(from the internal „Manual for the DEMO coil test“)

Most of the coil data are given in the internal (unpublished) documentation of the manufacturer Noell/Ansaldo in several volumes. In this report, the volume number and the content is only given.

Volume 1: Acceptance in the factory

Volume 2: Coil case and bedding

Volume 3: Coil case and bedding

Volume 4: Coil winding

Volume 5: Coil winding (Ansaldo)

Volume 6: Instrumentation

Volume 7: Support structure

Volume 8: Current bus

Volume 9: Tools/ Tools (Ansaldo)

Volume 10: Handbook for the instrumentation of the Demonstration coil of the stellarator experiment Wendelstein 7-X

Volume 11: FEM calculation, volume I

Volume 12: FEM calculation, volume II

1.3.1 Main parameters of W 7-X

The main parameters of the Wendelstein 7-X stellarator experiment are given in the following table Table 1.3.1-1.

Table 1.3.1-1: Technical data of Wendelstein 7-X (W 7-X)	
Total diameter	15 m
Height	~ 4 m
Mass	550 t
Major plasma radius	5.5 m
Average minor plasma radius	0.53 m
Number of field periods	5
Number of superconducting main coils	50
Number of superconducting auxiliary coils	20
Magnetic field on plasma axis	3 T
Magnetic field on the superconductor	6 T
Inductance of one module (typical)	0.775 H
Inductance of torus	5.803 H
Stored magnetic field energy	620 MJ (172 kWh)

These data come from the original design of the nonplanar coil, type 3, with 120 turns.

1.3.2 Visualisation of the 64 elements of the winding

In order to localise the positions of sensors on the coil, the winding which is partitioned in 64 elements is shown beside the LCT coil in the following figure

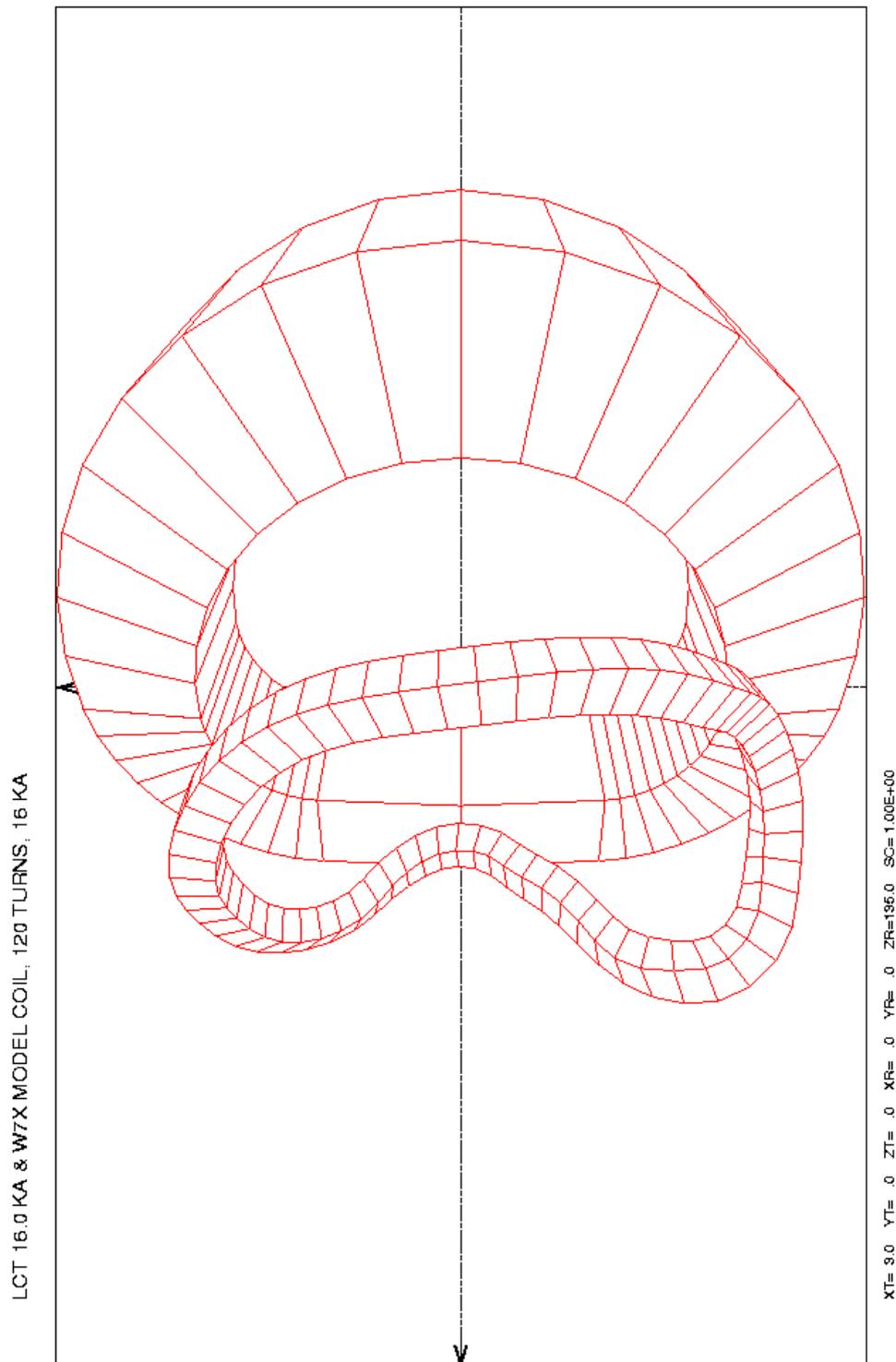


Fig. 1.3.2-1: Principal arrangement of the DEMO coil and the LCT coil

1.3.3 Main parameters of the DEMO coil

The main dimensional data of the coil are given in the following Table 1.3.3-1.

Table 1.3.3-1: Dimensional data of the Wendelstein 7 – X DEMO coil			
Property	Unit	Number	Comment
Conductor: Stranded cable in coextruded Al-conduit (LMI)			
Insulation: Glass-epoxy-resin system, Conductor insulation (one side): 0.6 mm, Ground insulation: 3 mm, Interlayer insulation: 2 x 0.4 mm,			
Number of turns		120	6 double layer (DL) winding
Conductor dimensions	mm x mm	14.8 x 14.8	Without insulation
Strands area	mm ²	45.6	One conductor
Conduit area	mm ²	130	One conductor
Insulation area	mm ²	34	One conductor
Cable area	mm ²	76	Cu/NbTi = 2.03, 37% void
He cross-section in cable space	mm ²	29.06	
He volume per winding	ℓ	29.64	
Winding area	mm ²	34597	Including insulation
Average winding diameter	m	2.706	
Average length of DL	m	170	Without terminals; Minimum: 159.9 m; Maximum 180.3 m;
Total coil cross section	m x m	0.4 x 0.4	
Weight of winding pack	kg	804	Per coil without casing, resin-compound and support
Total mass	t	ca 5	

The main electrodynamic data of the DEMO coil are given in the following Table 1.3.3-2.

Table 1.3.3-2: Electrodynamic data of the Wendelstein 7 – X DEMO coil			
Property	Unit	Number	Comment
Nominal current	kA	14.5	Standard case with 3 T
Nominal Ampère turns	MA	1.74	Standard case with 3 T
Design current	kA	16	Max. standard case, 3.3 T
Design Ampère turns	MA	1.92	Max. standard case, 3.3 T
Cable current density	A/mm ²	210	Max. standard case, 3.3 T
Overall winding pack current density	A/mm ²	55.5	Max. standard case, 3.3 T
Resistance of the casing	μΩ	210	Estimated at RT by IPP
Inductance of the casing	μH	50.63	Estimated by IPP
Coupling capacitance between winding and casing	nF	40	Estimated by IPP
Coupling factor between winding and casing		0.90.....0.95	Estimated by IPP
Resistance of the conductor	mΩ	170	Estimated for 1.2 km at RT by IPP
Self inductance	mH	61.0	“Proposal” (coil type No. 3)
Self inductance	mH	63	Calculated by Forschungszentrum Karlsruhe
Stored energy	MJ	8	At 16 kA

In order to get preliminary electromagnetic data for the influence of the casing during discharge and quench, a simple estimation was made by the Forschungszentrum Karlsruhe for the winding and casing in the following way:

The nonplanar DEMO coil was approximated by an equivalent solenoid with an average winding length of 8.5 m. The average radius is then 1.353 m. The radial thickness is 20.86 cm and the axial width is 16.76 cm. The thickness of the ground insulation is supposed to be 4 cm. The overall winding current density is 5492 A/cm² without ground insulation. The average thickness of the casing is supposed to be 4 cm.

The inductance matrix of winding and casing was calculated. The result is:

Inductance of winding: $L_1 = 70.06$ mH.

Inductance of casing: $L_2 = 0.06$ mH.

Mutual inductance: $L_{12} = 1.843$ mH.

The coupling factor of the winding and casing is defined as

$$k = L_{12}/(L_1 \cdot L_2)^{1/2}$$

(The definition is according to K. Küpfmüller: Einführung in die theoretische Elektrotechnik. 13. Verbesserte Auflage, Springer-Verlag, 1990)

The numerical value of k is 0.9.

To define the time constant of the casing at operational temperature the resistance of the casing must be estimated. The specific resistivity for Stainless Steel is at 4 K: $\rho_{SS} = 5.8 \cdot 10^{-7}$ Ωm.

The resistance of the casing R_c is:

$$R_c = \rho_{SS} \cdot L/A_c$$

With the average length of the casing $L = 8.5$ m and the cross section $A_c = 433.6$ cm² of the casing material the numerical value of R_c is 0.114 m Ω for 4 K.

The time constant $\tau_c = L_2/R_c$ is then 0.526 s for 4 K.

The comparison of the calculation data in the Forschungszentrum Karlsruhe with the data in the table, estimated by IPP, is quite good with respect to the very rough approximation of the nonplanar coil by a planar solenoid.

1.3.4 Flow test results of the DEMO coil at room temperature

The flow test was made by Ansaldo in order to prove the transmissivity of the cable and whether the six DL's are similar in their behaviour. The values are reported here just for information in Table 1.3.4-1.

Table 1.3.4-1: Flow test on DEMO coil						
Pressure [bar]	DL1 [ℓ/h]	DL2 [ℓ/h]	DL3 [ℓ/h]	DL4 [ℓ/h]	DL5 [ℓ/h]	DL6 [ℓ/h]
15	2650	2500	2600	2600	2650	2300
20	4200	3750	4000	4000	4100	3650

Shortly before closing the vacuum vessel of TOSKA, flow measurements were repeated by the Forschungszentrum Karlsruhe and compared to the measurement results at Ansaldo. The results are given in the following Table 1.3.4-2.

Table 1.3.4-2: Mass flow measurements at the Forschungszentrum Karlsruhe before closing the vacuum vessel of TOSKA				
Double layer No. (conductor length)	Sensor for mass flow	Measurement at Ansaldo with 16 bar (g/s)	Measurement at the Forschungszentrum Karlsruhe in TOSKA with 16 bar with FI213/215 (g/s)	Comparison between Ansaldo and Forschungszentrum Karlsruhe
1 (2/1 inner)	MFI710	0.123	0.104	1.183
2 (1/3)	MFI720	0.116	0.100	1.160
3 (2/2)	MFI730	0.121	0.101	1.198
4 (2/3)	MFI740	0.121	0.098	1.235
5 (1/1)	MFI750	0.123	0.107	1.150
6 (3/1 outer)	MFI760	0.107	0.081	1.321

Note: The results at Ansaldo were received by means of a rotameter (variable-area) flowmeter, those at the Forschungszentrum Karlsruhe with a linear flowmeter
Note: Pressure is pressure abs.

1.3.5 Inductance and stored energy

The basic data for the calculation of the inductances and stored energy are given in the following Table 1.3.5-1.

Table 1.3.5-1: Basic data for the calculation of the stored energy					
The input for the LCT coil is different from that of the W 7-X coil, the LCT coil consists of two parts: INLCT and OUTLCT. The inductance matrix is calculated for the whole coil current not for the conductor current (i.e. as for a coil with only one turn)					
W 7-X	INLCT	OUTLCT	Turn number	ATurns	Comment
$4.367 \cdot 10^{-6}$			120	1.92	
$7.444 \cdot 10^{-7}$	$4.521 \cdot 10^{-6}$		420	5.886	
$7.775 \cdot 10^{-7}$	$4.160 \cdot 10^{-6}$	$6.370 \cdot 10^{-6}$	168	2.352	

From these basic data it is possible to calculate the inductance of the DEMO coil to be $L_{W\ 7-X} = 63\text{ mH}$ and the inductance of the LCT coil to be $L_{LCT} = 1.56\text{ H}$. The mutual inductance of the DEMO coil and the LCT coil is $L_{W\ 7-X, LCT} = 2 \cdot 53.2\text{ mH} = 106.4\text{ mH}$. The coupling factor is $k = 0.17$. The definition is given in 1.3.3 according to K. Küpfmüller: Einführung in die theoretische Elektrotechnik ($k = L_{12}/(L_1 \cdot L_2)^{1/2}$). Take into account: $L_{W\ 7-X, LCT} = 2 \cdot L_{12}$.

The stored energy in the DEMO coil is about 8 MJ for 1.92 coil current (i.e., 16 kA conductor current) and in the LCT coil 153.3 MJ for 14 kA conductor current. The total stored energy in the system is 173.5 MJ. These values are summarised in the following table:

Table 1.3.5-2: Inductances and stored energy			
Property	W 7-X DEMO coil	LCT coil	System
Inductance	63 mH	1.56 H	
Mutual inductance	2 x 53.2 = 106.4 mH		
Coupling factor	0.17		
Stored energy	8 MJ for 16 kA	153.3 for 14 kA	173.5

In order to design the quench detection system by means of compensation, the inductance matrix for the 6 double layers was calculated. The values are given in the following Table 3.5-3.

Table 3.5-3: Inductance matrix for the 6 Double Layers					
Unit = mH					
DL1	DL2	DL3	DL4	DL5	DL6
1.973					
1.806	2.049				
1.595	1.877	2.125			
1.437	1.660	1.948	2.202		
1.313	1.497	1.725	2.020	2.279	
1.212	1.369	1.557	1.790	2.092	2.357

1.3.6 Magnetic field information

Detailed information is given in Part 3.1.

The maximum fields on the DEMO coil are given for the different load cases.

Load case A:

7.3 T at 24 kA conductor current in the W 7-X DEMO coil

Load case B:

6.07 T at 14.7 kA conductor current in the W 7-X DEMO coil and 14.0 kA conductor current in the LCT coil

Load case C:

7.06 T at 18.3 kA conductor current in the W 7-X DEMO coil and 14.0 kA conductor current in the LCT coil

1.4 Der Ablauf des Testes

Für den Test der W 7-X DEMO Spule wurde die TOSKA-Anlage im wesentlichen in der Ausstattung benutzt, wie sie für den Test der LCT Spule bei He II ausgerüstet war nur ohne He II Teil [1.4-1]. Die Kryoversorgung musste speziell für die Anforderungen der Kühlkreisläufe der W 7-X Spule ausgelegt werden. Die Stromversorgung erfolgte durch das 30 kA Netzgerät in Verbindung mit der POLO Schaltanlage [1.4-2]. Zwei Stromzuführungen wurden auf der Basis der Betriebserfahrungen beim Test der LCT Spule entsprechend modifiziert und neu gebaut.

Die wichtigsten Meilensteine beim Test der W 7-X Spule sind mit Datum in der Tabelle 1.4-1 zusammengestellt.

Tabelle 1.4-1 :Die wichtigsten Meilensteine beim Ablauf des Tests der W 7-X Spule	
Meilenstein	Datum
Anlieferung des Stützrahmens	27.Okt 1997
Versand des angepassten Stützrahmens	Jan 1998
Anlieferung der W 7-X Spule auf Stützrahmen montiert	3. Juli 1998
Einfahren in den TOSKA Vakuumbehälter	6. Okt. 1998
Beginn der Abkühlung	25. Mai 1999
Erreichen des supraleitenden Zustandes	8. Juni 1999
Beginn der Tests mit Strom	14. Juni 1999
Lastfall A (W 7-X Spule allein) abgeschlossen	29. Juni 1999
Lastfall B (W 7-X Spule mit LCT Spule) abgeschlossen	6. Juli 1999
Lastfall C (wie B jedoch maximal möglicher Strom für die W 7-X Spule)	8. Juli 1999
Abschluss der Stromtests	15. Juli 1999
Zusatzuntersuchungen zur AC-Stabilität und Wärmeleitung	16. – 19.7.1999
Positive Bewertung der erreichten Testziele seitens der Projektverantwortlichen vom Forschungszentrum Karlsruhe und vom IPP	19. Juli 1999
Beginn des Aufwärmens	21. Juli 1999
Öffnen des TOSKA Vakuumbehälters	1. Sept 1999
Herausnehmen der W 7-X Spule	29. Sept. 1999
Versand der W 7-X Spule	12. Okt. 1999

Die W 7-X Spule wurde bei bereits installierter LCT Spule eingebaut. Dies erfolgte in zwei Schritten: Zuerst wurde mit der Zwischenstruktur eine Probemontage durchgeführt. Der Zweck dieser Probemontage war, die Machbarkeit der Montage bei extrem engen Raumverhältnissen abzusichern und die Feinanpassung der Stützflächen an die Oberflächen der LCT Spule vorzunehmen (Fig. 1.4-1). Zu diesem Zweck war eine Schablone auf die Zwischenstruktur montiert, damit die geometrischen Abmessungen wie mit montierter W 7-X Spule simuliert wurden. In einem zweiten Schritt wurde die W 7-X Spule auf die angepasste Zwischenstruktur beim SpulenhHersteller montiert und dann als Baugruppe zur TOSKA-Anlage angeliefert. Nach Anbau der Heliumverteilung und Komplettierung der Instrumentierung verbunden mit entsprechenden Abnahmetests konnte dann die Spule in den Vakuumbehälter der TOSKA-Anlage installiert werden (Fig. 1.4-2). Mit Anschluss der W 7-X Spule an die kryogene und elektrische Versorgung sowie der Datenerfassung mit entsprechenden detaillierten Vortests (Leck, Isolation, Funktion der Instrumentierung) konnte dann im evakuierten Vakuumbehälter der integrale Abschlusstest vor dem Start der

Abkühlung durchgeführt werden. Die Installationsarbeiten und Prüfungen wurden gemeinsam mit dem IPP durchgeführt. Eine gefundene Leckage im Bereich des Isoliervakuum der W 7-X Stromzuführungen konnte mit Hilfe eines separat gepumpten Schirmvakuum in seinem Einfluss auf das Vakuum des Behälters kompensiert werden.

Über den detaillierten Ablauf des Tests mit dem sich aus der jeweiligen Situation ergebenden Vorgehen gibt es Tagesberichte, die im Anhang zu 1.4 zusammengestellt sind.

Der Abkühlungsvorgang dauerte bis zum Erreichen des supraleitenden Zustandes 13 Tage. Die maximale Temperaturdifferenz von $\Delta T = 40$ K zwischen verschiedenen Temperaturfühlern der Zwischenstruktur, des Spulengehäuses und der Wicklung musste im gegenseitigen Einvernehmen in Schritten bis auf 100 K für einzelne Temperaturfühler erhöht werden, um die Abkühlrate von 1 K/h beibehalten zu können. Nach Erreichen der Betriebstemperatur wurden die kryogenen Betriebsparameter für die beiden Spulen und deren Stromzuführungen optimiert. Die Stromtests begannen gemäß Testprogramm mit Lastfall A (W 7-X Spule allein), bei einer Vorlauftemperatur erst von 4,8 K, später von 3,8 K, der in Stromstufen von 25 % der bei Nennstrom gespeicherten Energie angefahren wurde. Jede Stromstufe wurde gemäß dem Testprogramm dreimal angefahren. Die Abfahrt erfolgte erst mit der Stromrampe wie bei der Hochfahrt, dann mit dem Wechselrichterbetrieb (volle negative Spannung des Netzgerätes) und schließlich mit der Sicherheitsentladung. Dadurch konnten sukzessiv das Verhalten der Spule und der Testeinrichtung beobachtet werden. Vor Beginn der Tests erfolgte ein Isolationstest der W 7-X Spule bei 2,4 kV und der LCT Spule bei 3,4 kV. Die W 7-X Spule erreichte ihren Nennstrom ohne Probleme.

Anschließend erfolgte die Inbetriebnahme der W 7-X Spule mit der LCT Spule. Hier musste zunächst die richtige Folge der Abläufe bei der Verknüpfung der Steuerungen der Elektroversorgung mit der Kryoversorgung bei verschiedenen anstehenden Alarmen ausgetestet werden. Für diesen Betrieb wurde die Vorlauftemperatur entsprechend dem Messprogramm wiederum abgesenkt. Der Nennstrom der Konfiguration (W 7-X Spule: 14,7 kA; LCT Spule: 14 kA) wurde in Stromstufen von 25 % der gespeicherten Energie angefahren. Beim Anfahren des Stromwertes von 87 % traten wiederholt Sicherheitsentladungen auf, die nicht durch einen Quench in einer der beiden Spulen ausgelöst wurde. Die Ursache lag in dem Nullflusstromwandler des 30 kA Netzgerätes, der durch das magnetische Streufeld der Testkonfiguration an diesem Ort ($\sim 3,4$ mT) in seiner Funktion gestört wurde. Den Einfluss durch eine Abschirmung oder Kompensation des Streufeldes mit einer externen Spule zu unterbinden waren nicht erfolgreich.

Zur Nutzung der Testzeit wurde, abweichend vom ursprünglichen Testprogramm in gemeinsamer Abstimmung des Instituts für Plasmaphysik und des Forschungszentrum Karlsruhe mit dem Lastfall A bis zum Erreichen des Quenchstromes fortgefahren. Die Spule erreichte mit drei Quenchen 18,49 kA, 18,75 kA und 19,88 kA ihre Betriebsgrenze bei 3,8 K Eintrittstemperatur in die Einspeisezone.

Durch Umstellung der Strommessung auf die Wechselstromwandler des 30 kA Netzgerätes und den Abgleich der Regelung konnte der Betrieb mit beiden Spulen fortgesetzt werden. Nach einem Quench bei 14,8 kA konnte in einem zweiten Lauf der Nennlastfall sicher betrieben und damit der Lastfall B abgeschlossen werden. Die Betriebsgrenze im Lastfall C (W 7-X Stromwert bis zum Quench; LCT Spule konstant bei 14 kA) wurde danach zwischen 16,10 kA und 16,73 kA bei einer Eintrittstemperatur in die Wicklung von 4,1 K erreicht.

Durch Wiederholung der Lastfälle A und B mit Vergleich der mechanischen Daten, die gegenüber den früheren Messungen keine Abweichungen zeigten, waren die Stromtests gemäß dem Testprogramm abgeschlossen.

Alle Sicherheitsentladungen konnten von dem kryogenen System der TOSKA Anlage ohne Heliumverluste an die Atmosphäre beherrscht werden. Die Rückkühlung nach Sicherheitsentladungen von höheren Strömen dauerte ca. 3 Stunden. Zur Analyse der thermischen Verluste wurden diese in Abhängigkeit vom Druck des Tankvakuum gemessen, welches sich beim Strombetrieb durch ein Leck im Hüllrohr der Stromzuführungen verschlechterte.

Die Stromzuführungen der W 7-X Spule zeigten die Wirksamkeit der Verbesserungen und konnten bei ihren theoretisch erwarteten Massenströmen stabil betrieben werden.

Neben dem bereits erwähnten Problem bei der Strommessung bewirkte eine notwendige Änderung in der Programmierung der Steuerung der POLO-Schaltanlage aufgrund der längeren Entladezeitkonstante der W 7-X Spule im Vergleich zu früheren Experimenten und ein Isolationsfehler im Entladewiderstand eine kurzzeitige Unterbrechung des Messbetriebes.

Das Testprogramm mit Strom war nach 5 ½-wöchiger Testzeit abgearbeitet. Gemeinsam wurde von den Projektverantwortlichen des Forschungszentrums Karlsruhe und des IPP festgestellt, dass die gewonnenen Ergebnisse die grundsätzliche Funktion der eingesetzten Technik bestätigt haben.¹

Nach einem abschließenden Leck- und Hochspannungstest wurde die gesteuerte Aufwärmung der Testkonfiguration begonnen, wobei die bei der Abkühlung gemachten Erfahrungen bezüglich der zulässigen Temperaturdifferenzen angewendet wurden. Der Temperaturanstieg betrug 1,0 – 1,3 K/h. Nach 3 Wochen war die Raumtemperatur erreicht. Die Aufwärmung wurde durch einen 10-tägigen Anlagentest und im Hinblick auf die Abkühlung der ITER TF Modellspule und nicht aktiver Erwärmung an Wochenenden unterbrochen.

Nach einem abschließenden Leck- und Hochspannungstest bei Raumtemperatur konnte der Vakuumbehälter belüftet und geöffnet werden. Eine visuelle Inspektion vor und nach dem Ausbau deutet auf eine Aufwärtsbewegung der W 7-X Spule bei der Erregung mit der LCT Spule und eine Durchbiegung des Zwischenrahmens hin, wodurch die Entlastung des Auflagers der W 7-X Spule verständlich wird. Die Spule wurde nach dem Ausbau für den Versand vorbereitet und verließ das Forschungszentrum Mitte Oktober 1999.

Literatur zu 1.4

- [1.4-1] M. Darweschsad, S. Fink, G. Friesinger, A. Grünhagen, R. Heller, A. Hofmann, W. Herz, P. Komarek, W. Maurer, G. Nöther, K. Rietzschel, G. Schleinkofer, M. Süßer, A. Ulbricht, F. Wüchner, G. Zahn, Test of the EURATOM LCT coil (NbTi conductor) with forced flow He II cooling, Fusion Engineering and Design 45 (1999), pp. 361 – 375
- [1.4-2] M. Darweschsad, G. Friesinger, R. Heller, M. Irmisch, H. Kathol, P. Komarek, W. Maurer, G. Nöther, G. Schleinkofer, Ch. Sihler, M. Süßer, A. Ulbricht, F. Wüchner, Development and test of the poloidal prototype coil POLO at the Forschungszentrum Karlsruhe, Fusion Engineering and Design 36 (1997), pp. 227 – 250

¹ Obwohl zu diesem Zeitpunkt noch keine Gesamtauswertung vorlag und Teilergebnisse noch unverstanden waren, wurde gemeinschaftlich entschieden, die Testanordnung ab 21.07.99 aufzuwärmen.

Die Freigabevoraussetzung zum Beginn der Serienfertigung war mit dem erfolgreichen Nachweis des Nennverhaltens gemäß Lastfall A und B erfüllt. Zuvor konnte bereits nach der Abkühlung und dem bestandenen Dichtigkeits- und Hochspannungstest die Endabnahme der W 7-X Spule vom Hersteller durch das IPP erklärt werden.

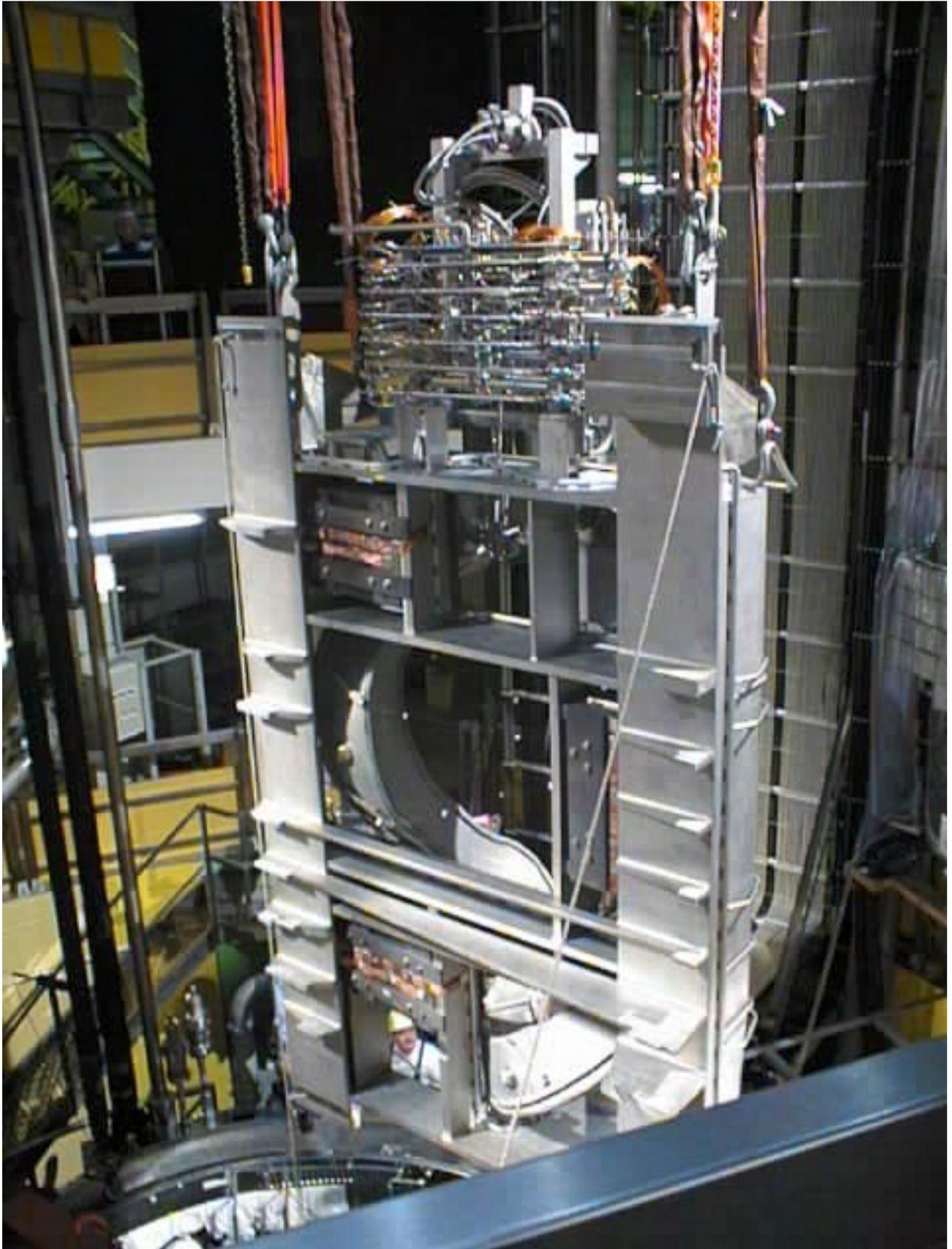


Fig. 4.1-1: Der Stützrahmen der W 7-X Spule und de LCT Spule mit den kammartigen Auflageflächen auf der LCT Spule

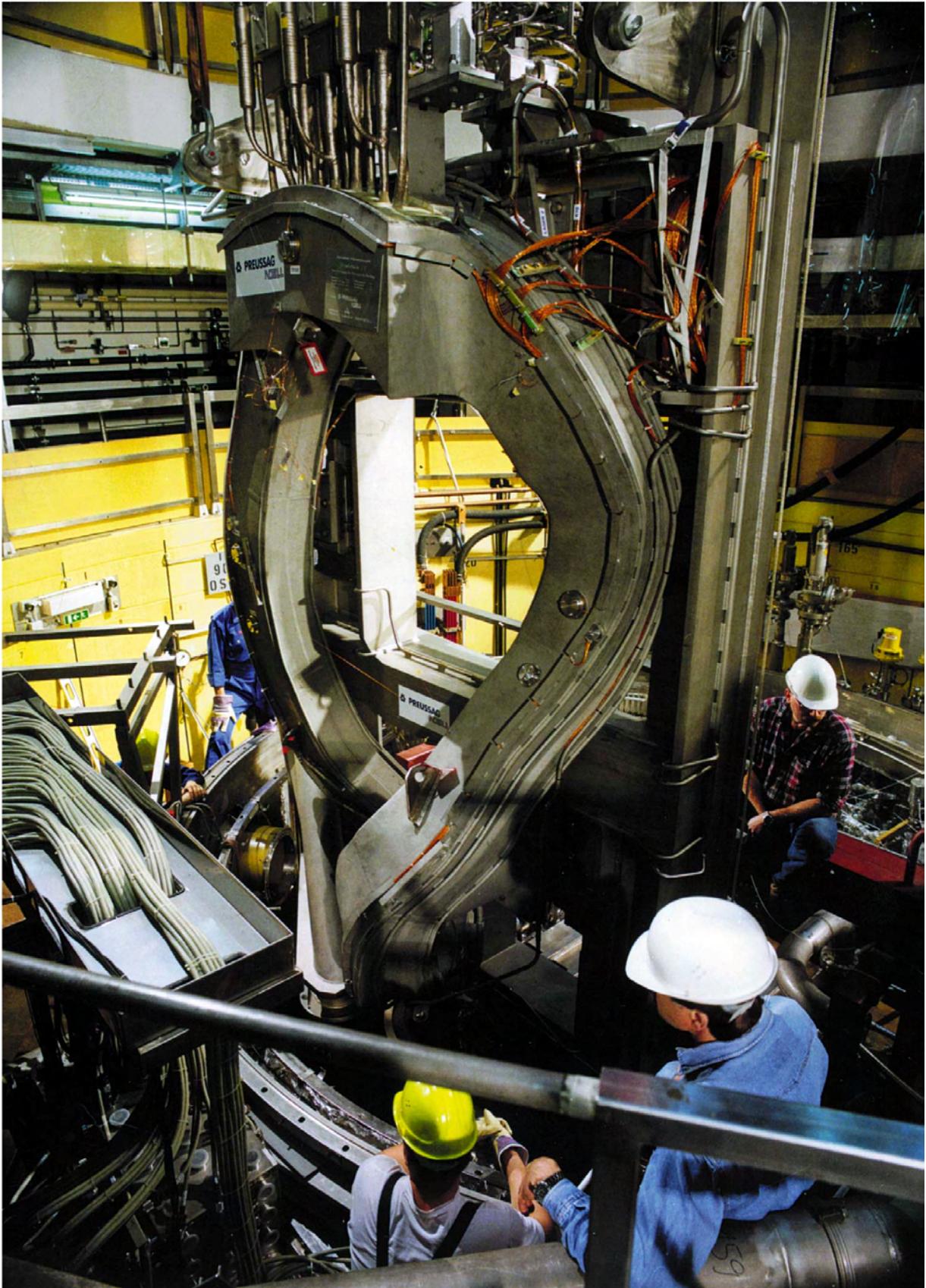


Fig. 1.4-2 : Die W 7-X Spule montiert auf dem Stützrahmen bei der Einfahrt in den TOSKA Vakuumbehälter

Anhang zu Teil 1.4 Tagesprotokolle

Für die Durchführung des Testes wurden von Herrn Zahn Tagesprogramme geschrieben, die den Status der Arbeiten, wichtige Ergebnisse und das weitere Vorgehen enthielten. Sie beginnen am 25. Mai 1999 und enden mit dem Ausbau der Spule.

Diese Tagesprogramme sind hier beigefügt. Es sind dies:

Tagesprogramm für Dienstag, den 25. Mai 1999
Tagesprogramm für Mittwoch, den 26. Mai 1999
Tagesprogramm für Donnerstag, den 27. Mai 1999
Tagesprogramm für Freitag, den 28. Mai 1999
Tagesprogramm für Samstag, den 29. Mai 1999, und Sonntag, den 30. Mai 1999
Tagesprogramm für Montag, den 31. Mai 1999

Tagesprogramm für Dienstag, den 1. Juni 1999
Tagesprogramm für Mittwoch, den 2. Juni 1999
Tagesprogramm für Donnerstag, den 3. Juni 1999, bis 7. Juni 1999
Tagesprogramm für Montag, den 7. Juni 1999
Tagesprogramm für Dienstag, den 8. Juni 1999
Tagesprogramm für Mittwoch, den 9. Juni 1999
Tagesprogramm für Donnerstag, den 10. Juni 1999
Tagesprogramm für Freitag, den 11. Juni 1999
Tagesprogramm für Samstag, den 12. Juni 1999, bis Montag, den 14. Juni 1999
Tagesprogramm für Dienstag, den 15. Juni 1999
Tagesprogramm für Mittwoch, den 16. Juni 1999
Tagesprogramm für Donnerstag, den 17. Juni 1999
Tagesprogramm für Freitag, den 18. Juni 1999
Tagesprogramm für Samstag, den 19. Juni 1999, bis Montag, den 21. Juni 1999
Tagesprogramm für Dienstag, den 22. Juni 1999
Tagesprogramm für Mittwoch, den 23. Juni 1999
Tagesprogramm für Donnerstag, den 24. Juni 1999
Tagesprogramm für Freitag, den 25. Juni 1999
Tagesprogramm für Samstag, den 26. Juni 1999, bis Montag, den 28. Juni 1999
Tagesprogramm für Dienstag, den 29. Juni 1999
Tagesprogramm für Mittwoch, den 30. Juni 1999

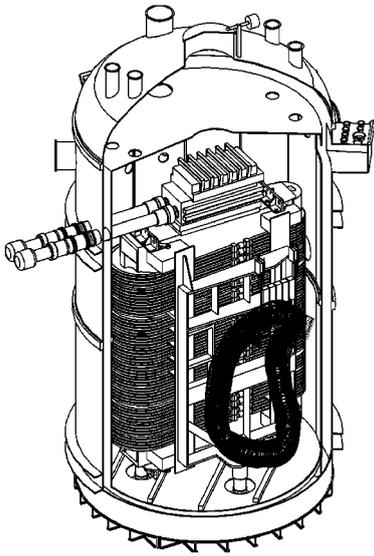
Tagesprogramm für Donnerstag, den 1. Juli 1999
Tagesprogramm für Freitag, den 2. Juli 1999
Tagesprogramm für Samstag, den 3. Juli 1999, bis Montag, den 5. Juli 1999
Tagesprogramm für Dienstag, den 6. Juli 1999
Tagesprogramm für Mittwoch, den 7. Juli 1999
Tagesprogramm für Donnerstag, den 8. Juli 1999
Tagesprogramm für Freitag, den 9. Juli 1999
Tagesprogramm für Samstag, den 10. Juli 1999, bis Montag, den 12. Juli 1999
Tagesprogramm für Dienstag, den 13. Juli 1999
Tagesprogramm für Mittwoch, den 14. Juli 1999
Tagesprogramm für Donnerstag, den 15. Juli 1999
Tagesprogramm für Freitag, den 16. Juli 1999, bis Montag, den 19. Juli 1999
Tagesprogramm für Dienstag, den 20. Juli 1999
Tagesprogramm für Mittwoch, den 21. Juli 1999
Tagesprogramm für Donnerstag, den 22. Juli 1999
Tagesprogramm für Freitag, den 23. Juli 1999

Freitag, 23. Juli 1999: Programm für weiteres Warmfahren

Donnerstag, 12. August 1999: Status und weiteres Programm

Mittwoch, 29. September 1999: Ausbau der W 7-X DEMOspule

Mittwoch, 13. Oktober 1999: Status



W7-X Demospule

Tagesprogramm

für

Dienstag 25. Mai 1999

- Inbetriebnahme der 2 kW Kälteanlage mit Beginn der Frühschicht
- Inbetriebnahme der Leitung Nr. 1 über Umgangsventil HCV303
- Stabilisierung der Vorlauftemperatur TI302 auf 40 K unter der Temperatur von W7-X Demospule und LCT-Spule (255K).
- Nach der Stabilisierung der Temperatur W7-X Demospule und LCT-Spule mit Verstärkung und Abstützung in den He-Kühlkreis zuschalten.

Kühlbedingungen

$\Delta T_{\max.}$	= 40 K
Abkühlgeschwindigkeit	= ca. 1 K/h

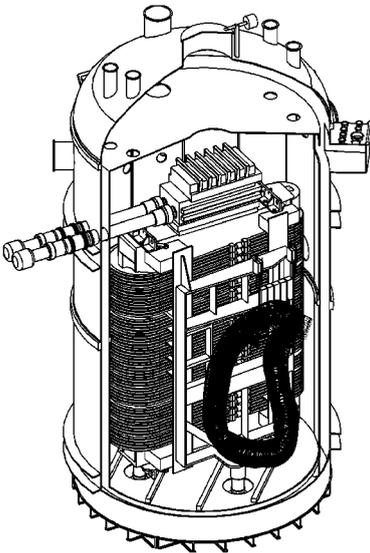
Massenstromaufteilung:

LCT

Wicklung, Gehäuse, Verstärkung je	27,4 g/s
-----------------------------------	----------

W7-X

Wicklung	= 1,4 g/s
Gehäuse	= 5,5 g/s
Abstützung	= 11 g/s



W7-X Demospule

Tagesprogramm

für

Mittwoch, 26. Mai 1999

- Inbetriebnahme der 2 kW Kälteanlage mit Beginn der Frühschicht
- Inbetriebnahme der Leitung Nr. 1 über Umgangsventil HCV303
- Stabilisierung der Vorlauftemperatur TI302 auf 40 K unter der Temperatur von W7-X Demospule und LCT-Spule (255K).
- Nach der Stabilisierung der Temperatur W7-X Demospule und LCT-Spule mit Verstärkung und Abstützung in den He-Kühlkreis zuschalten.

Kühlbedingungen

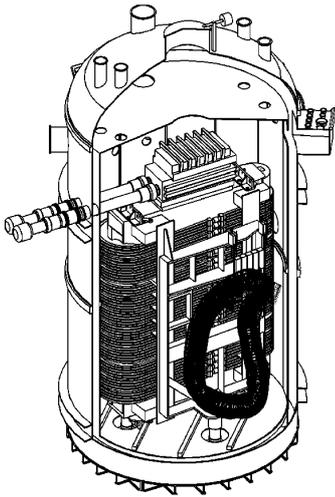
$\Delta T_{\max.}$	= 40 K
Abkühlgeschwindigkeit	= ca. 1 K/h
Massenstromaufteilung:	

LCT

Wicklung, Gehäuse, Verstärkung je	27,4 g/s
-----------------------------------	----------

W7-X

Wicklung	= 1,4 g/s
Gehäuse	= 5,5 g/s
Abstützung	= 11 g/s



W7-X Demospule

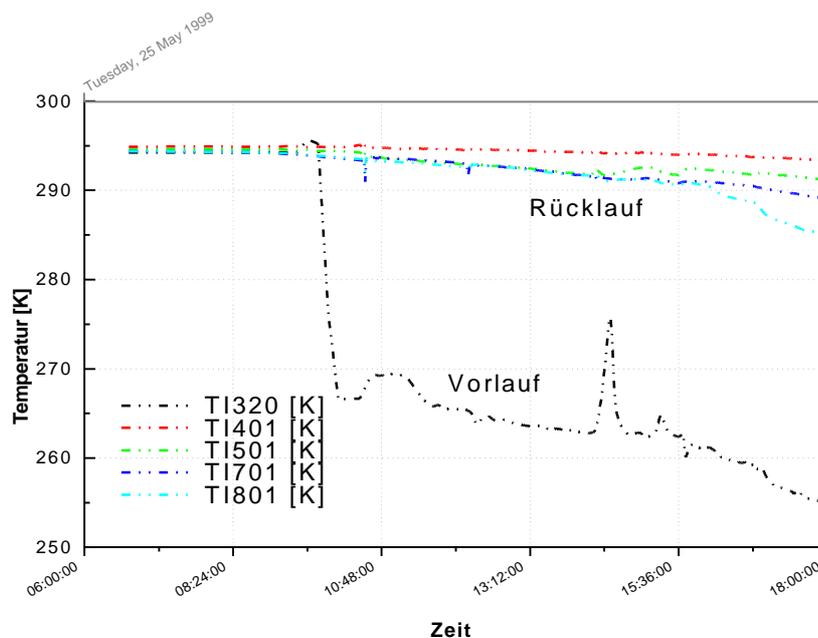
Tagesprogramm

für

Mittwoch, 26. Mai 1999

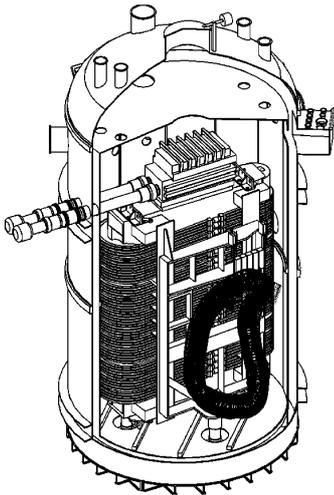
Status der Abkühlung

- Abkühlung begonnen
- Stabilisierung dauerte etwas länger als geplant



Programm für den 26. Mai 1999

- Abkühlung wie geplant fortsetzen
- Wenn ΔT der Verbindung zu den Stromzuführungen > 35 K diese mit He kühlen



W7-X Demospule

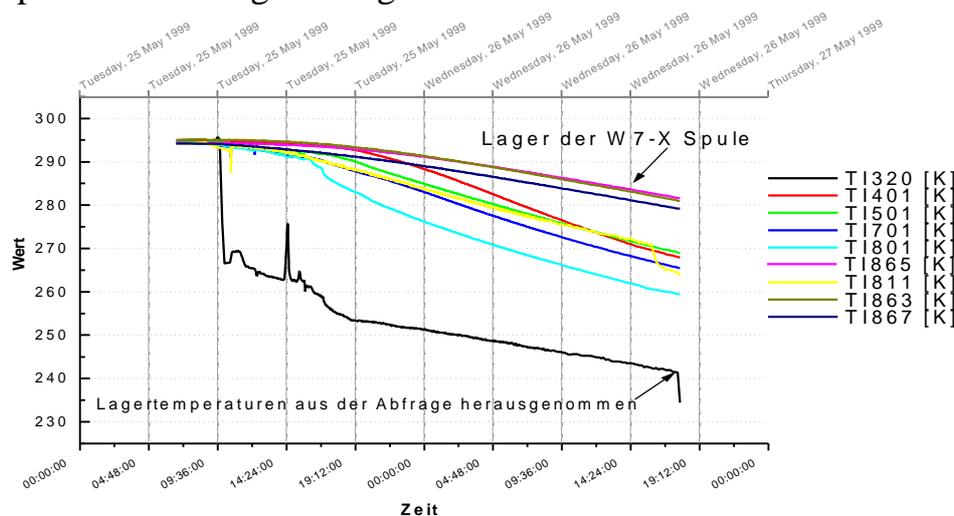
Tagesprogramm

für

Donnerstag, 27. Mai 1999

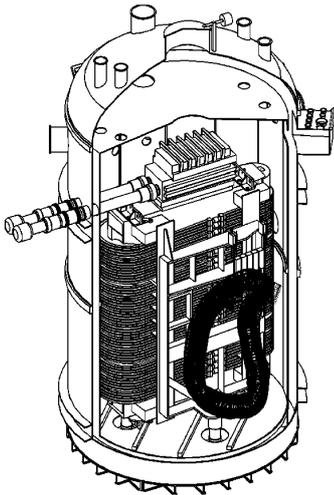
Status der Abkühlung

- Abkühlung wird durch die Temperaturen der W7-X Lager auf ca. 0,5 K/h gebremst
- Nach Rücksprache mit Noell und IPP H. Schönewolf wurden die Temperaturen TI863, TI865 und TI867 um 17:45 aus der automatischen Temperatursteuerung herausgenommen



Programm für den 27. Mai 1999

- Abkühlung wie geplant fortsetzen
- Die Lager der W7-X Spule beobachten $\Delta T_{\max} = 60 \text{ K}$
- Mit Noell und IPP überprüfen ob die Lagertemperaturen der W7-X Spule für die Temperatursteuerung wieder berücksichtigt werden sollen.



W7-X Demospule

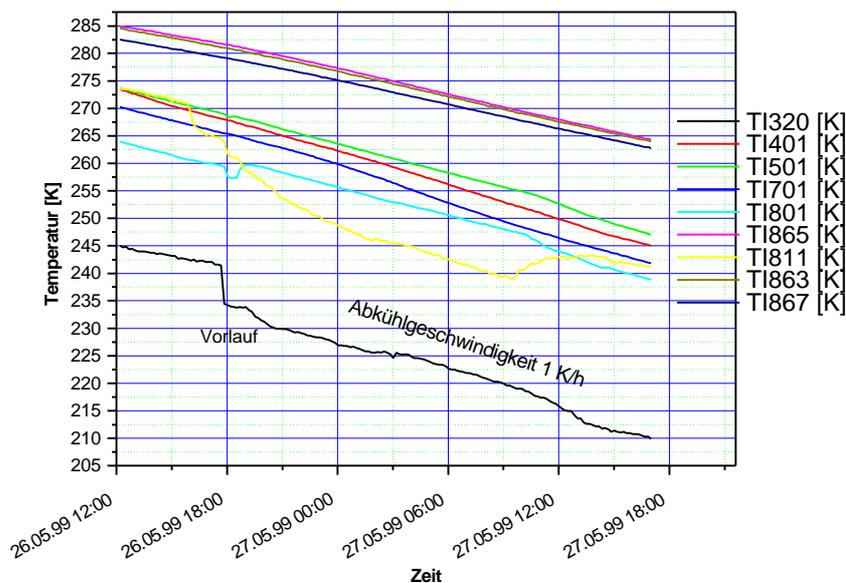
Tagesprogramm

für

Freitag, 28. Mai 1999

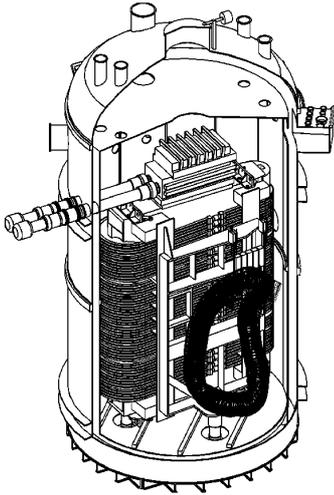
Status der Abkühlung

- Abkühlung erfolgt nun mit 1 K/h ohne Berücksichtigung der Temperaturen der W7-X Lager in der automatischen Temperatursteuerung (Von IPP und Noell genehmigt)
- Begrenzt wird die Abkühlung nun von der LCT-Spule (TI411)



Programm für den 28. Mai 1999

- Abkühlung wie geplant fortsetzen
- Stromzuführungen der LCT-Spule mit ca. 0,1 g/s pro Pol kühlen um die Windungstemperaturen (TI411 und 475) abzukühlen
- Verstärkung der LCT-Spule verstärkt kühlen und W7-X Lager beobachten $\Delta T < 60$ K



W7-X Demospule

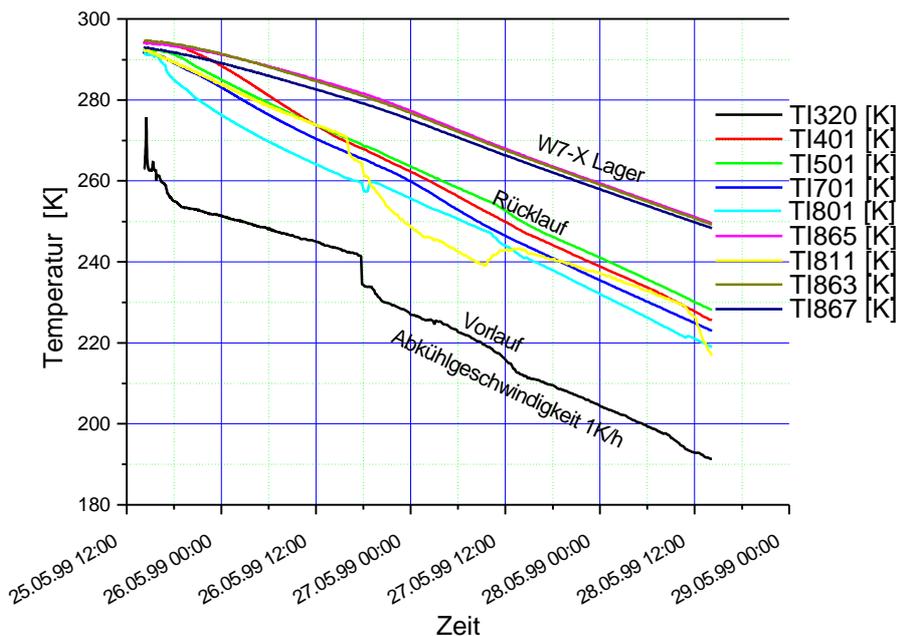
Tagesprogramm

für

29. und 30. Mai 1999

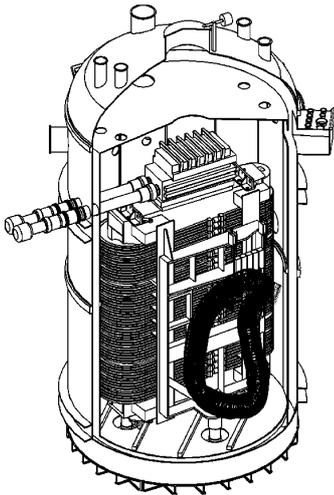
Status der Abkühlung

- Abkühlung erfolgt mit 1 K/h
- Die Stromzuführungen von W7-X und LCT-Spule werden mit je 0,1 g/s gekühlt die Kopfheizungen sind in Betrieb
- Begrenzt wird die Abkühlung nun vom Zwischenrahmen der W7-X Spule
- Die Spannstangen wurden nachgestellt



Programm für den 29. und 30. Mai 1999

- Abkühlung wie geplant fortsetzen
- Temperatur der W7-X Lager beobachten ΔT zwischen TI863, TI865, TI867 und TI800 darf 80 K nicht überschreiten. Bei 75 K TI320 nicht weiter absenken.



W7-X Demospule

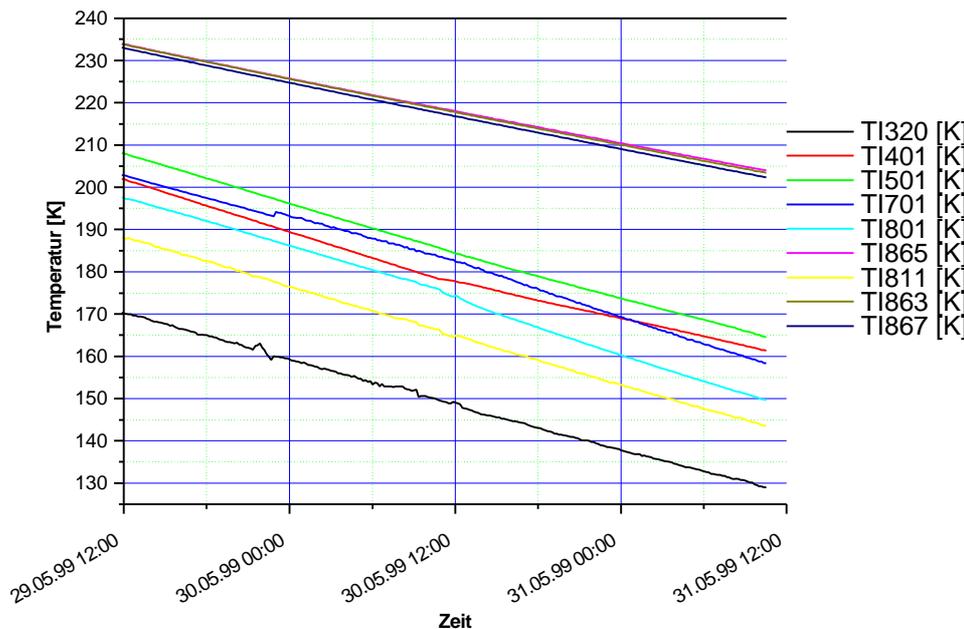
Tagesprogramm

für

Montag 31. Mai 1999

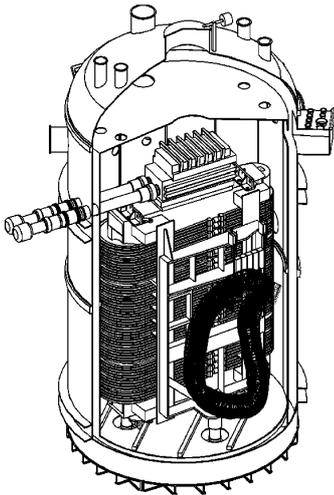
Status der Abkühlung

- Abkühlung erfolgt weiterhin mit 1 K/h
- Bei 150 K Vorlauftemperatur traten Massenstromschwingungen an der 2 kW Anlage auf
- Die Lagertemperaturen der W7-X Spule sind 74 K wärmer



Programm für den 31. Mai 1999

- Abkühlung wie geplant fortsetzen
- Temperatur der W7-X Lager beobachten ΔT zwischen TI863, TI865, TI867 und TI800 darf 80 K nicht überschreiten. Bei 80K TI320 nicht weiter absenken.



W7-X Demospule

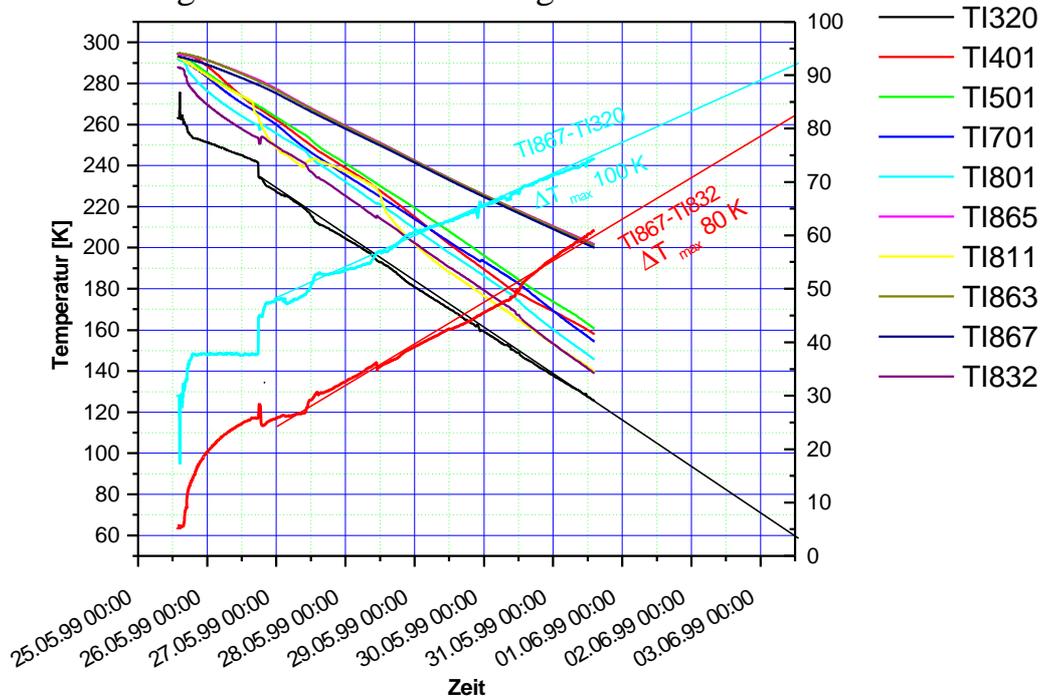
Tagesprogramm

für

Dienstag 1. Juni 1999

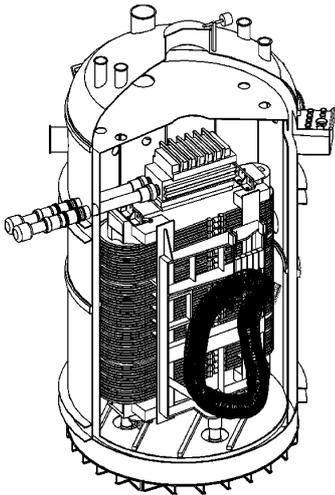
Status der Abkühlung

- Abkühlung erfolgt weiterhin mit 1 K/h
- Die Lagertemperaturen der W7-X Spule sind 77 K wärmer. Der Abstand wird immer größer wie aus dem Diagramm ersichtlich ist



Programm für den 1. Juni 1999

- Abkühlung wie geplant fortsetzen
- Temperatur der W7-X Lager beobachten ΔT zwischen TI863, TI865, TI867 und TI800 darf jetzt 100 K nicht überschreiten. Zwischen den Temperaturen TI830-TI837 und den Lagertemperaturen TI863-TI867 ist gemäß Herrn Sapper eine maximale Temperaturdifferenz von 80K einzuhalten.



W7-X Demospule

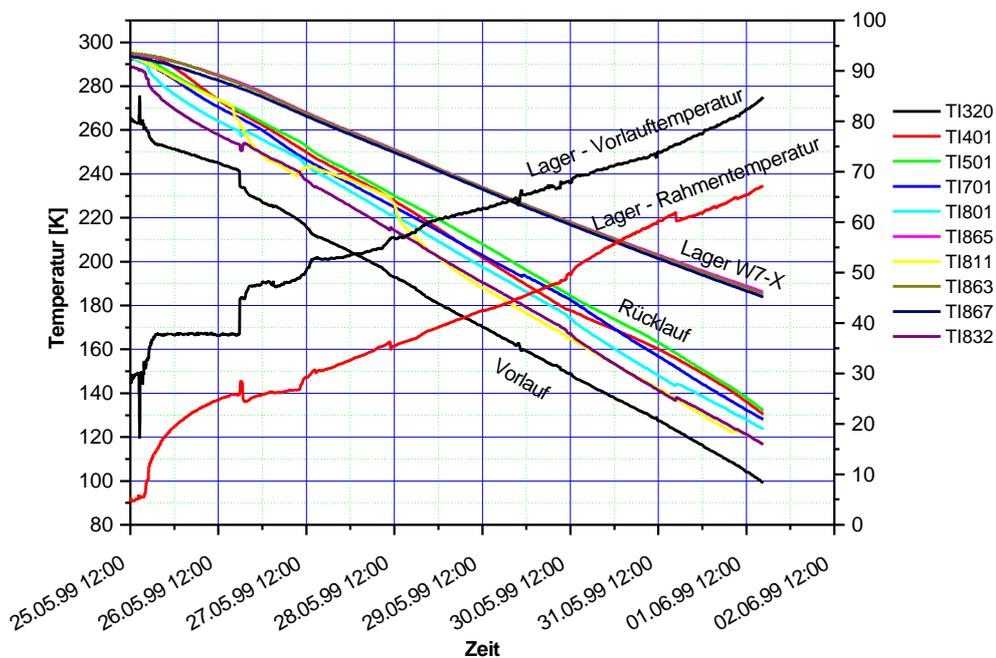
Tagesprogramm

für

Mittwoch 2. Juni 1999

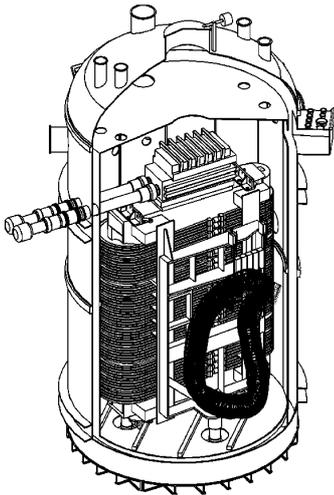
Status der Abkühlung

- Abkühlung erfolgt weiterhin mit 1 K/h
- Die Vorlauftemperatur liegt jetzt unter 100 k



Programm für den 2. Juni 1999

- Abkühlung wie geplant fortsetzen
- ΔT zwischen TI863, TI865, TI867 und TI800 darf weiterhin 100 K nicht überschreiten. Zwischen den Temperaturen TI830-TI837 und den Lagertemperaturen TI863-TI867 ist eine maximale Temperaturdifferenz von 80K einzuhalten.
- Ob die Abkühlung gedrosselt oder ΔT vergrößert werden kann entscheidet H. Sapper zwischen 10 und 12 Uhr.



W7-X Demospule

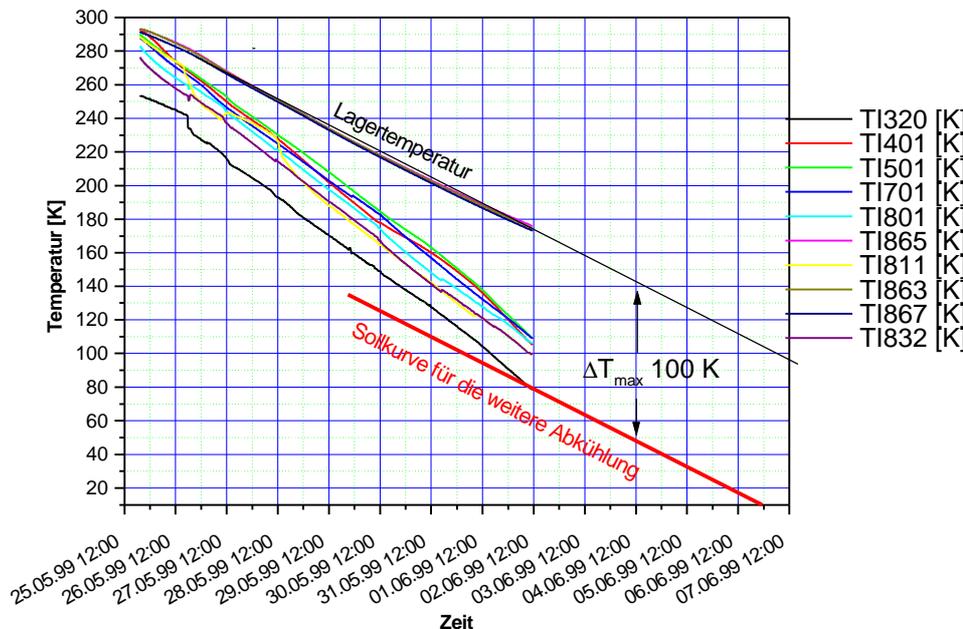
Tagesprogramm

für

3. - 7. Juni 1999

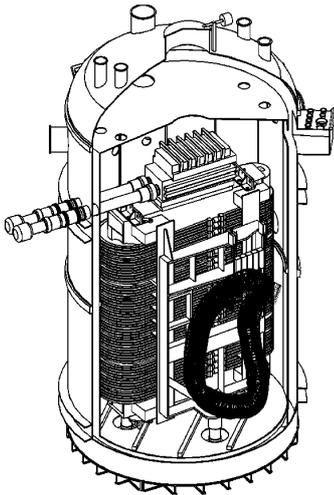
Status der Abkühlung

- Abkühlung erfolgte bis 2.6 11:00 Uhr mit 1 K/h danach wurde die weitere Abkühlung gestoppt
- Die Vorlauftemperatur liegt jetzt unter 80 K



Programm für 3. -7. Juni 1999

- Abkühlung mit 0,5 K/h oder 20-30 K ΔT fortsetzen um nachfolgende Bedingungen einzuhalten
- ΔT zwischen TI863, TI865, TI867 und TI800 darf weiterhin 100 K nicht überschreiten. Zwischen den Temperaturen TI830-TI837 und den Lagertemperaturen TI863-TI867 soll eine maximale Temperaturdifferenz von 80K nicht überschritten werden



W7-X Demospule

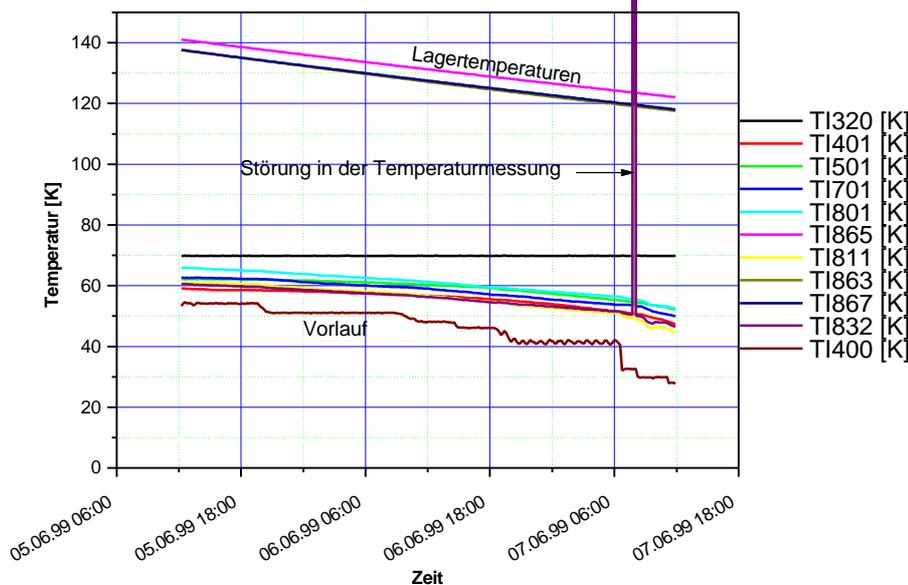
Tagesprogramm

für

Montag 7. Juni 1999

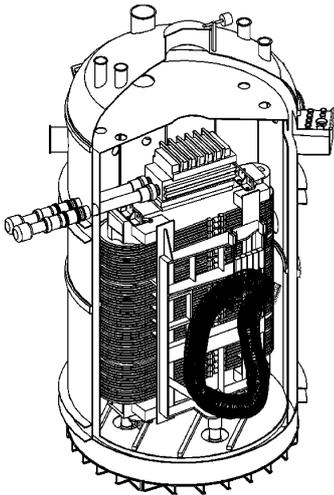
Status der Abkühlung

- Bedingt durch die schlecht kühlbaren Lager der W7_X Demospule erfolgt die weitere Abkühlung nun mit ca. 0,5 K/h.
- Die Vorlauftemperatur liegt jetzt unter 30 K
- Im B300 wurde am 2. 6. 99 ein hoher He-Untergrund festgestellt



Programm für den 7. Juni 1999

- Abkühlung mit einem ΔT_{\max} von 120 K zwischen TI863, TI865, TI867 und TI800 bzw. 96 K zwischen TI863, TI865, TI867 und TI840-TI842 fortsetzen (von H. Sapper festgelegt).
- Abkühlung von B250 starten
- Lecksuche in B300 um die Ursache für den hohen He-Untergrund festzustellen



W7-X Demospule

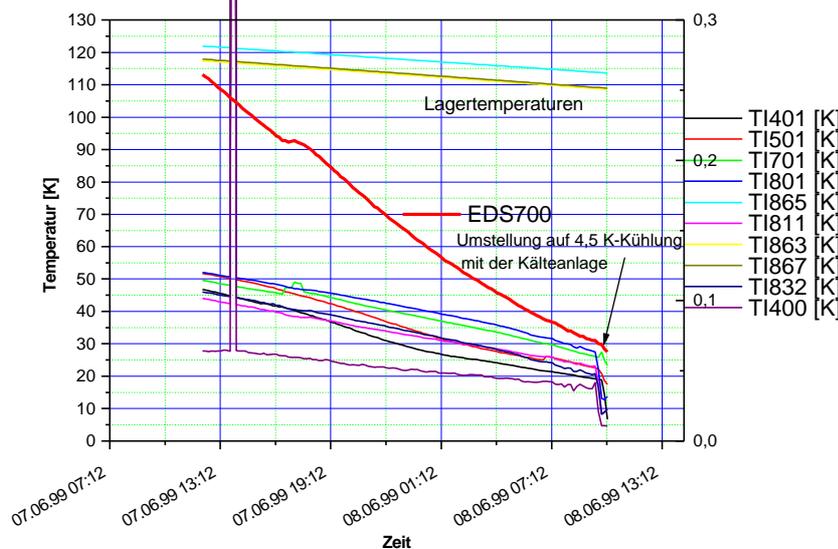
Tagesprogramm

für

Dienstag 8. Juni 1999

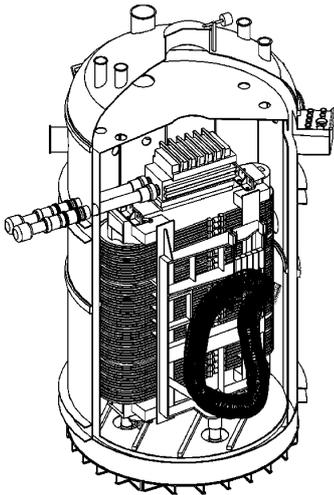
Status der Abkühlung

- Durch die Erhöhung von ΔT_{\max} auf 120 K bzw. 96K wurde die Abkühlung beschleunigt. Die Umstellung auf 4,5 K-Betrieb mit der Kälteanlage ist erfolgt.
- Der hohe He-Untergrund in B300 wird durch die + Stromzuführung (SZ) von W7-X verursacht (L im Bereich 10^{-2} mbar l/s).



Programm für den 8. Juni 1999

- Füllen von B250 bis 80 cm
- Lecktest der W7-X und LCT-Spule bei 8 bar und 5-10 K
- Betrieb der W7-X SZ bei Betriebsbedingungen und Beobachtung des Vakuums in B300
- Umstellung der Kühlung auf Pumpenbetrieb



W7-X Demospule

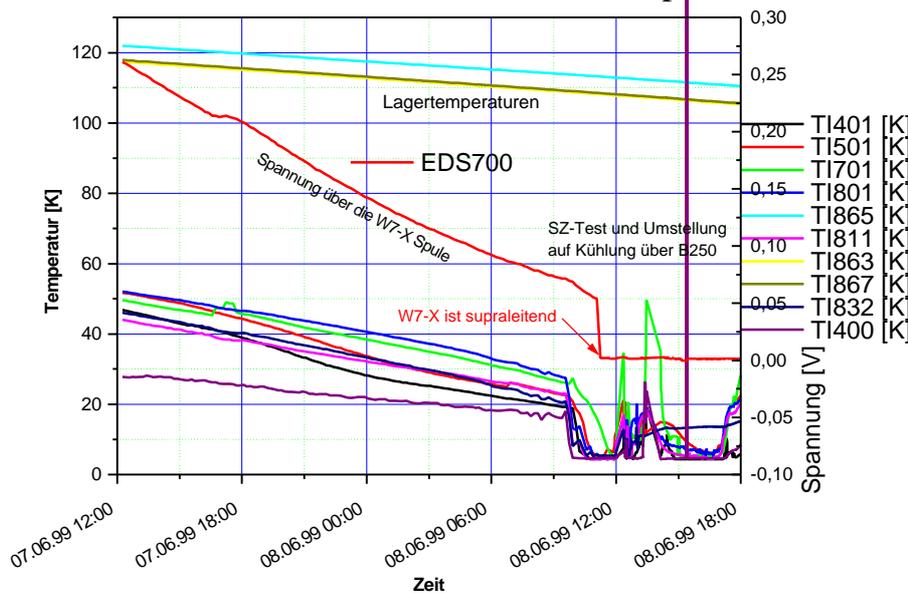
Tagesprogramm

für

Mittwoch 9. Juni 1999

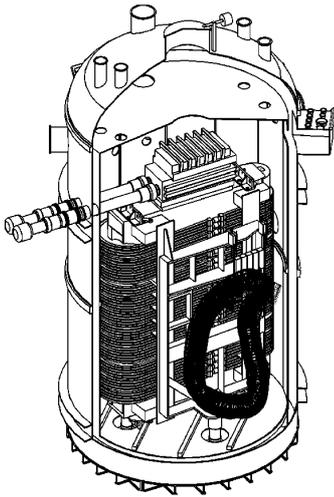
Status der Abkühlung

- Die Abkühlung der Testanordnung ist Abgeschlossen und B250 z.T. gefüllt
- Beide Spulen sind supraleitend
- Die + Stromzuführung (SZ) von W7-X wurde ohne wesentlichen Druckanstieg in B300 ($1,5 \cdot 10^{-5}$ mbar) etwa auf Betriebsbedingungen gefahren
- Leckrate der W7-X $L < 2,4 \cdot 10^{-4}$ mbar und LCT-Spule $L \sim 2,4 \cdot 10^{-4}$ mbar



Programm für den 9. Juni 1999

- Umstellung auf Pumpenbetrieb und Vorbereitung für stationären Kühlbetrieb
- Vorbereitung des Strombetriebs
- Anschließen der Hochstromkabel
- Abgleich der Quenchdetektoren



W7-X Demospule

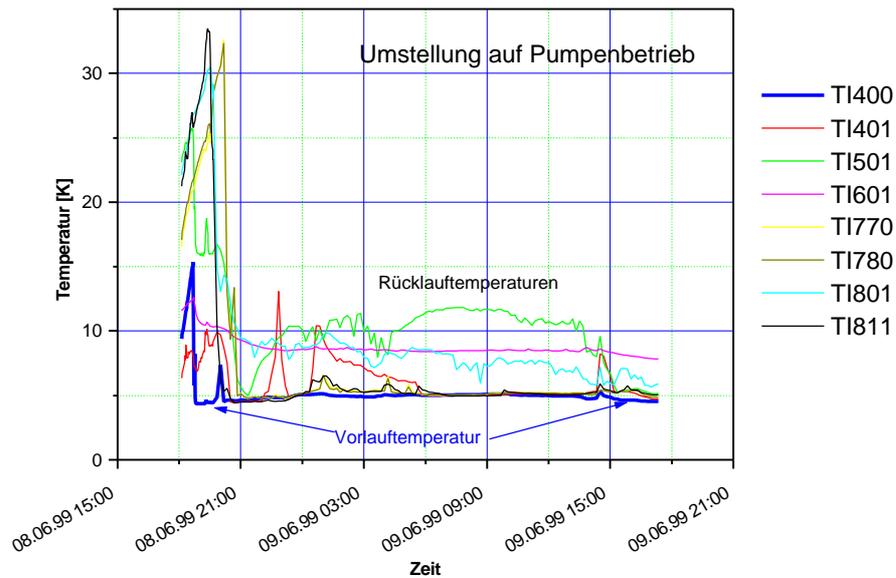
Tagesprogramm

für

Donnerstag 10. Juni 1999

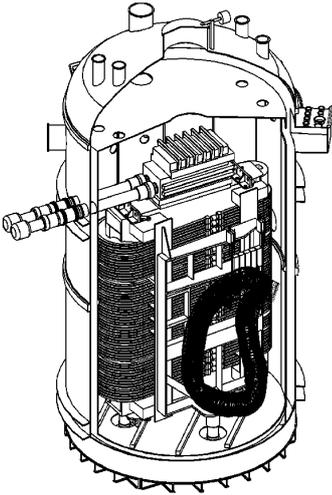
Status der Abkühlung

- Umstellung auf Pumpenbetrieb und Vorbereitung für stationären Kühlbetrieb. Die einzelnen Bauteile des Systems sind noch nicht ausreichend durchgekühlt.
- Die Hochstromkabel wurden angeschlossen
- Die Quenchdetektoren modifiziert



Programm für den 10. Juni 1999

- Umstellung der Kühlung auf Testbedingungen mit Strom
- TI920, 940, 960, 980 der SZ auf $T < 10$ K fahren
- Stromschienen in den Schaltanlagen schließen
- 10 Uhr Hochspannungstest
- 11 Uhr Test der Verriegelungen
- Beginn der Stromtests mit niederen Strömen



W7-X Demospule

Tagesprogramm

für

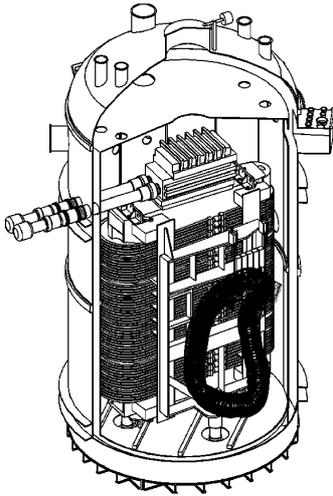
Freitag 11. Juni 1999

Status

- Hochspannungstest von LCT und W7-X Spule mit Problemen in der W7-X (POLO) Schaltanlage durchgeführt.
- Umstellung der Kühlung auf Testbedingungen mit Strom. Die Temperaturen der W7-X Stromzuführungen (TI940 und TI980) konnten nicht auf die Solltemperatur $T < 10$ K gebracht werden.

Programm für den 11. Juni 1999

- Austausch der defekten Elemente des W7-X Entladewiderstandes
- Hochspannungstest der W7-X Demospule im kalten Zustand ohne Schaltanlage und ohne Anschluß an das Kühlsystem der Hochstromkabel
- Optimierung der Stromzuführungskühlung von W7-X
- Test der Verriegelungen
- Beginn der Stromtests mit niederen Strömen



W7-X Demospule

Tagesprogramm

für

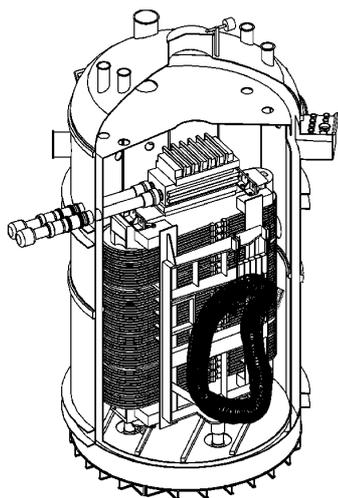
12-14. Juni 1999

Status

- Rückkühlung der Testanlage nach einem Stromausfall im FZK-Netz.
- Austausch der defekten Elemente des W7-X Entladewiderstandes
- Hochspannungstest der W7-X Demospule im kalten Zustand erst ohne Schaltanlage und anschließend mit Schaltanlage

Programm für das Wochenende und den 14. Juni 1999

- Kalthaltebetrieb der Testanlage ohne He-Pumpen
- Hochspannungstest von W7-X und LCT Spule
- Test der Verriegelungen
- Beginn der Stromtests mit niederen Strömen



W7-X Demospule

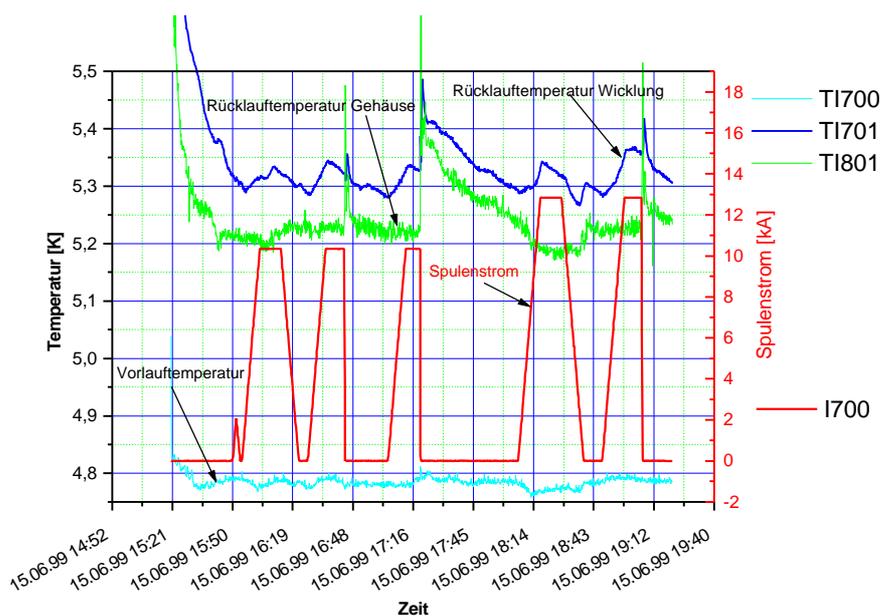
Tagesprogramm

für

Mittwoch 16. Juni 1999

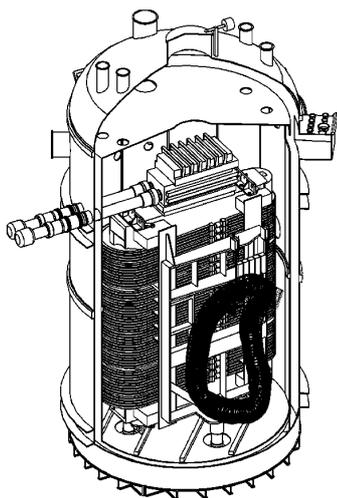
Status

- Test der Verriegelungen der Einzelspulen W7-X und LCT-Spule abgeschlossen
- Strombetrieb der W7-X Demospule mit 10,29 kA (0,7 Nennstrom) mit Wechselrichter- und Schnellentladung
- Strombetrieb der W7-X Demospule mit 12,79 kA (0,87 Nennstrom) mit Wechselrichterentladung und unbeabsichtigtem Übergang zur Schnellentladung bei 2 kA



Programm für den 16. Juni 1999

- Erste Auswertung der bisher durchgeführten Tests
- Suche der Ursache für den Übergang zur Schnellentladung
- Fortsetzung der Stromtests mit der W7-X Demospule mit 12,79 kA und Nennstrom von 14,7 kA gemäß Testprogramm



W7-X Demospule

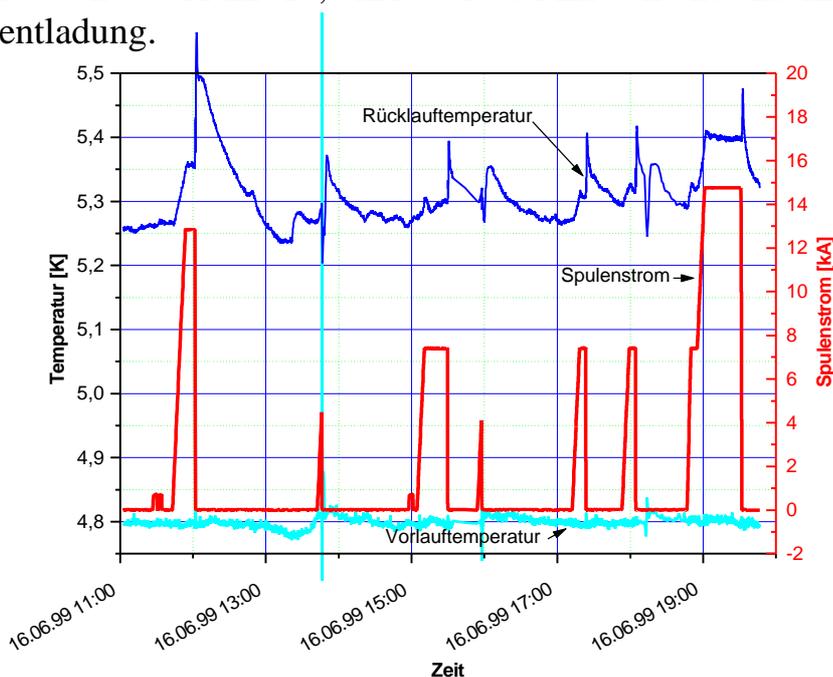
Tagesprogramm

für

Donnerstag 17. Juni 1999

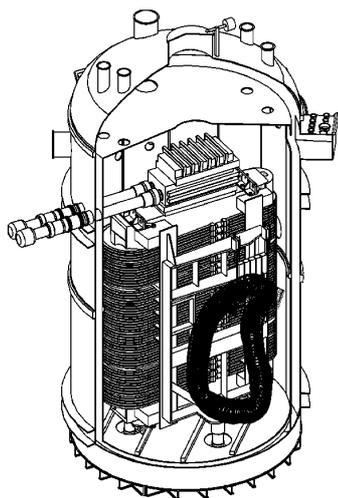
Status

- Strombetrieb der W7-X Demospule mit 12,79 kA mit Schnellentladung.
- Zwei unbeabsichtigte Schnellentladungen (SE) beim Hochfahren bei 4 kA. Die Auslösung dieser Schnellentladungen ist bisher unklar.
- Test der Schaltanlage mit Schnellentladungen von 7,35 kA.
- Nennstrombetrieb von W7-X mit 14,7 kA über 30 Minuten und anschließender Wechselrichterentladung.



Programm für den 17. Juni 1999

- Nennstrombetrieb von W7-X mit 14,7 kA mit Netzgeräteentladung und Schnellentladung
- Test der Verriegelungen für den gemeinsamen Betrieb von W7-X und LCT-Spule
- Suche der Ursache für die unbeabsichtigten Schnellentladungen

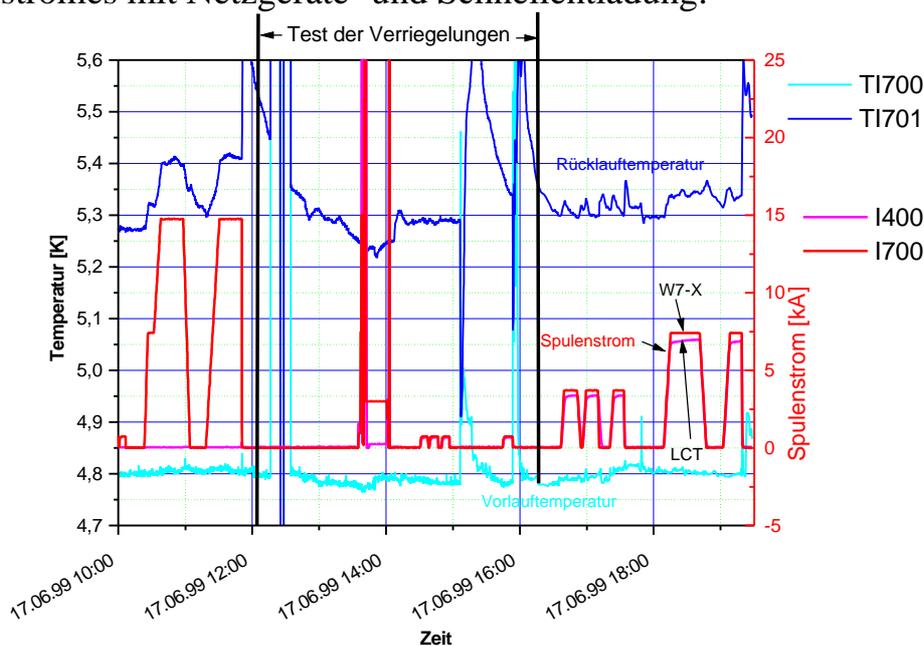


W7-X Demospule

Tagesprogramm für Freitag 18. Juni 1999

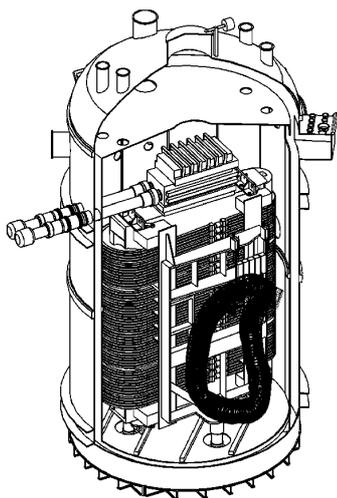
Status

- Nennstrombetrieb von W7-X mit 14,7 kA mit Netzgeräte- und Schnellentladung.
- Test der Verriegelungen für den gemeinsamen Betrieb von W7-X und LCT Spule.
- Gemeinsamer Betrieb von W7-X und LCT-Spule bei 25% und 50% des Nennstromes mit Netzgeräte- und Schnellentladung.



Programm für den 18. Juni 1999

- Umstellung der Anlage auf 3,5 K Betrieb.
- Fortsetzung des Testprogrammes mit Nennstrombetrieb (14,7 kA) der W7-Spule bei 3,8 K.
- Gemeinsamer Betrieb von W7-X und LCT-Spule bei 70% (mit einem Stop bei 50%) und 87% des Nennstroms.



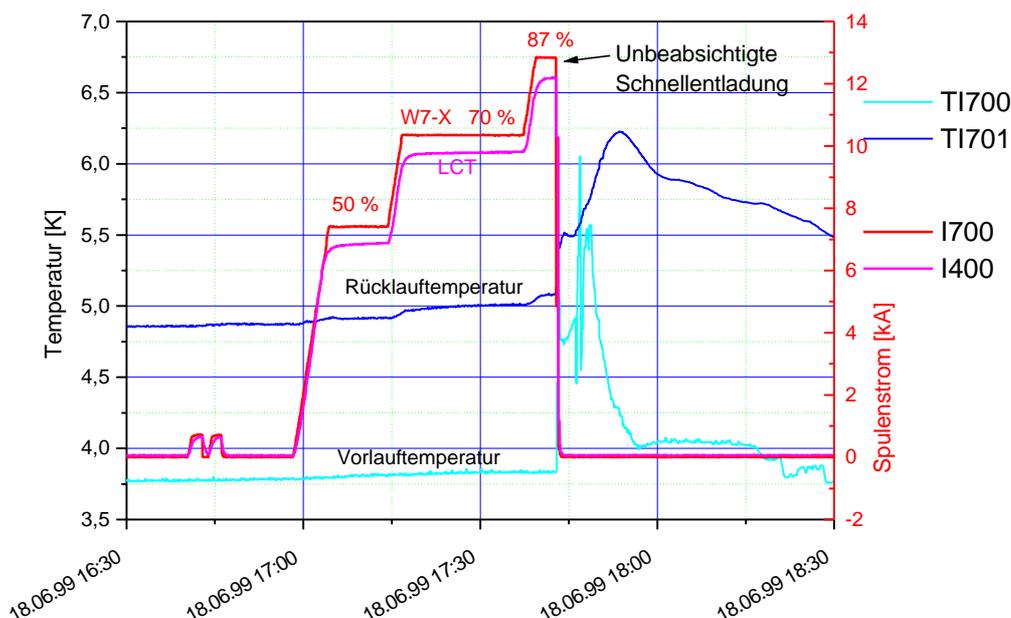
W7-X Demospule

Tagesprogramm für

19. bis 21. Juni 1999

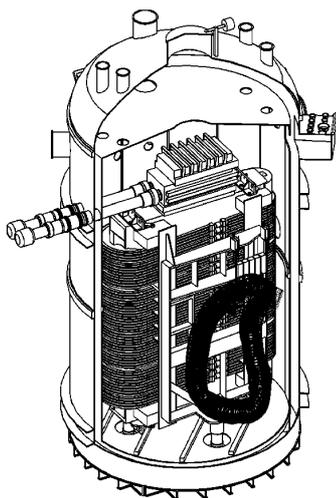
Status

- Umstellung der Anlage auf 3,5 K Betrieb. Die Eintrittstemperatur in die Wicklung der W7-X Spule konnte wegen zu hoher Wärmezufuhr im Verteilerbereich nicht auf 3,8 K gesenkt werden.
- Gemeinsamer Betrieb von W7-X und LCT-Spule bei 50 %, 70 % und 87 % des Nennstromes mit unbeabsichtigter Schnellentladung. Die Ursache ist unklar.



Programm für 19. bis 21. Juni 1999

- Übers Wochenende Kalthaltebetrieb bei 4,5 K ohne He-Pumpen
- Umstellung auf 3,5 K Betrieb am Montagmorgen
- Fortsetzung des Testprogrammes mit gemeinsamen Betrieb von W7-X und LCT-Spule.
- Klärung der Ursache für die unbeabsichtigte Schnellentladung.

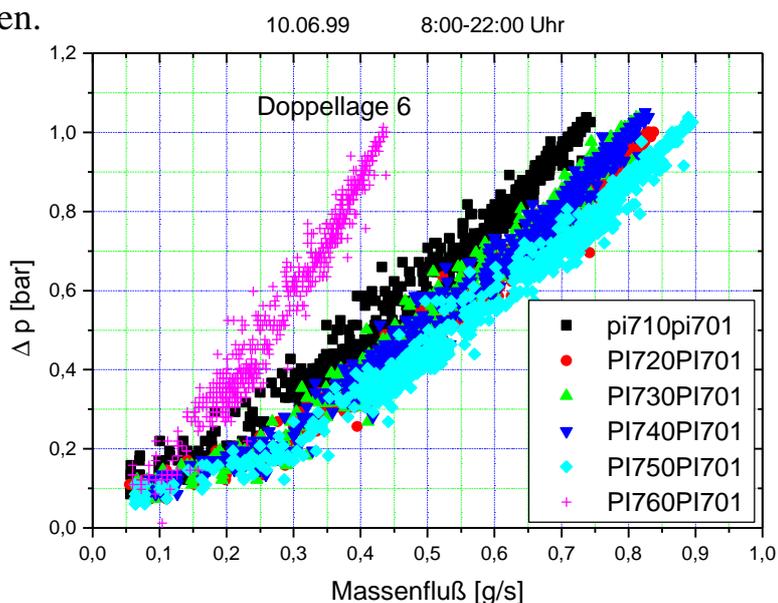


W7-X Demospule

Tagesprogramm für Dienstag 22. Juni 1999

Status

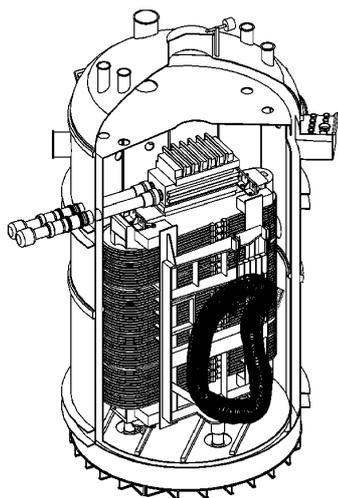
- Die Verriegelungen zwischen Kryotechnik und Schaltanlage wurden auf die transiente Datenerfassung gelegt um die Ursache für die unbeabsichtigten Schnellentladungen einzugrenzen.
- Strombetrieb war wegen zu geringem Füllstand in B250 und 10000 l Tank nicht möglich. Ursache war Stromausfall und ein undichtes Ventil.
- Der Druckabfall in Doppellage 6 ist erheblich höher als in den anderen Doppellagen.



WTFMC/Origin W7X_2/W7X-Wicklung

Programm für den 22. Juni 1999

- Umstellung der Anlage auf 3,5 K Betrieb.
- Gemeinsamer Betrieb von W7-X und LCT-Spule bei Nennstrom von 14,7 kA in der W7-X und 14 kA in der LCT-Spule mit einem Stop bei 87%. Erst mit Netzgeräteentladung und anschließend mit Schnellentladung

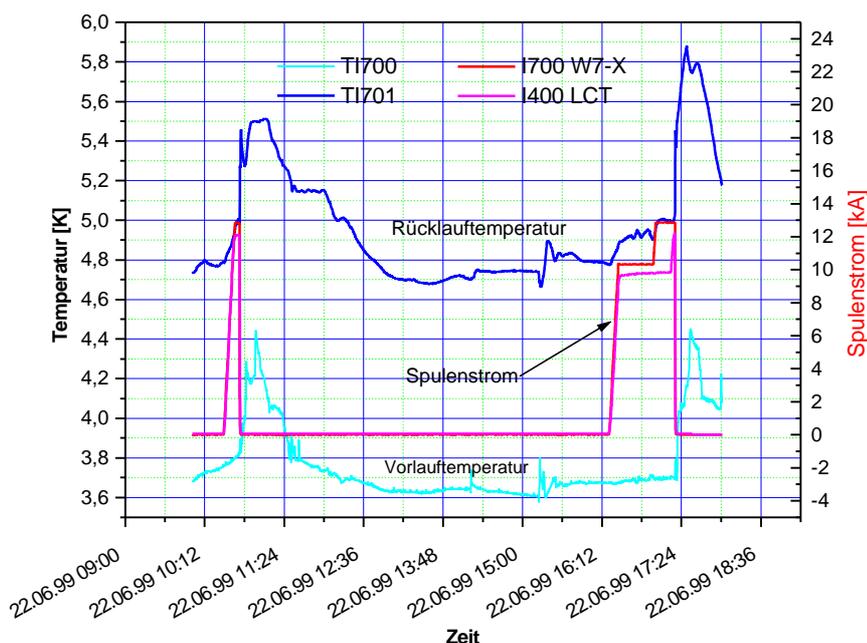


W7-X Demospule

Tagesprogramm für Mittwoch 23. Juni 1999

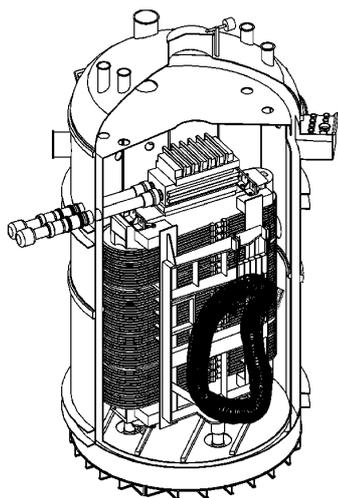
Status

- Gemeinsamer Betrieb von W7-X und LCT bis 87 % Nennstrom. Nach kurzem Betrieb von wenigen Minuten erfolgte eine unbeabsichtigte Schnellentladung.
- Als Ursache stellte sich ein Stromwandler des 30 kA Netzgerätes heraus. Dieser Wandler wird vom Magnetfeld beeinflusst und übersteuert.



Programm für den 23. Juni 1999

- Abschirmung oder Kompensation des Magnetfeldes am Stromwandler des 30 kA Netzgerätes.
- Gemeinsamer Betrieb von W7-X und LCT-Spule bei 87 % des Nennstrom und anschließend bei Nennstrom.

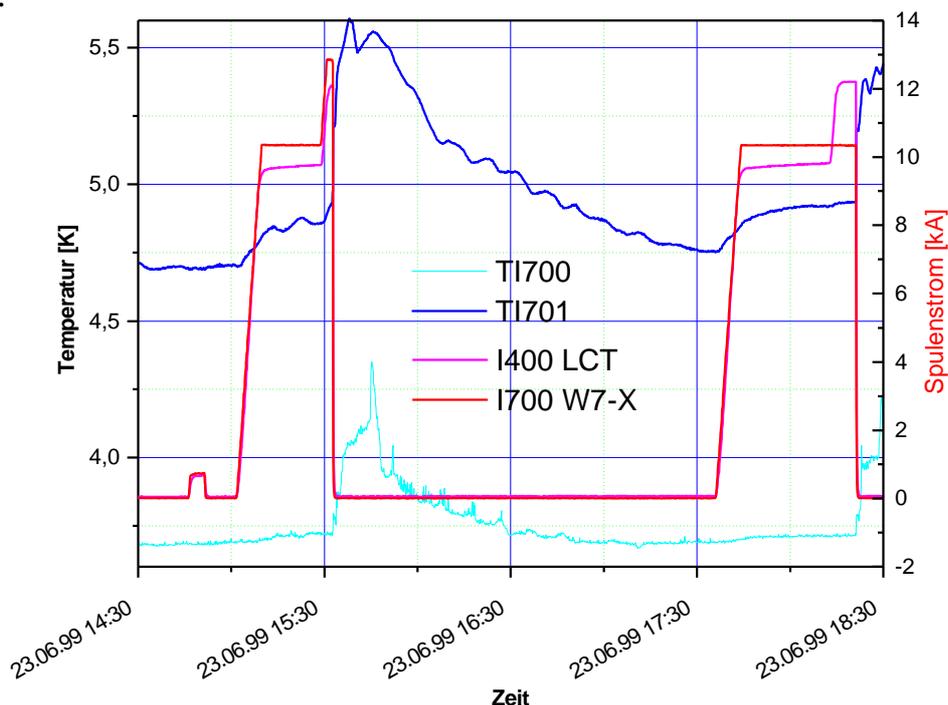


W7-X Demospule

Tagesprogramm für Donnerstag 24. Juni 1999

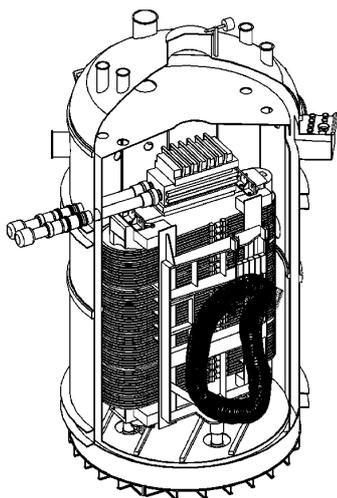
Status

- Die Kompensation des Magnetfeldes am Stromwandler des 30 kA Netzgerätes brachte nicht die erwartete Verbesserung. Auch mit der Kompensation erfolgte die Schnellentladung nach kurzer Betriebszeit von W7-X und LCT-Spule bei 87 % des Nennstroms sowie bei 70 % in der W7-X und 87% in der LCT Spule.



Programm für den 24. Juni 1999

- Weitere Suche nach der Ursache für die Störung der Strommessung am 30 kA Netzgerät.

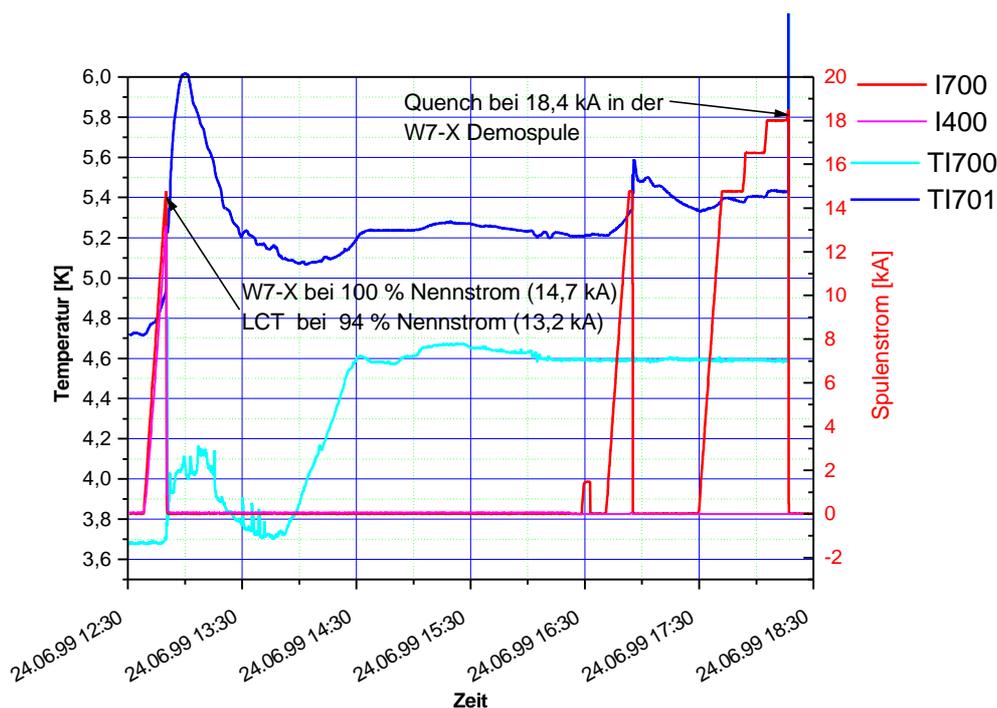


W7-X Demospule

Tagesprogramm für Freitag 25. Juni 1999

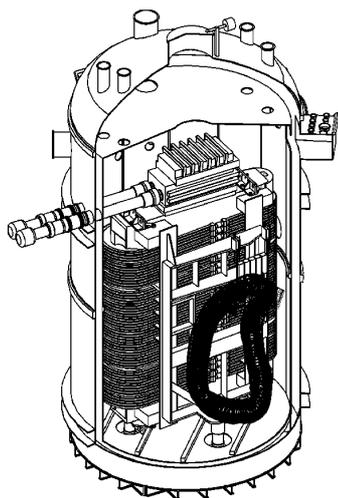
Status

- Gemeinsamer Betrieb der W7-X Spule bei 100 % und LCT - Spule bei 94 % Nennstrom ohne Quench mit Schnellentladung durch das 30 kA-Netzgerät (Störung der Strommessung).
- Betrieb der W7-X Spule ohne LCT Spule (Lastfall A) bis 18,4 kA dann Quench in der Hochfeldlage.



Programm für den 25. Juni 1999

- Wiederholung des Betriebs der W7-X Spule ohne LCT-Spule bei 4,8 K He-Eintrittstemperatur in die Doppellagen bis zum Quench oder bis 19 kA.



W7-X Demospule

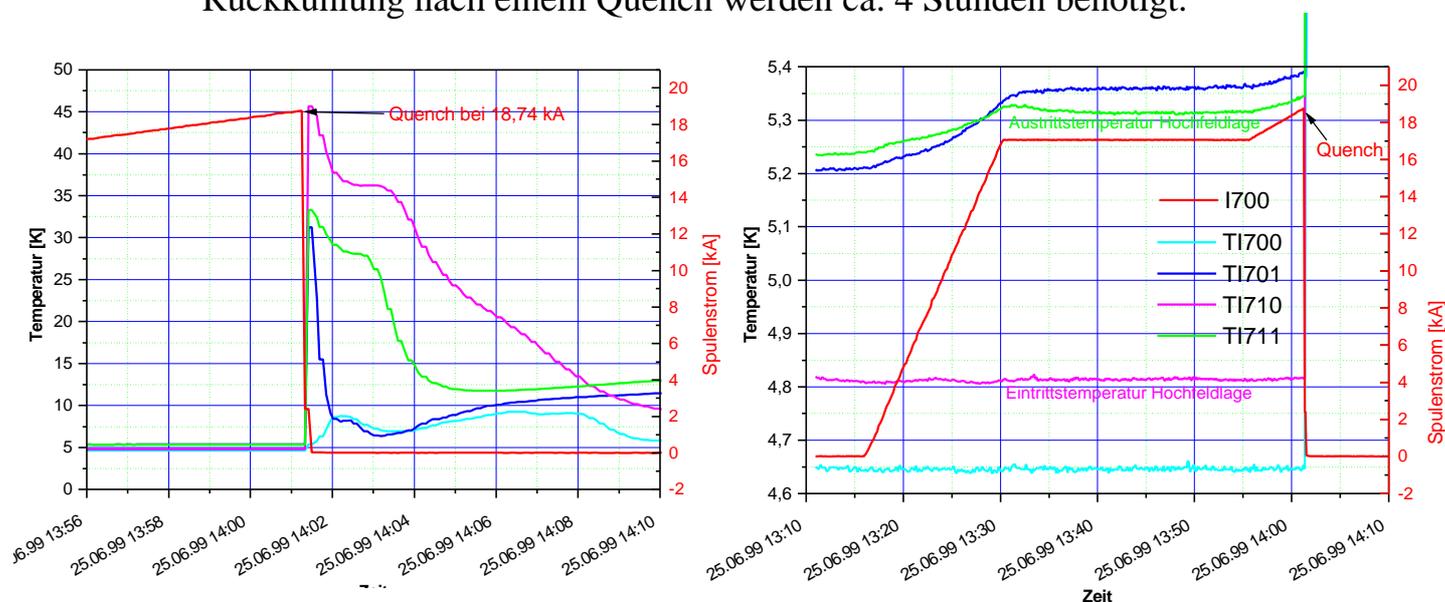
Tagesprogramm

für

26. bis 28. Juni 1999

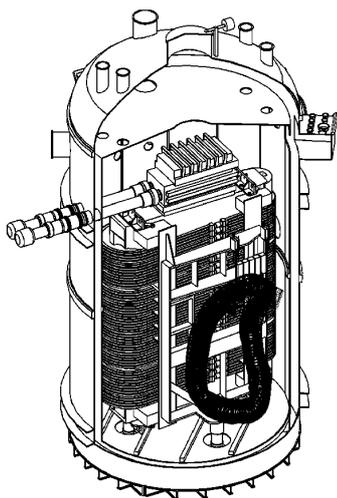
Status

- Wiederholung des Betriebs der W7-X Spule ohne LCT-Spule bei 4,8 K He-Eintrittstemperatur in die Doppellagen bis zum Quench bei 18,75 kA. Für die Rückkühlung nach einem Quench werden ca. 4 Stunden benötigt.



Programm für 26. bis 28. Juni 1999

- Übers Wochenende Kalthaltebetrieb bei 4,5 K ohne He-Pumpen.
- Umstellung auf 3,5 K Betrieb am Montagmorgen.
- Betrieb beider Spulen bis 87 % Nennstrom für den Test des 30 kA Netzgerätes wenn notwendig bis 100 % Nennstrom.
- Modifikation und Test des 30 kA Netzgerätes für den Betrieb beider Spulen.



W7-X Demospule

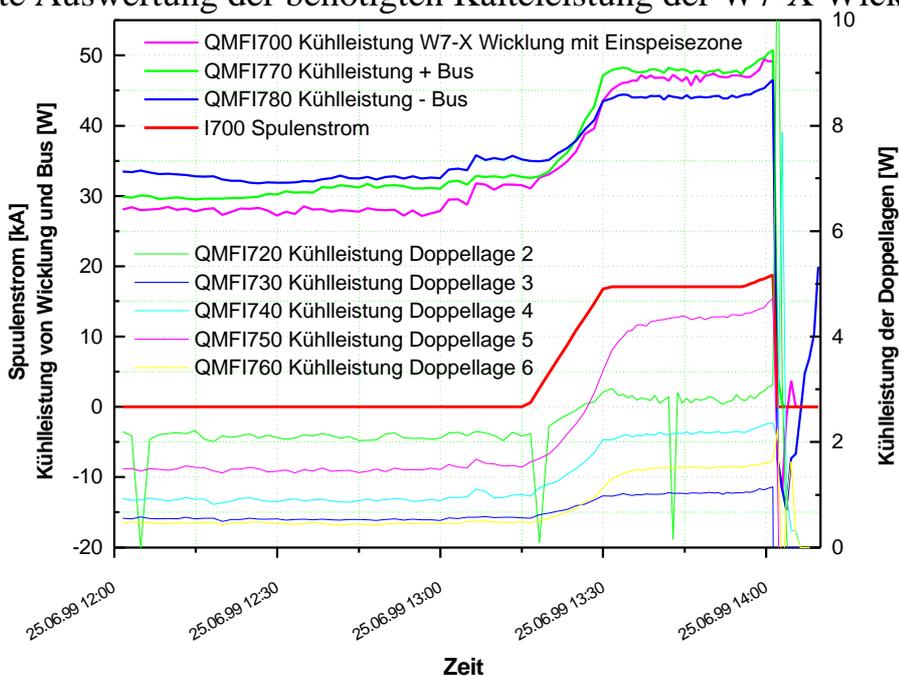
Tagesprogramm

für

Dienstag 29. Juni 1999

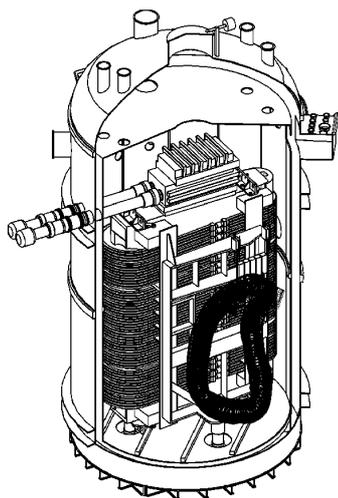
Status

- Fehlersuche am 30 kA Netzgerät. Umstellung der Stromregelung von sekundärer (Gleichstrom) auf primäre (Wechselstrom) Strommessung als Istwertgeber um unempfindlicher gegen Magnetfeld zu werden.
- Erste Auswertung der benötigten Kälteleistung der W7-X Wicklung.



Programm für den 29. Juni 1999

- Optimierung des Stromreglers vom 30 kA Netzgerät beim Betrieb mit der W7-X Spule.
- Betriebs der W7-X Spule erst ohne und dann mit der LCT-Spule bei 87 % und 100% Nennstrom.

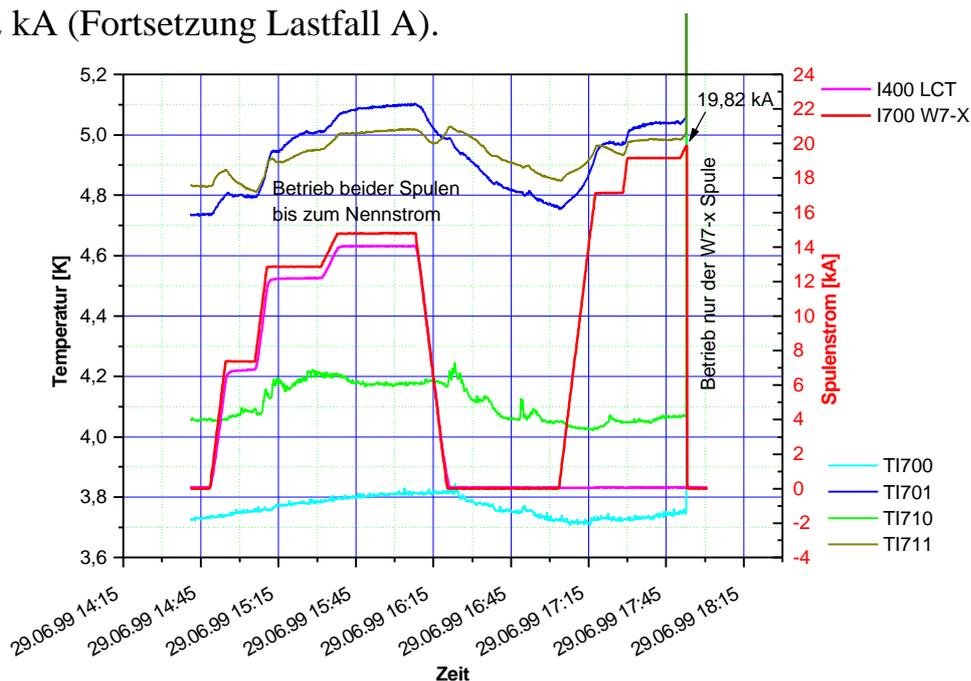


W7-X Demospule

Tagesprogramm für Mittwoch 30. Juni 1999

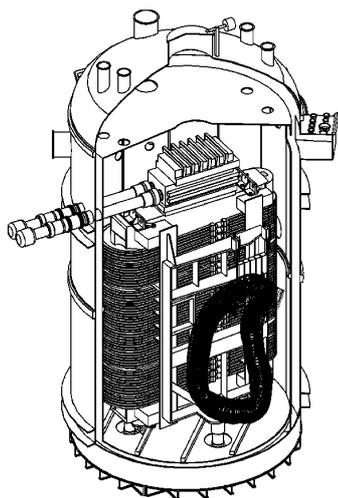
Status

- Optimierung des Stromreglers vom 30 kA Netzgerät beim Betrieb mit der W7-X Spule bis 14,7 kA.
- Betrieb beider Spulen bis zum Nennstrom von 14,7 kA in der W7-X und 14 kA in der LCT-Spule (Lastfall B).
- Betrieb der W7-X Spule ohne LCT erst bis 19 kA danach bis zum Quench bei 19,82 kA (Fortsetzung Lastfall A).



Programm für den 30. Juni 1999

- Modifikation und Test des 50 kA Netzgerätes mit der LCT-Spule.
- Auswertung der Ergebnisse vom 29. Juni 1999 und Festlegung des weiteren Programmes.

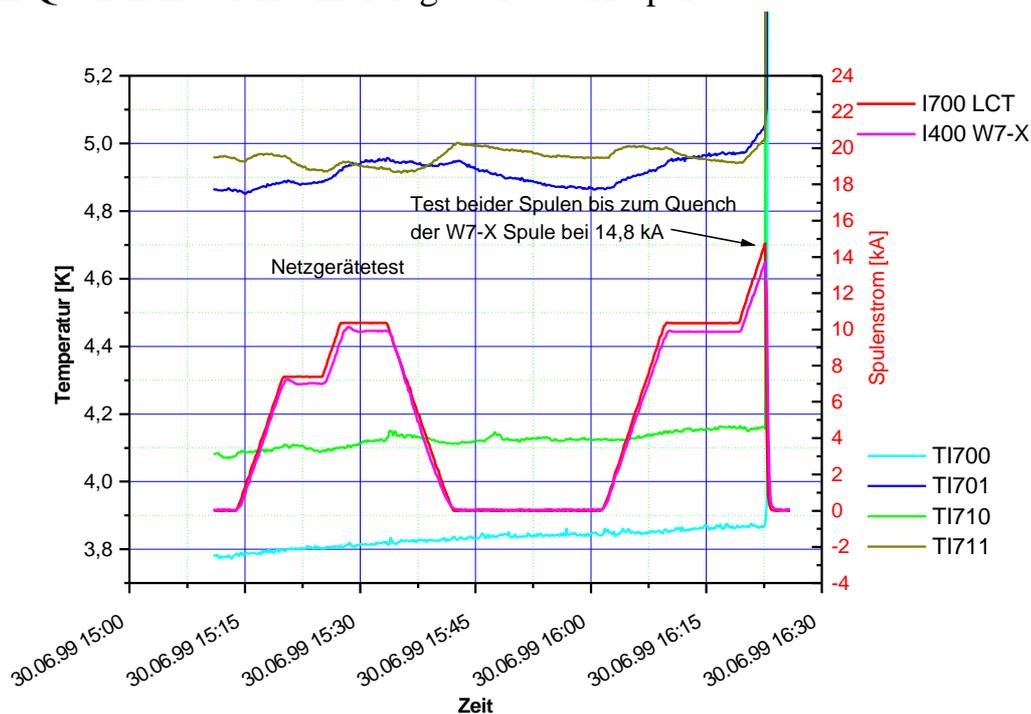


W7-X Demospule

Tagesprogramm für Donnerstag 1. Juli 1999

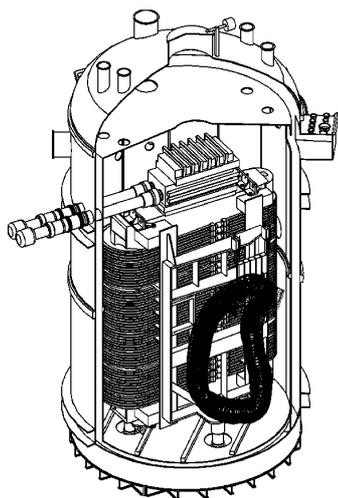
Status

- Modifikation und gemeinsamer Testbetrieb von 50 kA und 30 kA Netzgerät erfolgreich abgeschlossen.
- Betrieb beider Spulen bis 14,8 kA in der W7-X und 13,8 kA in der LCT-Spule dann Quench in der Hochfeldlage der W7-X Spule.



Programm für den 1. Juli 1999

- Auswertung der Testergebnisse sowie des Quench vom 30. Juni 1999 und Festlegung des weiteren Testprogrammes.
- Wiederholung des Lastfall A vom 29.6.99 bei möglichst tiefen Temperaturen

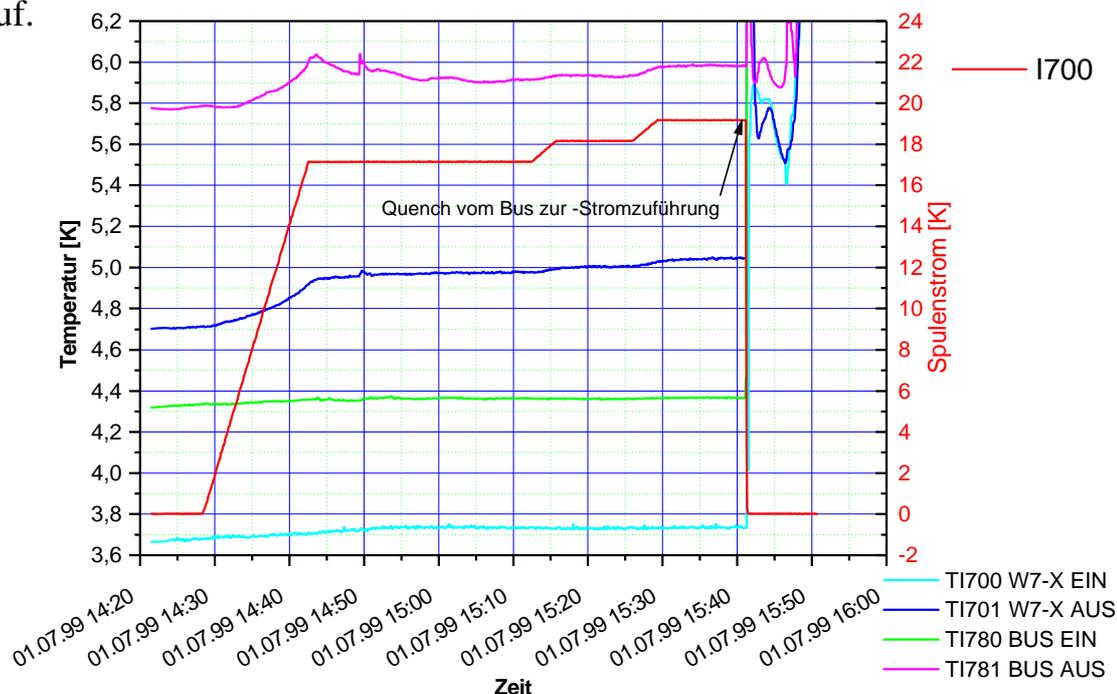


W7-X Demospule

Tagesprogramm für Freitag 2. Juli 1999

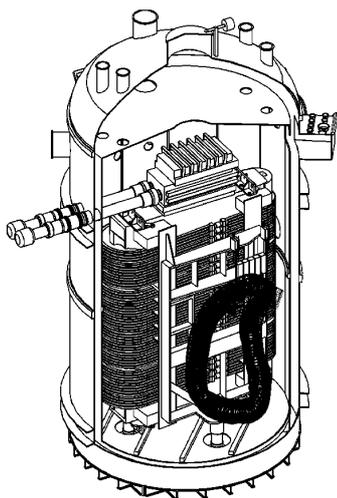
Status

- Betrieb der W7-X Spule ohne LCT Spule (Lastfall A) bis 19 kA mit längeren Zwischenstops bei 17 und 18 kA. Nach 12 Minuten bei 19 kA trat trotz stabiler Temperaturen und Kühlbedingungen ein Quench im Bus zur -Stromzuführung auf.



Programm für den 2. Juli 1999

- Wiederholung des Lastfall A vom 1.7.99 bei tieferen Gehäusetemperaturen und höheren Massenströmen in den Bussen.
- Test der LCT-Schaltanlage sowie Wartung von Datenerfassung und Visualisierung.

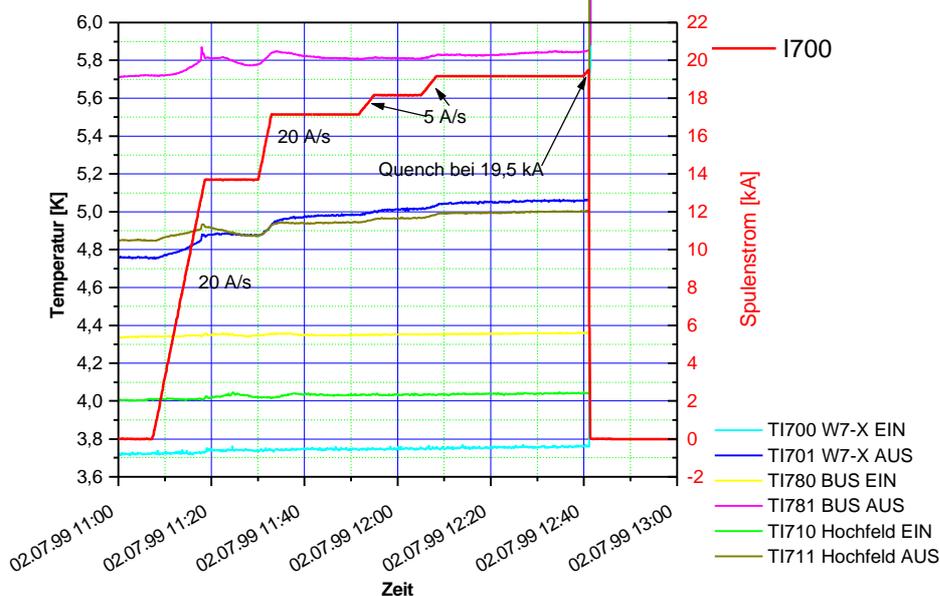


W7-X Demospule

Tagesprogramm für 3. bis 5. Juli 1999

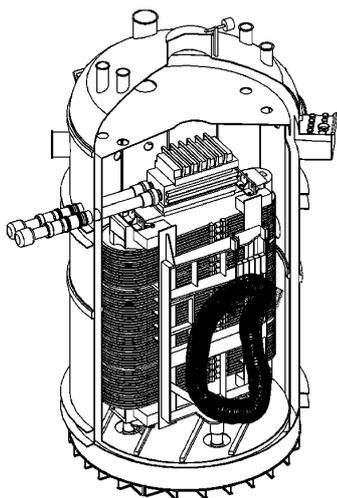
Status

- Wiederholung des Betriebs der W7-X Spule ohne LCT-Spule bei 3,8 K He-Eintrittstemperatur (LastfallA). Hochfahren in Stufen bis 19 kA, stabiler Betrieb bei 19 kA über eine halbe Stunde dann Hochfahren bis zum Quench bei 19,5 kA.
- Wartung von Datenerfassung und Visualisierung.



Programm für 3. bis 5. Juli 1999

- Übers Wochenende Kalthalteebetrieb bei 4,5 K ohne He-Pumpen.
- Am Montagvormittag Vorbereitung der W7-X Spule für Testbetrieb bis 14,7 kA bei 4,5 K.
- Fehlersuche, Modifikation und Test der 30 kA Schaltanlage

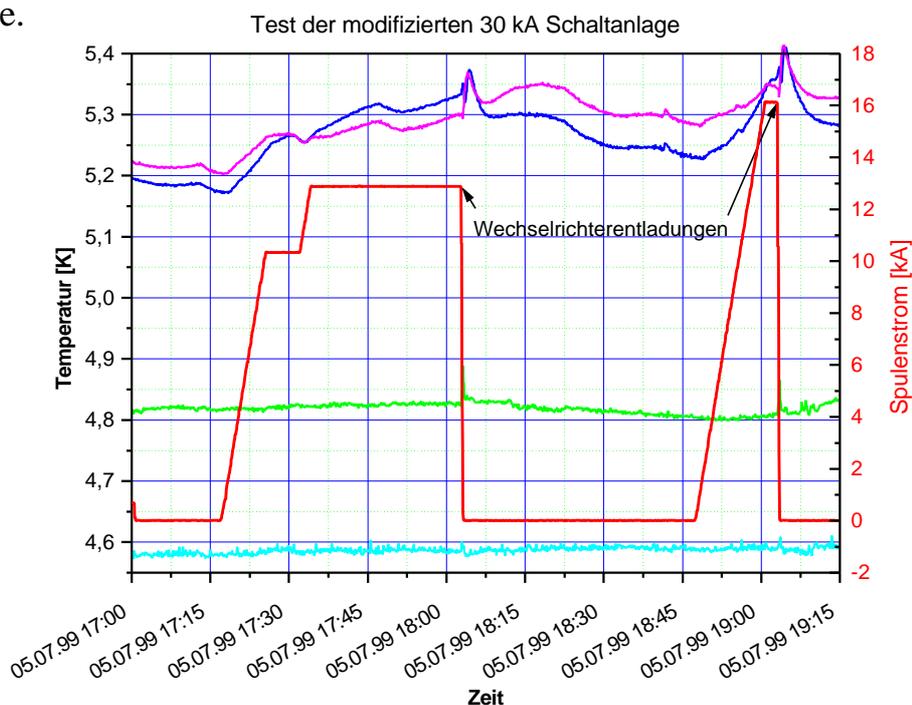


W7-X Demospule

Tagesprogramm für Dienstag 6. Juli 1999

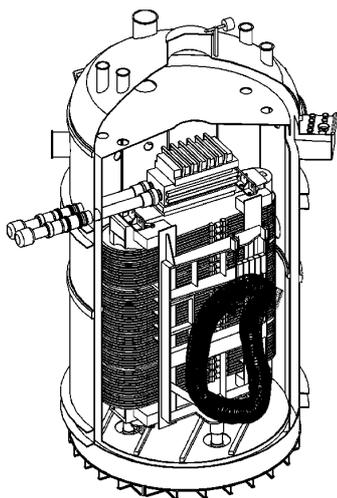
Status

- Modifikation der Software der 30 kA Schaltanlage und erfolgreicher Test von Wechselrichterentladungen mit der W7-X Spule.
- Erprobung von Kühlparametern für eine tiefere Austrittstemperatur der W7-X Spule.



Programm für den 6. Juli 1999

- Umstellung auf 3,5 K-Betrieb bei Schichtbeginn.
- Test der Wechselrichterentladung mit beiden Spulen bei 5 kA.
- Wiederholung des Lastfalls B mit 14, 7 kA in der W7-X und 14 kA in der LCT - Spule.

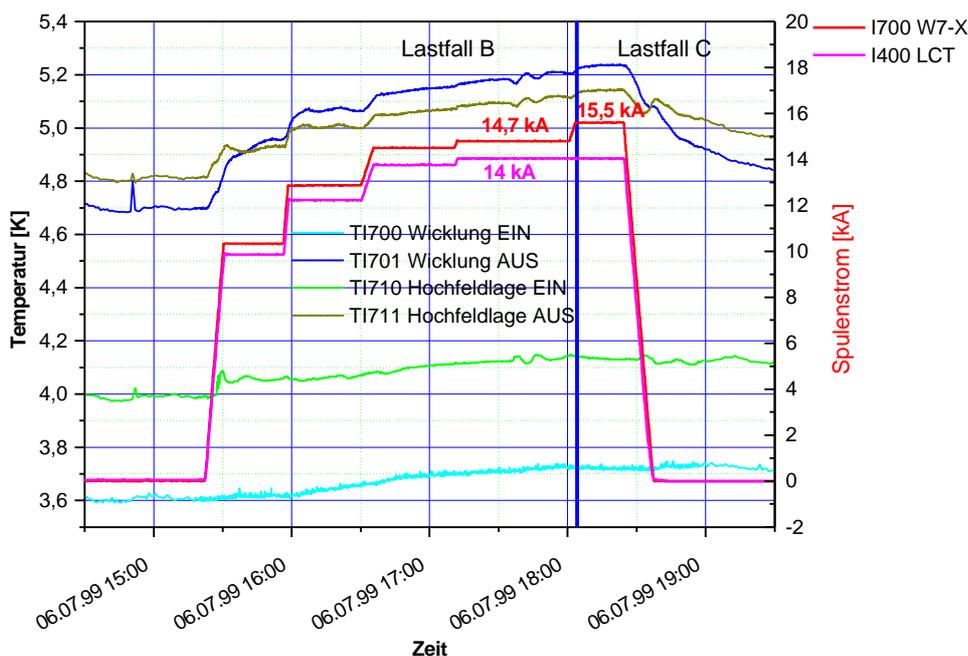


W7-X Demospule

Tagesprogramm für Mittwoch 7. Juli 1999

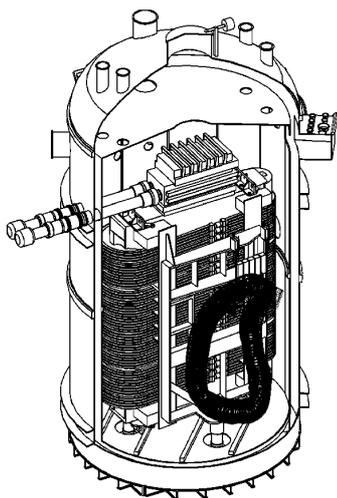
Status

- Test der Wechselrichterentladung mit beiden Spulen bei 50 % Nennstrom
- Wiederholung und erfolgreicher Abschluß des Lastfalls B mit 14,7 kA in der W7-X und 14 kA in der LCT-Spule über 45 Minuten.
- Beginn des Lastfalls C mit 14 kA in der LCT und 15,5 kA in der W7-X Spule



Programm für den 7. Juli 1999

- Test des neuen 20 kA Netzgerätes im Feld von W7-X und LCT-Spule bei 87% Nennstrom.
- Fortsetzung von Lastfall C mit 14 kA in der LCT und stufenweiser Erhöhung des Stromes in der W7-X Spule bis 18,3 kA oder bis zum Quench.

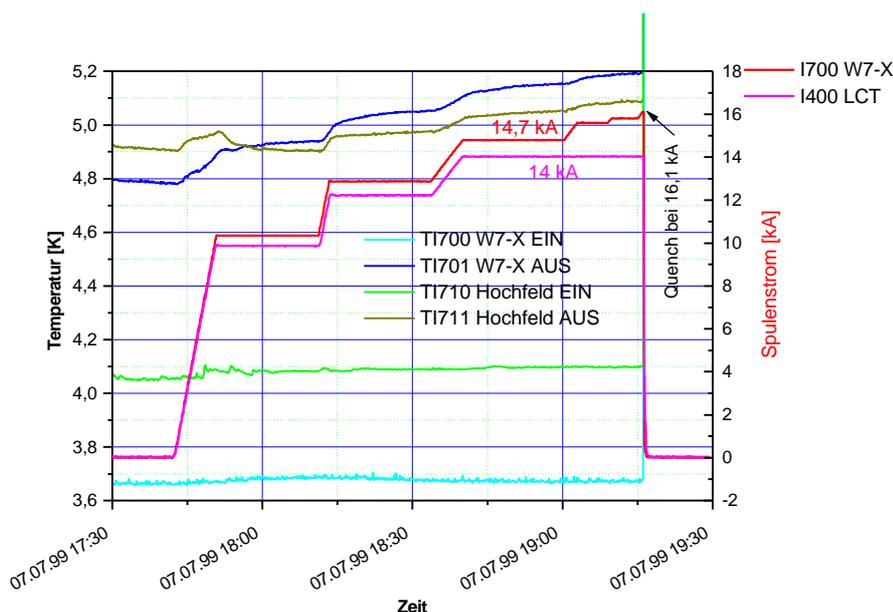


W7-X Demospule

Tagesprogramm für Donnerstag 8. Juli 1999

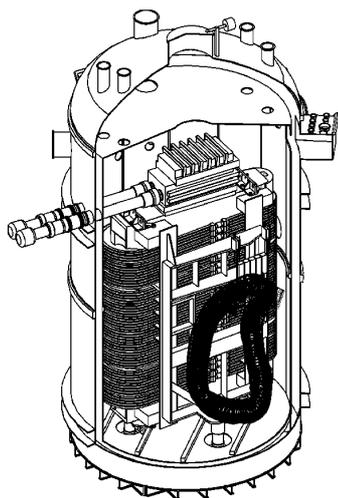
Status

- Der Test des neuen 20 kA Netzgerätes mußte wegen einer Störung im Netzgerät auf einen späteren Zeitpunkt verschoben werden.
- Wiederholung des Lastfalls C mit 14 kA in der LCT Spule und bis zu 16,1 kA in der W7-X Spule. Bei diesem Strom erfolgte ein Quench in der dritten Doppellage der W7-X Spule.



Programm für den 8. Juli 1999

- Wiederholung von Lastfall C mit 14 kA in der LCT und stufenweiser Erhöhung des Stromes in der W7-X Spule bis 18,3 kA oder bis zum Quench. Der He-Massenstrom soll bei Nennstrom erhöht werden um die He-Temperaturen im Austritt zu stabilisieren.

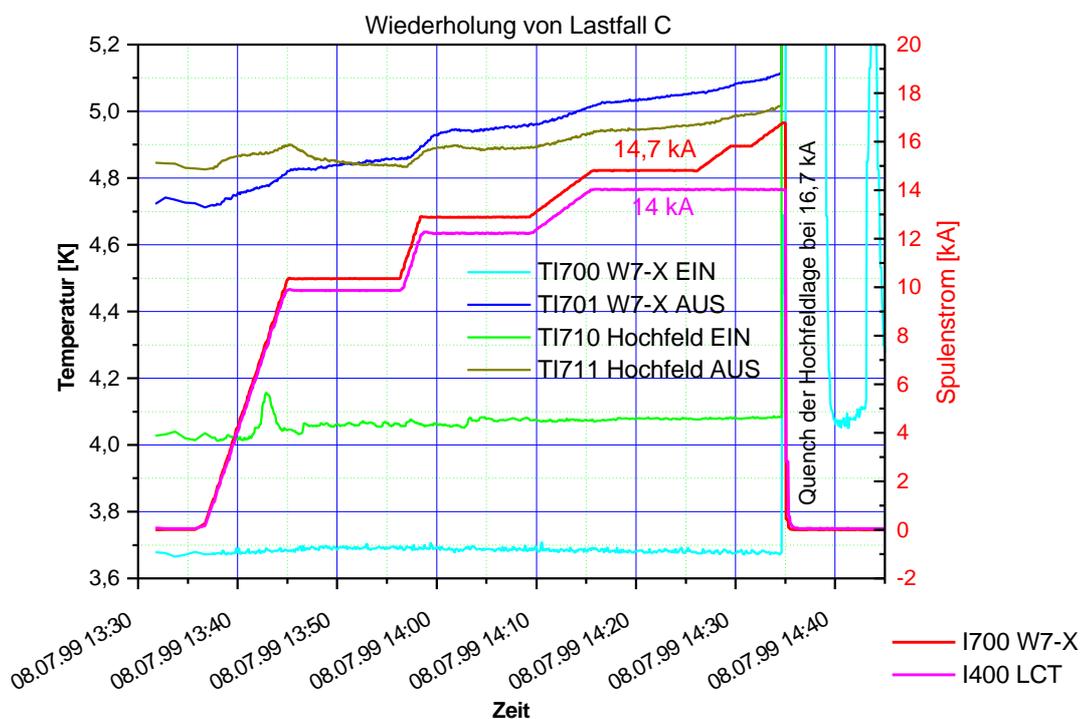


W7-X Demospule

Tagesprogramm für Freitag 9. Juli 1999

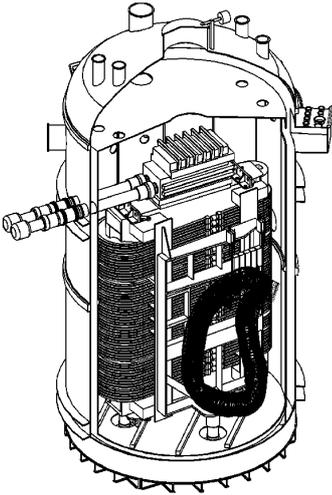
Status

- Wiederholung des Lastfalls C mit höherem He-Massenstrom, geringerem Druckniveau und dadurch ca. 0,1 K niedrigeren Austrittstemperaturen. Der Quench erfolgte bei 16,7 kA in der Hochfeldlage.



Programm für den 9. Juli 1999

- Wiederholung von Lastfall B mit 14 kA in der LCT und 14,7 kA in der W7-X Spule bei 3,8 K Betriebsbedingungen.
- Test des Einflusses der Gehäusekühlung auf die Wärmelast der Wicklung.

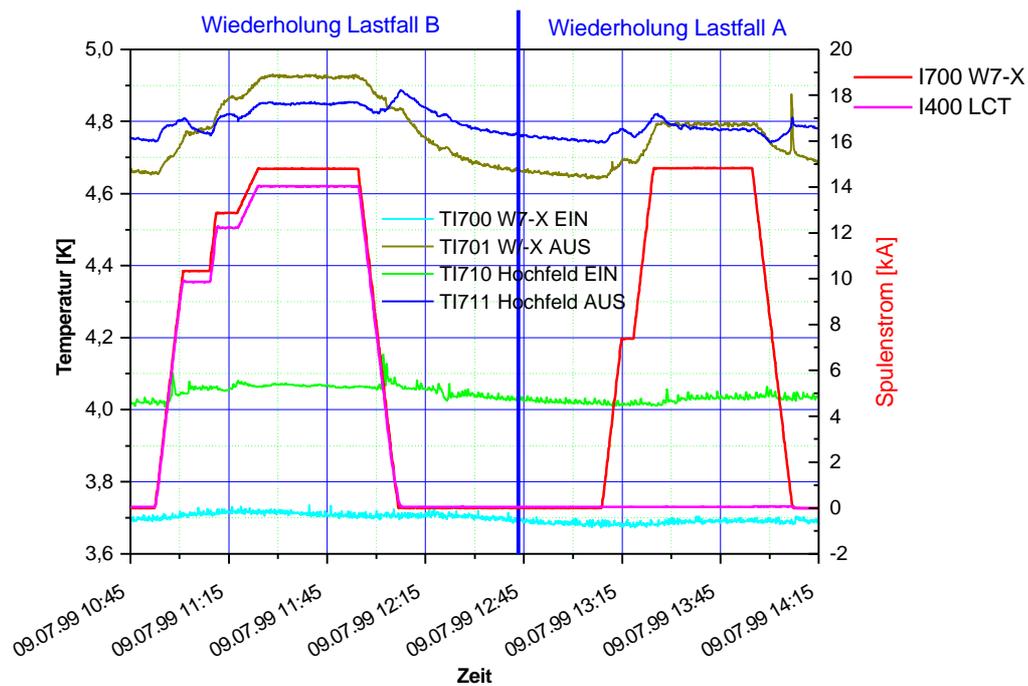


W7-X Demospule

Tagesprogramm für 10. bis 12. Juli 1999

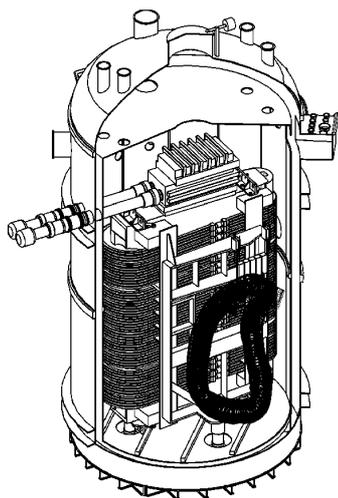
Status

- Wiederholung von Lastfall A (W7-X ohne LCT bei 14,7 kA) sowie Lastfall B (W7-X bei 14,7 kA und LCT bei 14 kA) und Vergleich der mechanischen Werte mit den Daten vor dem Überlastbetrieb C .
- Test des Einflusses der Gehäusekühlung auf die Wärmelast der Wicklung



Programm für 10. bis 12. Juli 1999

- Übers Wochenende Kalthalteebetrieb bei 4,5 K ohne He-Pumpen.
- Am Montagvormittag Rückkühlung auf Testbedingungen und Fortsetzung des Tests der Wärmelast auf die W7-X Wicklung durch das Gehäuse. Am Montag kein Strombetrieb.

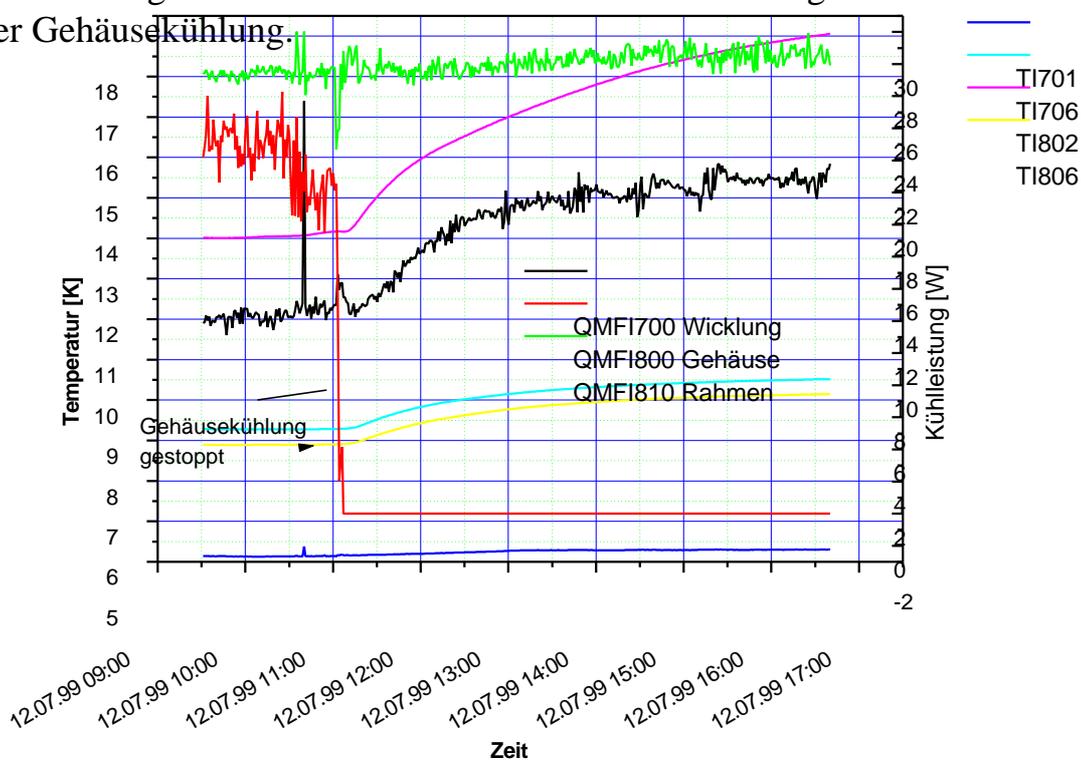


W7-X Demospule

Tagesprogramm für Dienstag 13. Juli 1999

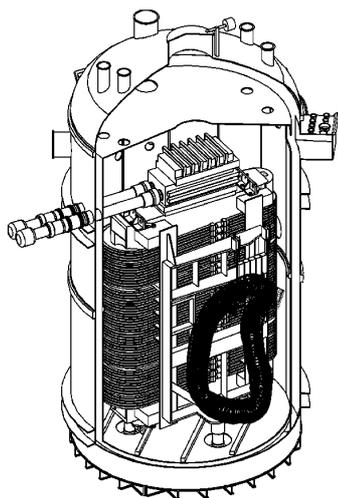
Status

- Bestimmung der Wärmelast vom Gehäuse zur Wicklung durch Abschaltung der Gehäusekühlung.



Programm für den 13. Juli 1999

- Umstellung auf 3,8 K Betrieb bei Schichtbeginn
- Bestimmung der Stabilitätsgrenze durch AC- Verluste der Wicklung bei Strömen von 12 kA und Stromänderungen von 0,5 kA
- Bestimmung der reinen AC – Verluste durch Sägezahnbetrieb mit Stromwerten zwischen Null und ca. 1000 A

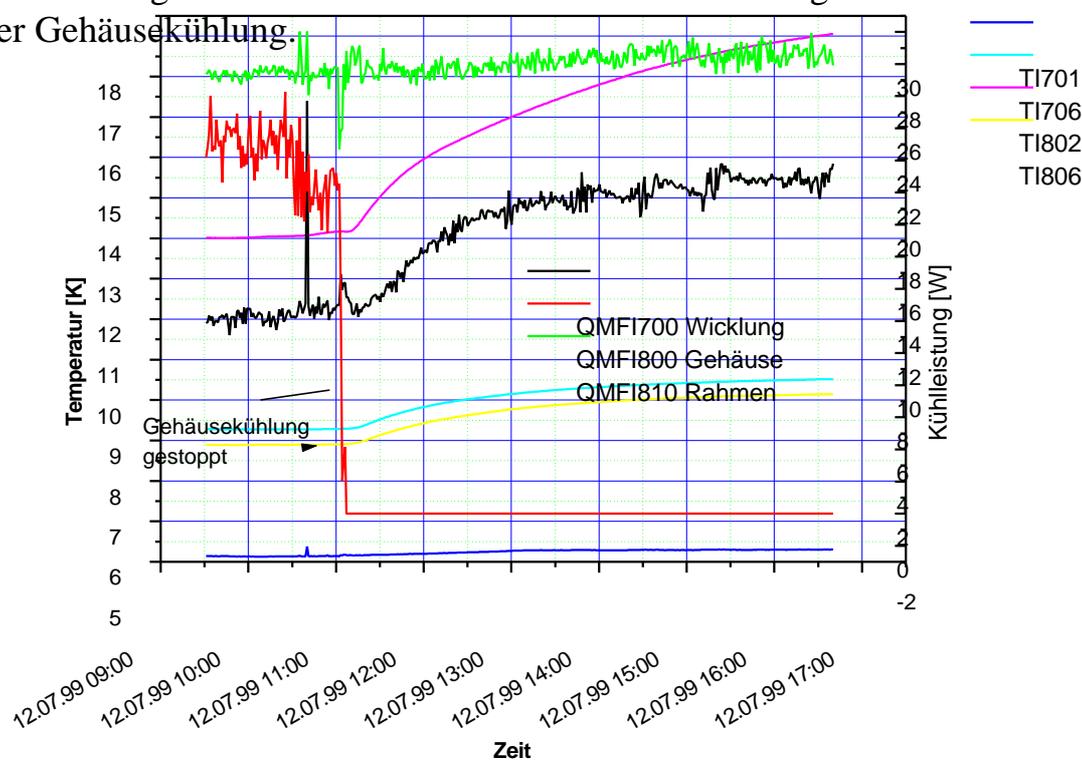


W7-X Demospule

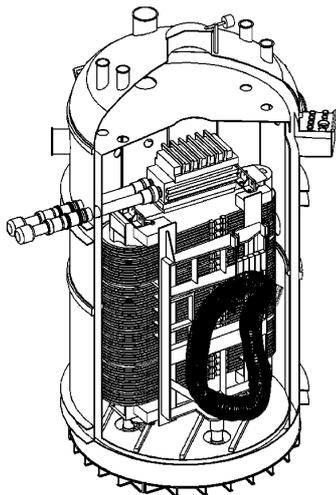
Tagesprogramm für Dienstag 13. Juli 1999

Status

- Bestimmung der Wärmelast vom Gehäuse zur Wicklung durch Abschaltung der Gehäusekühlung.



- Umstellung auf 3,8 K Betrieb bei Schichtbeginn
- Bestimmung der Stabilitätsgrenze durch AC- Verluste der Wicklung bei Strömen von 12 kA und Stromänderungen von 0,5 kA
- Bestimmung der reinen AC – Verluste durch Sägezahnbetrieb mit Stromwerten zwischen Null und ca. 1000 A



W7-X Demospule

Tagesprogramm

für

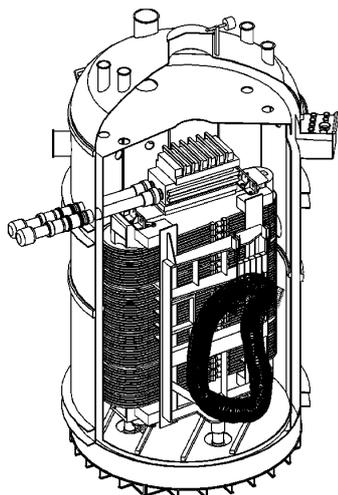
Donnerstag 15. Juli 1999

Status

- Die neuen W7-X Stromzuführungen wurden bei 10 kA und 14,7 kA getestet. Der notwendige He-Massenstrom entsprach bei beiden Strömen dem theoretischen Mindestwert von 0,063 g/ kA.
- Messung des Druckabfalles in den Transferleitungen und in B300 bei Massenströmen von 200 - 280 g/s wie sie für den Test von ITER TFMC benötigt werden.

Programm für den 15. Juli 1999

- Überprüfung von Verspannungen, Lastverteilung und Positionierung der Testanordnung im Vakuumbehälter.
- Test des neuen 20 kA Netzgerätes im Magnetfeld von LCT und W7-X Spule.
- Wiederholung von Lastfall C (LCT 14 kA, W7-X bis zum Quench max. 18,3 kA) bei möglichst tiefer Temperatur.

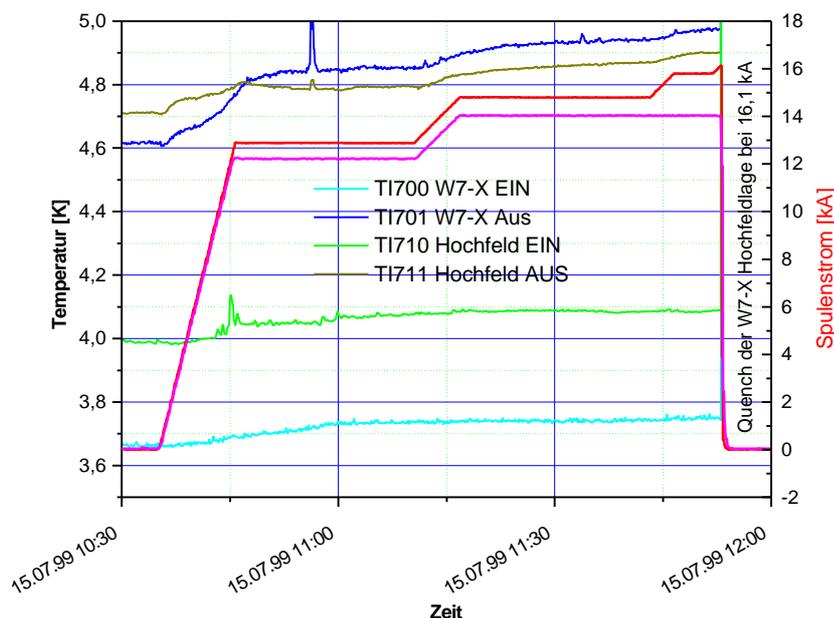


W7-X Demospule

Tagesprogramm für 16. bis 19. Juli 1999

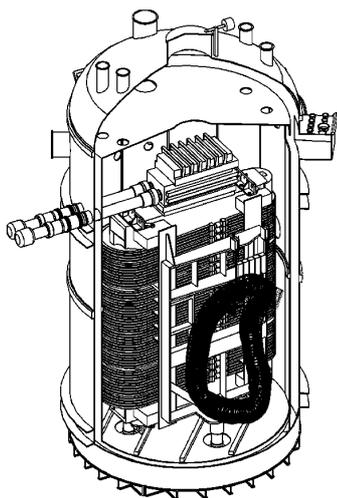
Status

- Verspannungen, Lastverteilung und Positionierung der Testanordnung im Vakuumbehälter überprüft.
- Betrieb des neuen 20 kA Netzgerätes im Magnetfeld von LCT und W7-X Spule.
- Wiederholung von Lastfall C (LCT 14 kA, W7-X bis zum Quench bei 16,1 kA) bei möglichst tiefer Temperatur. Danach nochmals Lastfall A zur Überprüfung der mechanischen Eigenschaften gefahren. Damit ist auch das Zusatztestprogramm bis auf den Lecktest abgearbeitet.



Programm für den 16. bis 19. Juli 1999

- Kalthaltebetrieb bei 4,2 K bis der Krisenstab am Montag entscheidet ob warmgefahren werden kann.

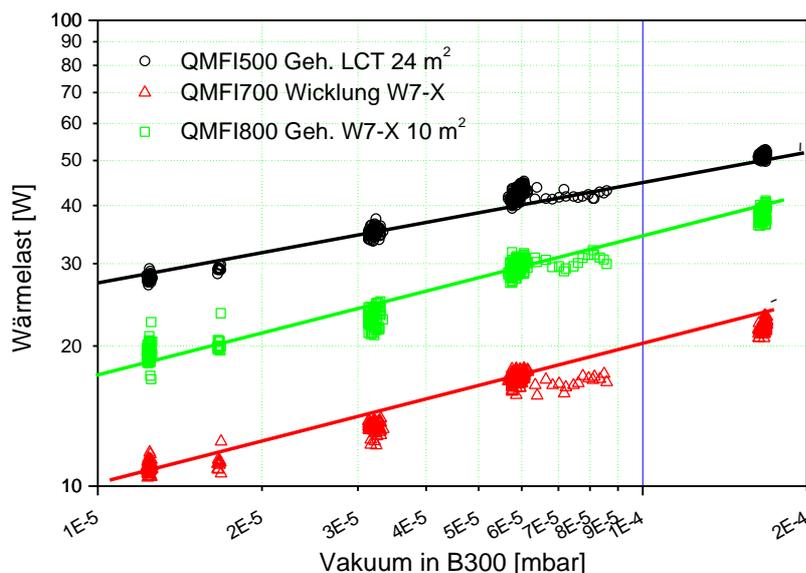


W7-X Demospule

Tagesprogramm für Dienstag 20. Juli 1999

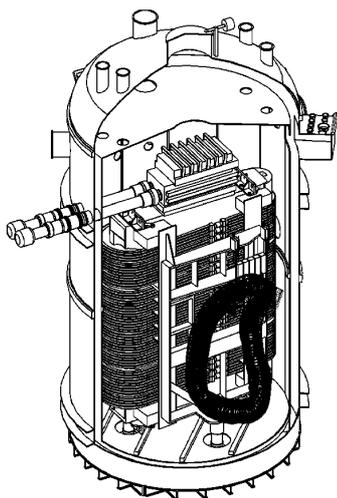
Status

- Messung der Wärmelast auf die Komponenten in B300 bei Änderung des Vakuumdruckes.
- IPP, ITP und Fa. Noell haben gemeinsam festgestellt, daß bei den Tests mit der W7-X Spule alle erforderlichen Daten gewonnen wurden und daher keine weiteren Tests notwendig sind.



Programm für den 20. Juli 1999

- Messung der Wärmelast auf die Komponenten in B300 bei möglichst niederem Vakuumdruck.
- Lecktest der W7-X und LCT Spule mit evakuierten Stromzuführungen. Das Evakuieren ist notwendig um den He-Untergrund in B300 zu senken und dadurch eine höhere Empfindlichkeit zu erreichen.



W7-X Demospule

Tagesprogramm für Mittwoch 21. Juli 1999

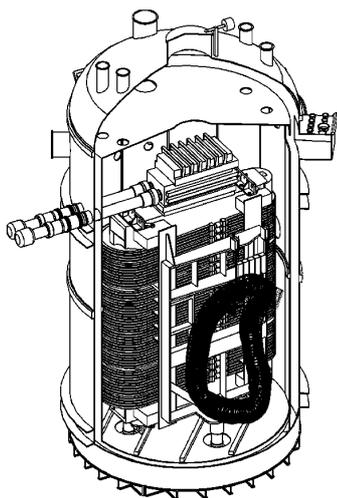
Status

- Messung der Wärmelast auf die Komponenten in B300 bei einem Vakuumdruck von 2×10^{-6} mbar.
- Lecktest der Komponenten in B300 bei einer Temperatur von ca. 5 K mit folgenden gemessenen Leckraten:

Empfindlichkeit der Testanordnung	$L = 2 \times 10^{-7}$	mbar l/s SKT
Leckrate _{+ Pol W7-X Stromzuführung}	$= 1,3 \times 10^{-1}$	mbar l/s
Leckrate _{W7-X Wicklung ohne Gehäuse und Zwischenrahmen}	$= 4 \times 10^{-2}$	mbar l/s

Programm für den 21. Juli 1999

- Beginn der Erwärmung der Testanordnung mit einer maximalen Temperaturdifferenz von 40 K und Temperatursteuerung analog zur Abkühlung.

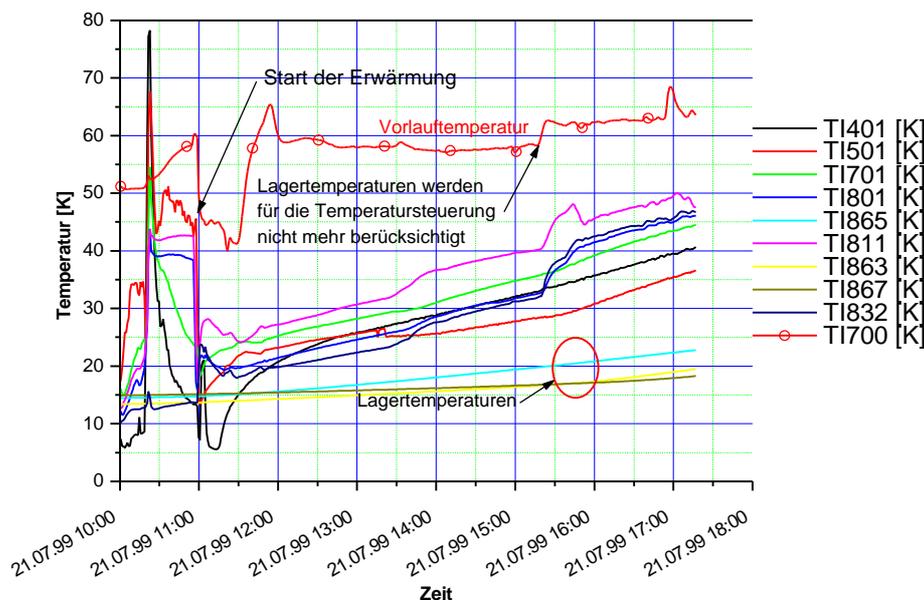


W7-X Demospule

Tagesprogramm für Donnerstag 22. Juli 1999

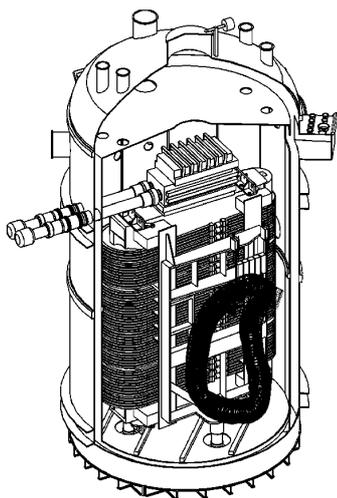
Status

- Beginn der Erwärmung der Testanordnung um 11:00Uhr mit einer maximalen Temperaturdifferenz von 40 K und Temperatursteuerung analog zur Abkühlung.



Programm für den 22. Juli 1999

- Weiteres Warmfahren der Testanordnung ohne Berücksichtigung der Lagertemperaturen für die Temperatursteuerung. Es sind jedoch wie bei der Abkühlung folgende Bedingungen einzuhalten.
- ΔT zwischen TI863, TI865, TI867 und TI800 darf 100 K nicht überschreiten. Zwischen den Temperaturen TI830-TI837 und den Lagertemperaturen TI863-TI867 soll eine maximale Temperaturdifferenz von 80K nicht überschritten werden

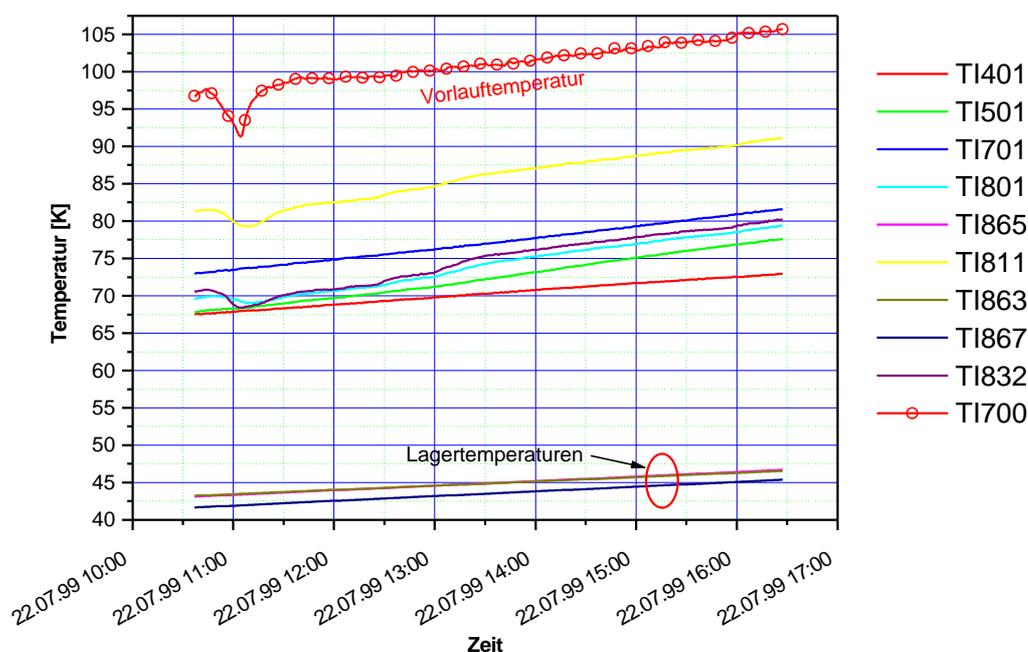


W7-X Demospule

Tagesprogramm für Freitag 23. Juli 1999

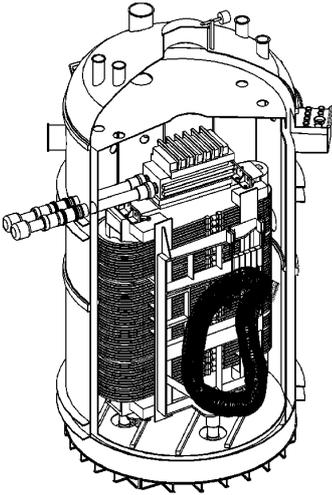
Status

- Weitere Erwärmung der Testanordnung um 1,2 K/h mit einer maximalen Temperaturdifferenz von 40 K und Temperatursteuerung über die kälteste Spulenteperatur ohne Berücksichtigung der Lager (ΔT_{\max} Lager zum Vorlauf 100K).



Programm für den 23. Juli 1999

- Weiteres Warmfahren der Testanordnung. Die Sollwertvorgabe für die Temperatursteuerung erfolgt bei weiter nachhinkenden Lagern über die Lagertemperatur minus 90 K. Die Temperaturdifferenz innerhalb der Spulen darf aber weiterhin 40 K nicht überschreiten.

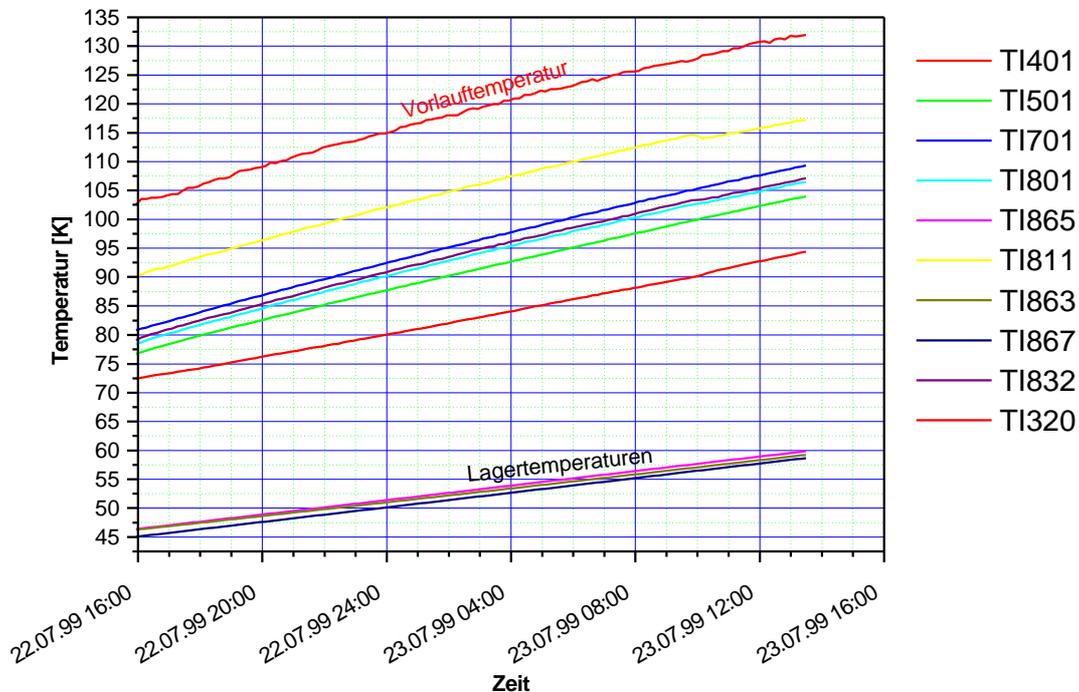


W7-X Demospule

Programm für weiteres Warmfahren

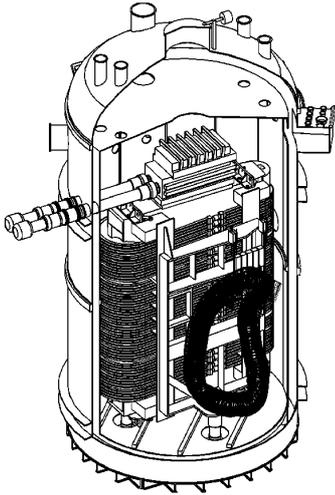
Status

- Erwärmung der Testanordnung mit 1,3 K/h fortgesetzt.



Programm für das weitere Warmfahren

- Weiteres Warmfahren der Testanordnung mit folgenden Bedingungen:
- Die maximale Temperaturdifferenz innerhalb der Spulen darf 40 K nicht überschreiten.
- Für Lager und Zwischenrahmen gilt weiterhin: ΔT zwischen TI863, TI865, TI867 und TI800 darf 100 K nicht überschreiten. Zwischen den Temperaturen TI830-TI837 und den Lagertemperaturen TI863-TI867 soll eine maximale Temperaturdifferenz von 80K nicht überschritten werden



W7-X Demospule

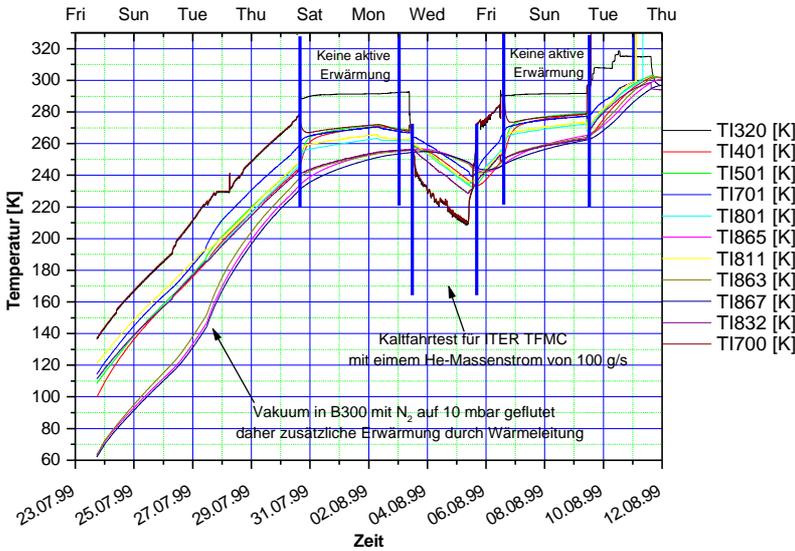
Status und weiteres Programm

Status

- Erwärmung der Testanordnung gemäß Diagramm fortgesetzt.
- Gemeinsames Kaltfahren von Kälteanlage und Toska für ITER TFMC erfolgreich getestet. Der erforderliche Massenstrom von 100 g/s wurde erreicht.
- Erwärmung der Testanordnung am 11.8.99 um 15 Uhr bei Raumtemperatur beendet.
- Hochspannungstest von LCT und W7-X Demospule am 12.8.99 durchgeführt.

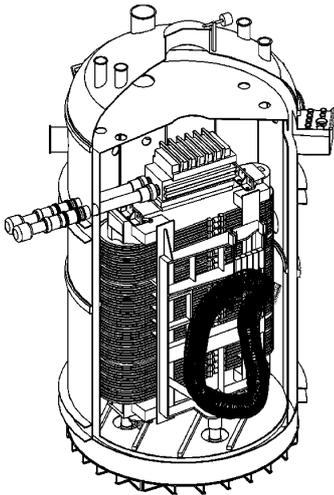
$$U_{LCT} = 2,5 \text{ kV}, I_{LCT} = 3,8 \text{ mA}$$

$$U_{W7-X} \text{ 1 kV kann nicht gehalten werden}$$



Weiteres Programm

- Lecksuche erst bei geschlossenem später bei offenem Vakuumbehälter B300
- Inspektion der Testanordnung auf Veränderungen während des Tests
- Demontage von Meßleitungen, Kapillaren, Stromzuführungen und He-Verrohrung
- Ausbau der Demospule
- Vorbereitung für den Versand



W7-X Demospule

Status

Status

- Hochspannungstest der W7-X Demospule am 13. 8. 99 mit besserem Schutzvakuum wiederholt. $U_{W7-X} = 2,5 \text{ kV}$, $I_{W7-X} = 382 \text{ nA}$ damit hat die Spule den Test bestanden.
- Lecktest der warmen Testanordnung in der 33 KW mit folgenden Ergebnissen durchgeführt.

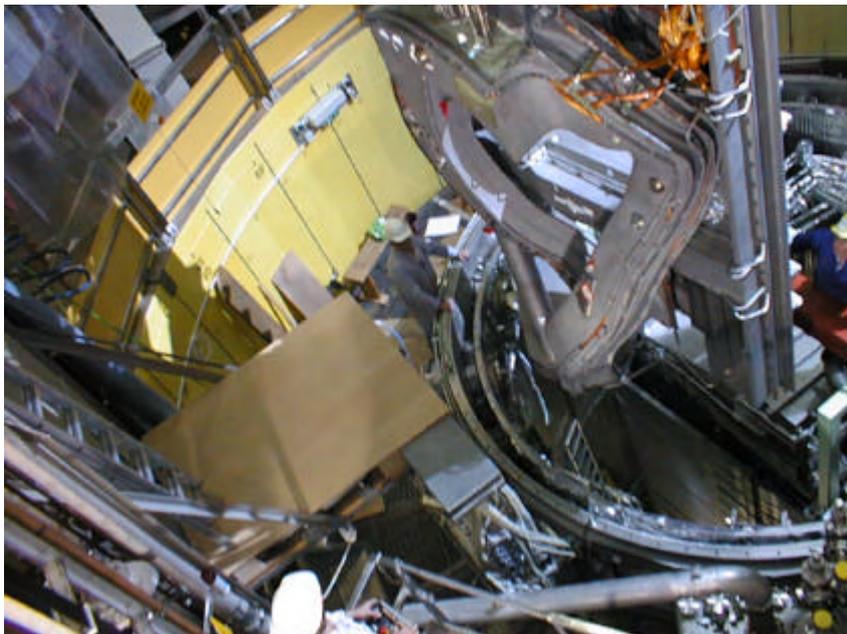
W7-X Spule mit Zwischenstruktur und Bus: $P_{\text{He}} = 17 \text{ bar}$ $L \Leftrightarrow 5 \times 10^{-7} \text{ mbar l/s}$

LCT-Spule mit Verstärkung: $P_{\text{He}} = 15 \text{ bar}$ $L = 2 \times 10^{-4} \text{ mbar l/s}$

Undichtheit an der LCT-Spule war an einer Kapillare und wurde beseitigt

Verrohrung und kalter He-Speicher $P_{\text{He}} = 8 \text{ bar}$ $L \Leftrightarrow 4 \times 10^{-6} \text{ mbar l/s}$

- Ausbau der W7-X Demospule am 29. 9. 1999
- Abtransport am 12. 10. 1999



1.5 Zusammenstellung der Stromtests

Die folgende Tabelle enthält eine Zusammenstellung der Stromtests, die Herr Schoenewolf vom IPP erstellt hat. Sie erstreckt sich über den Zeitraum vom 14. Juni 1999 bis zum 15. Juli 1999. Der Inhalt der Tabelle ist selbsterläuternd.

Es werden folgende Abkürzungen in der Tabelle benutzt:

NR : Strom-Hochfahrt bzw. Strom-Abfahrt mit vorgegebener Strom-Anstiegsgeschwindigkeit (Normal ramp rate [A/s])

WE : Wechselrichterentladung (Das Netzgerät wird voll auf negative Spannung geschaltet.)

SE : Sicherheitsentladung (Der Sicherheitsentladekreis wird für die Entladung benutzt.)

Im Anschluß daran sind die Tagesdiagramme dargestellt.

Aufgrund der Darstellungseigenschaften des Programms "ORIGIN" bezieht sich die erste Zahl der Zeitachse immer auf den Achsenanfang.

1.5 Zusammenstellung der Stromtests zum W 7-X Demospulen-Testprogramm

	Datum	Puls- ende	Test- Nr.	Last- fall	I_{W7X} [kA]	I_{LCT} [kA]	$t_{Flattop}$ [min]	beendet mit	Rampen [A/s]	Bemerkungen
1	14.06.99		1	A	0,7	0,0	0	NR	20	Anlagentests
			2	A	0,7	0,0	5	WE	20	
			3	A	0,2	0,0	5	SE	20	
			4	A	0,7	0,0	5	WE	20	Verriegelungstests
			5	A	0,7	0,0	2	WE	20	
			6	A	0,7	0,0	2	WE	20	
			7	A	0,7	0,0	5	SE	20	
			8	A	0,7	0,0	5	SE	20	
			9	A	0,7	0,0	5	SE	20	Stromtest
			10	A	3,7	0,0	5	NR	20	
			11	A	3,7	0,0	5	WE	20	
			12	A	3,7	0,0	5	SE	20	
			13	A	7,4	0,0	10	NR	20	
			14	A	7,4	0,0	10	WE	20	
			15	A	7,4	0,0	10	SE	20	
2	15.06.99		16	-	0,0	1,0	4	NR	5	Test LCT-Spule
			17	-	0,0	1,0	2	NR	10	
			18	-	0,0	1,0	3	NR	10	
			19	-	0,0	1,0	2	WE	10	
			20	-	0,0	1,0	1	WE	10	
			21	-	0,0	1,0	2	NR	10	
			22	-	0,0	1,0	3	WE	10	
			23	A	0,7	0,0	10	WE	20	
			24	A	0,7	0,0	10	SE	20	
			25	A	0,7	0,0	10	SE	20	
			26	A	2,0	0,0	0	NR	20	Abbruch wegen DMS-Reset
			27	A	10,3	0,0	10	NR	20	
			28	A	10,3	0,0	8	WE	20	
			29	A	10,3	0,0	5	SE	20	
			30	A	12,8	0,0	10	NR	20	

3	16.06.99		31	A	12,8	0,0	8	SE	20	
			32	A	0,7	0,0	1	WE	20	Verriegelungstests
			33	A	0,7	0,0	1	SE	20	
			34	A	12,8	0,0	9	SE	20	
			35	A	4,4	0,0	0	SE	20	Massenstromunterbrechung wg. Ventilstörung
			36	A	1,0	0,0	0	WE	20	Fehlbedienung
			37	A	7,4	0,0	20	SE	20	
			38	A	4,1	0,0	0	SE	20	Massenstromunterbrechung wg. Ventilstörung
			39	A	7,4	0,0	5	SE	20	
			40	A	7,4	0,0	5	SE	20	
4	17.06.99	19:32	41	A	14,7	0,0	30	WE	20	Lastfall A gem. Testprogramm 3.2.11
		11:04 11:51	42	A	0,7	0,0	1	WE	20	Verriegelungstests
			43	A	0,7	0,0	1	SE	20	
			44	A	14,7	0,0	20	NR	20	Lastfall A gem. Testprogramm 3.2.10/12
			45	A	14,7	0,0	20	SE	20	
			46	B	0,7	0,7	2	WE	20	Verriegelungstests
			47	B	0,7	0,7	2	SE	20	
			48	B	0,7	0,7	2	SE	20	
			49	B	0,7	0,7	5	SE	20	
			50	B	3,7	3,5	10	NR	20	
			51	B	3,7	3,5	10	WE	20	Beschluß: WE nur bei Bedarf
			52	B	3,7	3,5	10	SE	20	
			53	B	7,4	7,0	25	NR	20	
			54	B	7,4	7,0	12	SE	20	
5	18.06.99		55	B	0,7	0,7	20	SE	20	Verriegelungstests
			56	B	0,7	0,7	1	SE	20	
			57	B	0,7	0,7	1	SE	20	
			58	B	12,8	11,6	0	SE	20	Stufen: 50/70% bei 87% SE durch 30kA-Anlage
			59	B	0,7	0,7	2	SE	20	Kontrollpuls
6	21.06.99		60	B	0,7	0,7	1	SE	20	Verriegelungstests
			61	B	0,7	0,7	1	SE	20	wegen Netzstörung, Pumpenausfall
			62	B	0,7	0,7	1	SE	20	zu wenig LHe, daher kein Stromtest
			63	B	0,7	0,7	1	SE	20	
			64	B	0,7	0,7	1	SE	20	
7	22.06.99		65	B	0,7	0,7	1	SE	20	Verriegelungstests

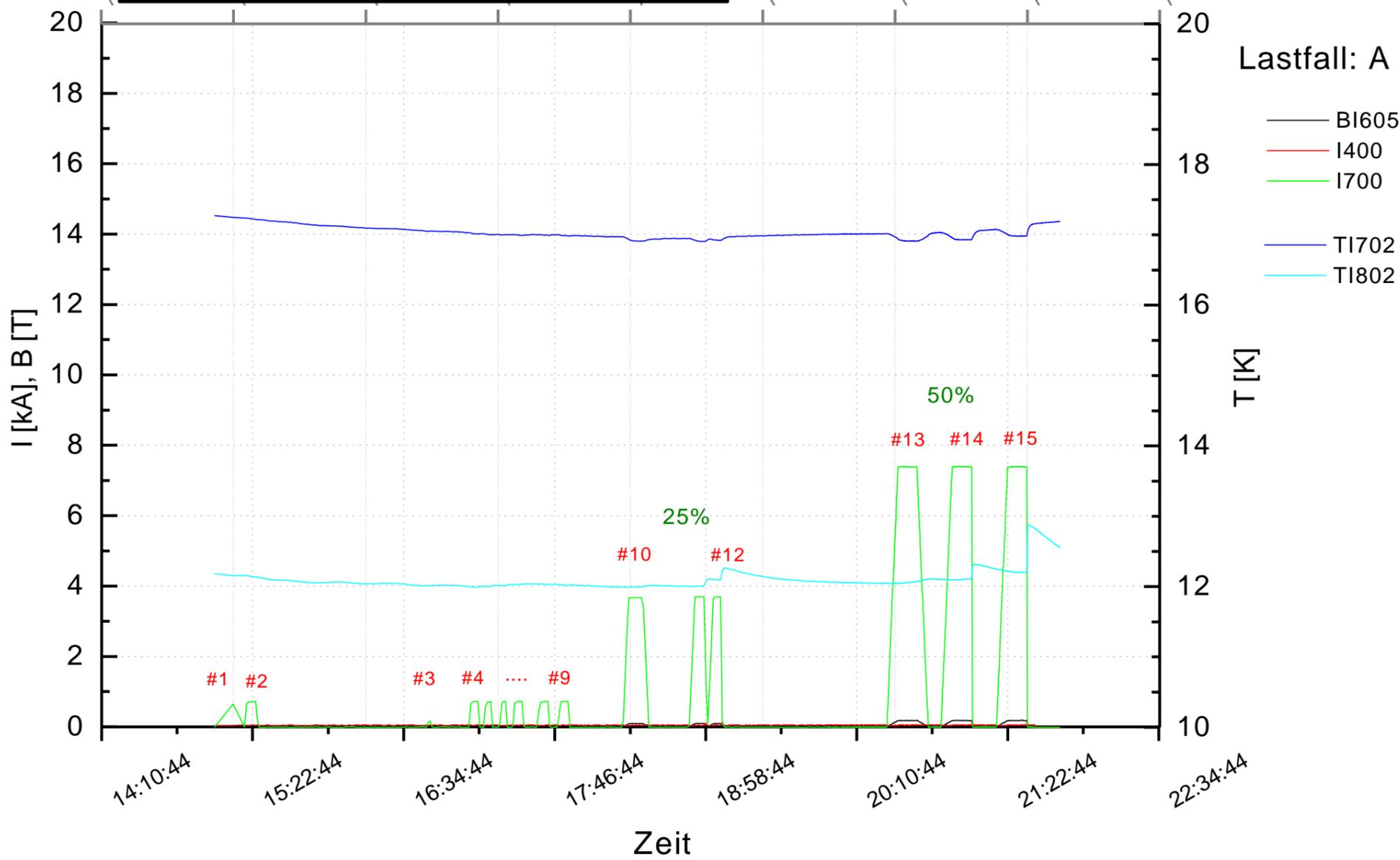
			66	B	12,8	11,6	4	SE	20	Störung im 30kA-Netzgerät
			67	B	12,8	9,8	1	SE	20	
8	23.06.99		68	B	0,7	0,7	5	SE	20	Verriegelungstests
			69	B	12,8	11,6	2	SE	20	Modifikation 30kA-Netzgerät
			70	B	10,3	12,2	2	SE	20	
9	24.06.99		71	B	0,7	0,7	1	SE	20	Verriegelungstests
			72	B	0,7	0,7	1	SE	20	
			73	B	14,7	13,2	0	SE	20	Störung im 30kA-Netzgerät
			74	A	1,5	0,0	2	SE	20	Verriegelungstests
			75	A	14,0	0,0	0	SE	20	Bedienfehler
		18:17	76	A	18,5	0,0	11	Quench 1	5 - 20	Quench in 1. Lage, in 112/122%-Stufen
10	25.06.99		77	A	0,7	0,7	3		20	Verriegelungstests
		14:02	78	A	18,7	0,0	0	Quench 2	5 - 20	Quench in 1. Lage, mit 116%-Stufe
11	28.06.99		79	A	0,7	0,0	3	SE		Modifikation 30kA-Netzgerät
			80	A	10,0	0,0	10	SE		
			81	A	10,0	0,0	10	SE		
			82	A	6,0	0,0	6	SE		
12	29.06.99		83	A	0,7	0,0	6	SE	20	Verriegelungstests
			84	A	14,7	0,0	13	NR	20	Einstellung Strommessung
			85	A	0,7	0,0	5	SE	20	Verriegelungstests
		16:21	86	B	14,7	14,0	30	NR	20	Lastfall B gem. Testprogramm 4.2.10
		17:54	87	A	19,9	0,0	0	Quench 3	5 - 20	Quench in 1. Lage, mit 116/129%-Stufen
13	30.06.99		88	B	0,7	0,7	2	SE	20	Verriegelungstests
			89	B	0,0	10,0	2	NR	20	Einstelltests LCT-Netzgerät
			90	B	0,0	5,0	5	NR	20	
			91	B	0,0	5,0	1	NR	20	
			92	B	0,0	10,0	5	NR	20	
			93	B	10,0	10,0	5	NR	20	
		16:23	94	B	14,8	13,7	0	Quench 4	20	Quench in 1. Lage, mit 70%-Stufe
14	01.07.99		95	B	0,7	0,7			20	Verriegelungstests
			96	B	0,0	1,0	0	NR	20	
		15:41	97	A	19,0	0,0	12	Quench 5	5 - 20	Quench im -Bus, mit 116/122/129%-Stufen. Lastfall A gem. Testprogramm 5
			98	A	0,7	0,0	?	NR	?	Kontrollpuls (Reglerstörung)
			99	A	0,7	0,0	?	NR	?	

15	02.07.99	12:41	100	A	5,0	0,0	0	NR	20	
			101	A	0,7	0,0	2	SE	20	Verriegelungstests
			102	A	11,2	0,0	0	NR	20	Schaltfehler
			103	A	19,5	0,0	0	Quench 6	5 - 20	Quench in 1. Lage, mit 116/122/129%-Stufen
16	05.07.99		104	A	0,7	0,0	4	SE	20	Verriegelungstests
			105	A	0,6	0,0	4	SE	20	
			106	A	0,7	0,0	2	SE	20	Verifikation der Schaltanlage (Anlagentest)
			107	A	12,8	0,0	30	WE	20	
			108	A	16,0	0,0	3	WE	20	
17	06.07.99	18:36	109	B	0,7	0,8	3	SE	20	Verriegelungstests
			110	B	7,4	7,1	5	WE	20	Verifikation der Schaltanlage (Anlagentest)
			111	B	14,8	14,0	49	-	5 - 20	Lastfall B gem. Testprogramm 6.2.10
			-	C	15,6	14,0	21	NR	2 - 20	Testpuls 111 weiter bis 105% gefahren
18	07.07.99	19:15	112	B	0,7	0,7	7	SE	20	Verriegelungstests
			113	B	5,0	4,8	0	NR	20	Test neue 20kA - Schaltanlage
			114	B	10,0	9,5	3	SE	20	
			115	B	12,8	12,2	3	SE	20	ungeklärte SE von Anlage ausgelöst
			116	C	16,1	14,0	0	Quench 7	5 - 20	Lastfall C gem. Testprogramm 7.2 , Quench in 3. D-Lage, mit 70/87/100/105/107%-Stufen
18	08.07.99	14:34	117	B	0,7	0,7	9	SE	20	Verriegelungstests
			118	B	0,7	0,7	30	SE	20	Testpulse zur Klärung der SE v. 7.7.99
			119	B	0,7	0,7	8	SE	20	
			120	B	0,7	0,7	5	SE	20	
			121	B	0,7	0,7	4	SE	20	
			122	C	16,7	14,0	0	Quench 8	5 - 20	Lastfall C gem. Testprogramm 7.3 , Quench in 1. Lage, mit 70/87/100/107/114%-Stufen
19	09.07.99	11:55	123	B	0,7	0,7	4	SE	20	Verriegelungstests
			124	B	3,4	3,3	0	NR	20	Schaltungsfehler
			125	B	14,7	14,0	30	NR	2 - 20	Lastfall B gem. Testprogramm 8.22 , in 70/87%-Stufen
			126	A	14,7	0,0	30	NR	20	Lastfall A gem. Testprogramm 8.10 , mit 50%-Stufe
20	13.07.99		127	B	0,7	0,7	4	SE	20	Verriegelungstests
			128	A	1,0	0,0	-	NR	10 - 100	Zusatztests (AC-Verlustbestimmung)

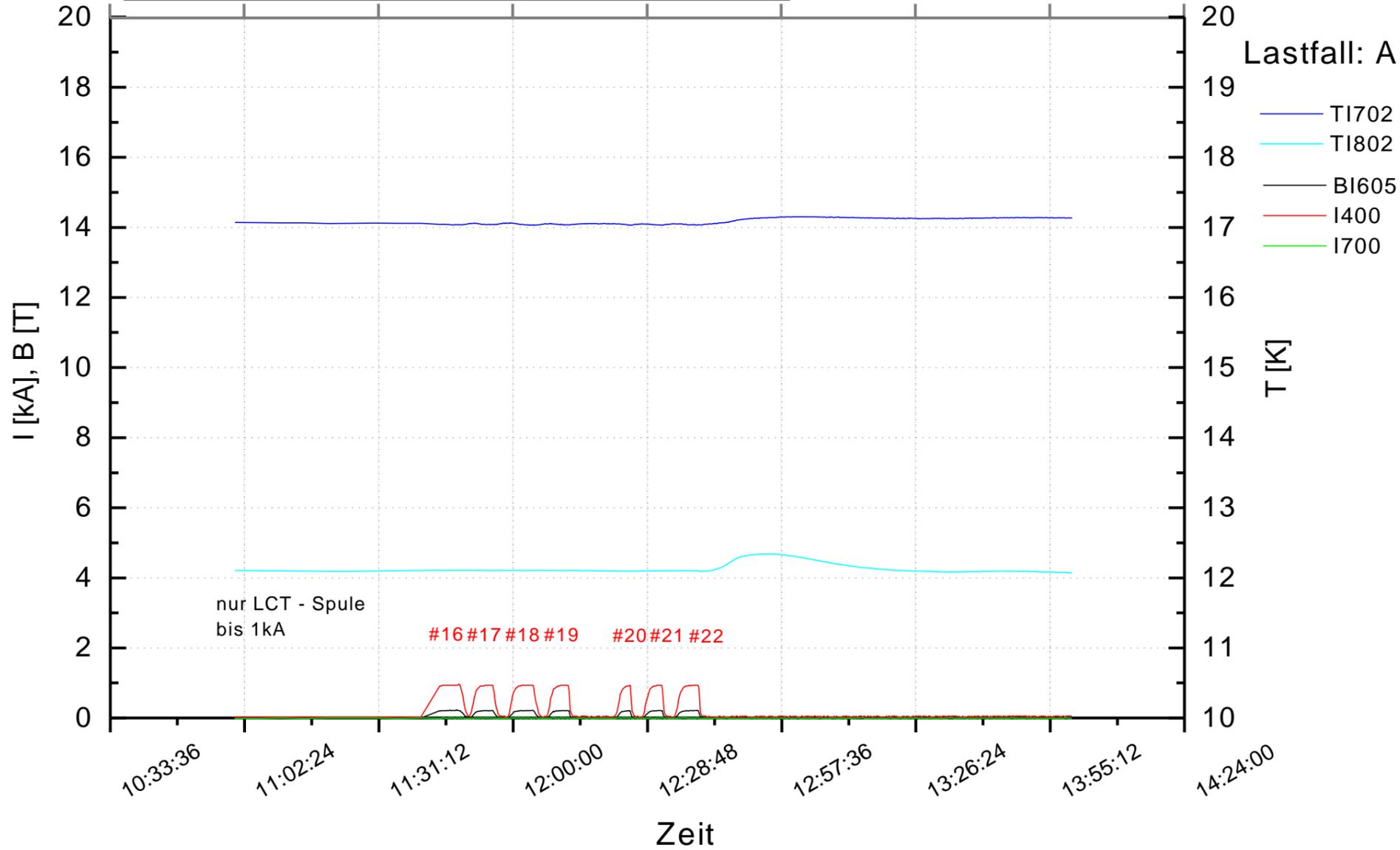
21	14.07.99	17:48	129	A	16,7	0,0	-	Quench 9	50 - 350	Quench in 6. DL, mit 87/100/107%-Stufen
			130	A	0,7	0,0	3	SE	20	Verriegelungstests
			131	A	10,0	0,0	138	NR	20	Test SZF (Forschungszentrum Karlsruhe intern)
			132	A	14,8	0,0	223	NR	20	in Stufen von 68/87/100%
22	15.07.99	11:53	133	B	0,7	0,7	5	SE	20	Verriegelungstests
			134	B	0,7	0,7	2	SE	20	
			135	C	16,1	14,0	0	Quench 10	5 - 20	Lastfall C (Wiederholung v. #122 m. niedrigerem Temp.-Niveau) Quench in 1. Lage, m. 87/100/107% - Stufen
			136	A	14,7	0,0	3	NR	5 - 20	mechan. Zustandskontrolle zum vsl. Testende

Forschungszentrum Karlsruhe, interner Test	Programmtest
Anlagen-Funktionstest	Zusatztest
Sicherheitstest	

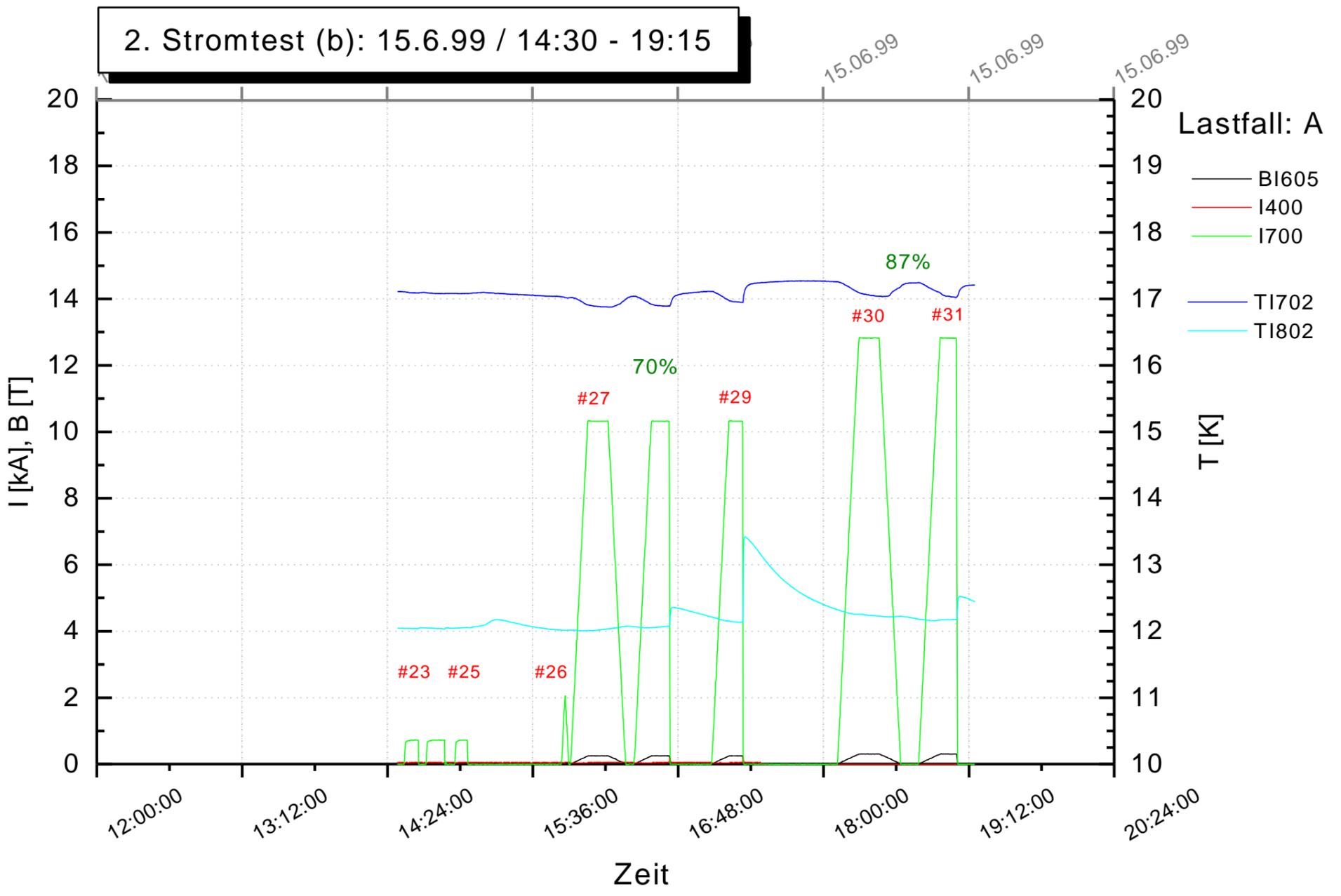
1. Stromtest: 14.6.99 / 11:45 - 19:30



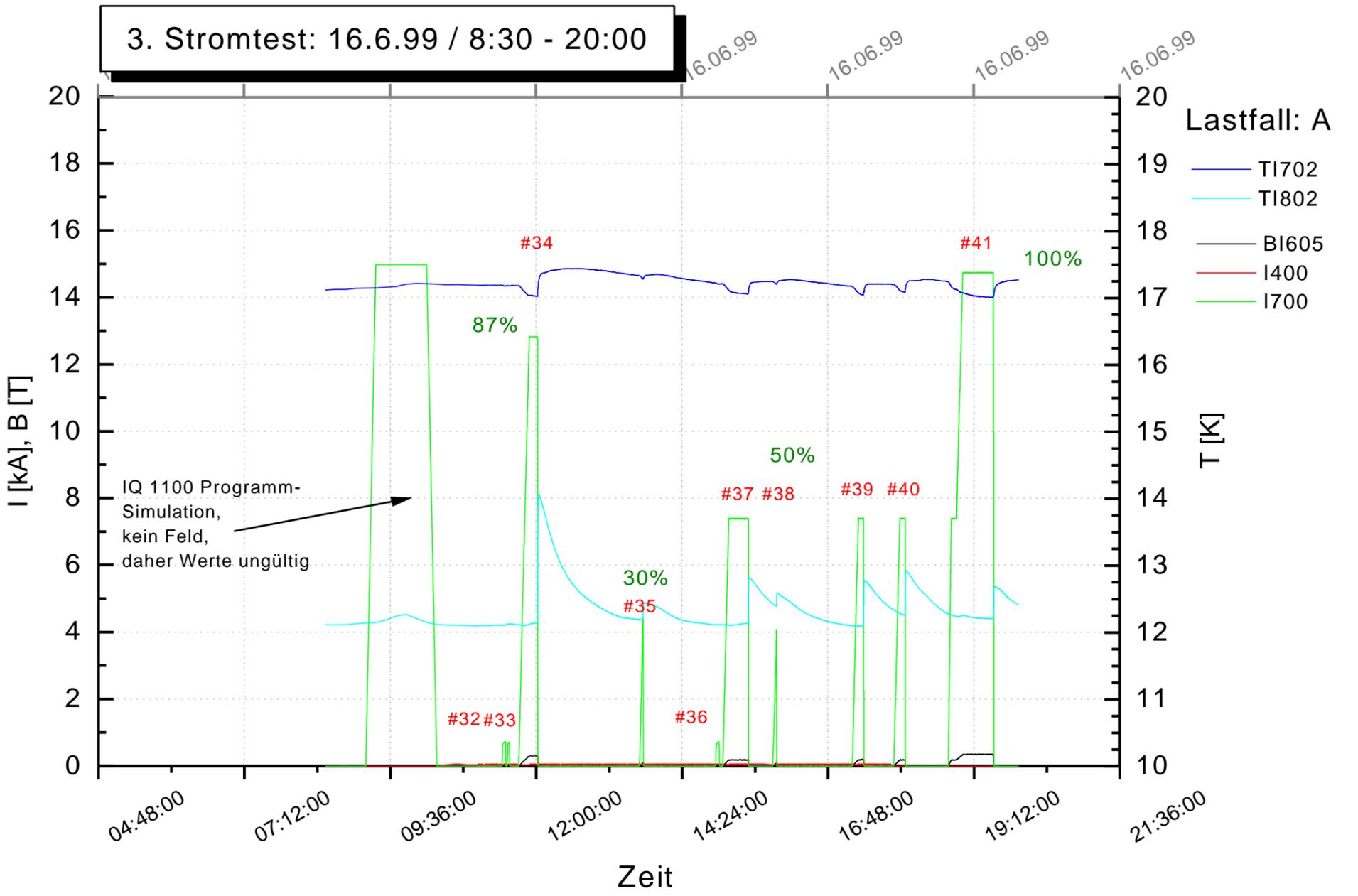
2. Stromtest (a): 15.6.99 / 11:00 - 14:00



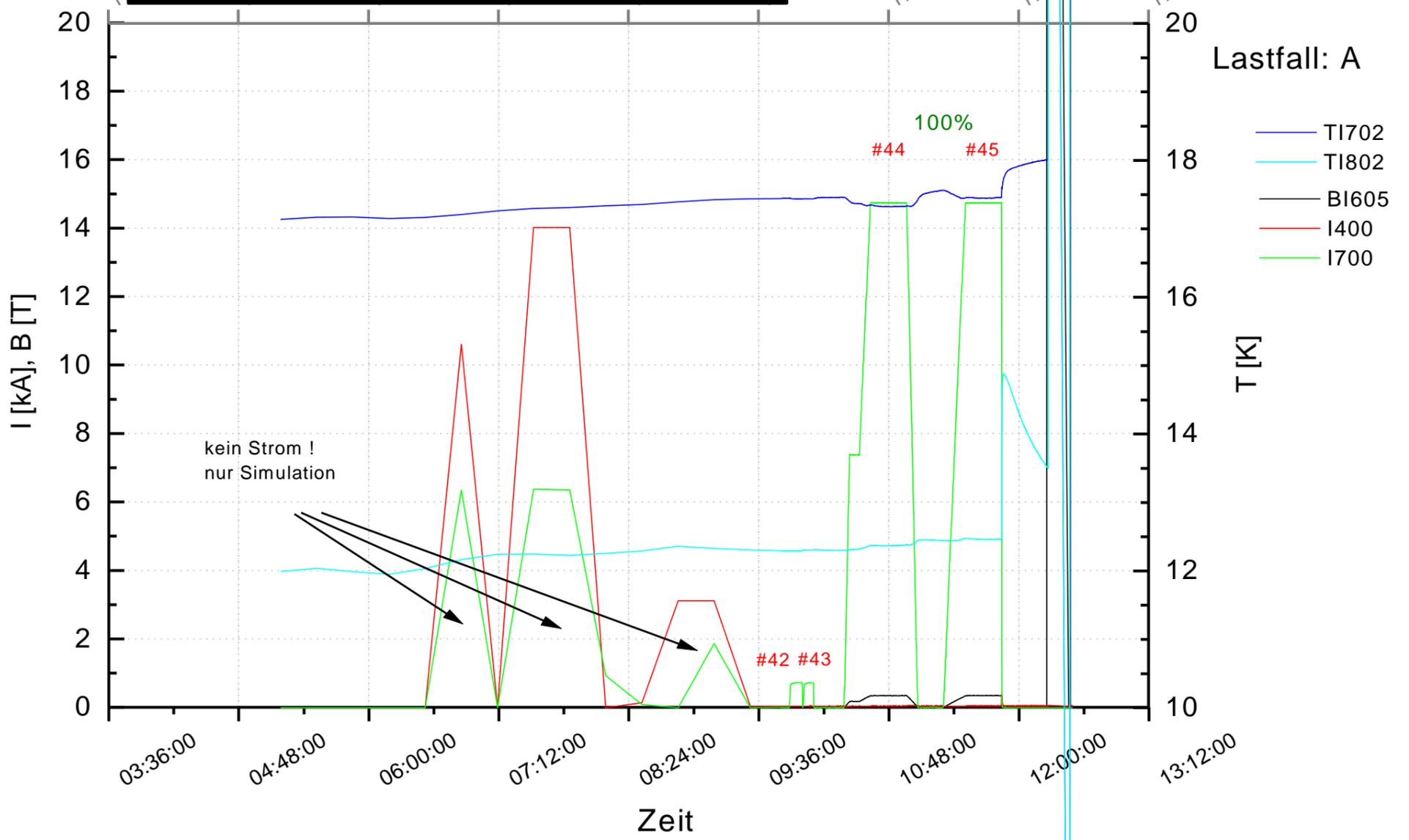
2. Stromtest (b): 15.6.99 / 14:30 - 19:15



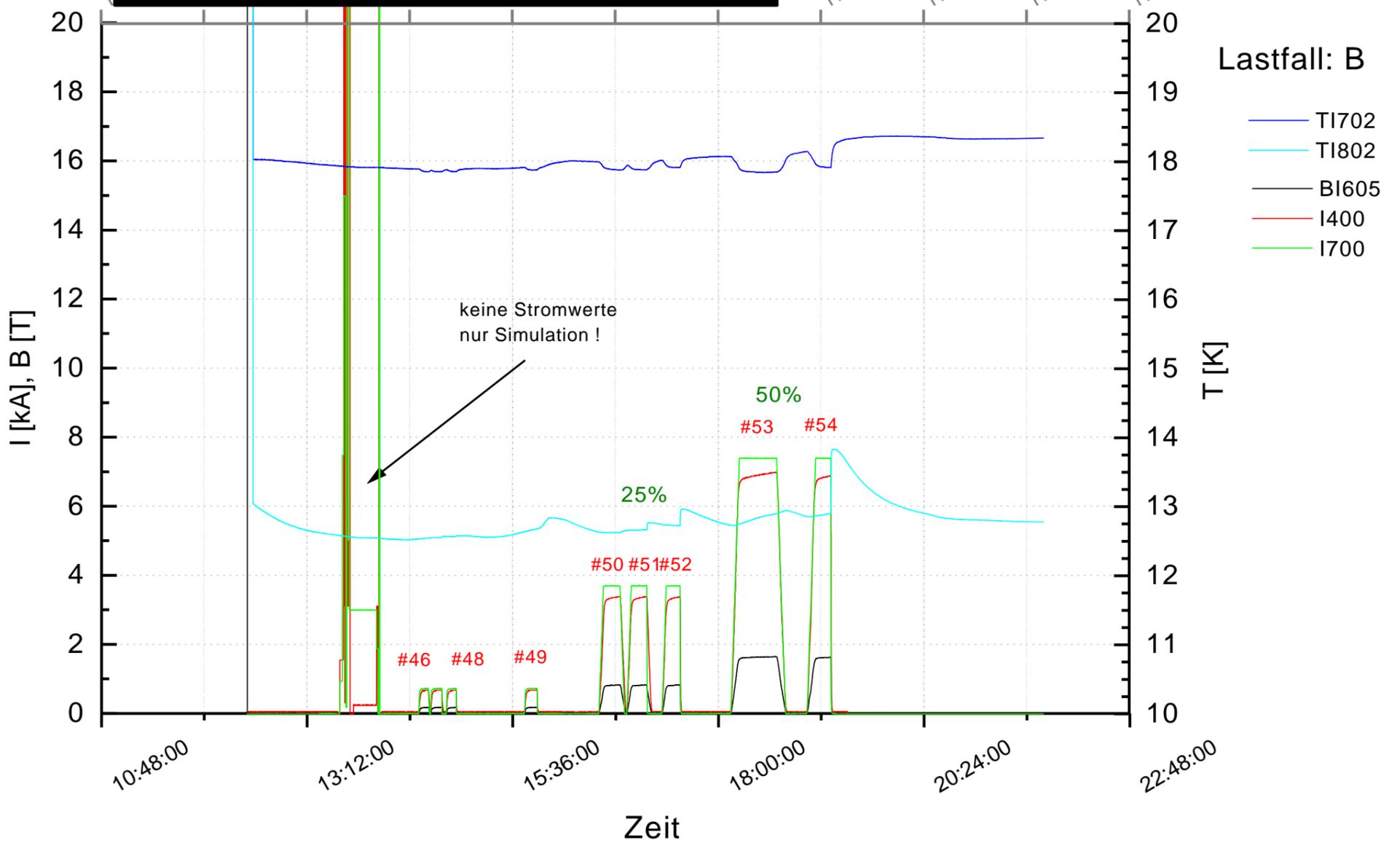
3. Stromtest: 16.6.99 / 8:30 - 20:00



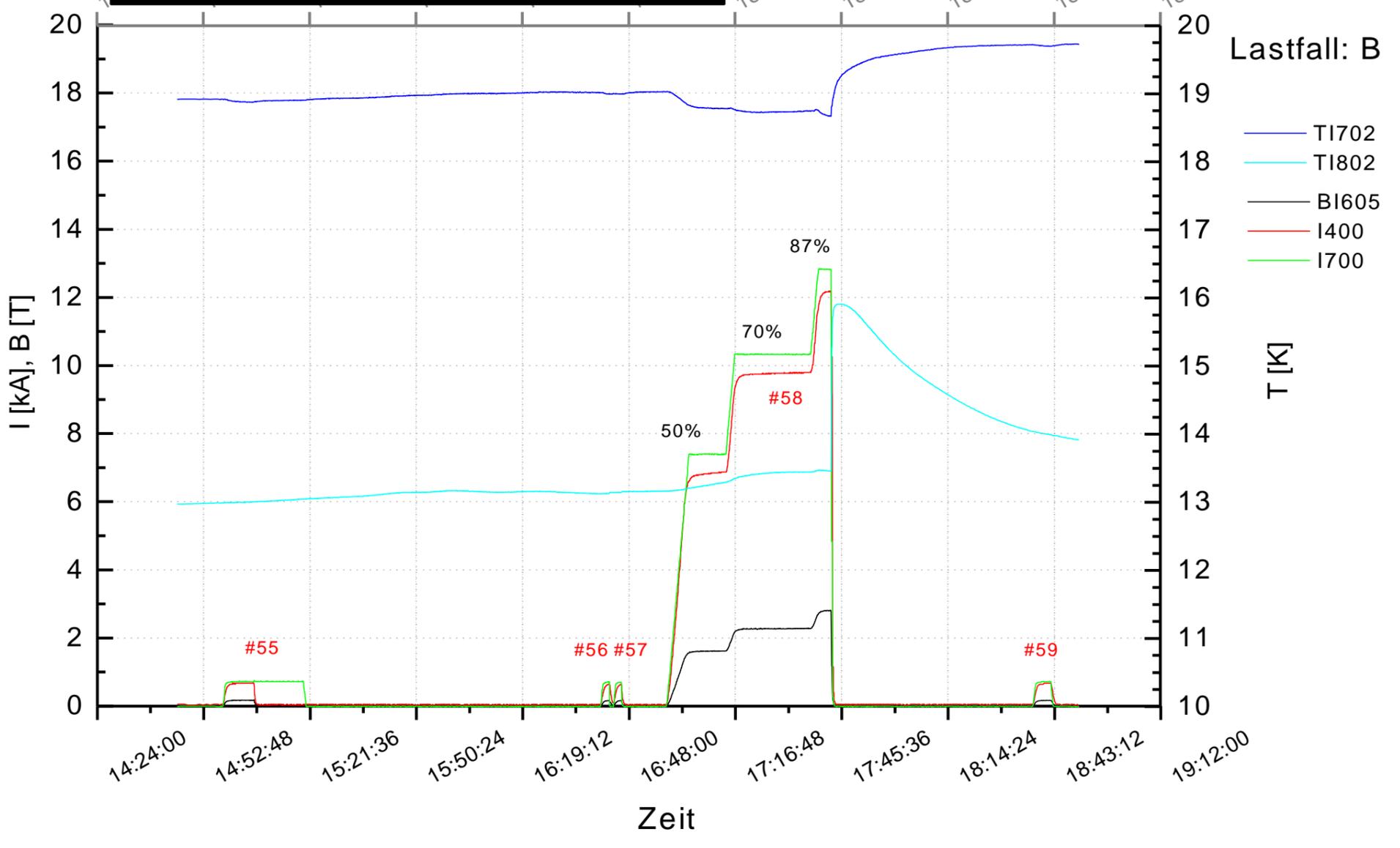
4. Stromtest (a): 17.6.99 / 7:00 - 14:45



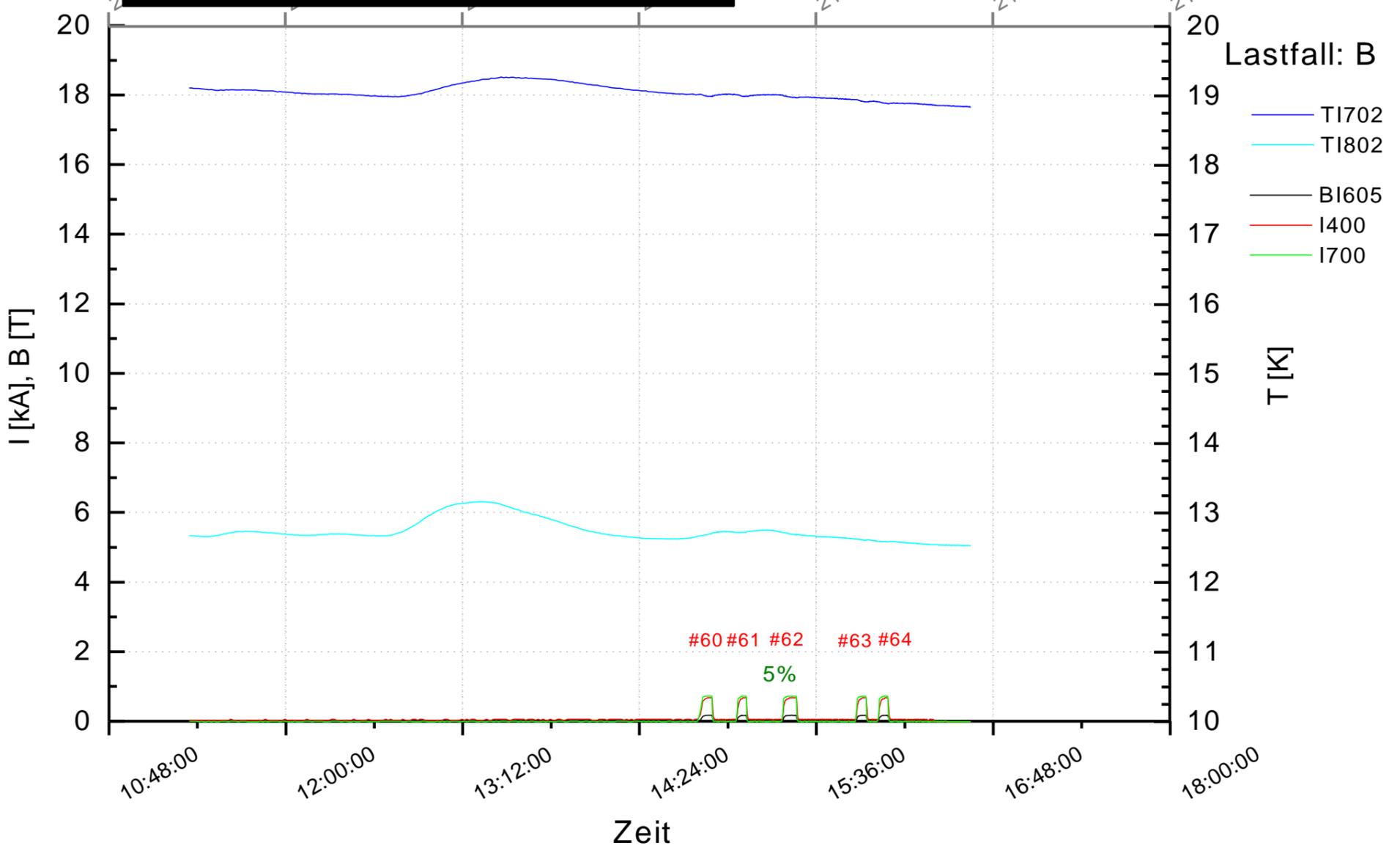
4. Stromtest (b): 17.6.99 / 12:48 - 20:00

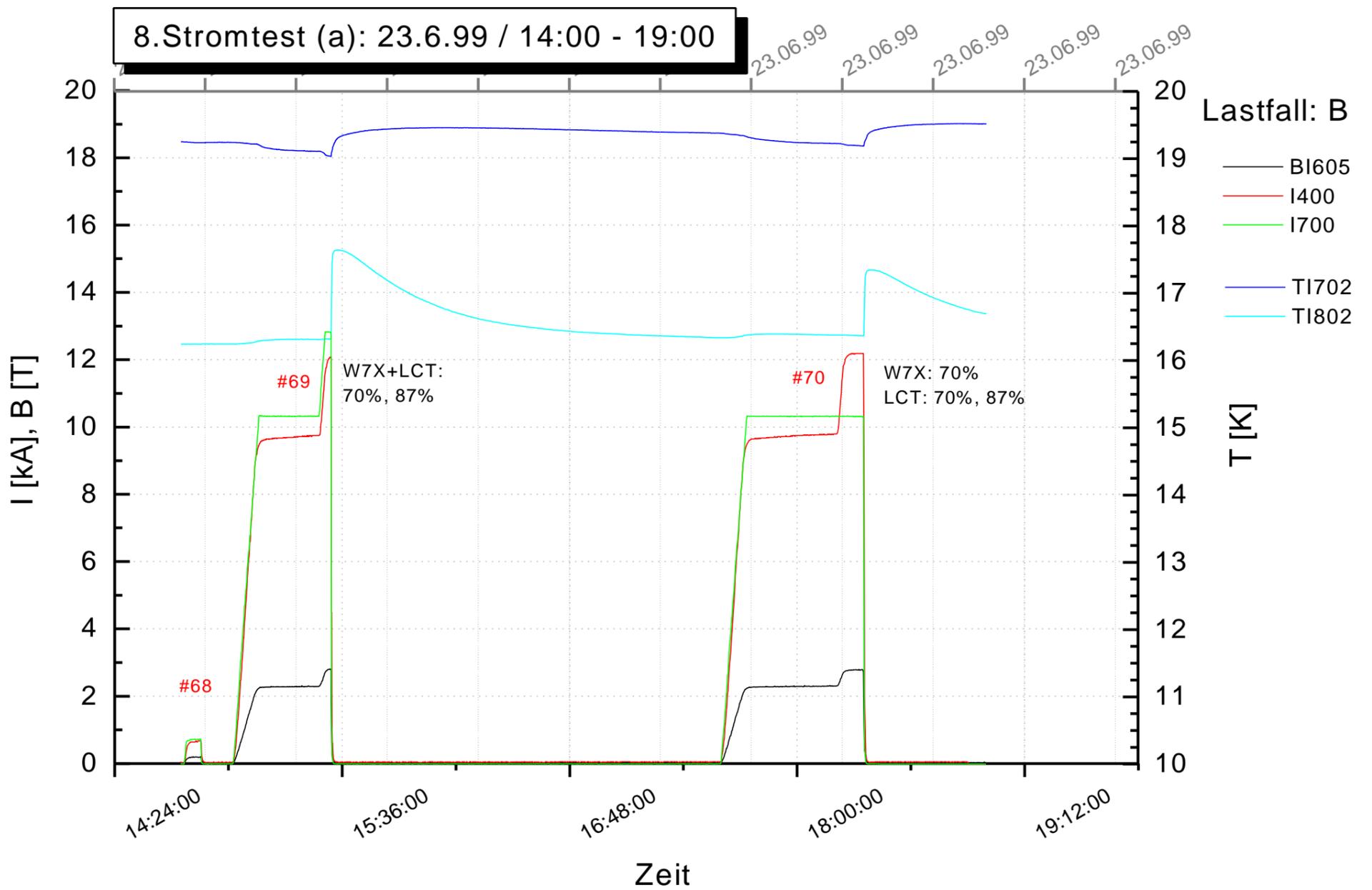
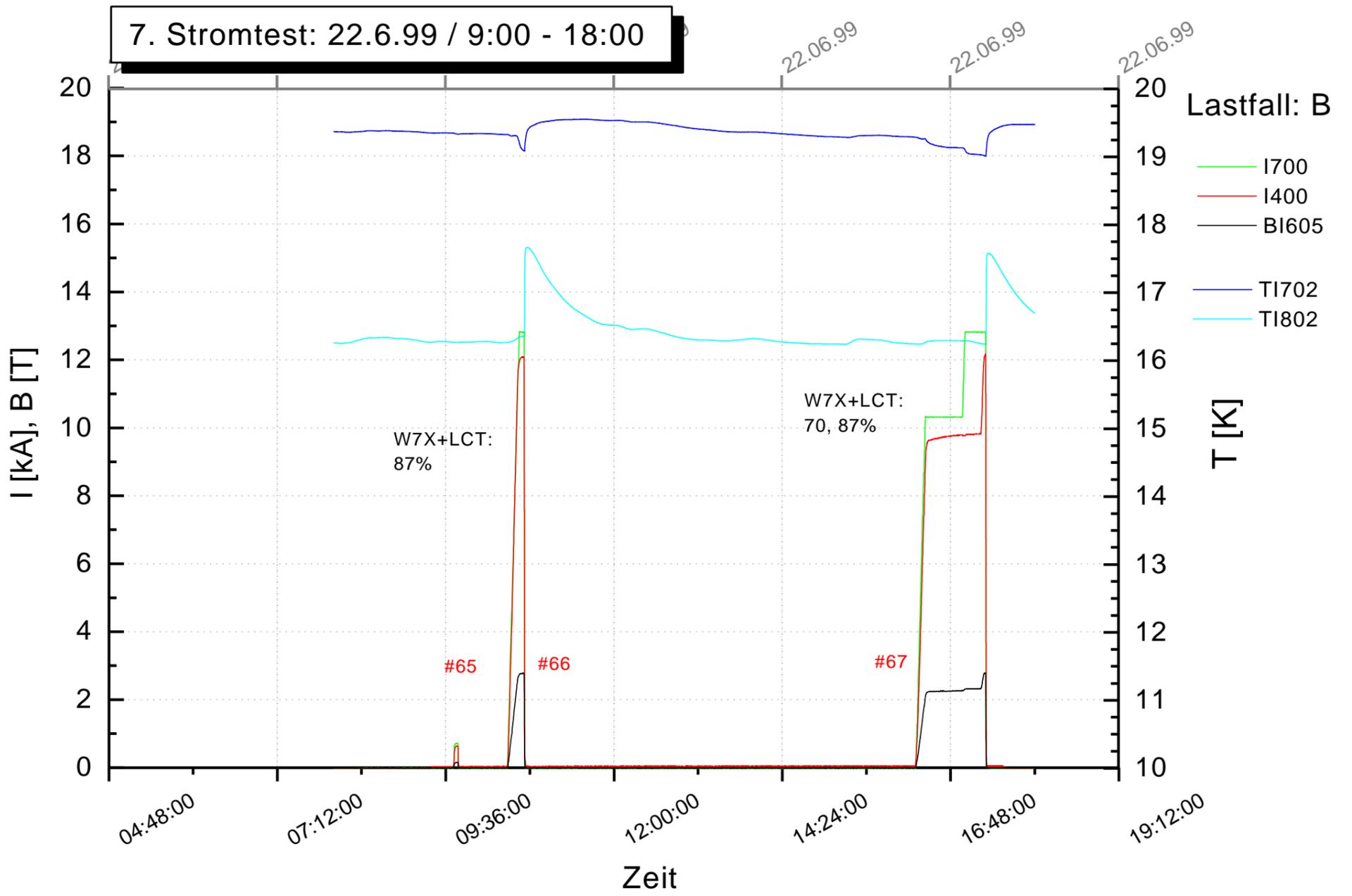


5. Stromtest: 18.6.99 / 17:00 - 19.15

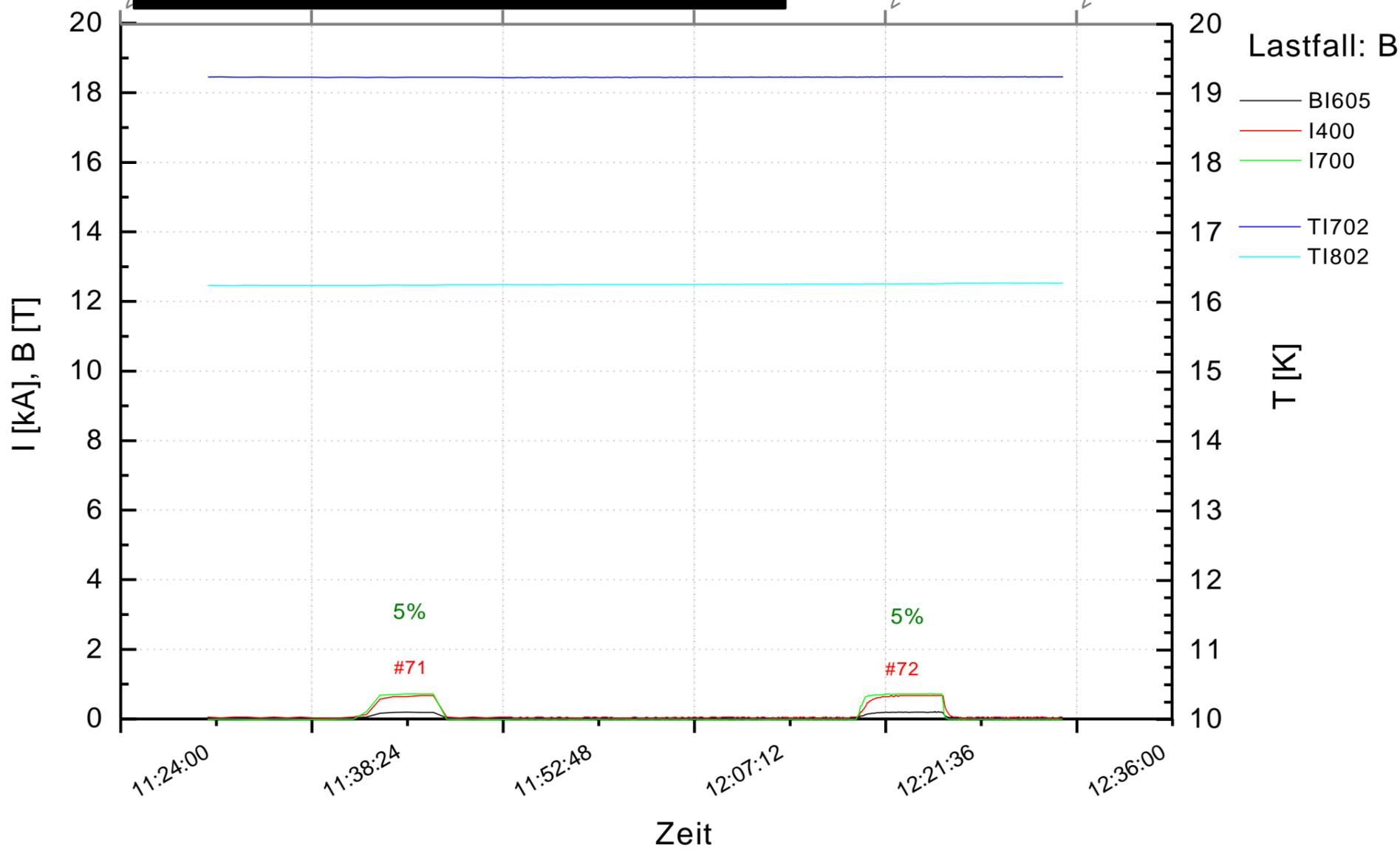


6. Stromtest: 21.6.99 / 14:45 - 16:30

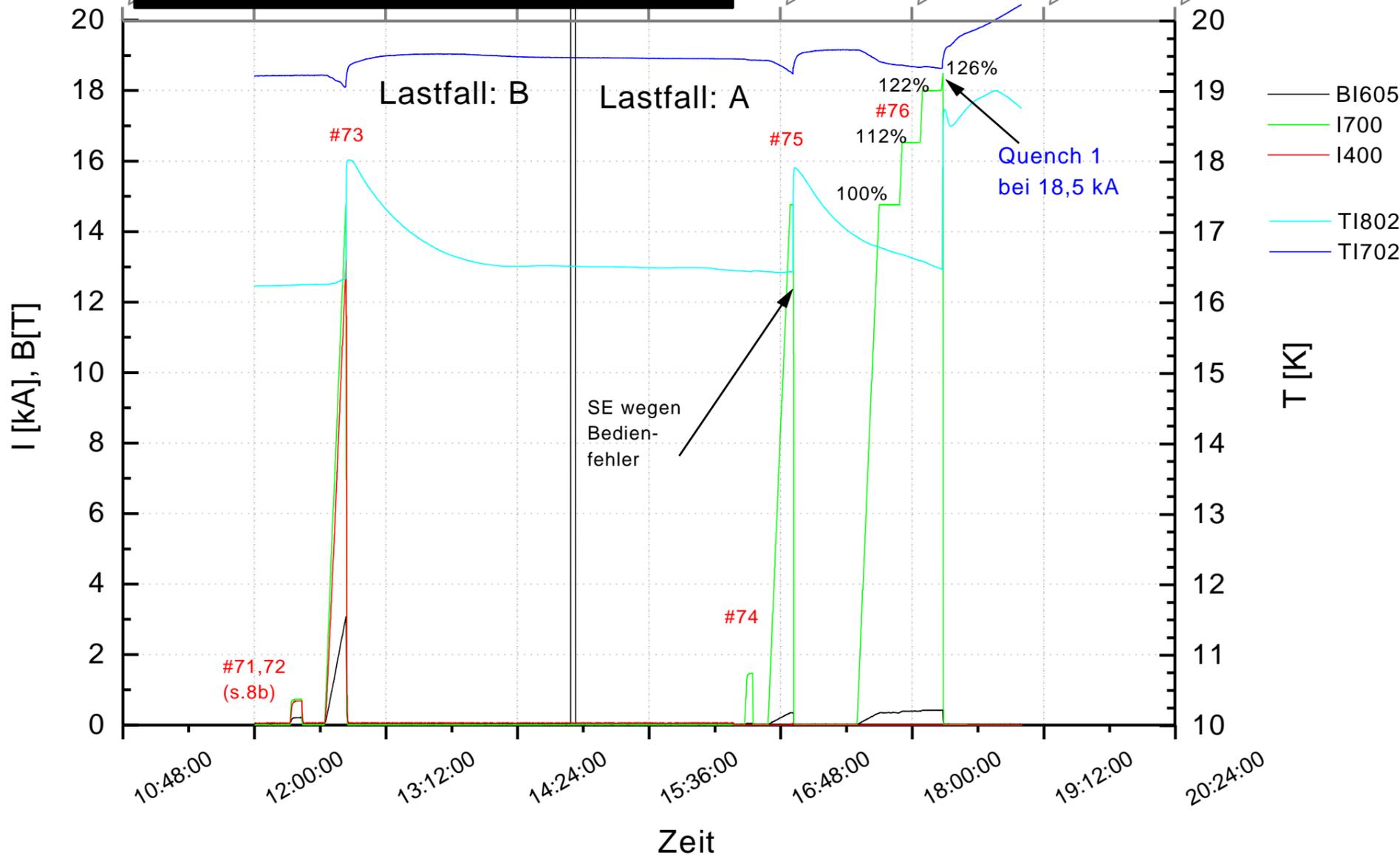


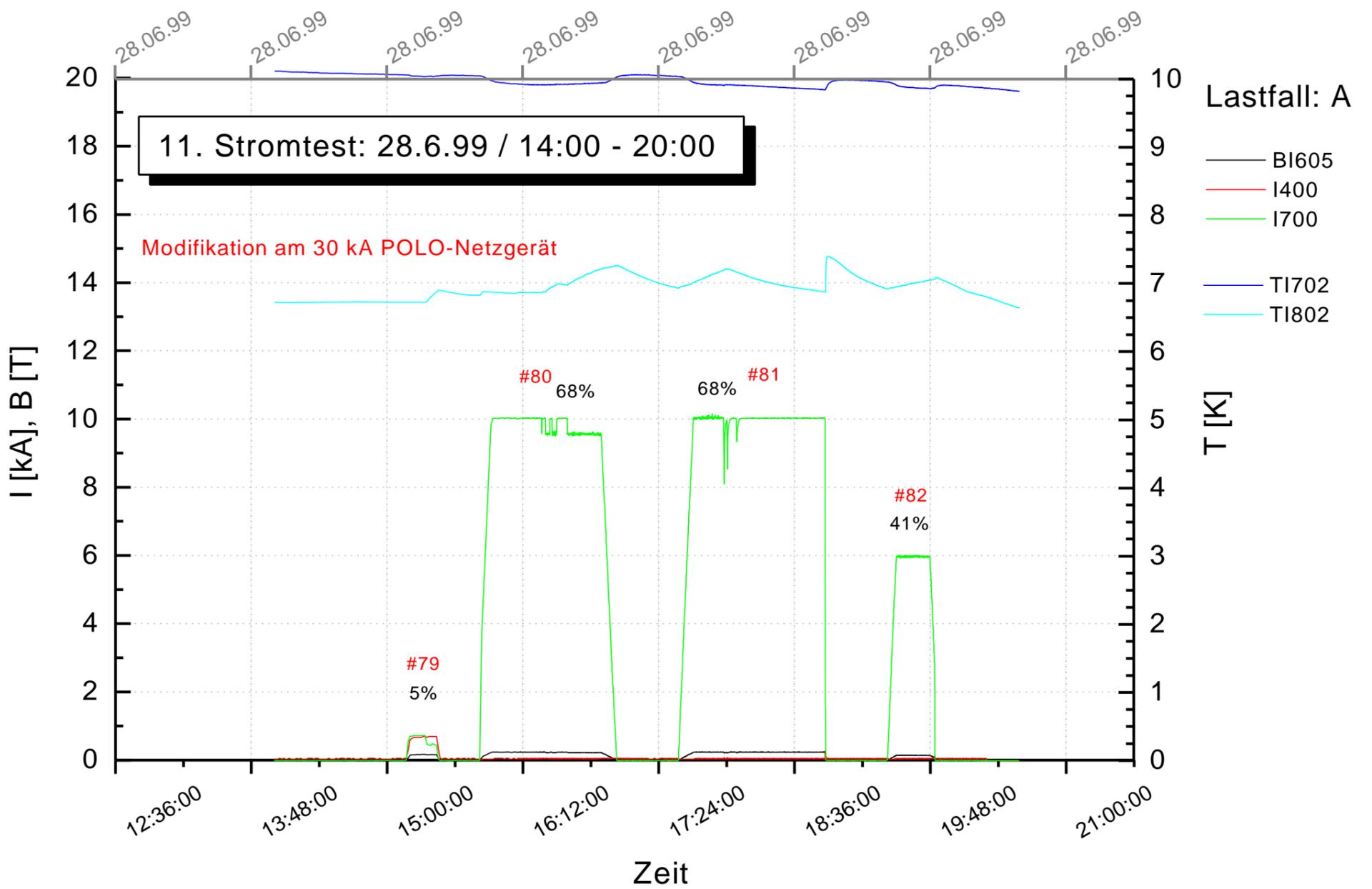
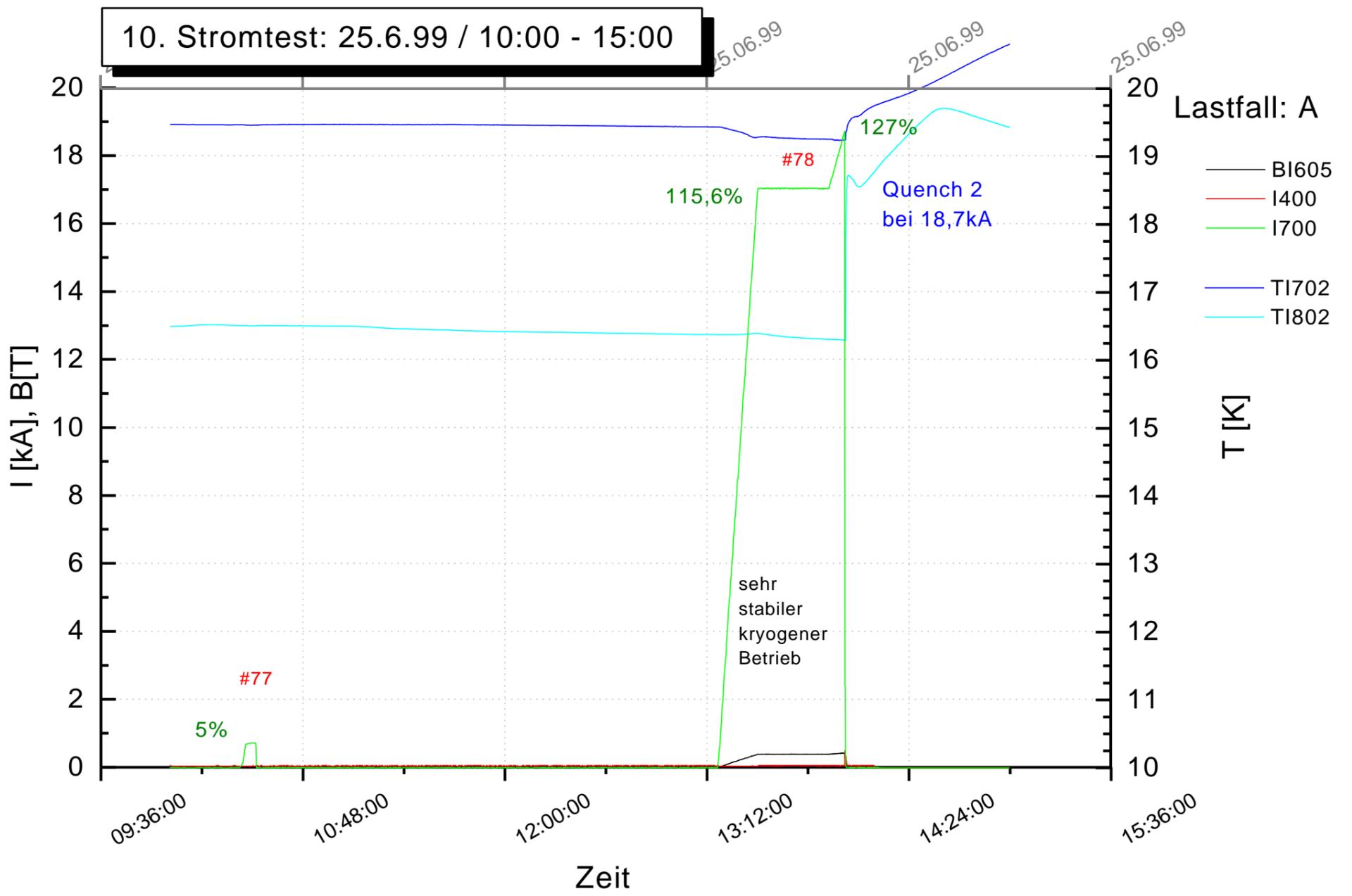


8. Stromtest (b): 24.6.99 / 11:30 - 12:35

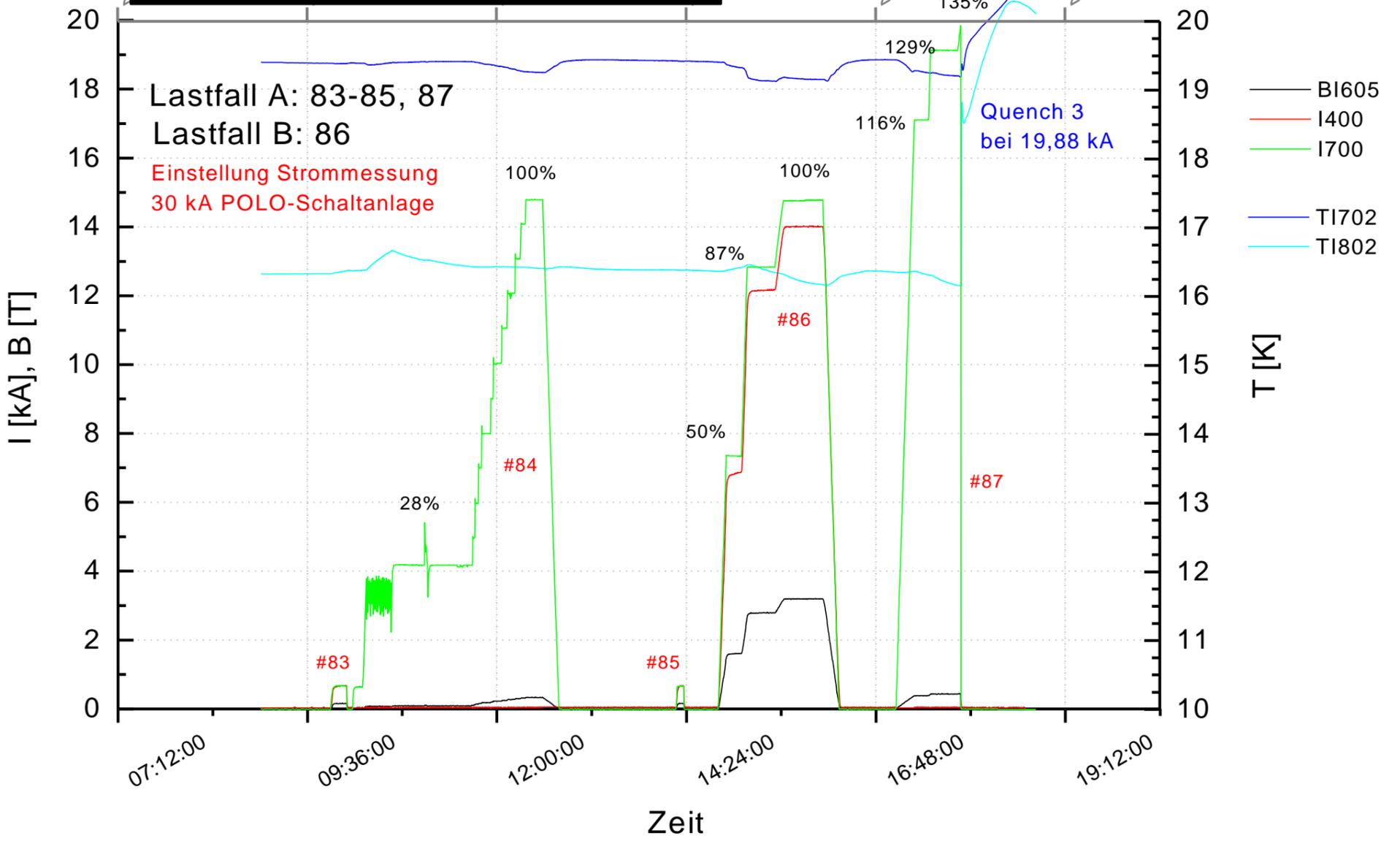


9. Stromtest: 24.6.99 / 12:00 - 19:00

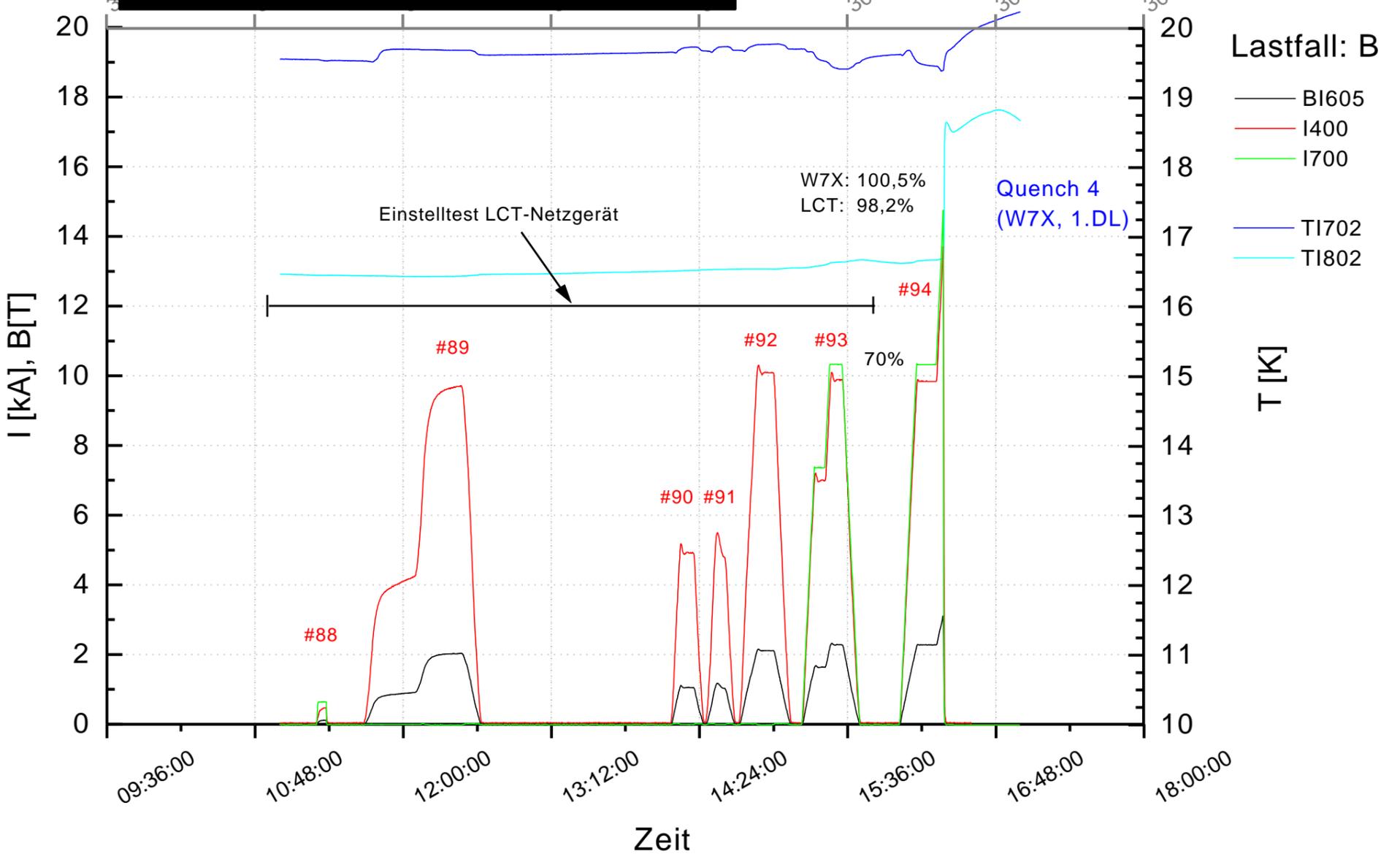




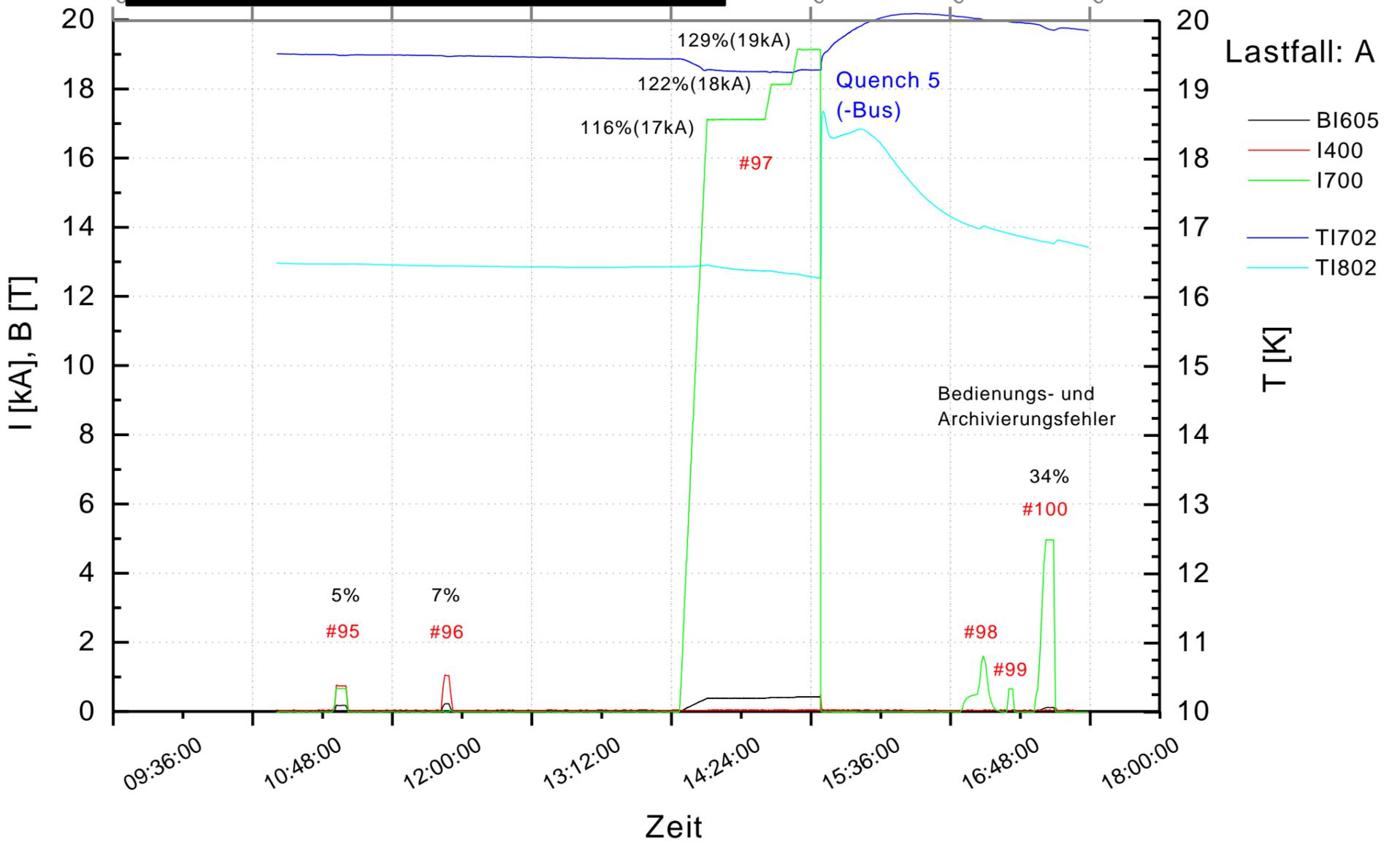
12. Stromtest: 29.6.99 / 8:00 - 19:00



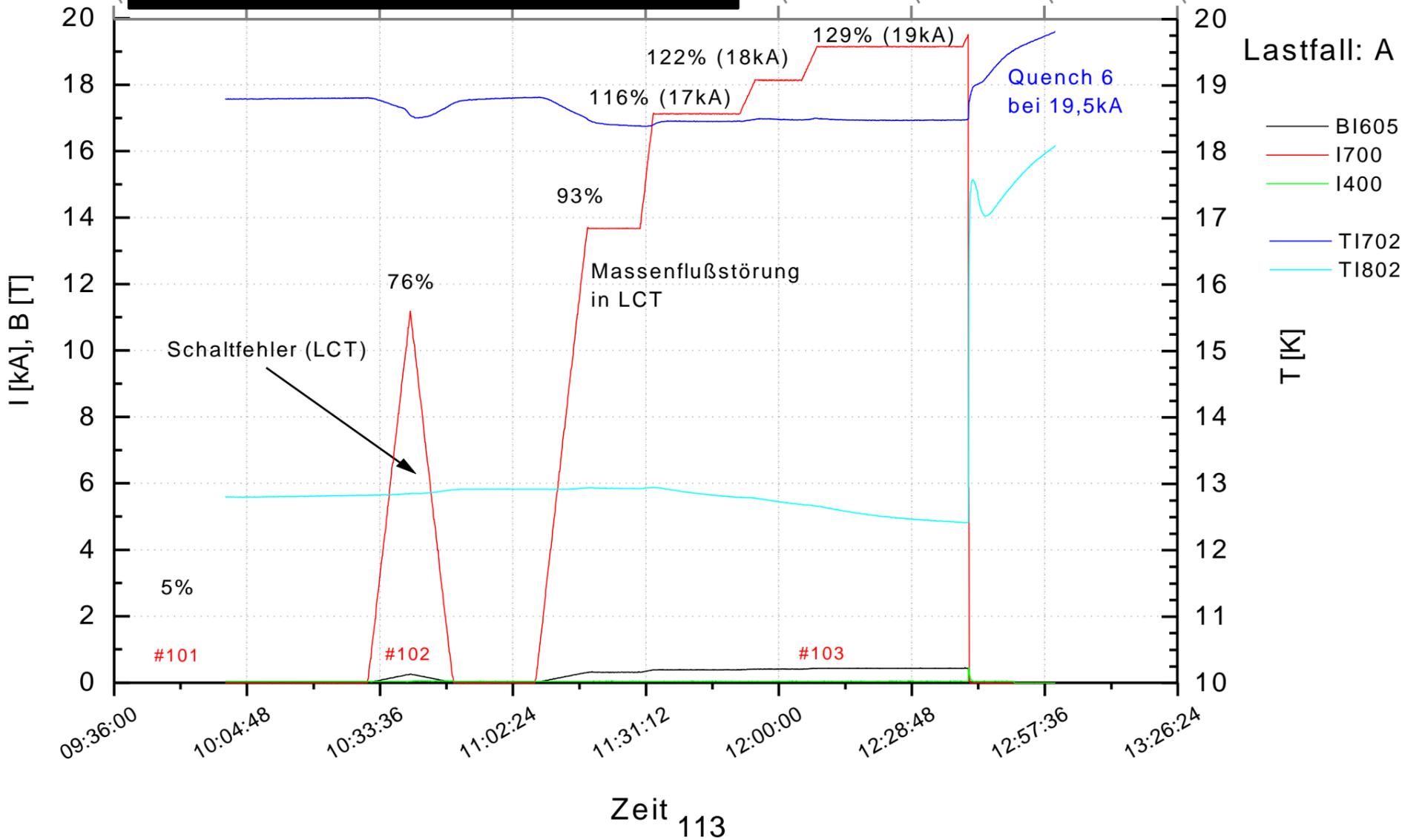
13. Stromtest: 30.6.99 / 11:00 - 17:00



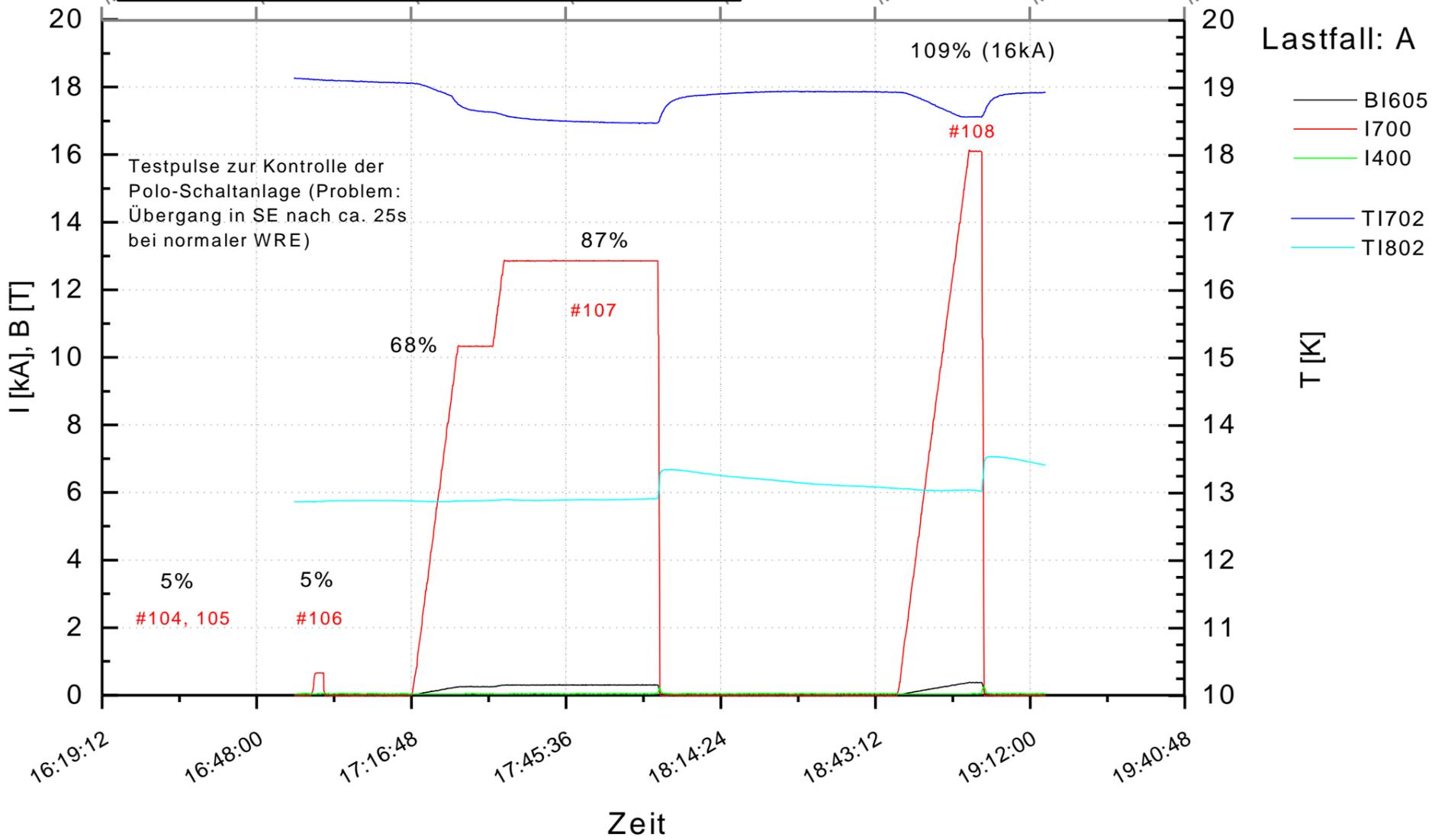
14. Stromtest: 1.7.99 / 10:00 - 18:30



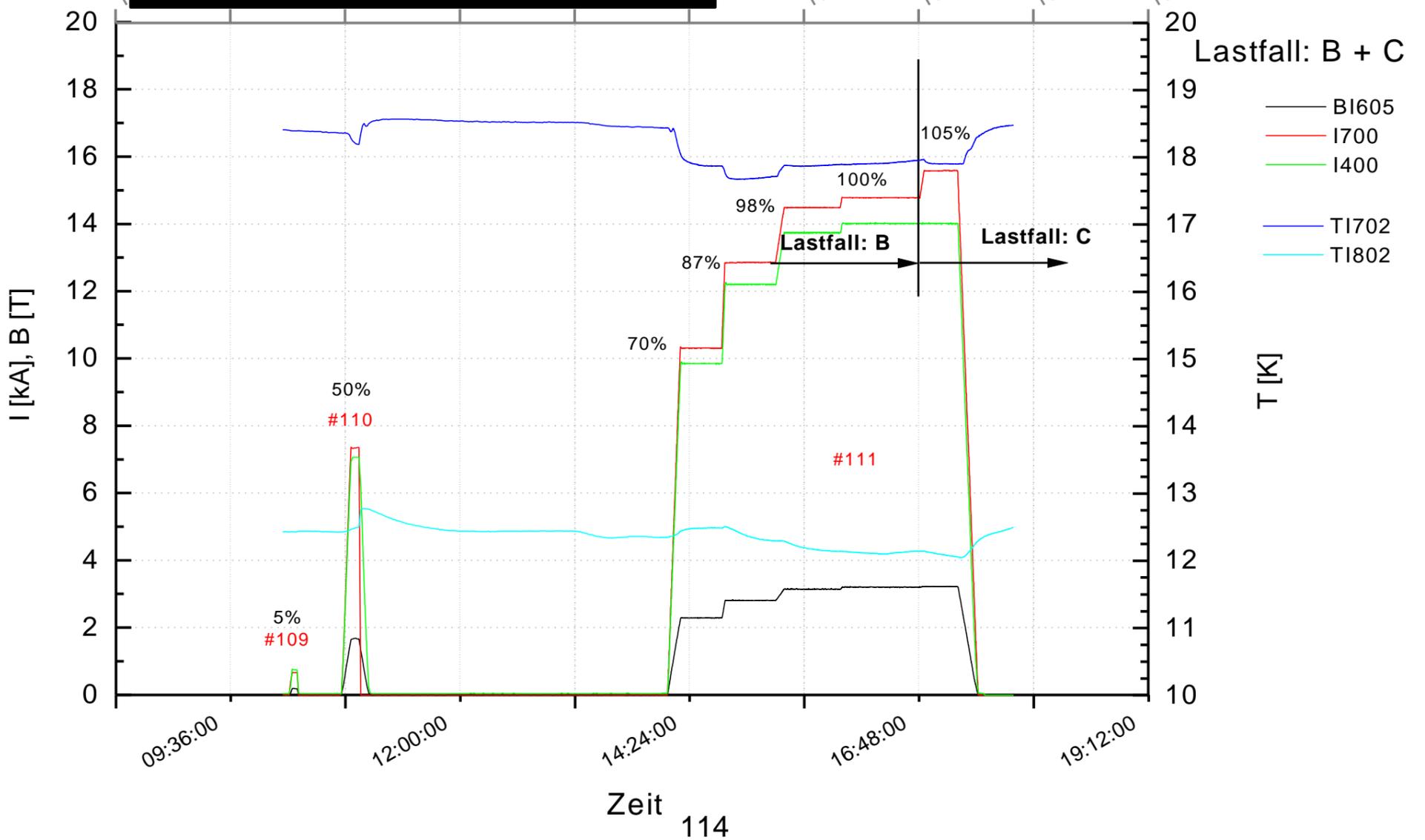
15. Stromtest: 2.7.99 / 10:00 - 13:00



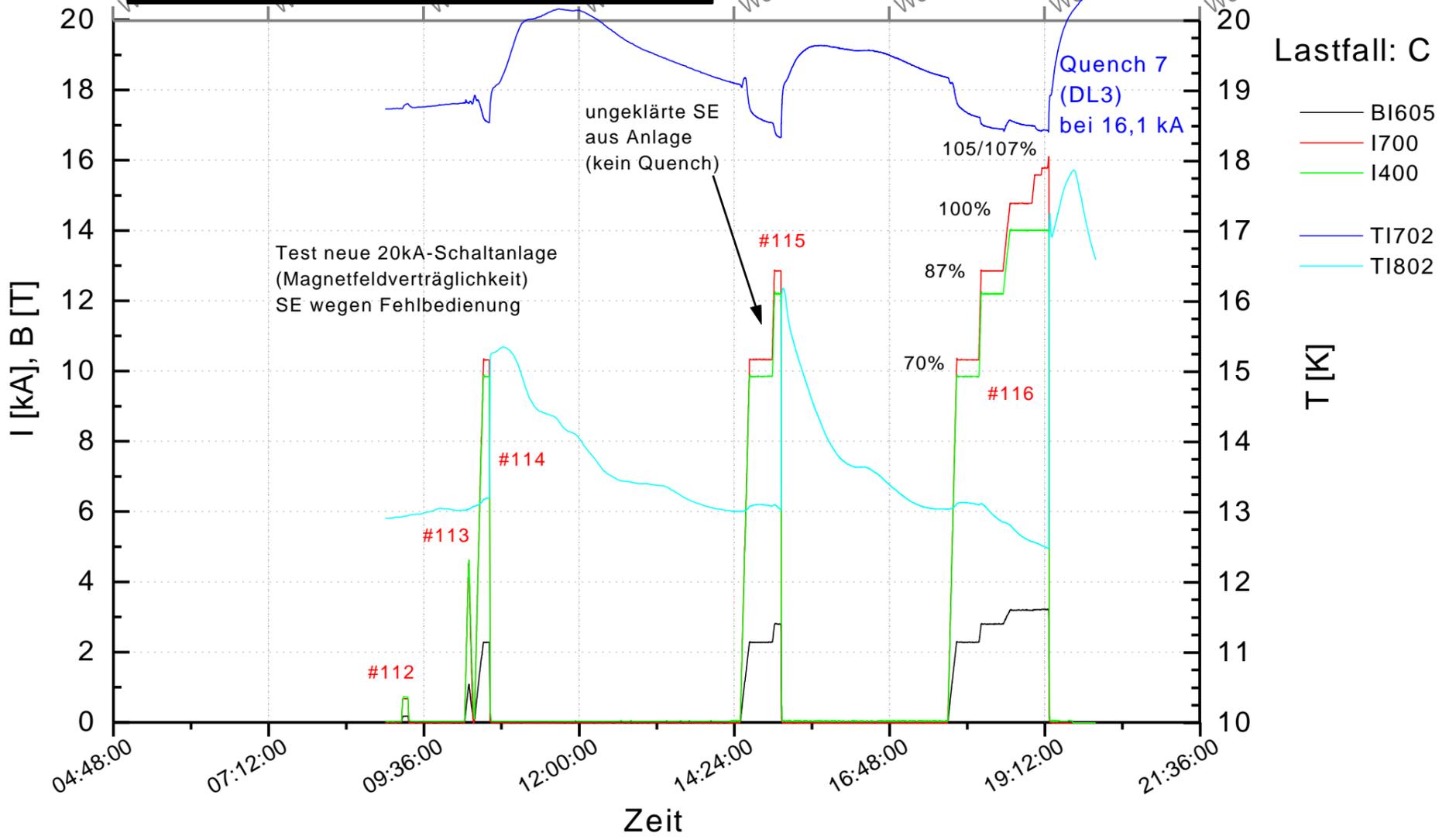
16. Stromtest: 5.7.99 / 10:00 - 19:30



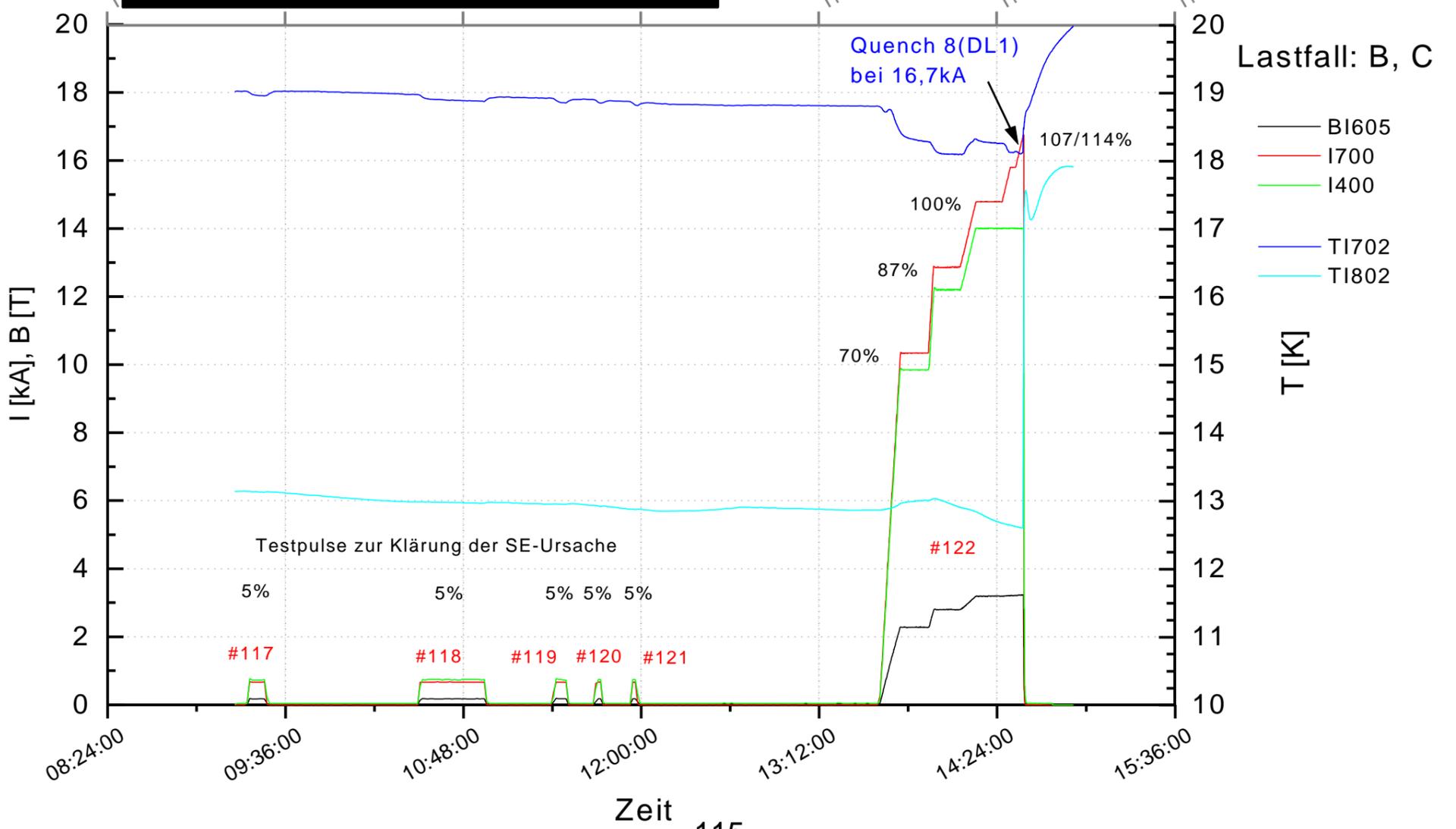
17. Stromtest: 6.7.99 / 11:00 - 19:00



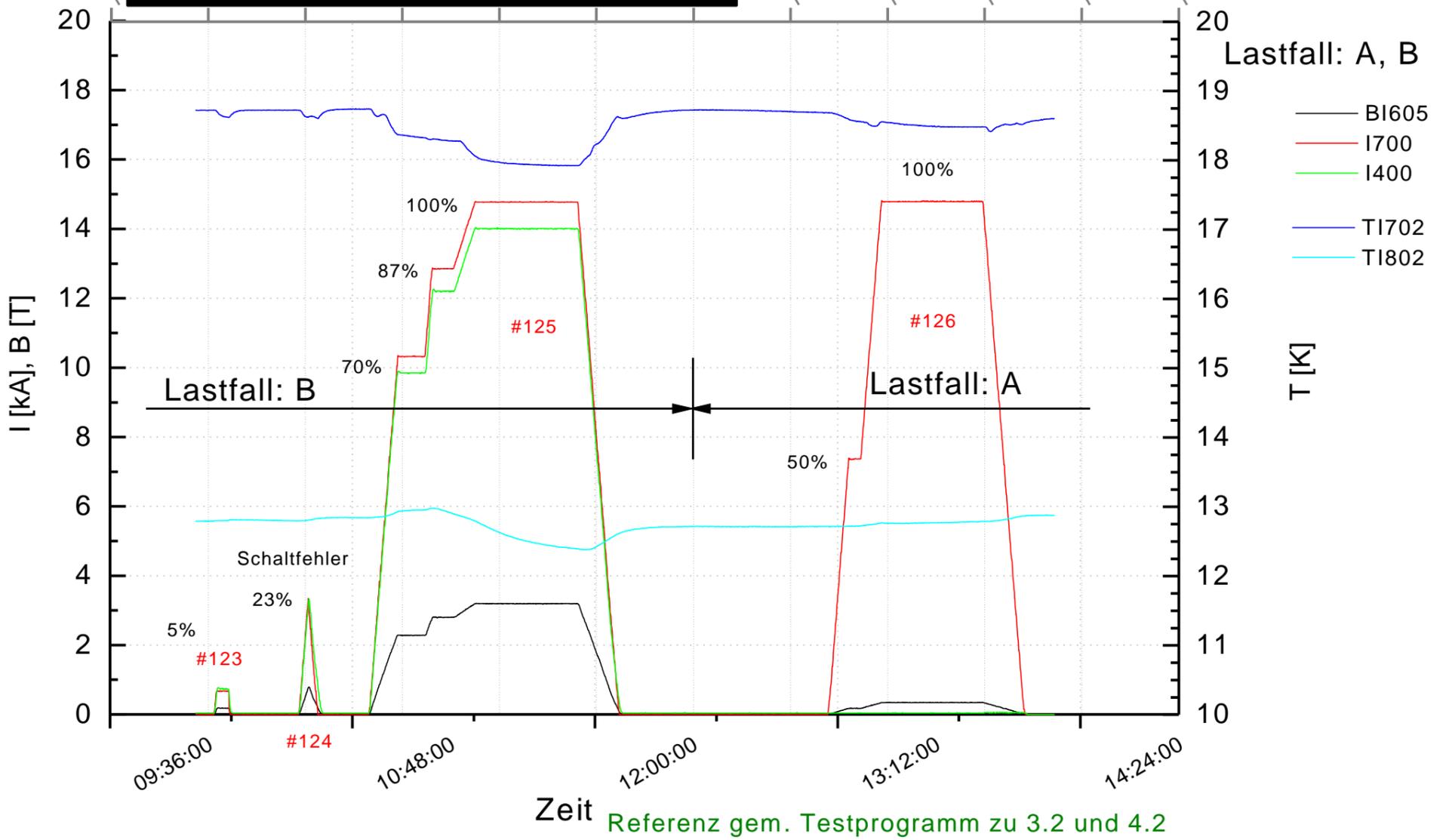
18. Stromtest: 7.7.99 / 9:00 - 20:00



19. Stromtest: 8.7.99 / 9:00 - 15:00

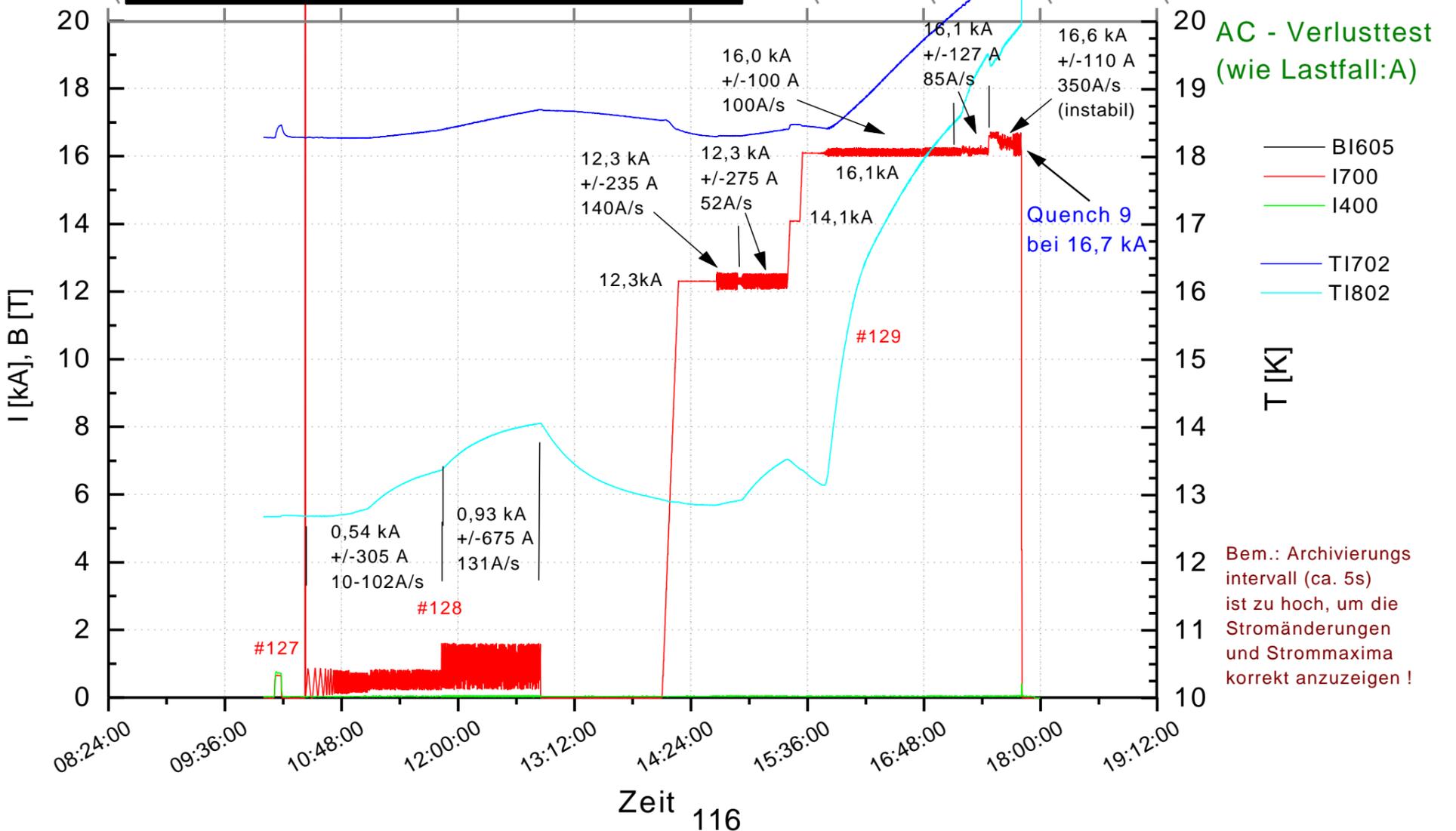


20. Stromtest: 9.7.99 / 10:00 - 15:00

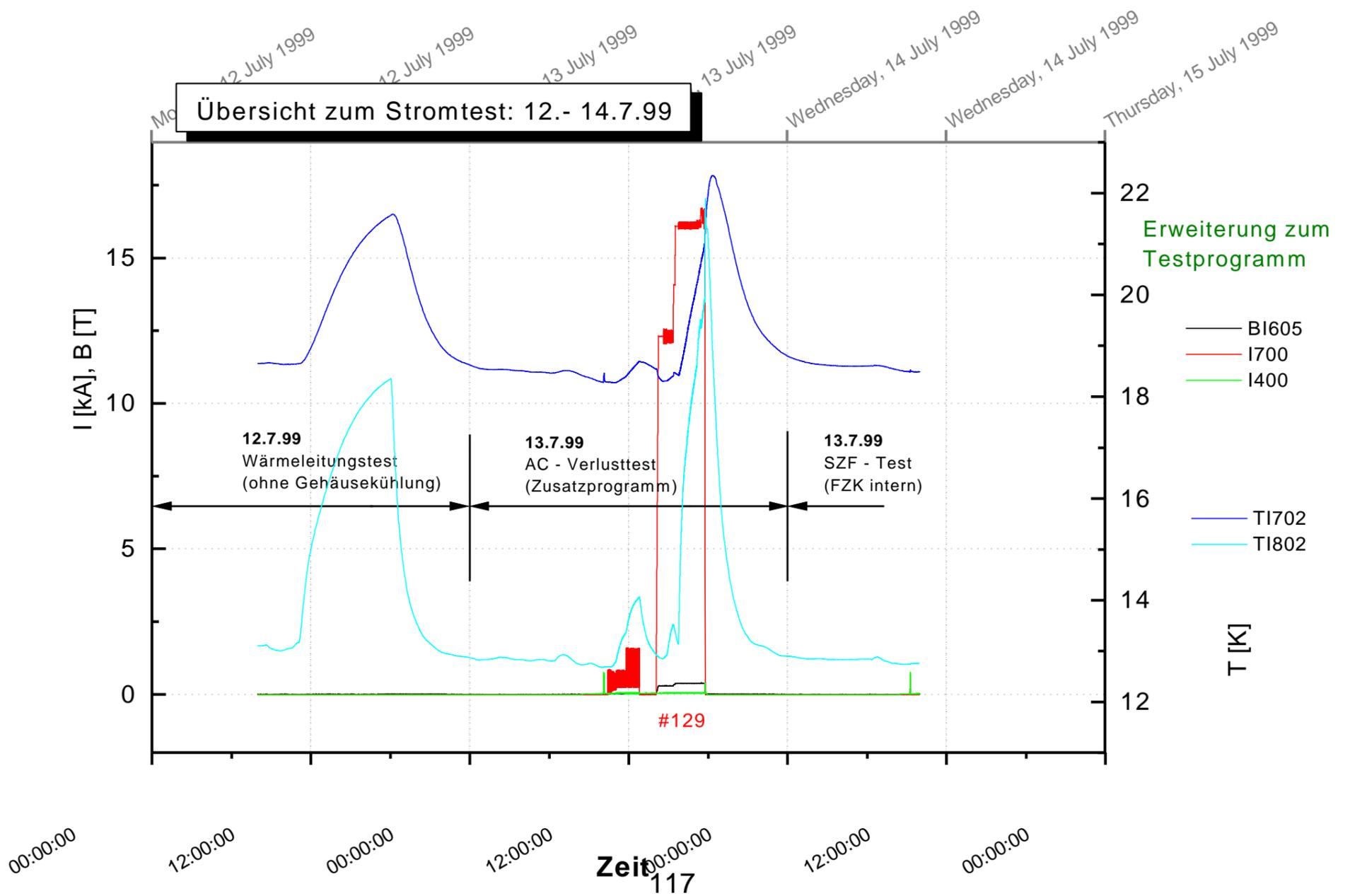
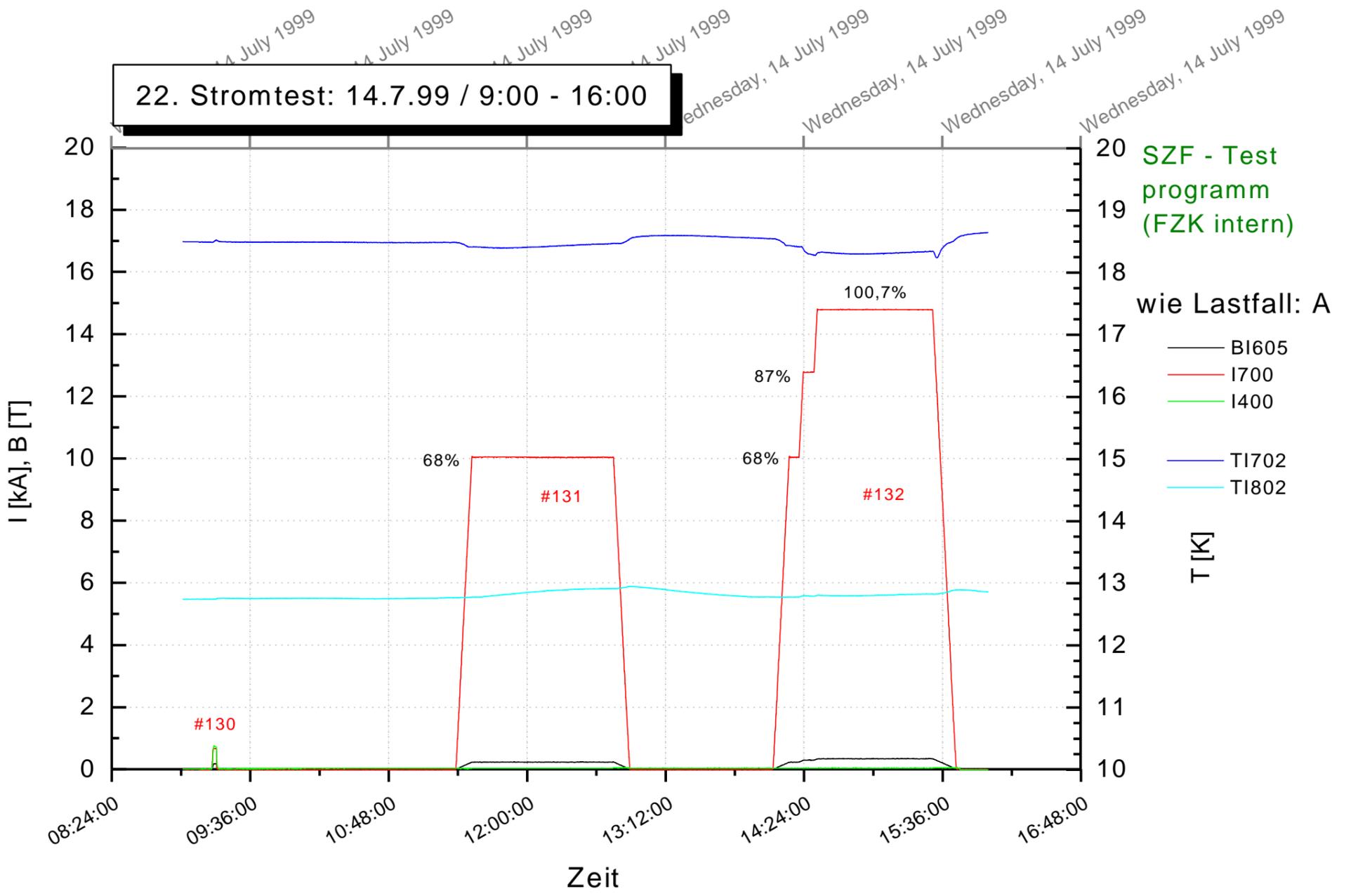


Referenz gem. Testprogramm zu 3.2 und 4.2

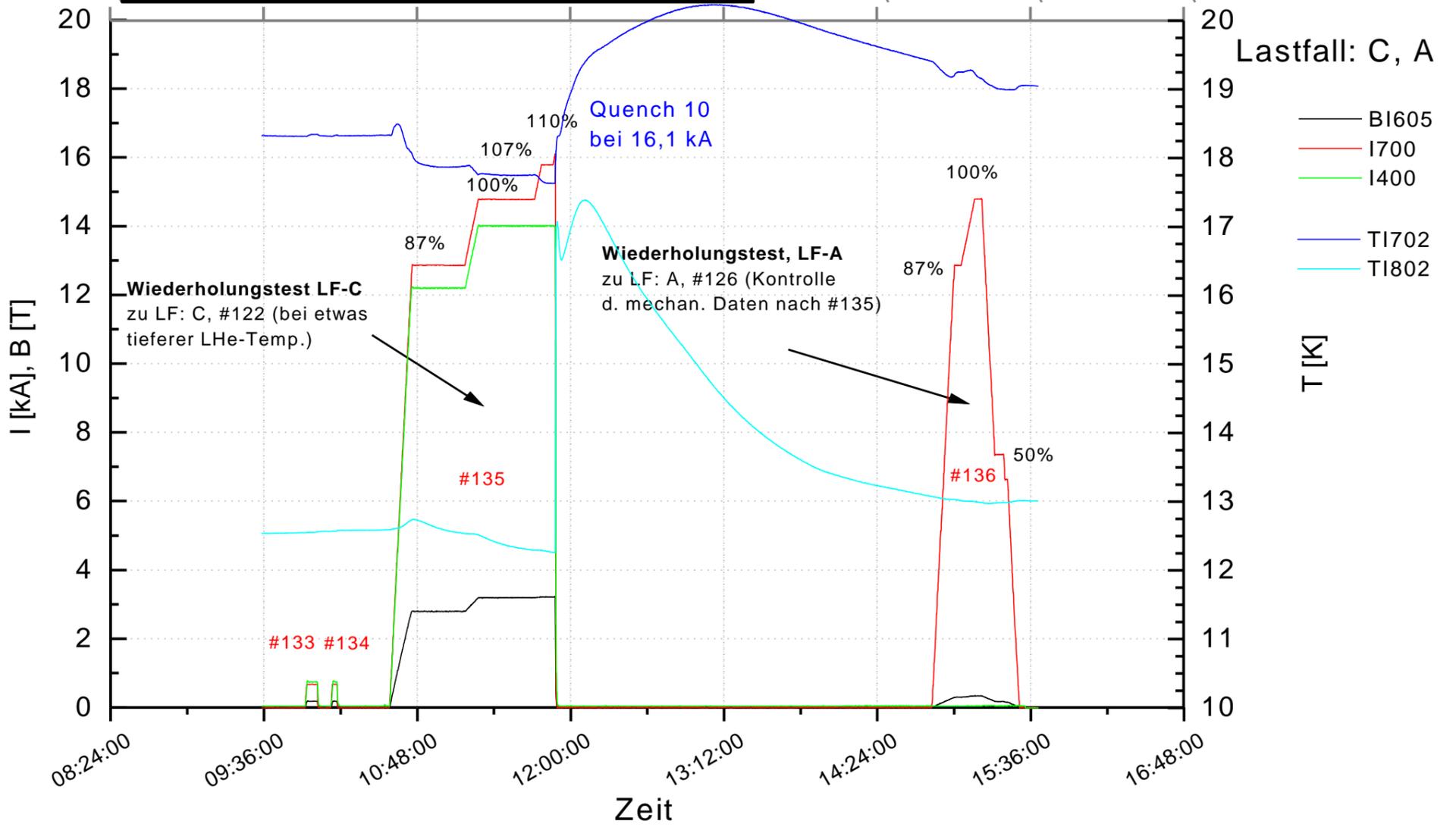
21. Stromtest: 13.7.99 / 10:00 - 18:00



Bem.: Archivierungsintervall (ca. 5s) ist zu hoch, um die Stromänderungen und Strommaxima korrekt anzuzeigen!



23. Stromtest: 15.07.99 / 9:30 - 17:00



Teil 2: Kryogenes Verhalten der W 7-X DEMO Spule

Teil 2: Kryogenes Verhalten der W 7-X DEMO Spule

2.1: Abkühlung von W 7-X DEMO Spule und LCT Spule . 124

2.2 Stationäres Verhalten und Strombetrieb..... 128

2.2.1 Füllen vom Kontrollkryostat B250 und Umstellen auf Pumpenbetrieb... 131

2.2.2 Betrieb der W 7-X DEMO Spule ohne LCT-Spule (Lastfall A)..... 132

2.2.2.1 Betrieb der W 7-X DEMO Spule bei 4,5 K..... 132

2.2.2.2 Betrieb der W 7-X DEMO Spule bei 3,8 K (Lastfall A) 139

2.2.3 Betrieb der W 7-X DEMO Spule mit LCT Spule (Lastfall B und C)..... 145

2.2.4 Druckverlust der Doppellagen der W 7-X DEMO Spule..... 149

2.2.5 Thermische Verluste und Restgaswärmeleitung 149

2.2.5.1 Thermische Verluste der W 7-X Wicklung 149

2.2.5.2 Thermische Verluste vom W 7-X Gehäuse 150

2.2.5.3 Thermische Verluste des Zwischenrahmens 152

2.2.5.4 Thermische Verluste auf die Einspeisezone 153

2.2.5.5 Restgaswärmeleitung durch bestehende Leckagen..... 153

2.3 Sicherheitsentladung und Quenchverhalten 159

2.3.1 Quenchverhalten und Rückkühlung der W 7-X DEMO Spule

im Lastfall A..... 159

2.3.2 Quenchverhalten und Rückkühlung der W 7-X DEMO Spule

im Lastfall C 164

2.4 Erwärmung der Testanordnung 168

2.5 Zusammenfassung 170

2. Kryogenes Verhalten der W 7-X DEMO Spule

Die Anordnung der verschiedenen Kühlsysteme ist aus dem vereinfachten Verfahrensschema Abb. 2.0.1 ersichtlich. Alle Angaben in diesem Bericht beziehen sich auf das Verfahrensschema „TOSKA-W 7-X ITP.34R.012.>0“ vom 20.04.1999 [2-1]. Beim Test der W 7-X DEMO Spule erfolgte die Kühlung der gesamten Testanordnung mit der 2 kW-Kälteanlage, da keine Betriebstemperaturen unter 3,6 K erforderlich waren.

Die 300 W Anlage war nur für einen Notbetrieb vorgesehen, falls die 2 kW Anlage ausgefallen oder Störungen in B250, z.B. mit den Kolbenpumpen, aufgetreten wären. In diesem Bericht wird nur das kryogene Verhalten der W 7-X DEMO Spule betrachtet.

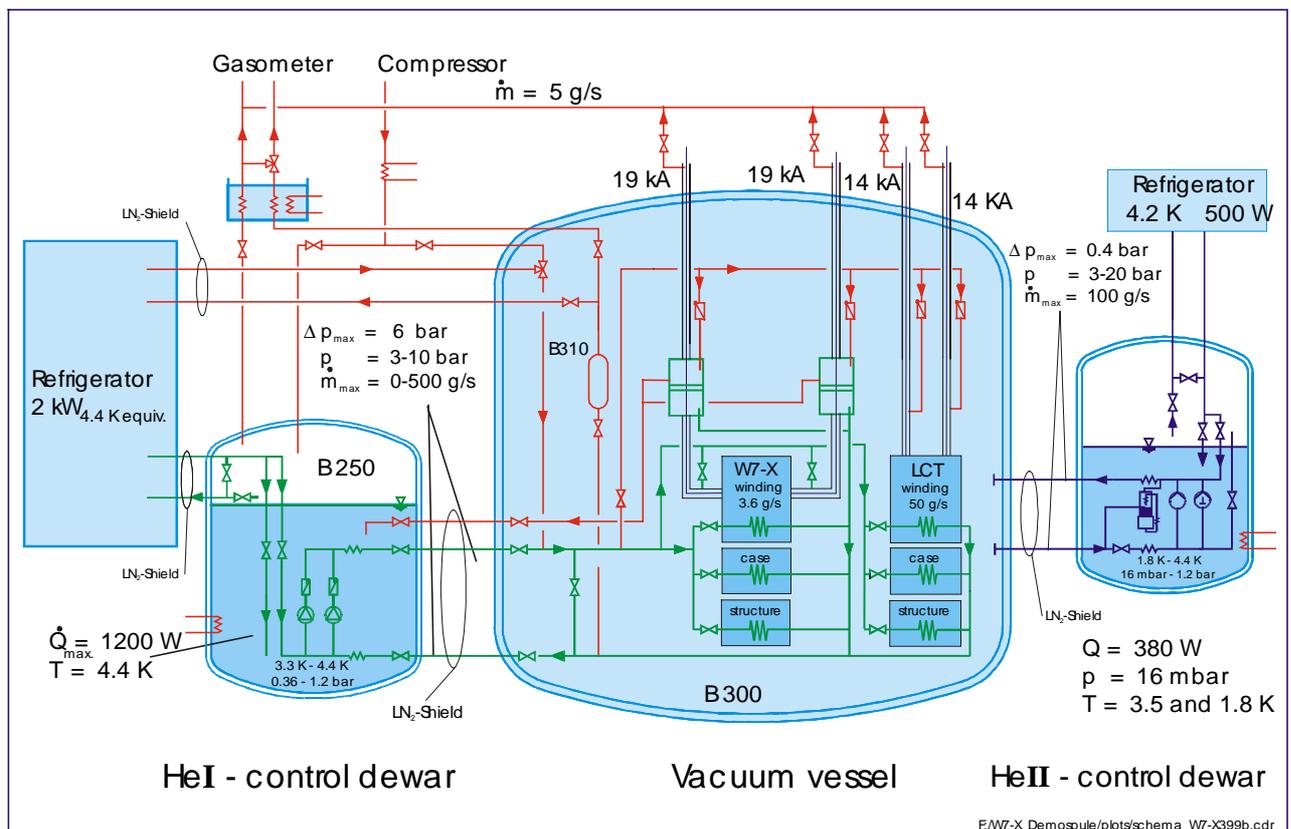


Abb. 2.0-1 Vereinfachtes Verfahrensschema des W 7-X DEMO Spulentests
(Zahlenangaben sind Auslegungs- oder Maximalwerte)

Literatur zu 2

[2-1] W. Maurer, Manual for the Test of the W 7-X DEMO coil, private Mitteilung

2.1 Abkühlung von W 7-X DEMO Spule und LCT Spule

Vom Hersteller der W 7-X DEMO Spule lagen für die Abkühlung folgende Grenzwerte fest.

Maximale Temperaturdifferenz in Gehäuse und Wicklung	= 40 K
Maximale Abkühlgeschwindigkeit	= 1 K/h

Die Abkühlung erfolgte, wie in Abb. 2.1-1 und Abb. 2.1-2 dargestellt, mit der 2 kW-Anlage über eine getrennte Transferleitung, um unabhängig von der Abkühlung der beiden Spulen den Kontrollkryostaten B250 füllen zu können.

Für die Abkühlung wurden vom Visualisierungssystem die Temperaturen aller Komponenten abgefragt, hieraus die maximale Temperatur der Testanordnung ermittelt, von dieser 40 K subtrahiert und diese Temperatur als Sollwert dem Prozeßleitsystem der Kälteanlage vorgegeben. In der Kälteanlage konnte, wie beim Test der LCT-Spule bereits erprobt, He entsprechender Temperatur gemischt und so mit der gewünschten Temperatur zur Kühlung von Spulen und Stützstruktur zur Verfügung gestellt werden.

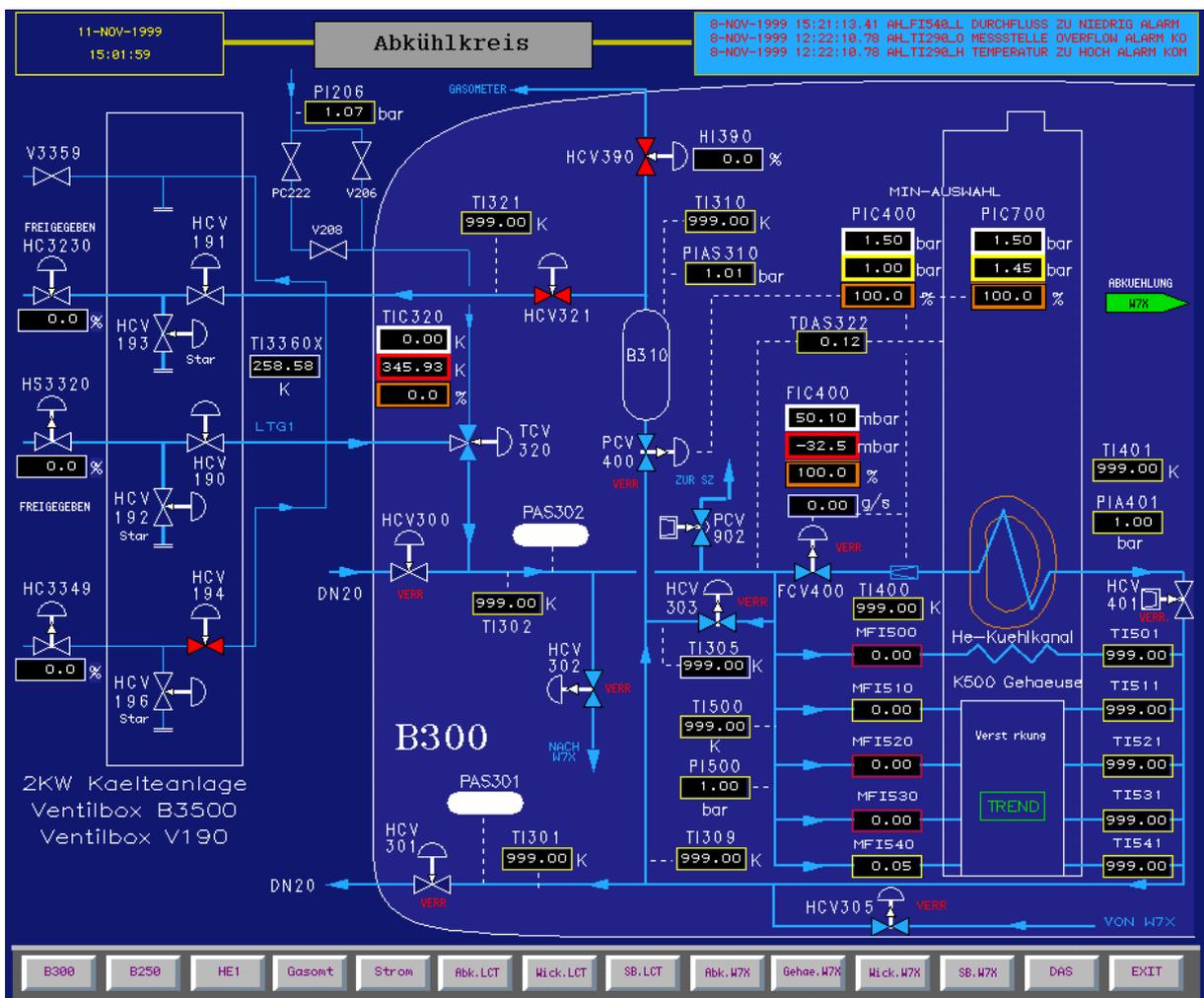


Abb 2.1-1 Schema der Anbindung an die 2 kW Kälteanlage und Abkühlung der LCT-Spule (Kopie vom Visualisierungssystem)

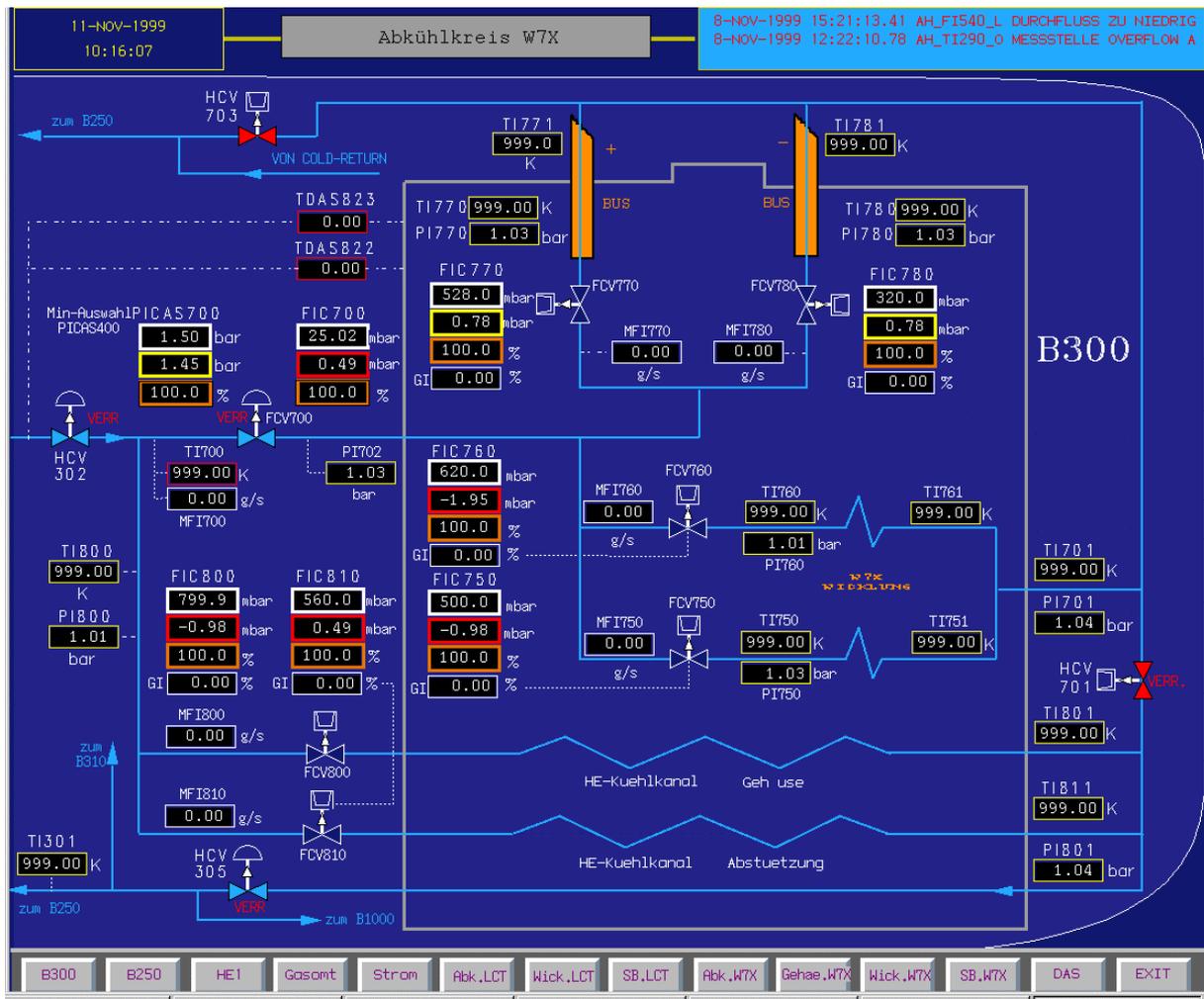


Abb 2.1-2 Abkuehlschema der W 7-X DEMO Spule
(Kopie vom Visualisierungssystem)

Wie aus Abb. 2.1-3 ersichtlich, war hiermit eine kontinuierliche Abkuehlung ohne Temperaturschwankungen bis zu einer He Temperatur von ca. 80 K moeglich. Zur Sicherheit der Spulen waren zusaezentlich noch Messungen und ueberwachungen der Temperaturdifferenz zwischen He-Eintritt und der vermutlich waermsten Stelle der Spulen installiert (TDAS 322, 822, 823). Beim ueberschreiten des eingestellten Grenzwertes von 45 K waere das Vorlaufventil geschlossen und so die weitere Abkuehlung gestoppt worden. Diese Absicherungen wurden aber waehrend des gesamten Tests nicht ausgeloeset.

Bedingt durch die nicht ausreichende Kuehlung der Lager zwischen W 7-X DEMO Spule und Zwischenrahmen hinkte die Temperatur der Lager erheblich nach, wie aus Abb. 2.1-3 ersichtlich ist. Die maximale zulaezssige Temperaturdifferenz zwischen Lager TI863-867 und He-Eintritt in die Lager TI830-837 wurde daher gemeinsam von Hersteller Fa. Noell und IPP zuerst auf 80 K spaeter auf 100 K erhoeht. Der Sollwert fuer die Vorlauftemperaturregelung wurde fuer die weitere Abkuehlung von Hand angepaest, da aus Sicherheitsgruenden das Visualisierungssystem nur eine maximale Temperaturdifferenz von 45 K zuliee. Hieraus resultieren auch die Temperaturschwankungen waehrend der weiteren Abkuehlung von 80 K bis 10 K.

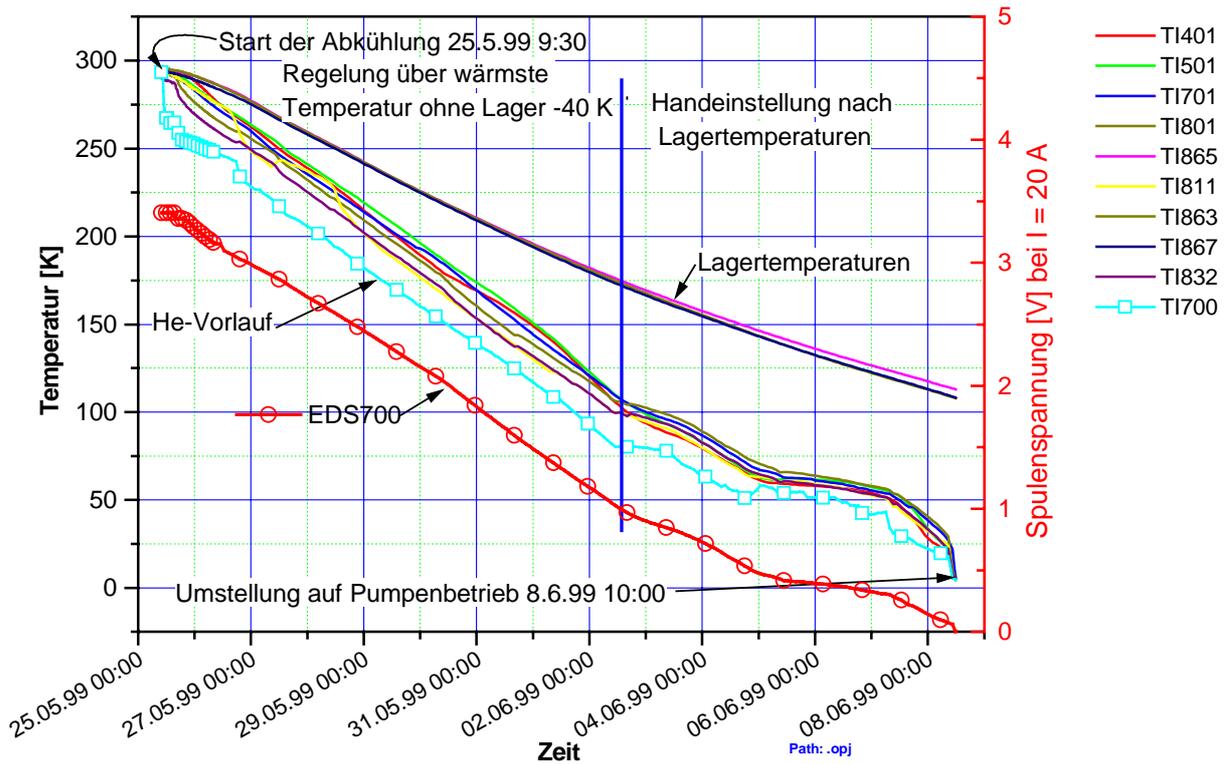


Abb. 2.1-3 Temperaturverlauf während der Abkühlung von W 7-X und LCT-Spule (EDS700 ist der Spannungsabfall der Wicklung der DEMO Spule bei 20 A Leiterstrom)

Die verhältnismäßig große Entfernung vom Lager zum nächsten Kühlkanal und damit die ungünstigen Kühlverhältnisse sind sehr gut aus nachfolgender Abb. 2.1-4 ersichtlich.

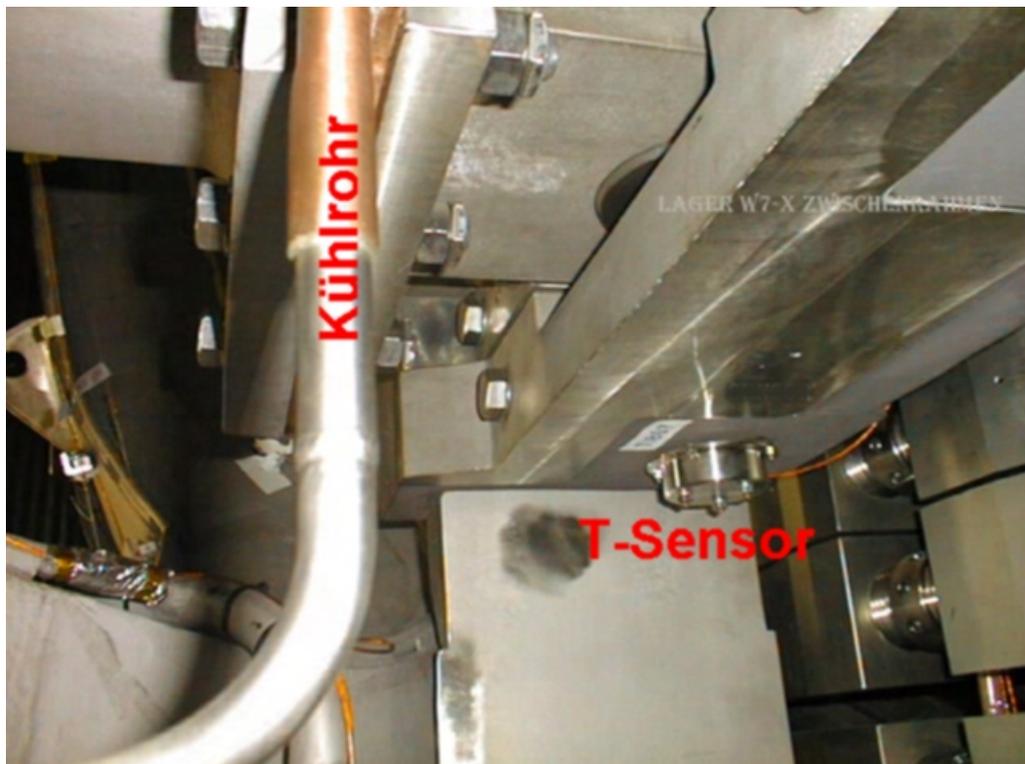


Abb. 2.1-4 Kühlkanal und Temperaturfühler am Lager der W 7-X DEMO Spule

Alle Kühlkanäle von W 7-X und LCT-Wicklung sowie der Gehäuse und des Zwischenrahmens wurden parallel gekühlt, wobei die Aufteilung der Massenströme von Hand den jeweiligen Bedürfnissen der einzelnen Komponenten soweit möglich und sinnvoll angepaßt wurden. Eine Erhöhung des Massenstromes durch die nachhinkenden Lager war z. B. nicht sinnvoll, weil hierdurch die Abkühlgeschwindigkeit nicht beschleunigt werden konnte. Die Wärmeübertragungsfläche war zu klein und hierdurch konnte dem He keine zusätzliche Wärme zugeführt werden.

Zur Massenstrommessung setzten wir im gesamten Kühlsystem, außer den 14 Kühlkanälen der LCT-Spule, Venturis ein, wobei die Berechnung des Massenstroms aus Differenzdruck, Absolutdruck und Temperatur online durch das Visualisierungssystem erfolgte.

Die Aufteilung der He- Massenströme während der Abkühlung ist aus nachfolgender Abb. 2.1-5 ersichtlich.

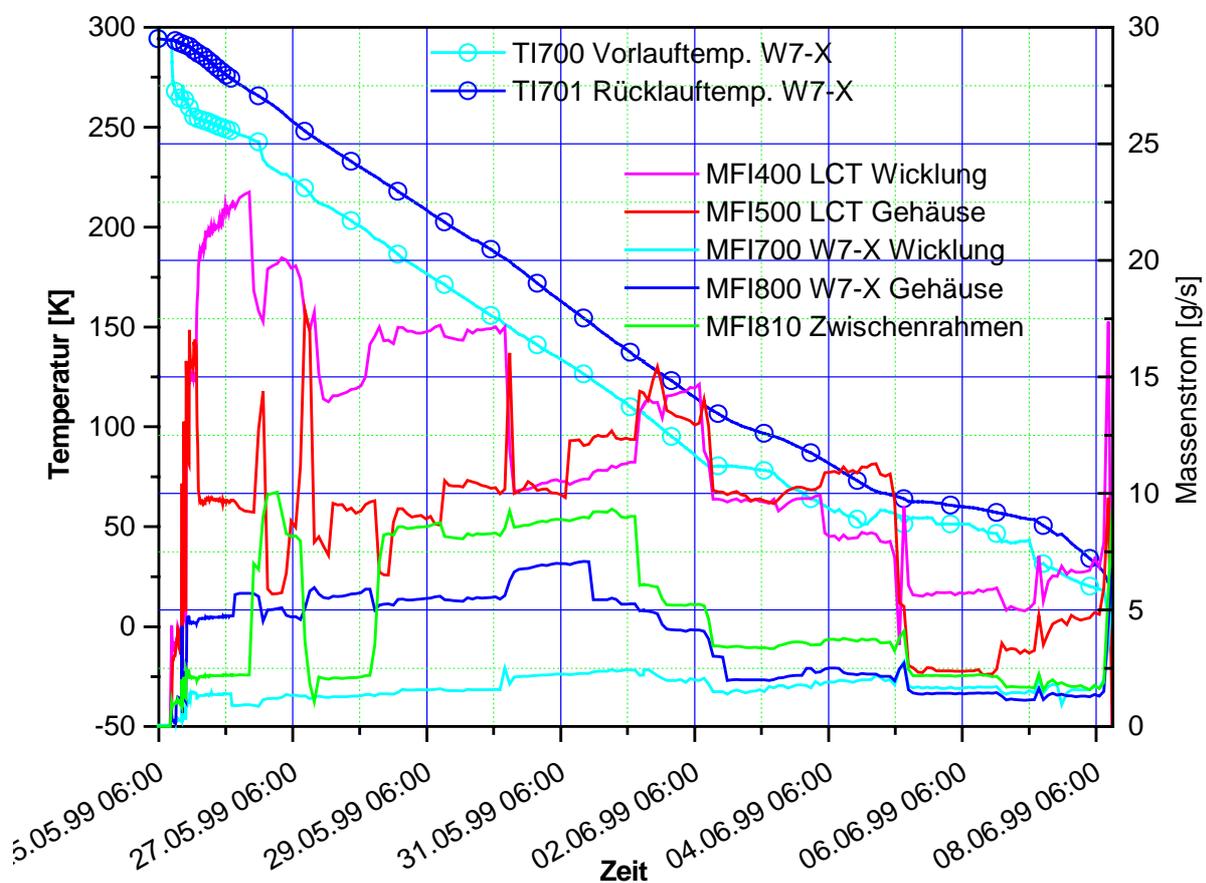


Abb. 2.1-5 He-Massenstromaufteilung während der Abkühlung.

Mit obigen Massenströmen und der Enthalpiedifferenz zwischen Ein- und Austritt, berechnet aus Druck und Temperatur mit dem Programm "HEPAK", wurde ebenfalls online auch die Kühlleistung für die einzelnen Komponenten berechnet. Die Schwankungen der Kühlleistung während der Abkühlung sind auf die von Hand vorgenommenen Anpassungen der Massenströme an die jeweiligen Bedürfnisse zurückzuführen. In folgender Abb. 2.1-6 sind die Kühlleistungen während der Abkühlung dargestellt.

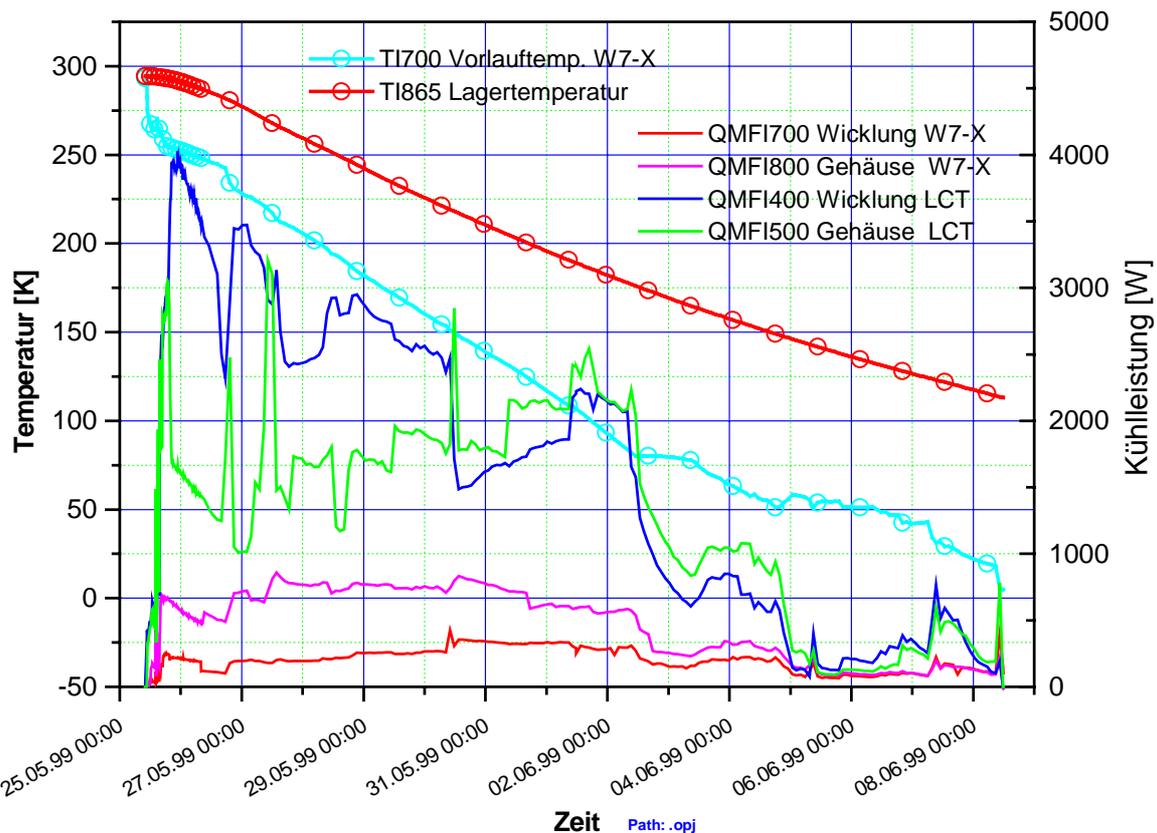


Abb. 2.1-6 Kälteleistungen von W 7-X und LCT Spule während der Abkühlung

Wie aus obigen Diagrammen ersichtlich, erfolgte die Abkühlung trotz nachhinkender Lagertemperaturen ohne jegliche Störungen der gesamten Testanlage im vorgesehenen Zeitraum von 2 Wochen.

2.2 Stationäres Verhalten und Strombetrieb

Aus folgenden vereinfachten Schemas in Abb. 2.2-1 und Abb. 2.2-2 sind sowohl das Kühlverfahren für Wicklung mit supraleitenden Stromschienen (SLS) und dem Gehäuse wie auch die Lage der Meßstellen im Kühlkreislauf ersichtlich. Die Meßstellen auf dem Gehäuse sind in Abb. 2.2-3 dargestellt.

Regelventile und Heizungen in der Einspeisezone der Wicklung (Abb. 2.2-1) waren für die Reduzierung des Massenstromes und die Heizungen für die Erhöhung der Temperatur bei Quenchuntersuchungen bestimmt. Bedingt durch den erforderlichen He-Massenstrom in der Wicklung war eine Reduzierung nicht notwendig und daher wurden die Regelventile nicht verwendet. Eine Temperaturerhöhung mit Heizung für die Einleitung eines Quenches war ebenfalls nicht notwendig, da der Quench ohnehin bei den üblichen Betriebstemperaturen von 4,8 K und 3,8 K erfolgte.

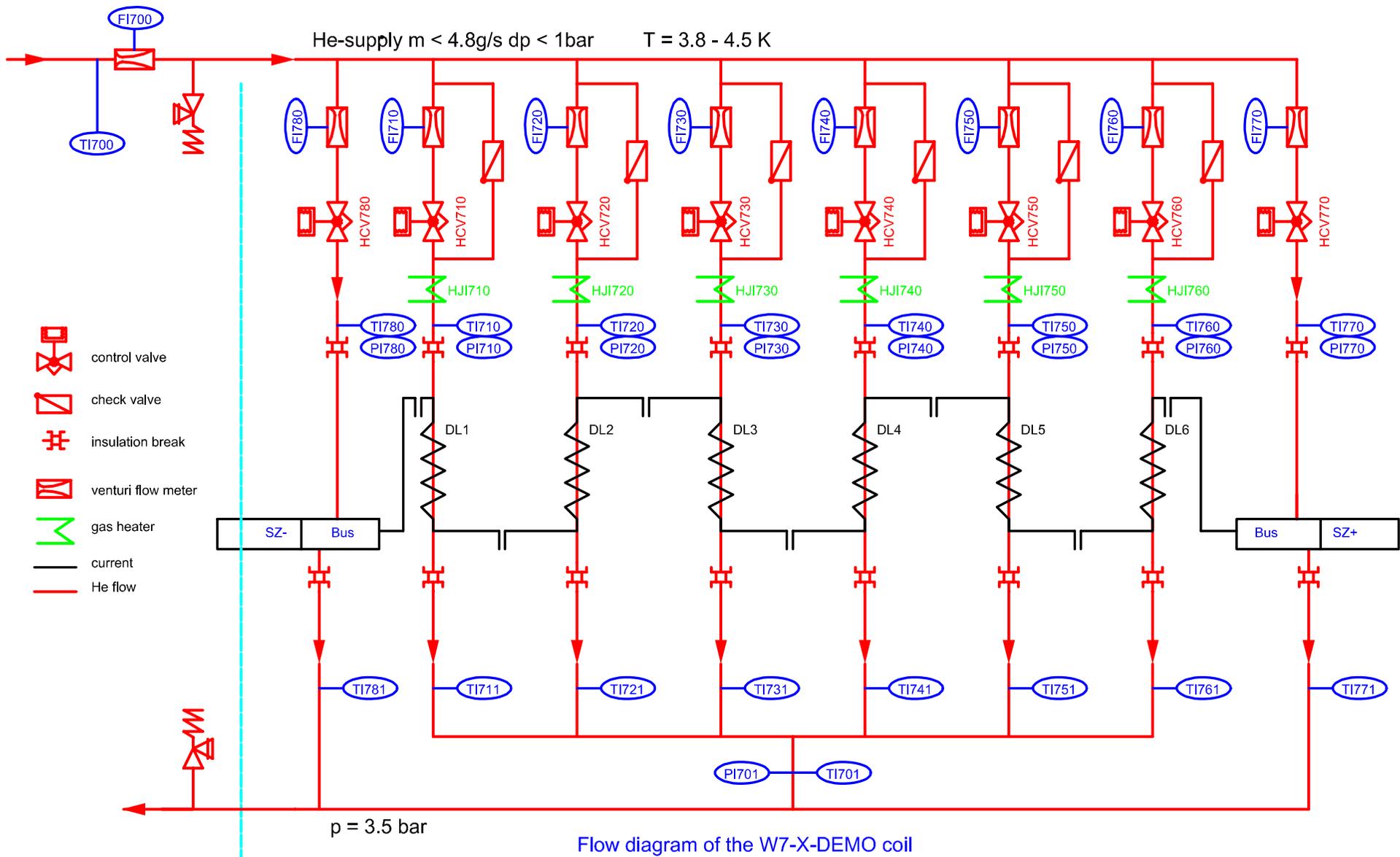


Abb. 2.2-1 Khlschema der Wicklung der W 7-X DEMO Spule

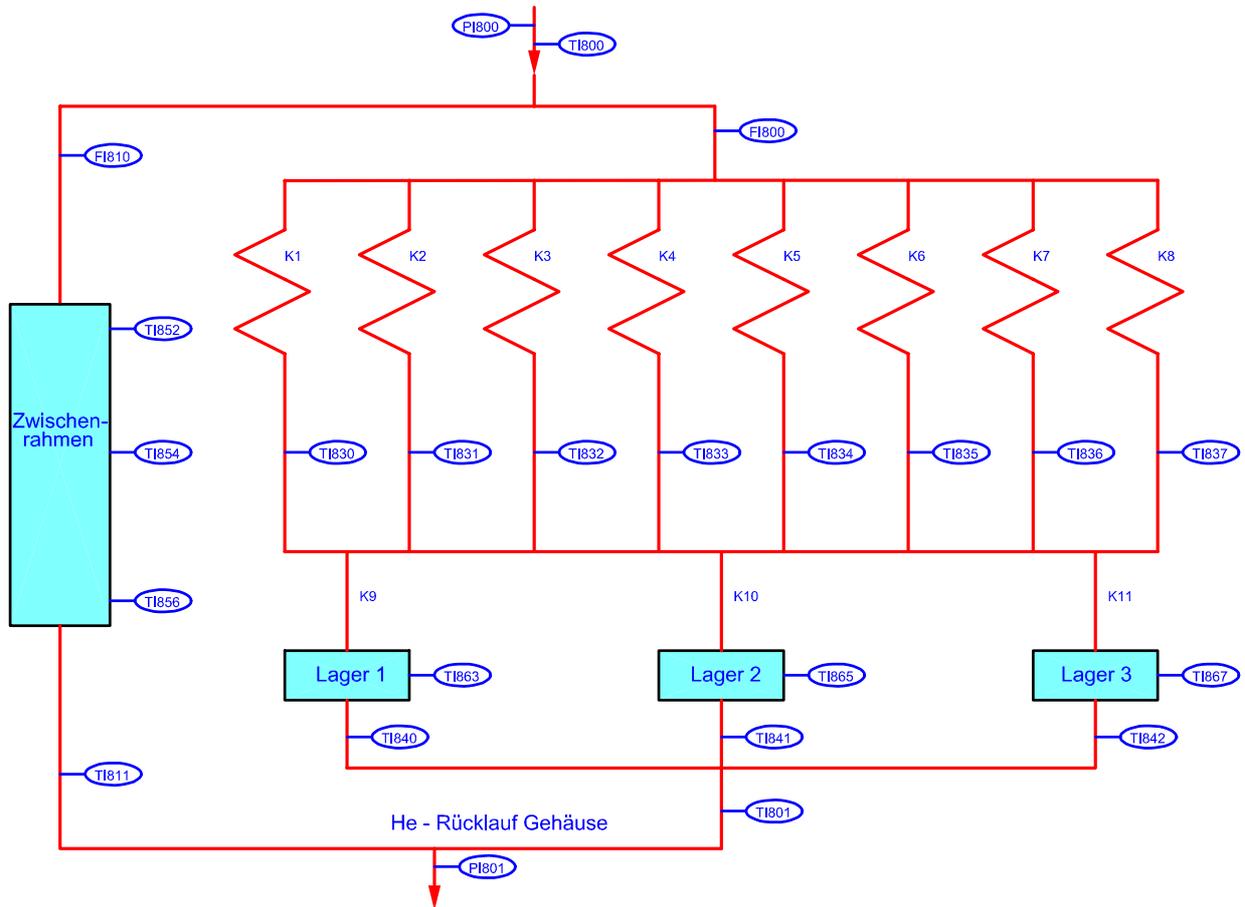


Abb. 2.2-2 Kühlschema von Gehäuse, Lagern und Zwischenrahmen

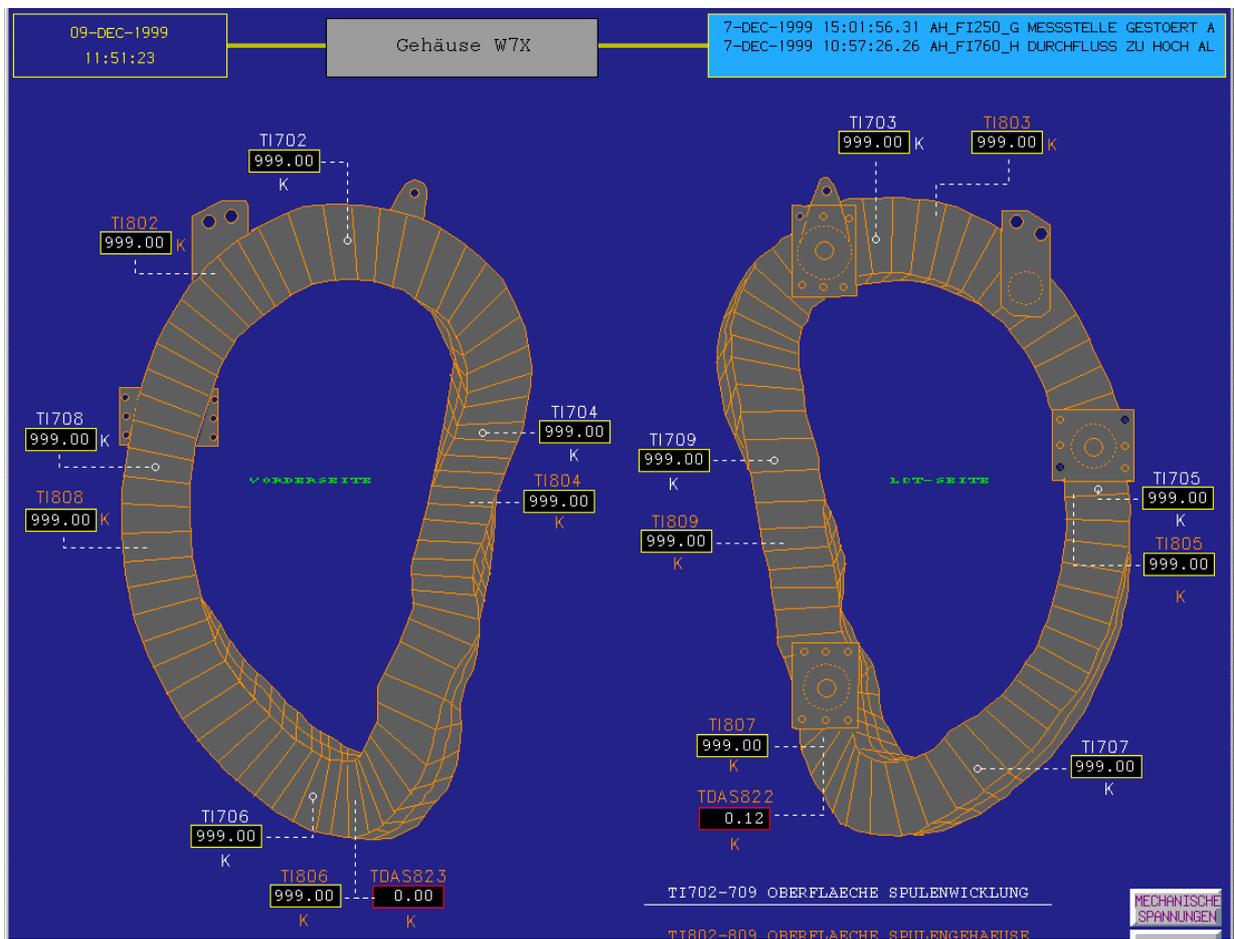


Abb. 2.2-3 Lage der Meßfühler am Gehäuse

Für Massenströme und Kälteleistungen gelten folgende Bezeichnungen:

Massenstrom Wicklung und SLS	MFI700 *
Massenströme Doppellage 1-6	MFI710-760
Massenströme SLS	MFI770-780
Massenströme Gehäuse	MFI800
Massenströme Lager	MFI810
Kälteleistung Wicklung und SLS	QMFI700*
Kälteleistung Doppellage 1-6	QMFI710-760
Kälteleistung SLS	QMFI770-780
Kälteleistung Gehäuse	QMFI800
Kälteleistung Lager	QMFI810

- Diese Daten sind für die Auswertung der Wicklung nur bedingt verwertbar da der Fehler durch den hohen Massenstrom in den Bussen und die notwendige Differenzbildung zu hoch ist

2.2.1 Füllen des Kontrollkryostaten B250 und Umstellung auf Pumpenbetrieb

Am Ende der Abkühlung der beiden Spulen wurde parallel hierzu der Kontrollkryostat B250 abgekühlt, mit LHe gefüllt und anschließend auf Spulenkühlung mit He-Pumpen umgestellt, wie aus folgender Abb. 2.2.1-1 ersichtlich ist. Für die Umstellung auf Pumpenbetrieb wurde die Transferleitung von B250 zum Vakuumbehälter B300 langsam kaltgefahren, anschließend die Kühlung direkt von der Kälteanlage gestoppt und mit der Kühlung über den Pumpenkreis begonnen. Dies führt natürlich zu einigen Instabilitäten, wie aus dem Diagramm ersichtlich ist. Außerdem wurde in dieser Zeit die Lecksuche bei ca. 5 K durchgeführt.

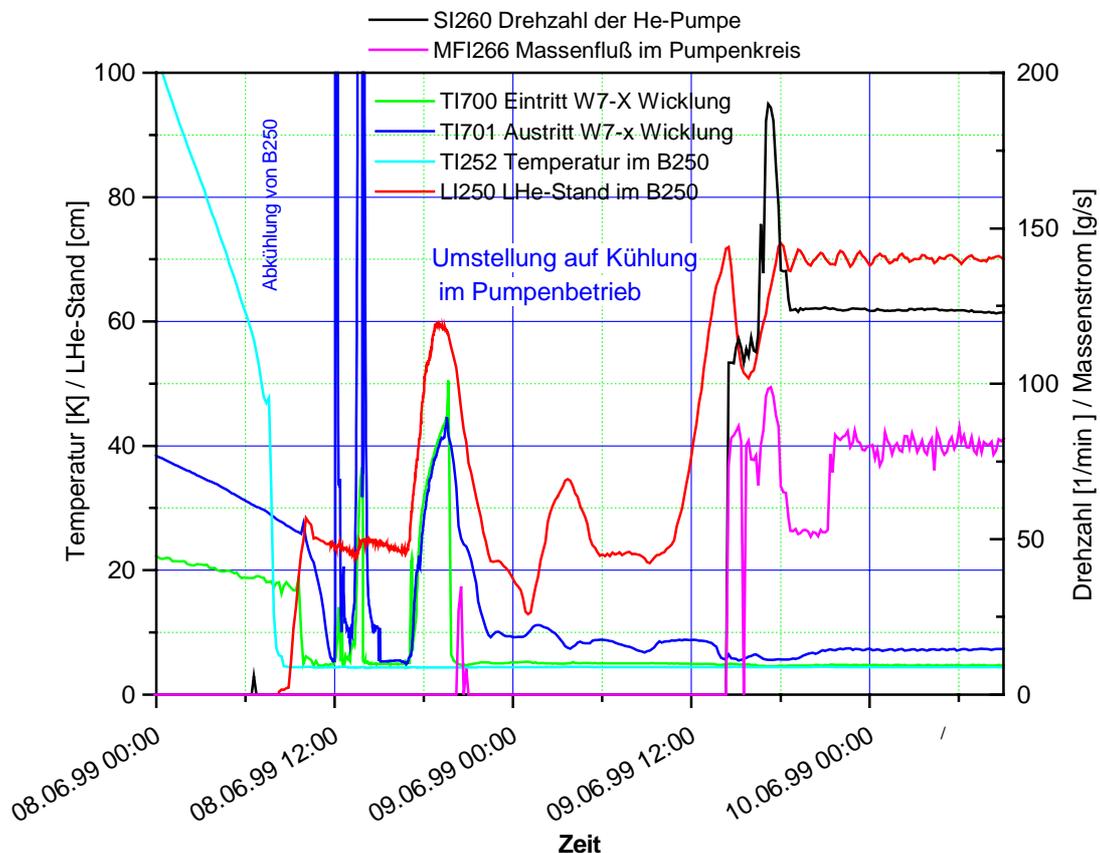


Abb. 2.2.1-1 Abkühlen und Füllen von B250 sowie Umstellung auf Pumpenbetrieb

2.2.2 Betrieb der W 7-X DEMO Spule ohne LCT-Spule (Lastfall A)

2.2.2.1 Betrieb der W 7-X DEMO Spule bei 4,5 K

Nach der Umstellung erfolgte die Vorbereitung für den Strombetrieb der W 7-X DEMO Spule. Die dabei gefahrenen Massenströme und notwendigen Kühlleistungen sind den nachfolgenden Diagrammen zu entnehmen. Die LCT-Spule wurde natürlich mit gekühlt aber nicht mit Strom betrieben. Sie war über den Entladewiderstand kurzgeschlossen.

Störung der Massenstrommessung der W 7-X DEMO Spule durch offene Rückschlagventile

Bei der Doppellage (DL) 6 war das Rückschlagventil (RV) parallel zum Venturi während der gesamten Testreihe teilweise offen, bei anderen DL's in bestimmten Zeitabschnitten, wodurch die Massenstrommessung durch diese Doppellagen verfälscht wurde. Bei den Durchfluß- und Venturivortests in TOSKA mit geschlossenen RV's ergab sich folgendes Verhältnis der Massenströme durch die einzelnen DL zu DL2 (DL2 oder DL4 als Referenz weil dieses RV immer geschlossen war):

$$DL1 = DL2 \times 1,06$$

$$DL5 = DL2 \times 1,065$$

$$DL3 = DL2 \times 1,0$$

$$DL6 = DL2 \times 0,8$$

$$DL4 = DL2 \times 1,0$$

Da man mit guter Näherung annehmen kann, daß sich dieses Verhältnis nicht ändert wurden alle Massenströme für die nachfolgende Auswertung entsprechend korrigiert und diese Meßstellen in den Diagrammen mit "K" gekennzeichnet (z. B. MFI760K).

Auch bei den weiteren Auswertungen der Kühlleistung wurden diese gemäß folgender Gleichung korrigiert. Diese Werte sind ebenfalls mit einem K hinter der Meßstellennummer gekennzeichnet (z. B. QMFI760K).

$$QMFI760K = (QMFI760 / MFI760) * MFI720 * 0,8$$

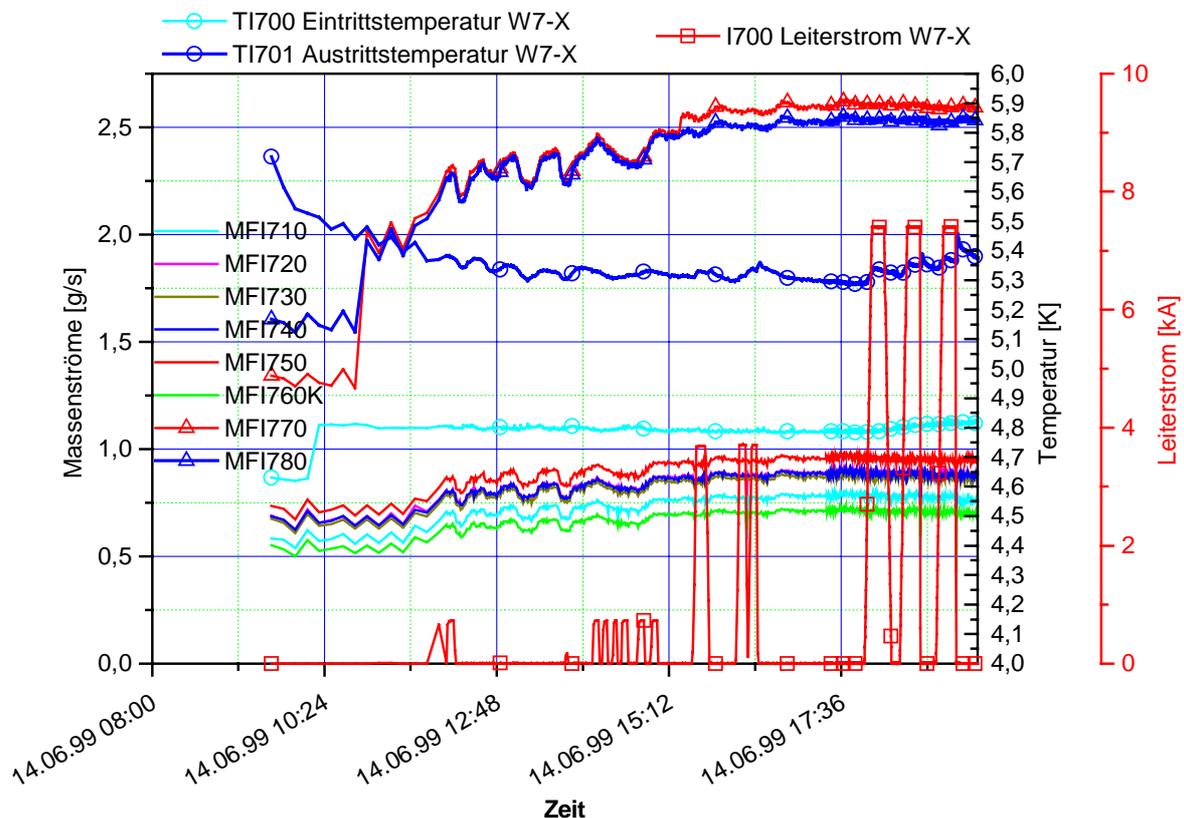


Abb. 2.2.2.1-1 Massenströme bei der Inbetriebnahme der W 7-X DEMO Spule

Die relativ hohen Massenströme durch die SLS waren notwendig, um den Kontakt zwischen Spule und Stromzuführung ausreichend zu kühlen. Der Grund des erhöhten Wärmeeinfalltes am Kontakt (Abb. 2.2.2.1-2) auch ohne Strom konnte weder während des Tests noch bei der Demontage vollständig geklärt werden.

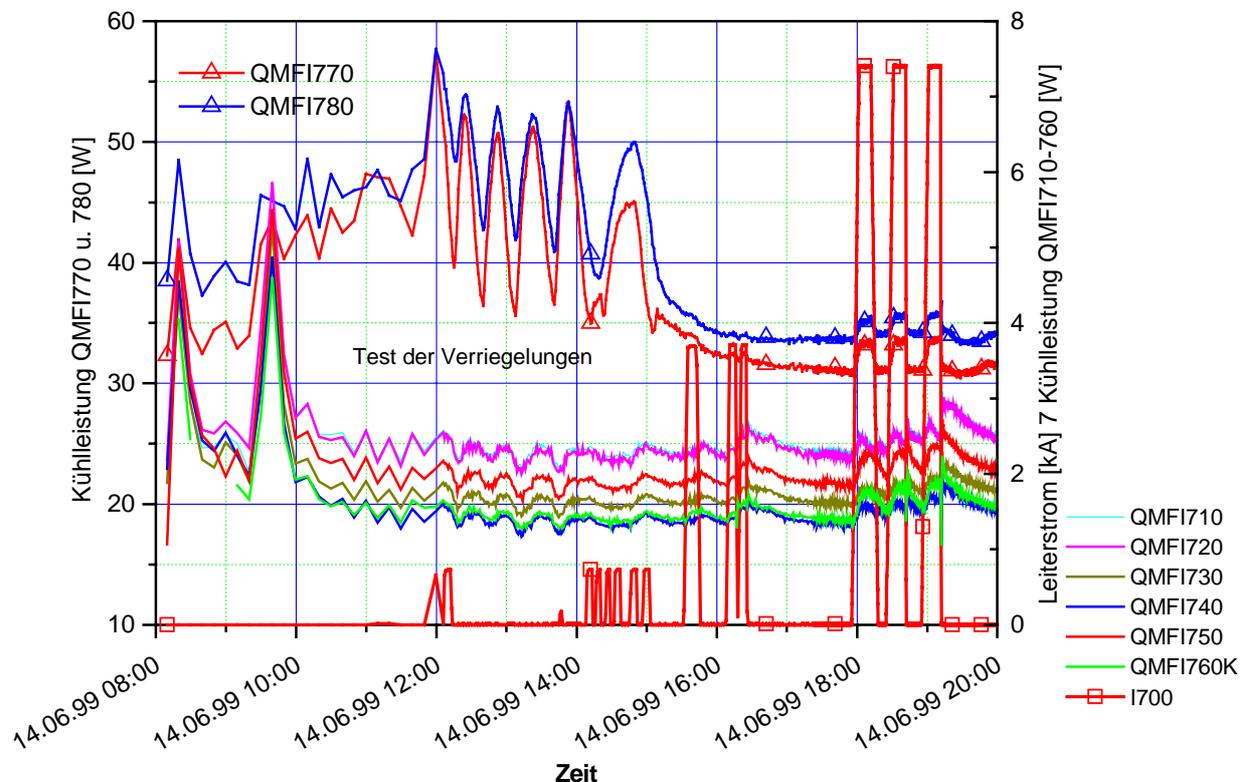


Abb. 2.2.2.1-2 Kühlleistungen bei der Inbetriebnahme der W 7-X DEMO Spule

Nach diesen vorbereitenden Arbeiten und dem Kennenlernen der Anlage sowie entsprechenden Verbesserungen an der Strommessung des 30 kA Netzgerätes wurde der Strom in der W 7-X Spule schrittweise erhöht und bei jedem dieser Schritte Wechselrichter- und Schnellentladungen durchgeführt. Der höchste bei dieser Betriebsweise (4,5 K) erreichte Strom lag bei 18,75 kA. Für diesen Test sind nachfolgend die wichtigsten Kühldaten anhand von Diagrammen zusammengestellt.

- Abbildung 2.2.2.1-3 gibt eine Übersicht vom Beginn des Strombetriebes bis zum Quench Nr 2.
- In der folgenden Abbildung 2.2.2.1-4 sind die Ein- und Austrittstemperaturen aller Doppellagen dargestellt. Der stärkere Temperaturanstieg in den Doppellagen 5 und 6 ist auf den höheren elektrischen Widerstand der Leiterverbindung zwischen diesen Doppellagen zurückzuführen.
- Der Temperaturanstieg in der Verteilerzone (TI700 zu TI710-780) wird später unter 2.2.5.4 näher untersucht.
- Die Massenströme durch die einzelnen Doppellagen sind in Abb. 2.2.2.1-5 ersichtlich, wobei die relativ hohen Werte in den Doppellagen 2,3,4,5 durch den scheinbar hohen Druckabfall in Doppellage 6 bedingt waren. Um in Doppellage 6 einen angezeigten Massenstrom von 0,5 g/s zu erreichen war ein ΔP von 3,4 bar erforderlich, was zu einem Massenstrom von ca. 1,7 g/s in den anderen Doppellagen führte. Wie sich bei der Auswertung herausstellte, war auch das Rückschlagventil der DL6 teilweise offen, wodurch sich der geringe angezeigte

Massenstrom erklären läßt. In dieses Diagramm sind für DL6 beide Werte (MFI760 und MFI760K) eingetragen, bei den weiteren Diagrammen nur die korrigierten Werte.

- Eine weitere Abbildung zeigt die benötigte Kälteleistung der einzelnen Doppellagen und der SLS während des Strombetriebs. Auffällig ist hier wieder der starke Anstieg der Kühlleistung in Doppellage 5.
- In Abb. 2.2.2.1-7 ist die Massenstromverteilung von Wicklung, Gehäuse und Stützstruktur der W 7-X Spule sowie die Ein- und Austrittstemperaturen dargestellt. Aus den tieferen Austrittstemperaturen und zum Teil hohen Gehäuse-temperaturen ist ersichtlich, daß die Kühlleistung des Heliums wegen zu geringer Austauschflächen und schlechter Wärmeleitung im Gehäuse nicht genutzt werden konnte. Auch durch eine Erhöhung des He-Massenstromes konnten diese Temperaturen von Wicklungsoberfläche (Abb. 2.2.2.1-8 TI702) und Gehäuse (Abb. 2.2.2.1-9 TI802, TI806) nicht gesenkt werden.
- Die wichtigsten Kühldaten aller Betriebsweisen sind in Tabelle 1 zusammengefaßt

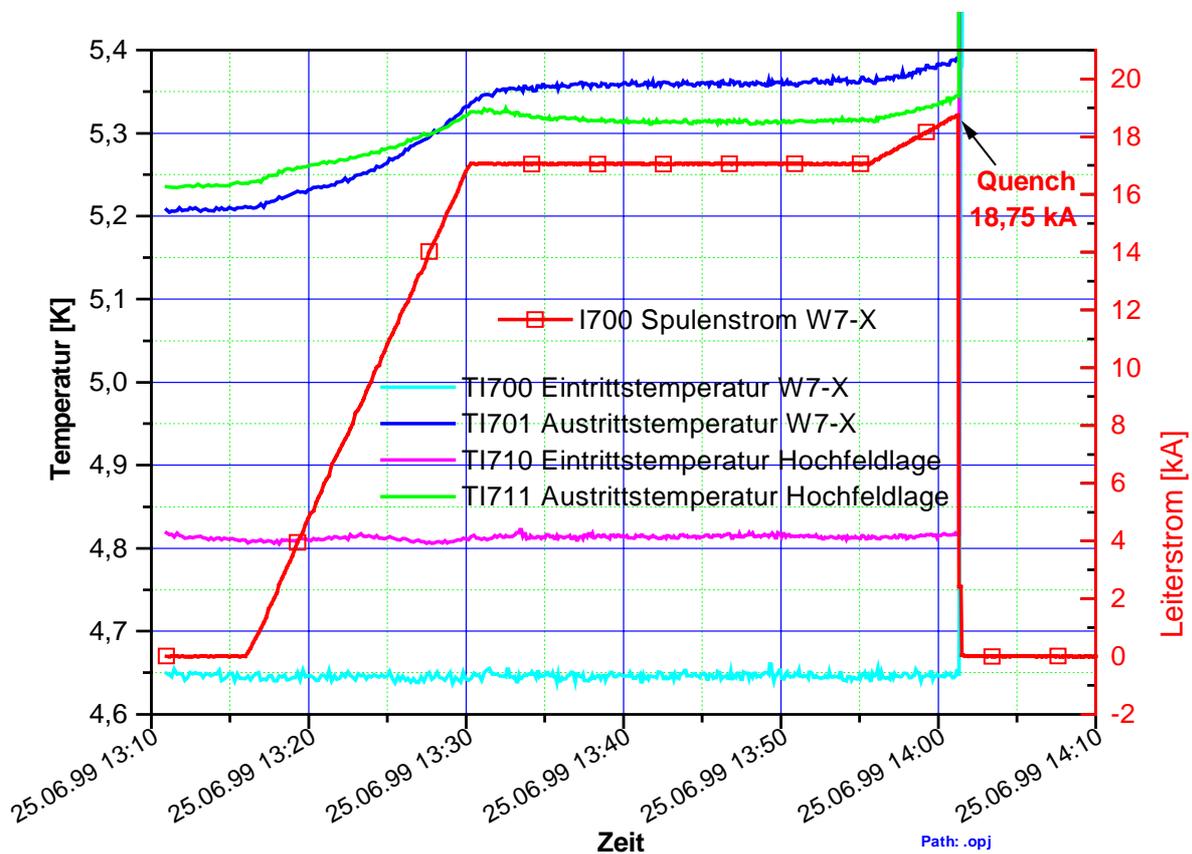


Abb. 2.2.2.1-3 Maximaler Quenchstrom bei 4,5 K Betrieb mit Ein- und Austrittstemperaturen

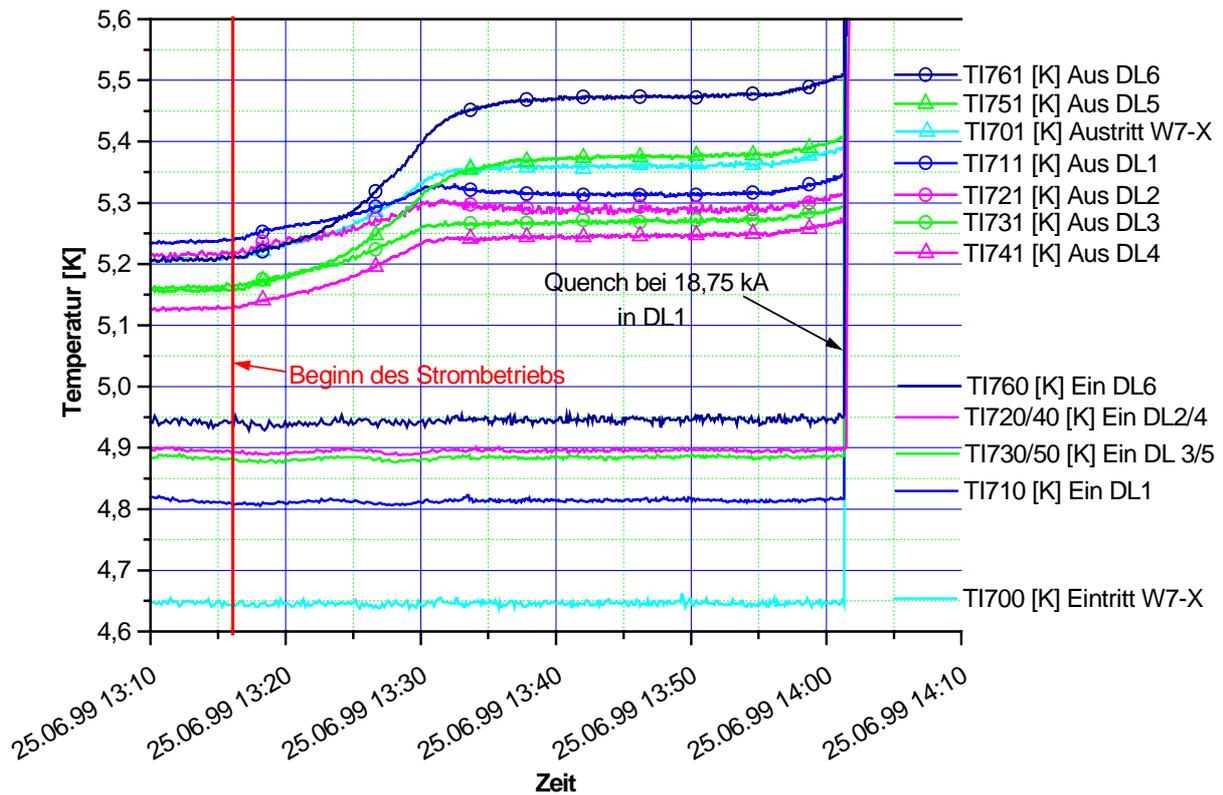


Abb. 2.2.2.1-4 Ein- und Austrittstemperaturen der einzelnen Doppellagen bei 4,2 K Betrieb

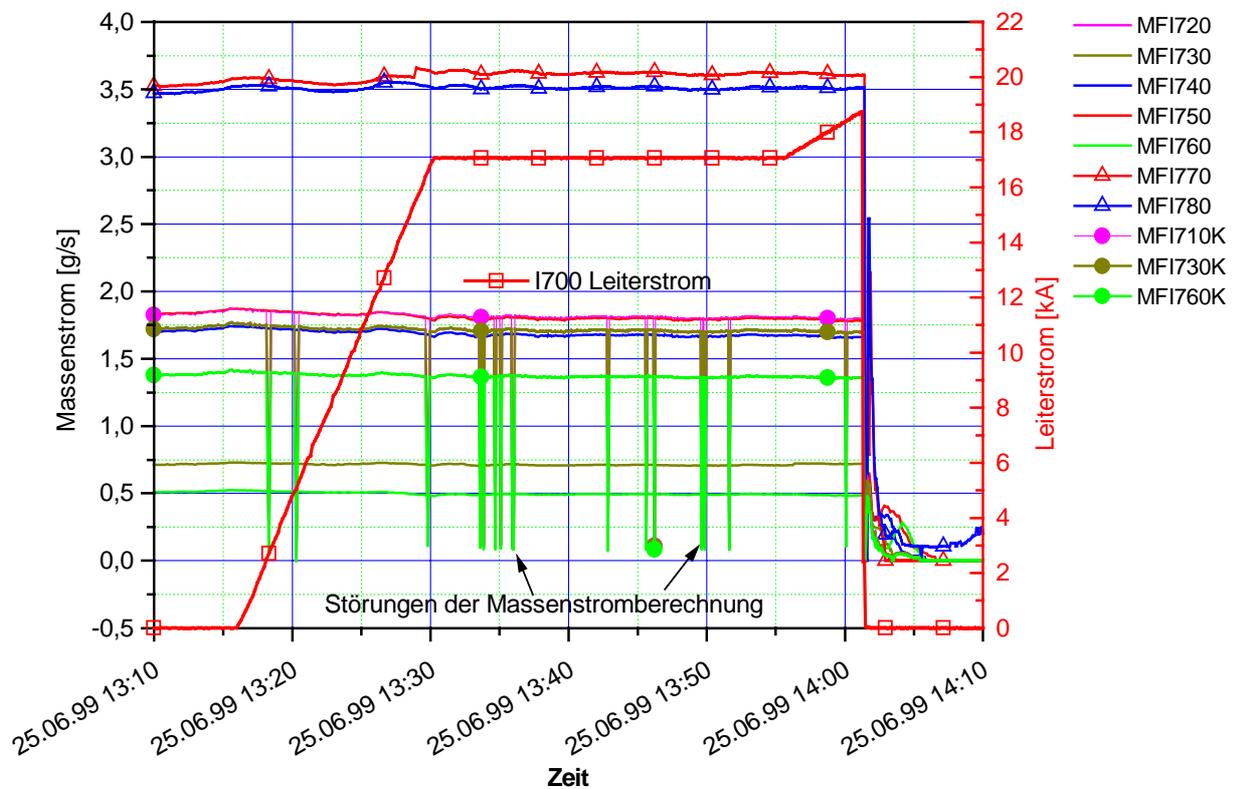


Abb. 2.2.2.1-5 Massenströme durch die Doppellagen und die SLS bei Strombetrieb

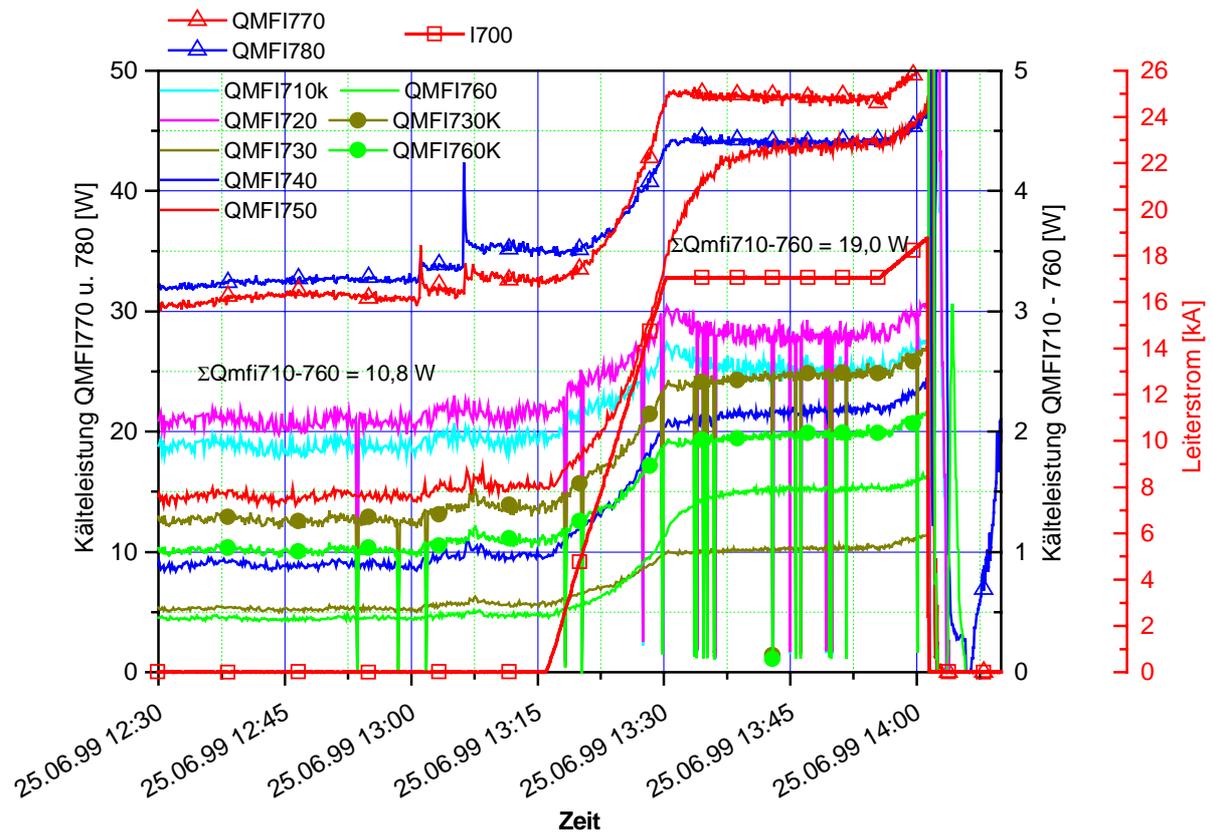


Abb. 2.2.2.1-6 Kühlleistungen der Doppellagen beim Strombetrieb

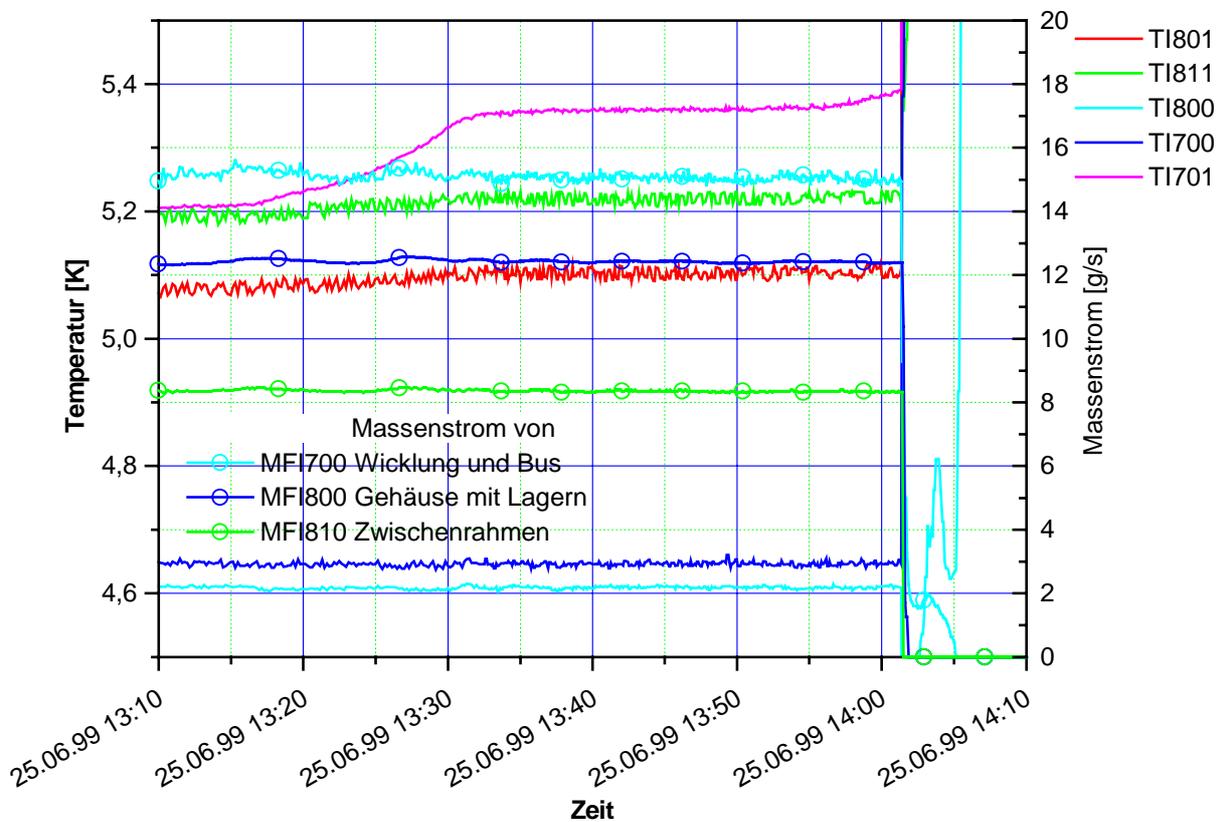


Abb. 2.2.2.1-7 Temperatur- und Massenstromverteilung im Kühlkreis von Wicklung, Gehäuse mit Lagern und Zwischenrahmen

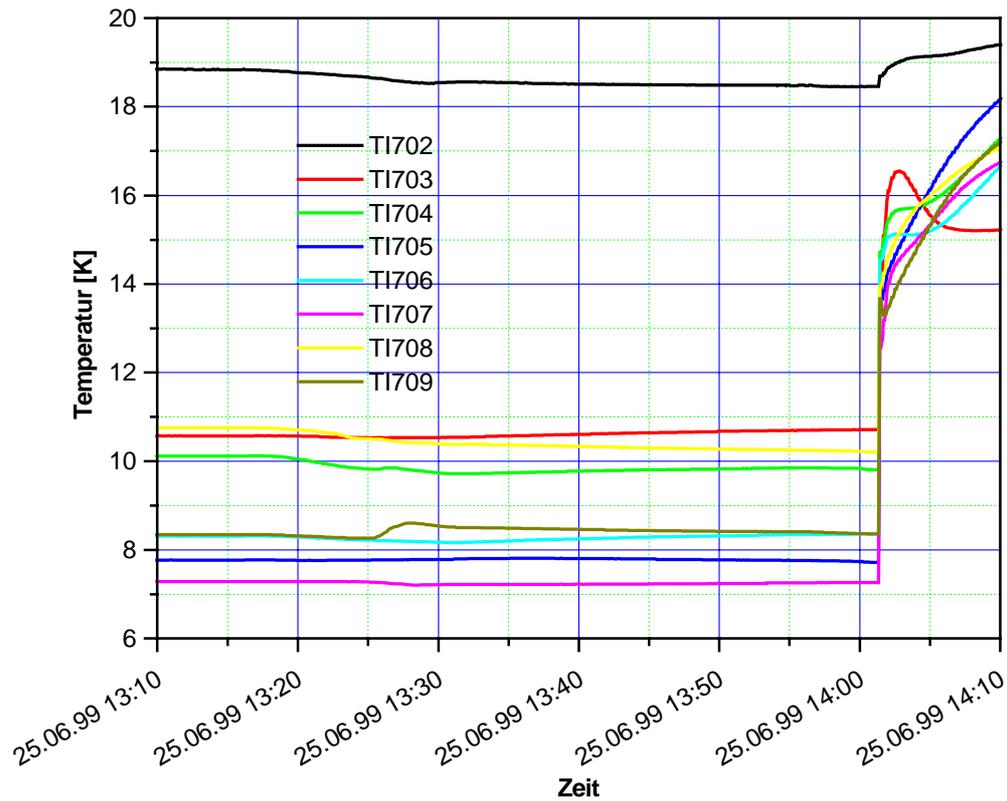


Abb. 2.2.2.1-8 Temperaturverteilung an der W 7-X Wicklungsoberfläche (Positionen siehe Abb. 2.2-3)

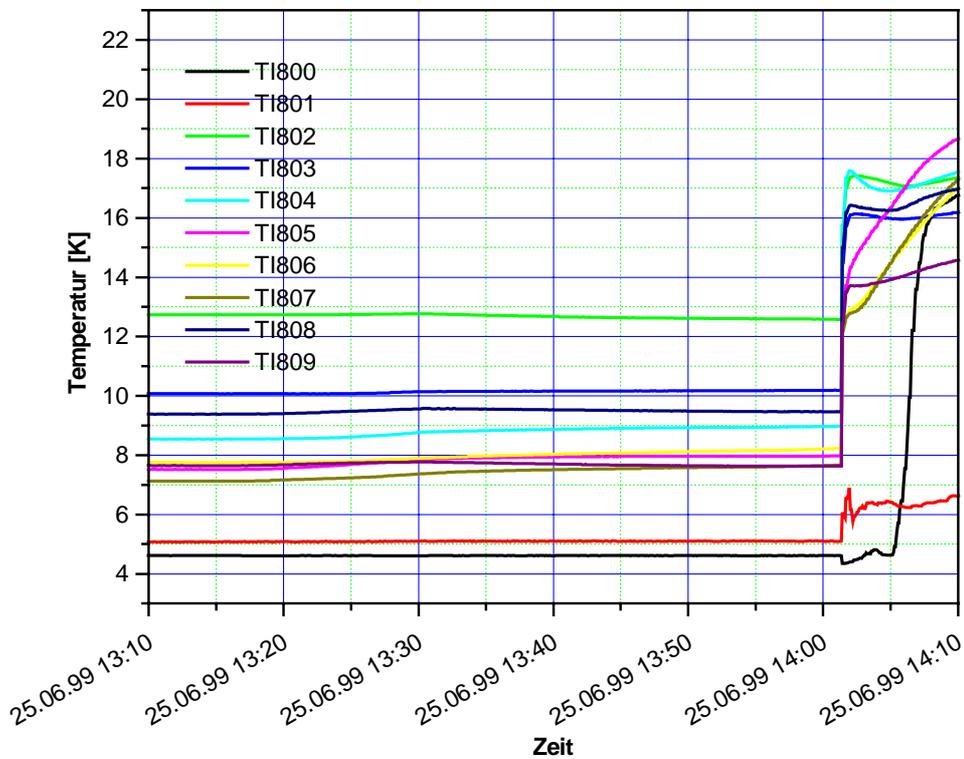


Abb. 2.2.2.1-9 Temperaturverteilung an der W 7-X Gehäuseoberfläche (Positionen siehe Abb. 2.2-3)

Während der Wochenenden und des Nachtbetriebs wurden alle Komponenten direkt von der Kälteanlage ohne Pumpenbetrieb gekühlt. Der He-Massenstrom mußte hierzu entsprechend reduziert werden, es war aber trotzdem ein stabiler Kalthaltebetrieb möglich, wie nachfolgende Abb. 2.2.2.1-10 zeigt.

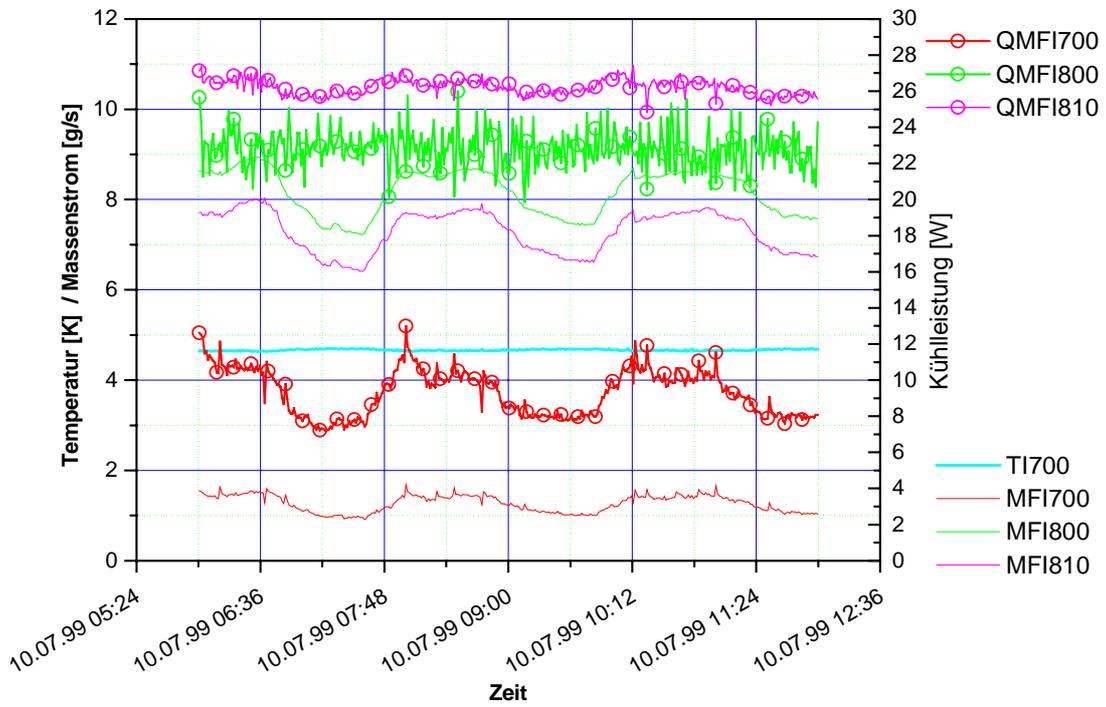


Abb. 2.2.2.1-10 Massenstrom, Temperatur und Kühlleistung beim Wochenendbetrieb

2.2.2.2 Betrieb der W 7-X DEMO Spule bei 3,8 K (Lastfall A)

Die Absenkung der Temperatur wird durch die Inbetriebnahme des Pumpstandes V1 der Kälteanlage erreicht, welcher den Druck im Kontrolldewar B250 auf 0,5 bar absenkt und somit auch die Verdampfungstemperatur in diesem Behälter. Der Druck im Pumpenkreis bleibt über dem kritischen Druck von 2,2 bar, um eine Zweiphasenströmung zu vermeiden. In Abb. 2.2.2.2-1 ist die Umstellung vom 4,4 K auf den 3,8 K Betrieb dargestellt. Wie aus diesem Diagramm ersichtlich, traten nach der Umstellung Schwingungen im Massenstrom des Pumpenkreises auf, welche aber durch Änderung der Betriebsparameter der Druckregelung beseitigt wurden. Danach war ein stabiler Betrieb sowohl mit Pumpen wie auch während der Nacht ohne Pumpen möglich.

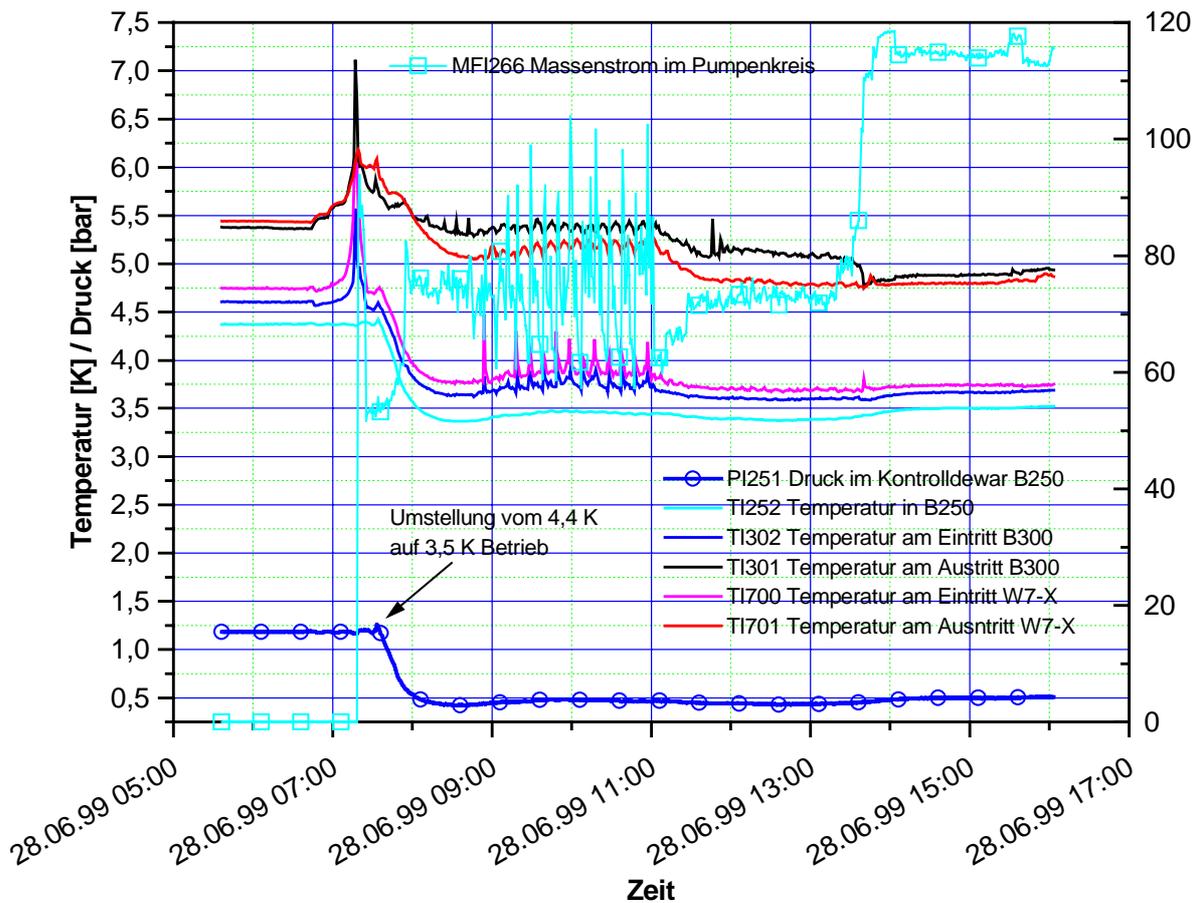


Abb. 2.2.2.2-1 Umstellung auf 3,8 K Betrieb

In der nächsten Abbildung (Abb. 2.2.2.2-2) sind wieder Massenströme, Ein- und Austrittstemperaturen während der Vorbereitung und des Strombetriebes dargestellt. Die Massenströme durch die einzelnen Doppellagen wurden auf ca. 1 g/s erhöht, die Massenströme durch die SLS mußten bis auf 4 g/s erhöht werden um die Kontaktzonen ausreichend zu kühlen.

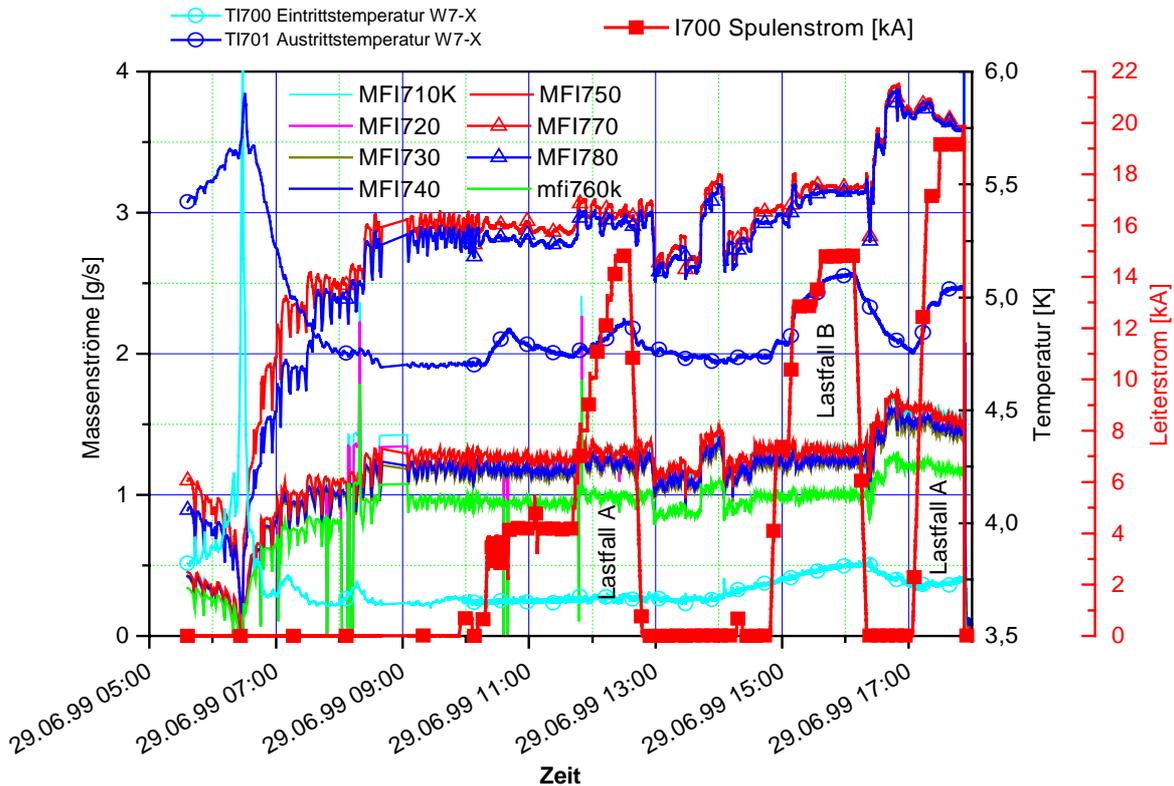


Abb. 2.2.2.2-2 Massenströme der W 7-X DEMO Spule beim 3,8 K Betrieb im Lastfall A und B

Der maximale Leiterstrom in der W 7-X DEMO Spule wurde im Lastfall A mit 19,88 kA am 29.6.99 erreicht, die kryotechnischen Parameter während dieses Tests sind in den folgenden Diagrammen dargestellt und unten kurz erklärt:

- Das Diagramm 2.2.2.2-3 zeigt den maximal mit der W 7-X DEMO Spule erreichten Strom von 19,88 kA. Bei diesem Strom wurde sie durch einen Quench in der DL1 automatisch entladen. Wie später in Abschnitt 3.1 gezeigt wird, waren wir bei diesem Quench schon sehr nahe (0,1 K) am Kurzprobenwert. In dieses Diagramm sind sowohl die Ein- und Austrittstemperaturen der gesamten Wicklung als auch die der Hochfeldlage eingetragen. Vergleicht man diese mit den in Abb. 2.2.2.1-3 dargestellten Werten beim 4,5 K- Betrieb, so fällt auf, daß die Temperaturerhöhung sowohl in der Wicklung als auch in der Hochfeldlage wesentlich höher ist (0,91 K beim 3,8 K gegenüber nur 0,5 K beim 4,5 K- Betrieb). Zum Vergleich sind diese Daten mit in das Diagramm eingetragen.
- Eine Erklärung findet sich in der nächsten Abb. 2.2.2.2-4. In diesem PH-Diagramm sind sowohl die isenthalpe Entspannung bei 4,5 K (rot) als auch die bei 3,5 K (blau) eingetragen. Wie hieraus ersichtlich, bringt eine Entspannung bei 3,5 K eine wesentlich höhere Temperaturerhöhung auch ohne Wärme oder Energiezufuhr. Zusätzlich liegen die Isothermen näher beieinander, wodurch eine Energiezufuhr eine größere Temperaturerhöhung des Heliums bewirkt. Hieraus ist das fast doppelt so hohe ΔT erklärbar. Wie später noch gezeigt wird, haben wir versucht, diesem Entspannungseffekt durch Absenkung des Massenstromes zu begegnen, aber wer verringert schon den Kühlmittelstrom, wenn er besser kühlen und der unzureichenden Gehäusekühlung begegnen will. Während des Tests mußte der Massenstrom jedoch erhöht werden, um in DL 5 und 6, mit hohem Kontaktwiderstand, die Austrittstemperatur nicht ansteigen zu lassen. Weiter ist bei der aus Platzgründen gewählten Doppellagenwicklung nicht die Eintritts- sondern die Austrittstemperatur am Ende der ersten Doppellage entscheidend für den Quench.

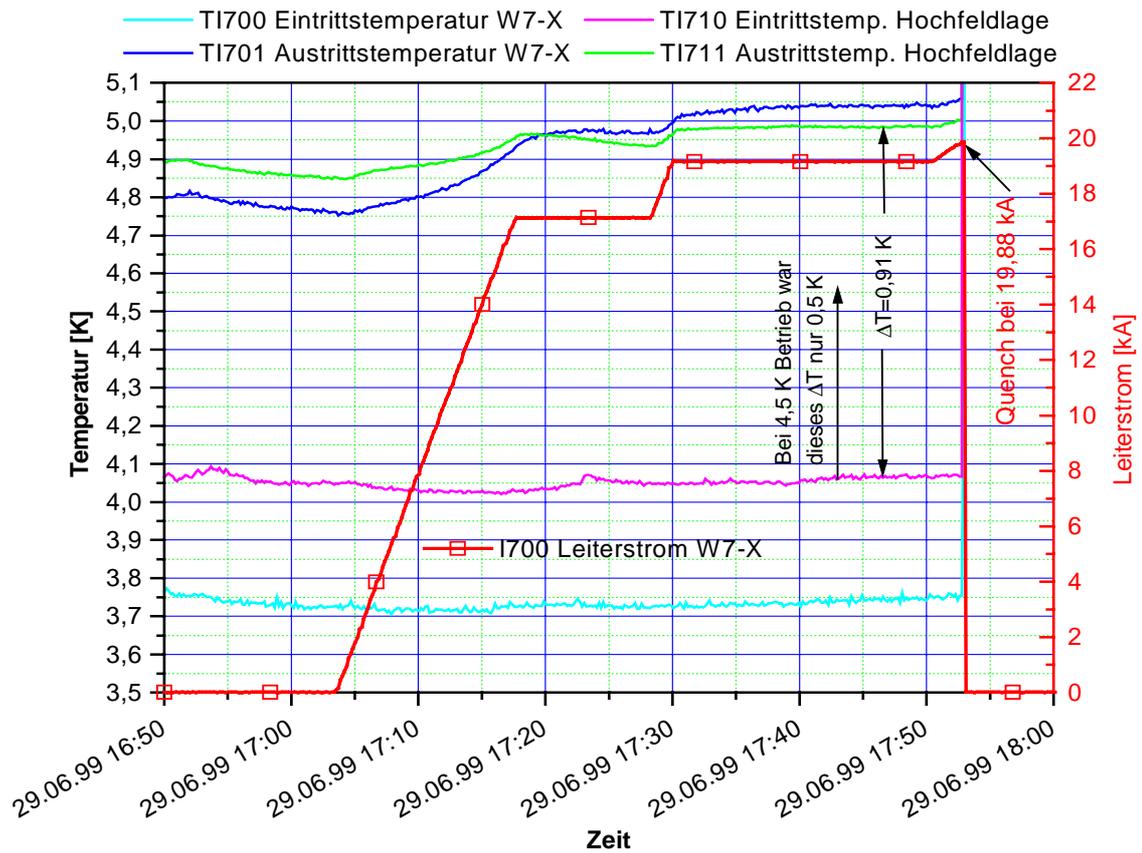


Abb. 2.2.2.2.-3 Maximaler Quenchstrom bei 3,8 K Betrieb mit Ein- und Austrittstemperaturen

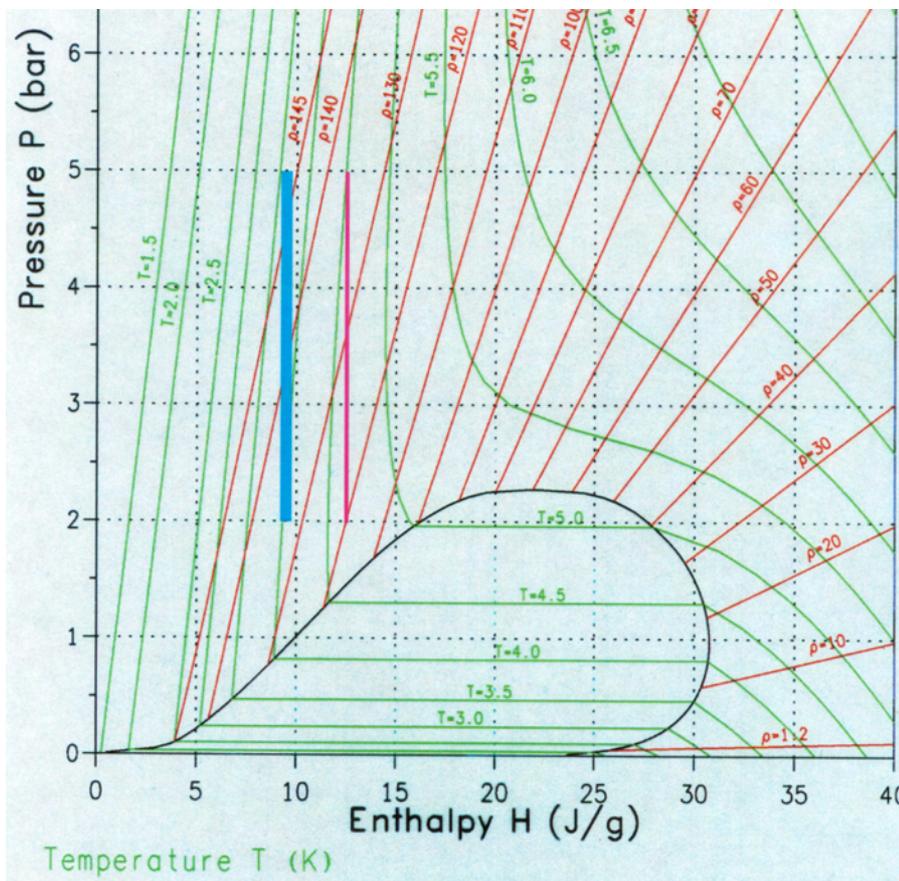


Abb. 2.2.2.2.-4 PH-Diagramm von He I mit der Entspannung von 5 auf 2 bar bei 3,5 K (blau) und 4,5 K (rot)

- Die Ein- und Austrittstemperaturen der einzelnen Doppellagen sind in Abb. 2.2.2.2-5 dargestellt. Auch hier ist natürlich wieder der höhere Temperaturanstieg gegenüber 4,5 K Betrieb zu sehen. Zusätzlich wirkt sich die höhere Wärmelast der Kontakte bei höheren Strömen aus.
- Die Massenströme durch die einzelnen Doppellagen und der SLS sind in Abb. 2.2.2.2-6 dargestellt. In diesem Diagramm sind die Massenströme von DL1 und DL6 wie unter Pkt. 2.2.2.1 beschrieben korrigiert.
- Abb. 2.2.2.2-7 zeigt die benötigten Kühlleistungen der Doppellagen und der SLS, wobei die Werte QMF1710K und QMF1760K wie oben beschrieben korrigiert wurden. Der hohe Anstieg der benötigten Kälteleistung beim Strombetrieb in DL 5 und 6 um 3,5 W deutet auf einen schlechten Kontakt mit einem Widerstand von $1,4 \times 10^{-8} \Omega$ dieser Doppellagenverbindung hin.
- Massenstrom- und Temperaturverteilung der W 7-X Komponenten Wicklung mit SLSn, Gehäuse mit Lagern und Zwischenrahmen sind in Abb. 2.2.2.2-8 gezeigt. In diesem Diagramm sind auch die Austrittstemperaturen der SLS eingezeichnet. Wie man hieraus sieht, waren die Austrittstemperaturen trotz des hohen Massenstromes mit ca. 6 K sehr hoch.

Die Oberflächentemperaturen wurden hier nicht gezeigt, da sie in etwa denen beim 4,5 K Betrieb entsprechen und erst bei der Rückkühlung nach dem Quench von Interesse sind. Wie man aus all diesen Diagrammen ersieht war ein sehr stabiler Testbetrieb bei 3,8 K möglich.

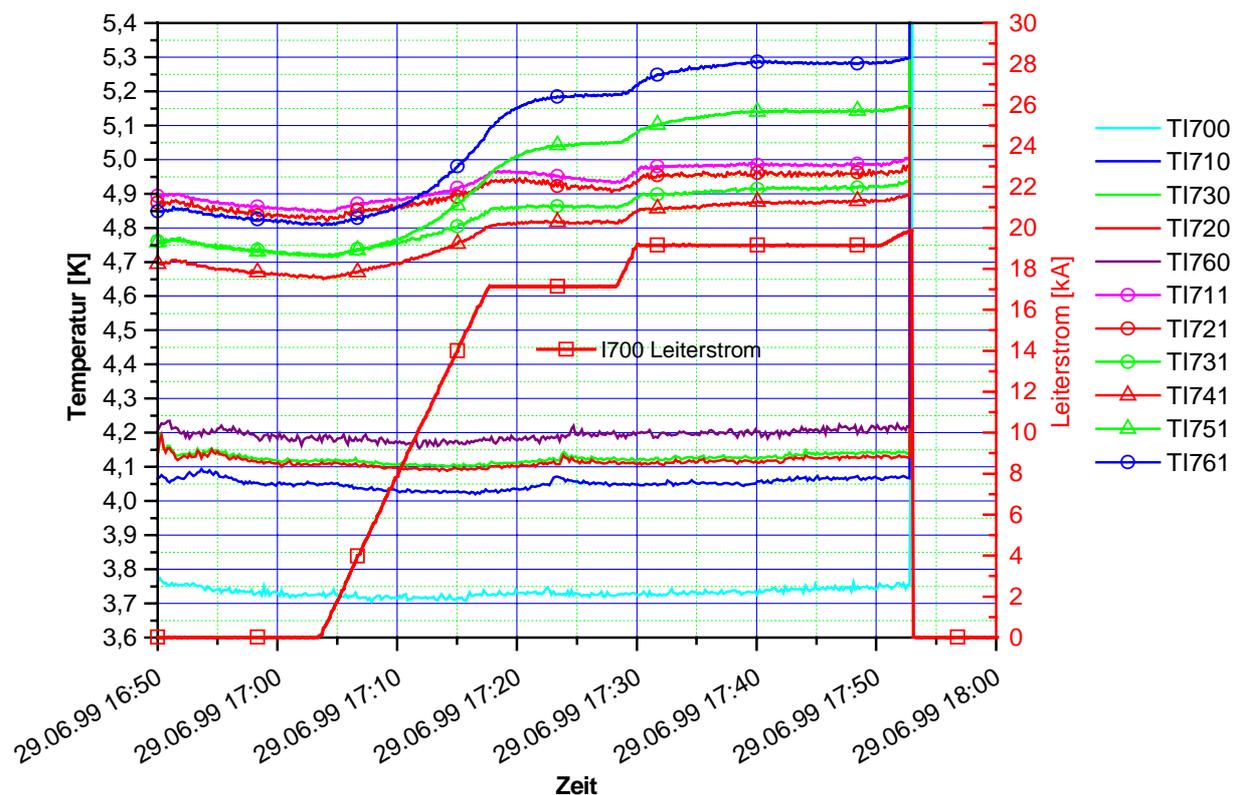


Abb. 2.2.2.2-5 Ein- und Austrittstemperaturen der Doppellagen beim 3,8 K Betrieb im Lastfall A. Die Lage der Meßfühler ist in Abb. 2.2-1 dargestellt.

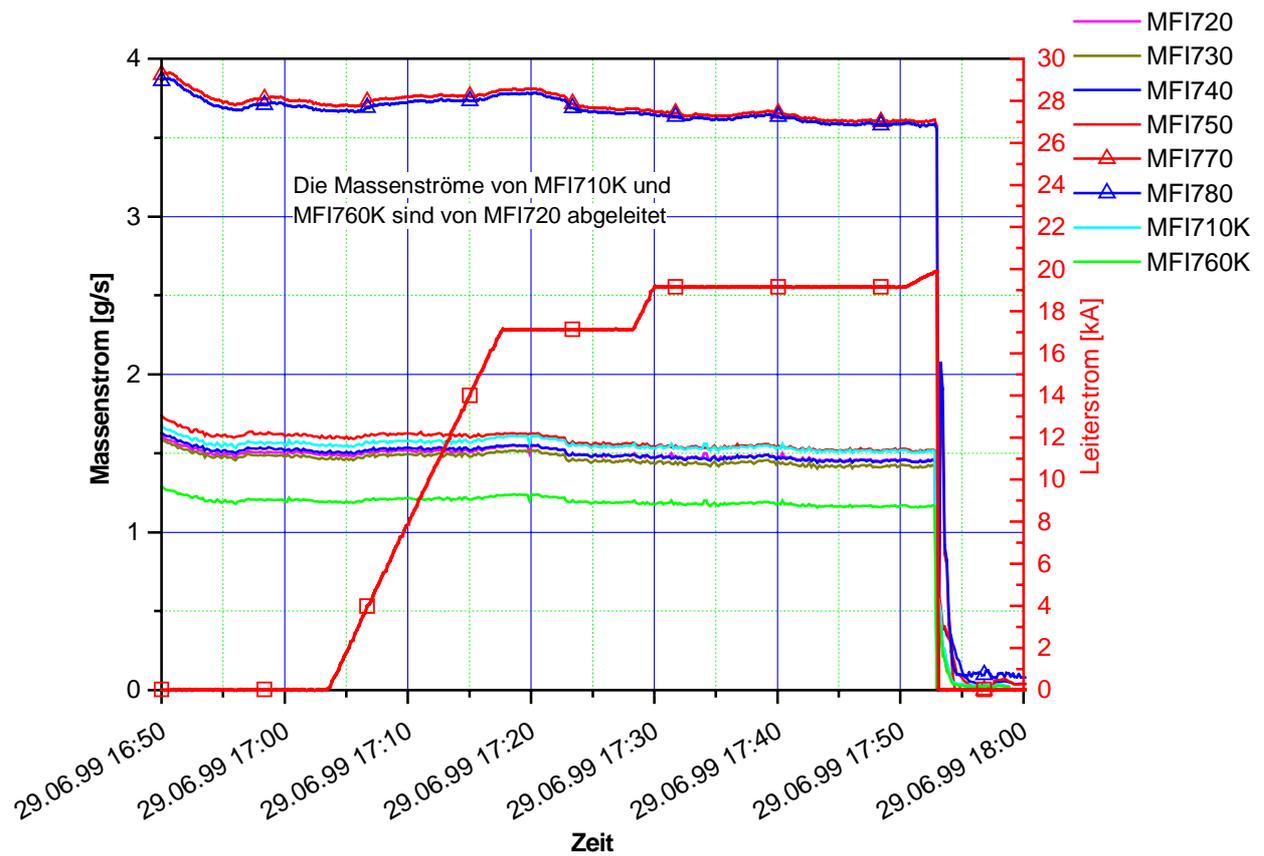


Abb. 2.2.2.2-6 Massenstromverteilung in den Doppellagen und SLS beim 3,8 K Betrieb im Lastfall A

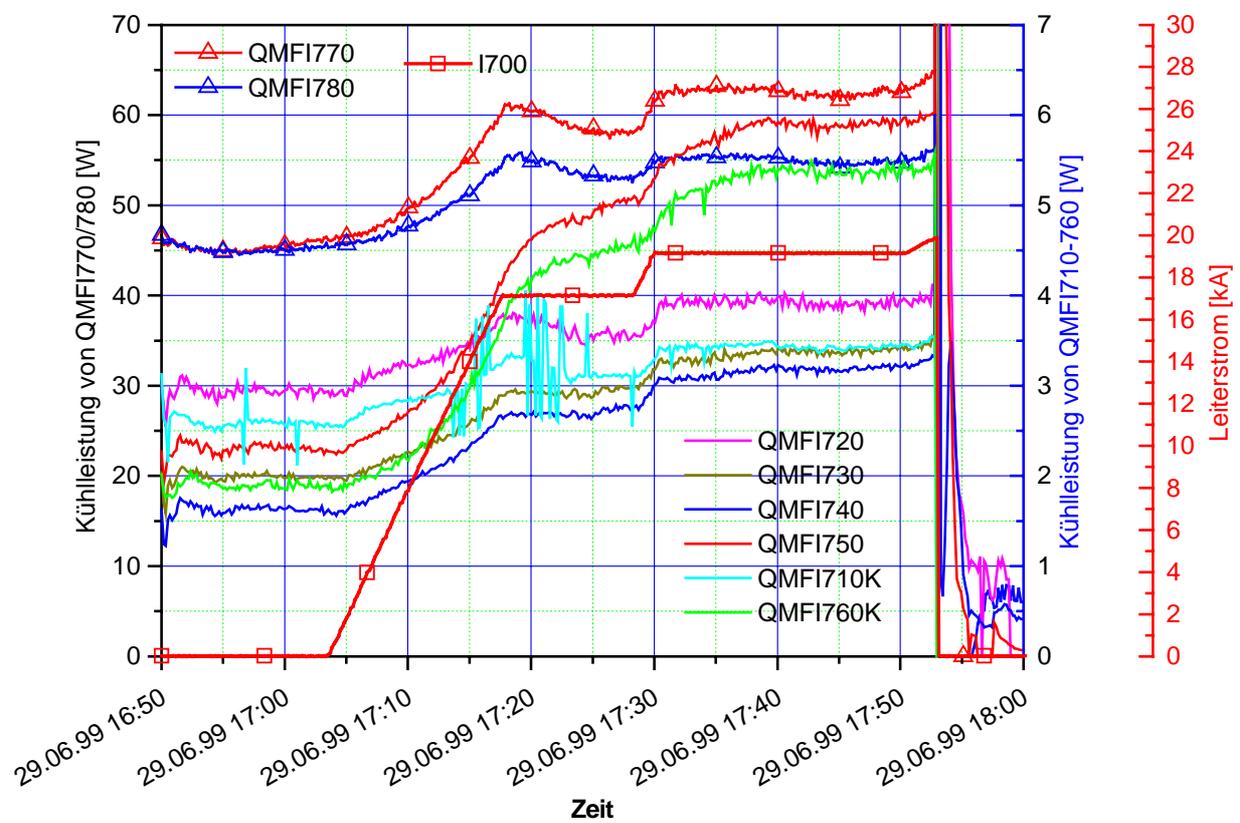


Abb. 2.2.2.2-7 Kühlleistungen beim 3,8 K Strombetrieb im Lastfall A

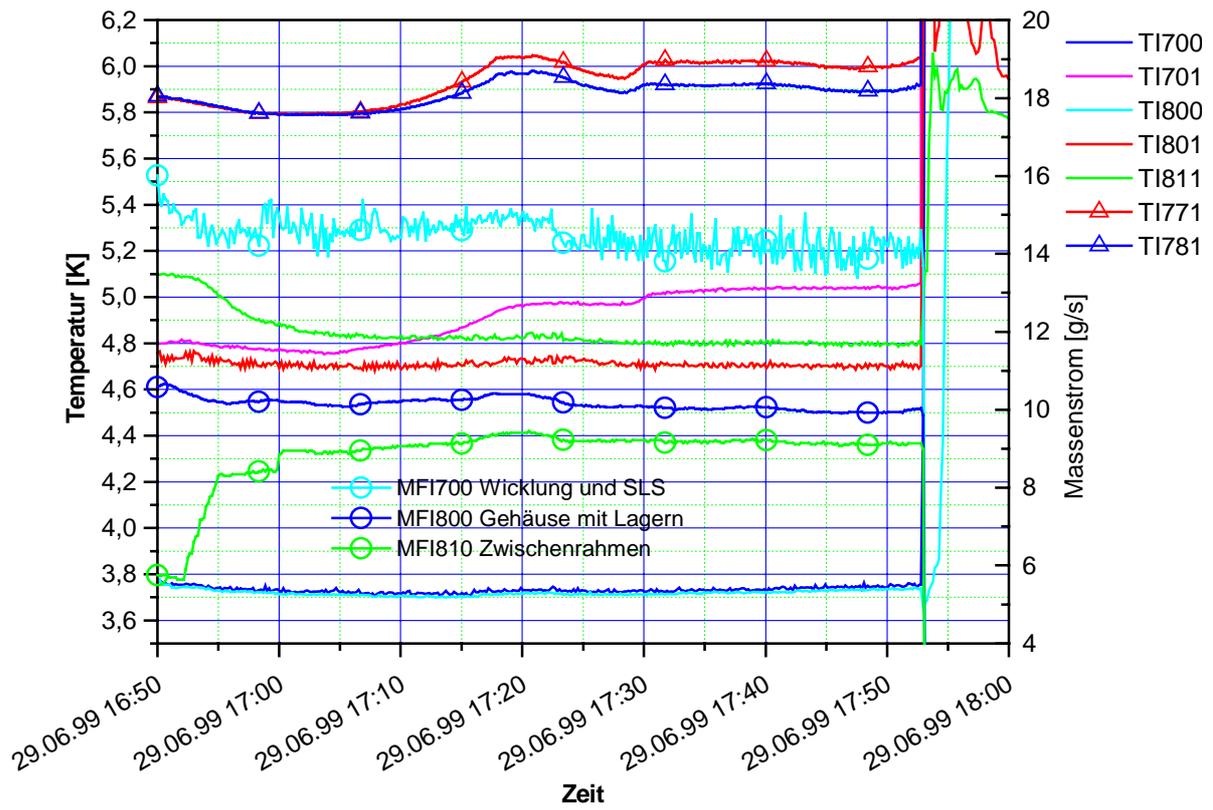


Abb. 2.2.2.2-8 Temperatur- und Massenstromverteilung in den Kühlkreisen von Wicklung mit SLS, Gehäuse mit Lagern und Zwischenrahmen

2.2.3 Betrieb der W 7-X DEMO Spule mit LCT Spule (Lastfall B und C)

Auf den Lastfall B wird nicht näher eingegangen, da er kryotechnisch immer im Lastfall C enthalten ist.

Der Lastfall C bedeutet, daß beide Spulen gemeinsam bis zum Nennstrom (LCT 14 kA, W 7-X 14,7 kA) erregt werden und anschließend der Strom in der W 7-X DEMO Spule in Stufen bis zum Quench erhöht wird, wie dies auch aus dem Diagramm Abb. 2.2.3-1 ersichtlich ist. In den nachfolgenden Diagrammen ist dieser Test detailliert dargestellt:

- Bei diesem Test wurde versucht, die Austrittstemperatur durch Verringerung des He- Massenstromes und damit der Druckdifferenz möglichst niedrig zu halten. Dies gelang auch in Grenzen; die Austrittstemperatur in der Hochfeldlage DL1 war 0,1 K tiefer als bei früheren Tests (vergleiche mit Abb. 2.2.2.2-3).
- Zusätzlich wurde der Druck insgesamt möglichst tief (PI701 von 3,5 bar auf 2,5 bar) abgesenkt, um den größeren Abstand der Isothermen in diesem Bereich zu nutzen.
- Eine weitere Verringerung des Massenstromes war nicht möglich, weil sonst die Austrittstemperatur aus DL6 zu stark angestiegen wäre und dann die Gefahr eines Quenches in DL6 bestanden hätte, wie aus der nächsten Abb. 2.2.3-2 ersichtlich ist. Der Anstieg der Vorlauftemperatur während des Tests ist zum Teil durch erhöhte Restgaswärmeleitung aber auch durch die erhöhte Kühlleistung und damit verbundenem Druckanstieg in B250 zurückzuführen.
- Wie aus Abb. 2.2.3-3 ersichtlich, wurde während des Versuches der Massenstrom durch die DL's schrittweise erhöht, um den Temperaturanstieg am Austritt von DL5 und DL6 zu begrenzen.

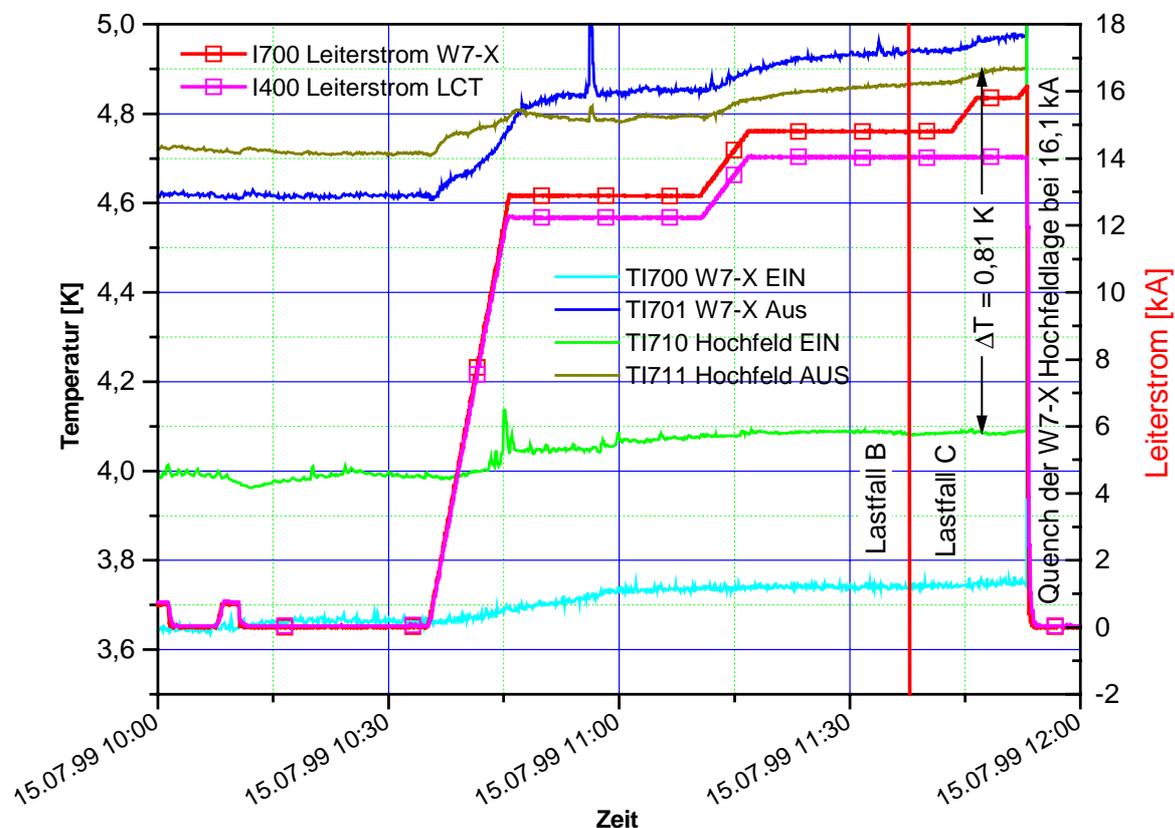


Abb. 2.2.3-1 Lastfall B und C mit möglichst tiefer Austrittstemperatur

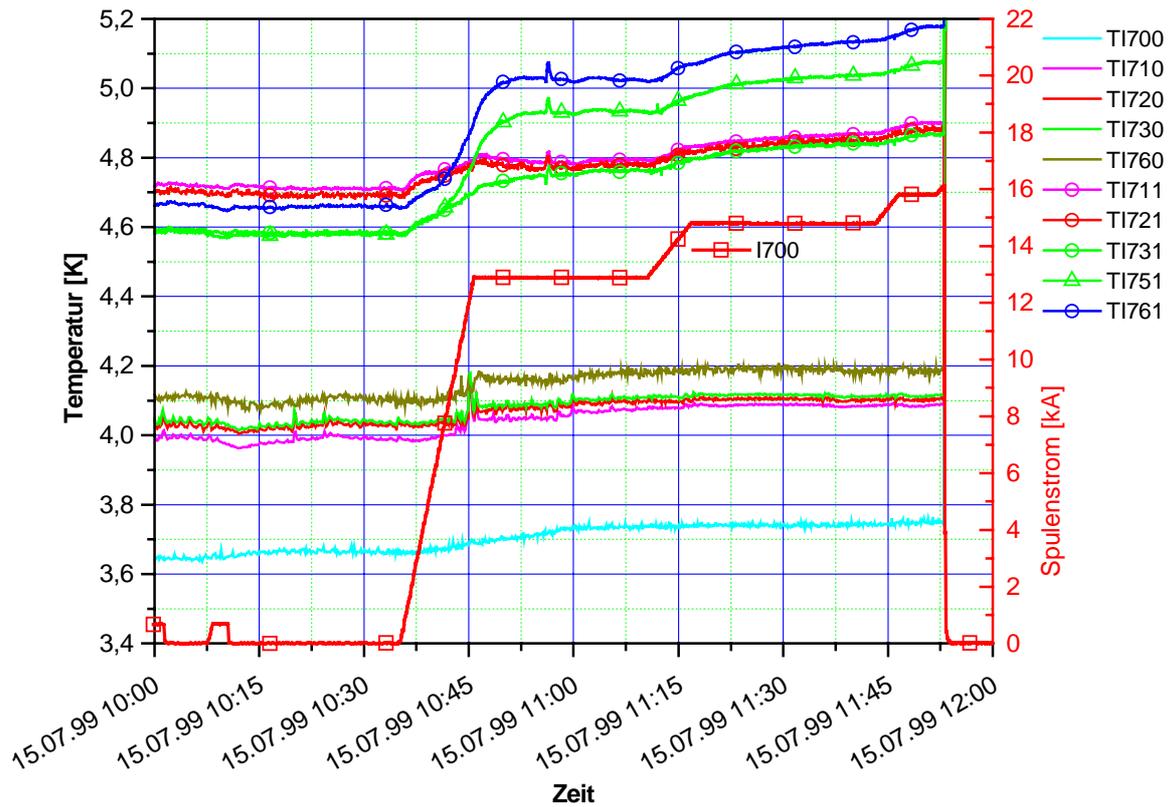


Abb. 2.2.3-2 Ein- und Austrittstemperaturen der Doppellagen im Lastfall B und C. Beim Start des Tests mit reduziertem He- Massenstrom

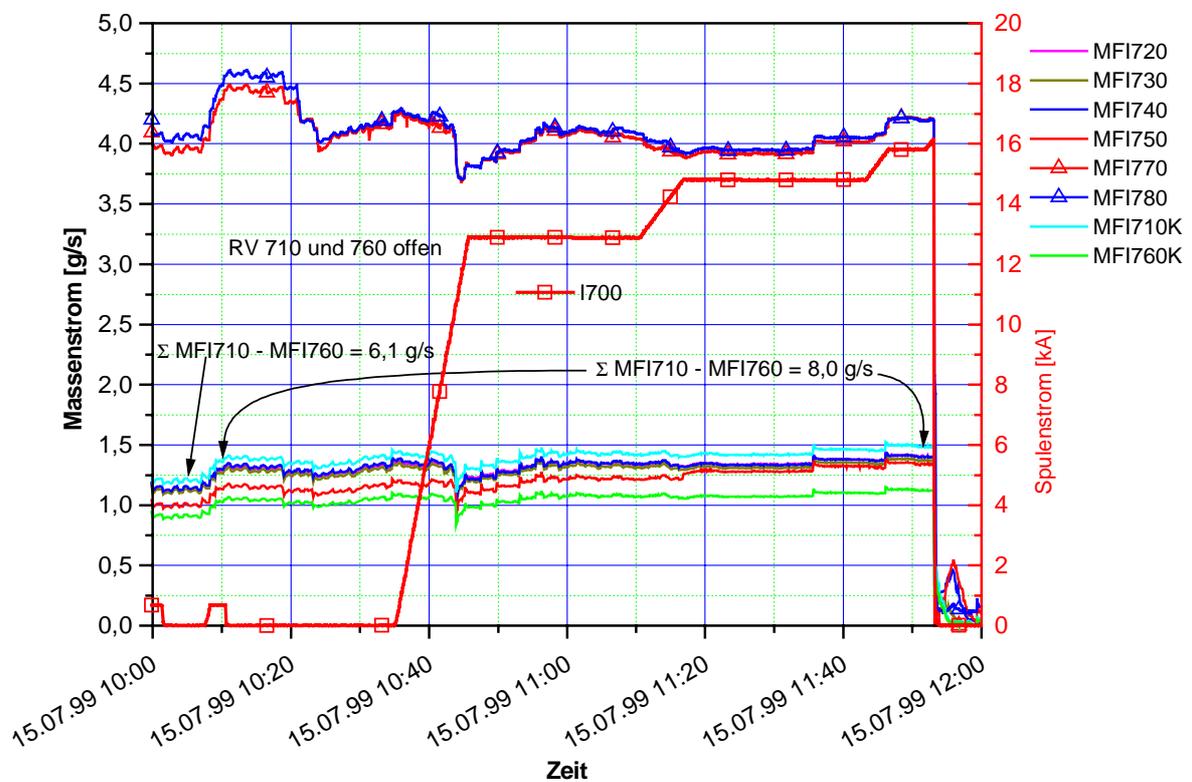


Abb. 2.2.3-3 Massenstromverteilung in den Doppellagen und SL-Stromschienen im Lastfall B und C. Beim Start des Tests mit reduziertem He- Massenstrom

- In der Abb. 2.2.3-4 sind wieder die Kälteleistungen der einzelnen DL dargestellt. Wie auch in diesem Diagramm wieder klar zu sehen ist, steigt die benötigte Kälteleistung in DL5 und DL6 bei Strombetrieb stark an, was wieder auf einen hohen Kontaktwiderstand zwischen DL5 und DL6 schließen lässt.
- Die Temperaturverteilung in den Kühlkreisen von Gehäuse mit Lagern, Zwischenrahmen und den SL-Stromschienen ist in Abb. 2.2.3-5 dargestellt. Zusätzlich sind in diesem Diagramm die Kühlleistungen von Gehäuse und Zwischenrahmen eingezeichnet. Wie man hieraus sieht, wird das Gehäuse bei der Erregung durch Wirbelströme erwärmt.
- Die Abb. 2.2.3-6 zeigt die Massenströme durch die LCT-Spule im Lastfall C. Sie wurde mit den minimal möglichen Massenströmen betrieben, war aber dennoch sehr stabil und bedurfte nur geringer Aufmerksamkeit während der Testphase.

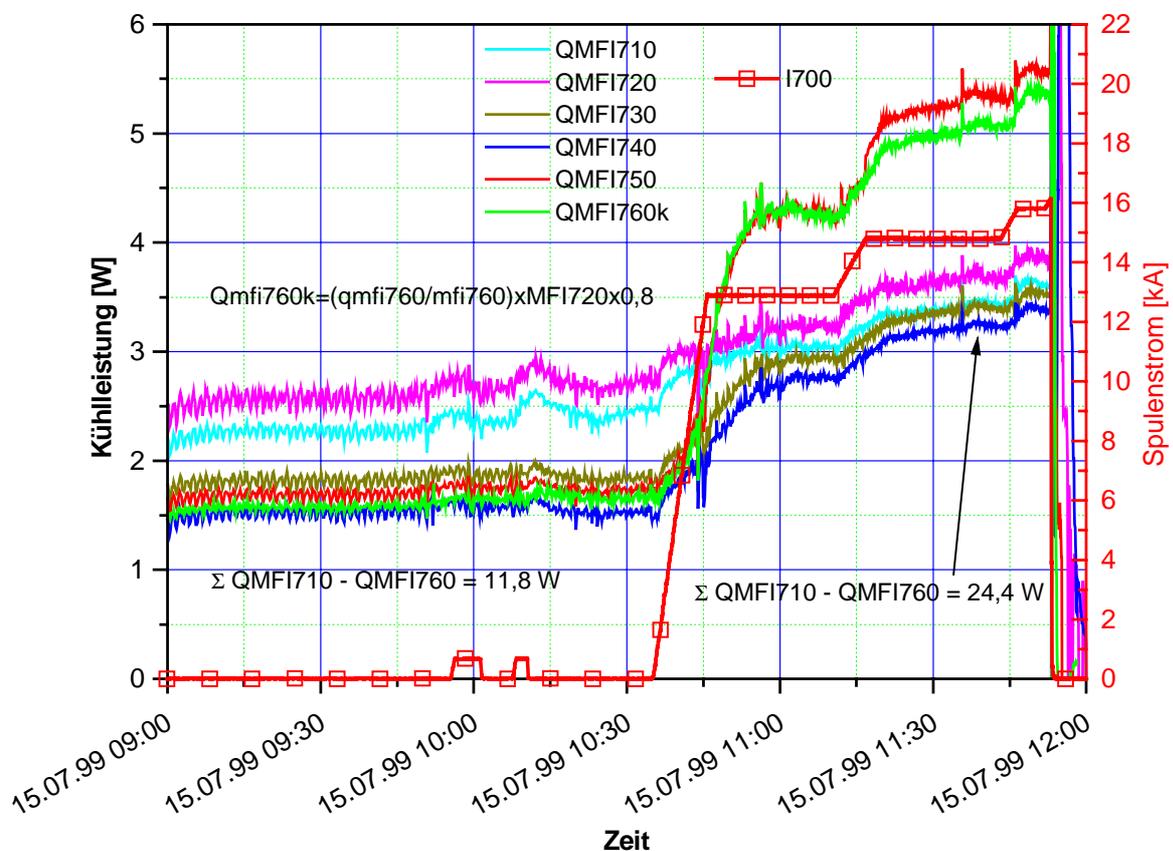


Abb. 2.2.3-4 Kühlleistung der W 7-X DEMO Spule im Lastfall B und C

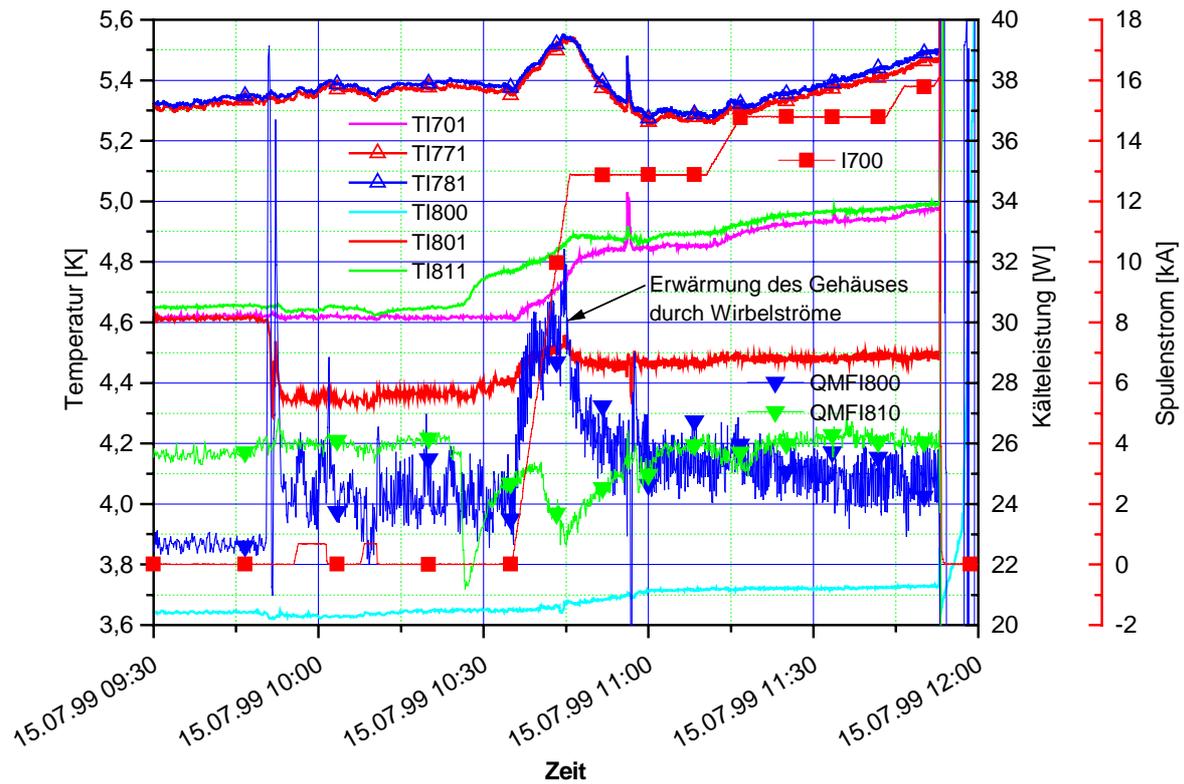


Abb. 2.2.3-5 Temperaturverteilung der Kühlkreise von SLS, Gehäuse mit Lagern und Zwischenrahmen sowie Kühlleistung von Gehäuse und Zwischenrahmen.

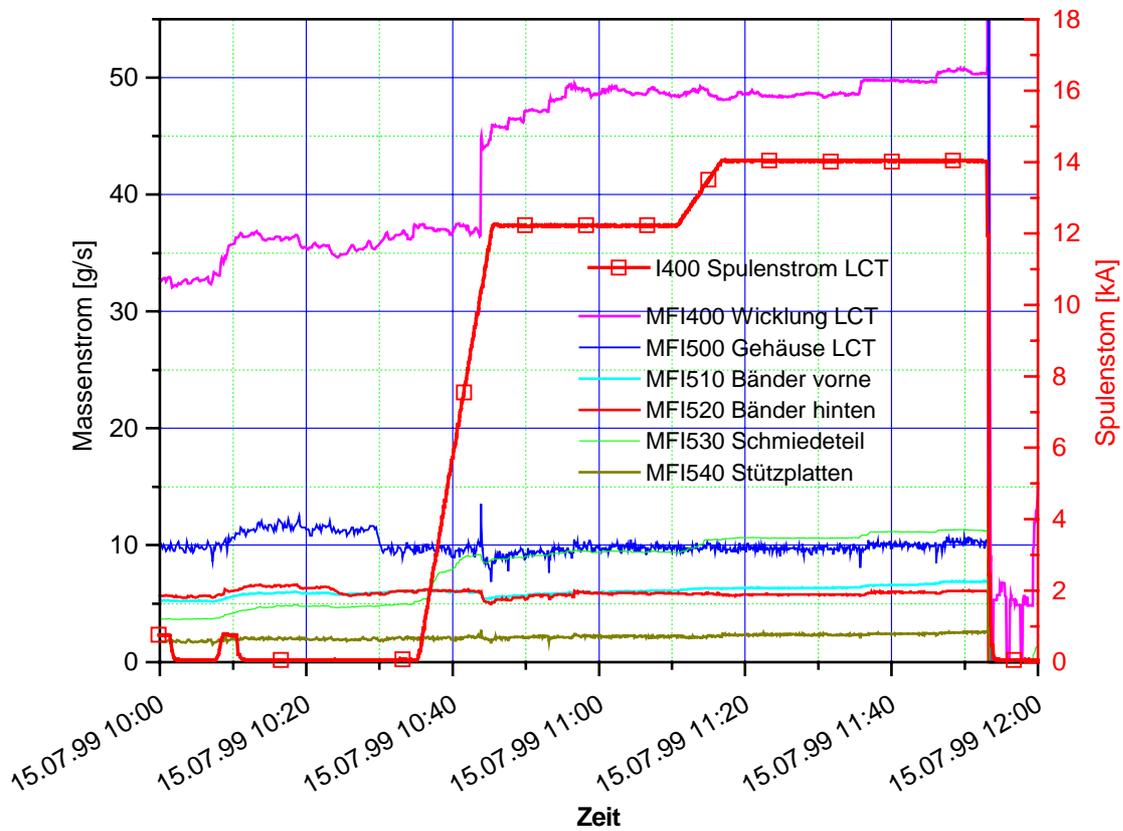


Abb. 2.2.3-6 Massenströme in der LCT-Spule im Lastfall C

2.2.4 Druckverlust der Doppellagen der W 7-X DEMO Spule

Der Druckverlust der W 7-X Wicklung entsprach in etwa den Erwartungen, wie aus nachfolgender Abb. 2.2.4-1 ersichtlich ist. Der Massenstrom von DL6 mußte jedoch korrigiert werden weil das Rückschlagventil RV760, wie bereits erwähnt, teilweise offen war, was während des Tests zu Fehlinterpretationen führte.

Der verhältnismäßig hohe Druckverlust dieses Leiters verhinderte eine Erhöhung des He-Massenstromes, um damit den Supraleiter besser kühlen zu können. Bei der Auslegung von Supraleitern sollte daher auf möglichst niedrigen hydraulischen Widerstand geachtet werden, was natürlich dem Bestreben nach einem möglichst kompakten Leiter widerspricht.

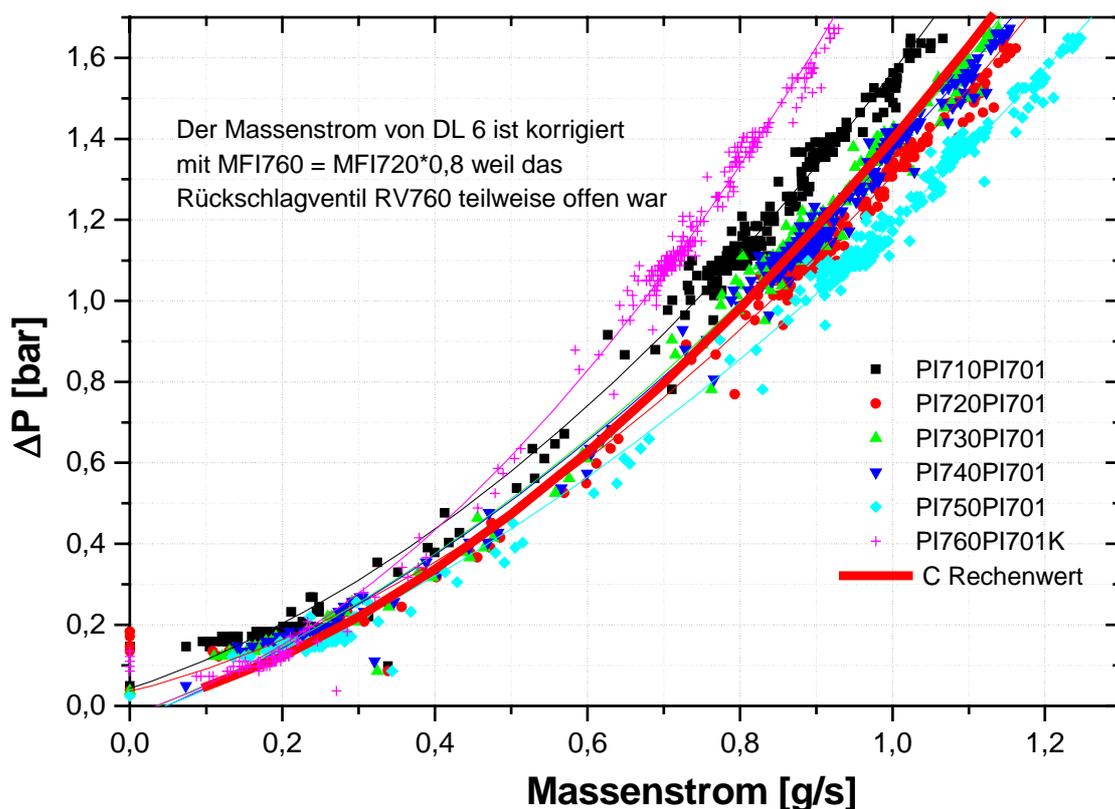


Abb. 2.2.4-1 Druckverlust der W 7-X Wicklung.

2.2.5 Thermische Verluste und Restgaswärmeleitung

2.2.5.1 Thermische Verluste der W 7-X Wicklung

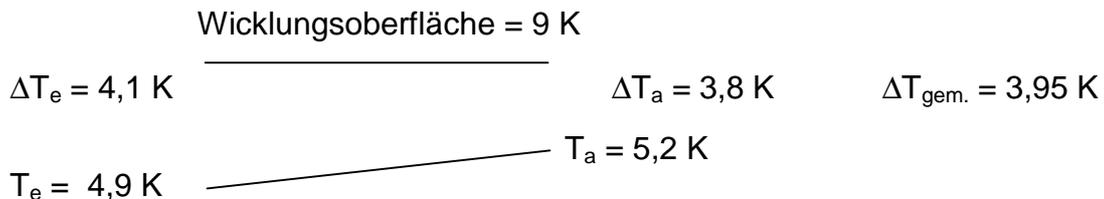
Die thermischen Verluste oder auch benötigten Kühlleistungen sind bei den verschiedenen Betriebsweisen in den Abb. 2.2.2.1-5, 2.2.2.2-7 und 2.2.3-4 jeweils mit und ohne Strom dargestellt.

Ohne Strom betragen die gemessenen thermischen Verluste der Wicklung bei 4,5 K Betrieb ca. 10,8 W und bei 3,8 K Betrieb 11,8 -13,4 W wie auch aus Tabelle 1 ersichtlich ist.

Nachfolgende grobe Abschätzung der Wärmeleitung durch Isolation und Verguß der Wicklung zeigt, daß diese Werte durchaus realistisch sind.

$$\dot{Q} = \frac{A}{L} \cdot \lambda \cdot \Delta T$$

A = Oberfläche der Wicklung = 6,45 m²
 L = Dicke von Isolation und Verguß = 0,03 m
 λ = Wärmeleitfähigkeit von Stycast bei 4 K = 0,06 W/mK
 ΔT = Mittlere Temperaturdifferenz zwischen Wicklungsfläche und Leiter
 Q = Wärmelast



Mit obigen Daten ergibt sich eine Wärmelast auf die Wicklung von **51 W**. Aus Erfahrungen mit der LCT-Spule liegt uns ein gemessener Wärmeübergangswert von $k = 0,13 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ vor. Dieser Wert ist für die W 7-X DEMO Spule mit Verguß sicher zu optimistisch aber zum Vergleich kommt man mit diesem Wert gemäß folgender Gleichung nur auf **3,3 W**.

$$\dot{Q} = k \cdot A \cdot \Delta T$$

Da die Meßwerte mit 10,8 W - 13,4 W dazwischen liegen, sind sie als realistisch anzusehen.

Der Anstieg der benötigten Kälteleistung bei Strombetrieb ist auf die Verluste in den Kontakten zurückzuführen. Hier fällt besonders der starke Anstieg in den DL5 und DL6 auf, welche einen Widerstandswert von ca. $1,4 \times 10^{-8} \Omega$ ergeben, während man bei den anderen Kontakten ca. $4 \times 10^{-9} \Omega$ ermittelt.

2.2.5.2 Thermische Verluste vom W 7-X Gehäuse

Die thermischen Verluste von W 7-X Gehäuse mit Lagern setzen sich im wesentlichen aus Wärmestrahlung und Restgaswärmeleitung zusammen. Die Festkörperwärmeleitung kann vernachlässigt werden, da die Zwischenstruktur, an welcher das Gehäuse aufgehängt ist, etwa auf gleicher Temperatur war. Die Wärmestrahlung läßt sich wie folgt abschätzen:

$$\dot{Q}_{\text{Strahlung}} = \frac{A_w \cdot \sigma \cdot (T_w^4 - T_k^4)}{1/\epsilon_w + (A_w/A_k)(1/\epsilon_k - 1)} \quad [2.2.5.2-1]$$

A_w = Warme Fläche
 A_k = Kalte Fläche
 T_w = Temperatur der warmen Fläche
 T_k = Temperatur der kalten Fläche
 ϵ_w = Emissionsgrad der warmen Fläche
 ϵ_k = Emissionsgrad der kalten Fläche
 σ = Strahlungskonstante

Strahlung vom LN₂ - Schild auf die Gehäusewand

Die aktiv gekühlte Oberfläche des LN₂ Schildes beträgt 123 m² und hat eine Temperatur von 80 K und einen Emissionsgrad von 0,1, da sie elektropoliert ist. Das W 7-X Gehäuse hat eine Oberfläche von 11,4 m² mit einer mittleren Temperatur von 9 K und einen Emissionsgrad von 0,2. Mit diesen Daten erhält man eine Wärmestrahlung auf das Gehäuse von **5,5 W**.

Berücksichtigt man noch die nicht aktiv gekühlten Flächen des LN₂ Schildes mit einer Fläche von 3,7 m², welche nur $\frac{3}{4}$ der W 7-X Gehäusefläche sehen und wie bei früheren Messungen am Mannloch gemessen auf ca. 180 K liegen, so erhält man eine Wärmestrahlung von **19,1 W**.

Addiert man beide Werte so erhält man **24,6 W**, was etwa der Summe der gemessenen thermischen Verluste von Wicklung und Gehäuse (siehe Abb. 2.2.5.2-1) bei einem Vakuumdruck von 2×10^{-6} mbar entspricht. Die thermischen Verluste der Wicklung müssen mit berücksichtigt werden, da die thermische Last der Wicklung im wesentlichen durch Wärmeleitung vom Gehäuse kommt.

Restgaswärmeleitung auf das Gehäuse

Die Restgaswärmeleitung von W 7-X Wicklung, W 7-X Gehäuse und LCT Gehäuse wurde ohne Strombetrieb im Druckbereich des Vakuums von 2×10^{-6} bis $1,5 \times 10^{-4}$ mbar (Druckwerte des Vakuums sind die nicht korrigierten Meßwerte) gemessen, was aus der Abb. 2.2.5.2-1 ersichtlich ist. Der Anstieg der thermischen Last auf das Gehäuse zwischen 2×10^{-6} mbar und dem beim Strombetrieb meist herrschenden Druck von 2×10^{-5} mbar (siehe Abb. 2.2.5.5-2) beträgt ca. 4 W, was auch mit folgender empirischer Gleichung abschätzbar ist.

$$\dot{Q}_{\text{Restgaswärmeleitung}} = 0,021 \cdot P \cdot A \cdot (T_w - T_k)$$

P = Vakuumdruck	= 2×10^{-5} mbar
A = Fläche des Bauteils	= $11,4 \times 10^4$ cm ²
T _w = Temperatur der warmen Fläche	= 80 K (171 K)
T _k = Temperatur der kalten Fläche in	= 9 K
Q _{Restgaswärmeleitung}	= 3,4 W (8,2 W)

Rechnet man auch hier mit der höheren Temperatur der nicht aktiv gekühlten Flächen, so erhält man die in Klammern eingetragenen Werte. Addiert man diese Werte wieder und berücksichtigt, daß nur $\frac{3}{4}$ der Gehäusefläche dem LN₂ Schild zugewandt sind, so erhält man 8,7 W. Für die gesamte Belastung aus Restgaswärmeleitung und Strahlung errechnet man **33,3 W**, was gut mit der Summe den Meßwerten von Wicklung und Gehäuse von **30 W - 36,9 W** in Tabelle 1 übereinstimmt.

Die gemessenen thermischen Verluste der W 7-X DEMO Spule sind daher mit obigen Überlegungen gut erklärbar. Die nicht aktiv gekühlten Flächen sind für die Durchführung von He-Leitungen, Meßleitungen, Abstützungen, Abspannungen und Vakuumpumpstutzen notwendig und mit vertretbaren Mitteln und Aufwand nicht aktiv kühlbar.

Diese thermische Last auf das Gehäuse ist bei einer ausreichenden Anzahl von Kühlkanälen oder Kühlmöglichkeiten kein Problem, im Fall der W 7-X DEMO Spule konnte diese Last, bedingt durch zuwenig Kühlkanäle, nicht abgeführt werden und floß zum Teil in die Wicklung. Dies und der geringe, bedingt durch den hohen

Druckabfall nicht erhöhbarer He-Massenstrom führten zu hohen He-Austrittstemperaturen.

Für die Wicklung der LCT-Spule konnte die Restgaswärmeleitung nicht erfaßt werden, da die Wärmelast von den dann nicht gekühlten Stromzuführungen das Ergebnis erheblich verfälschte.

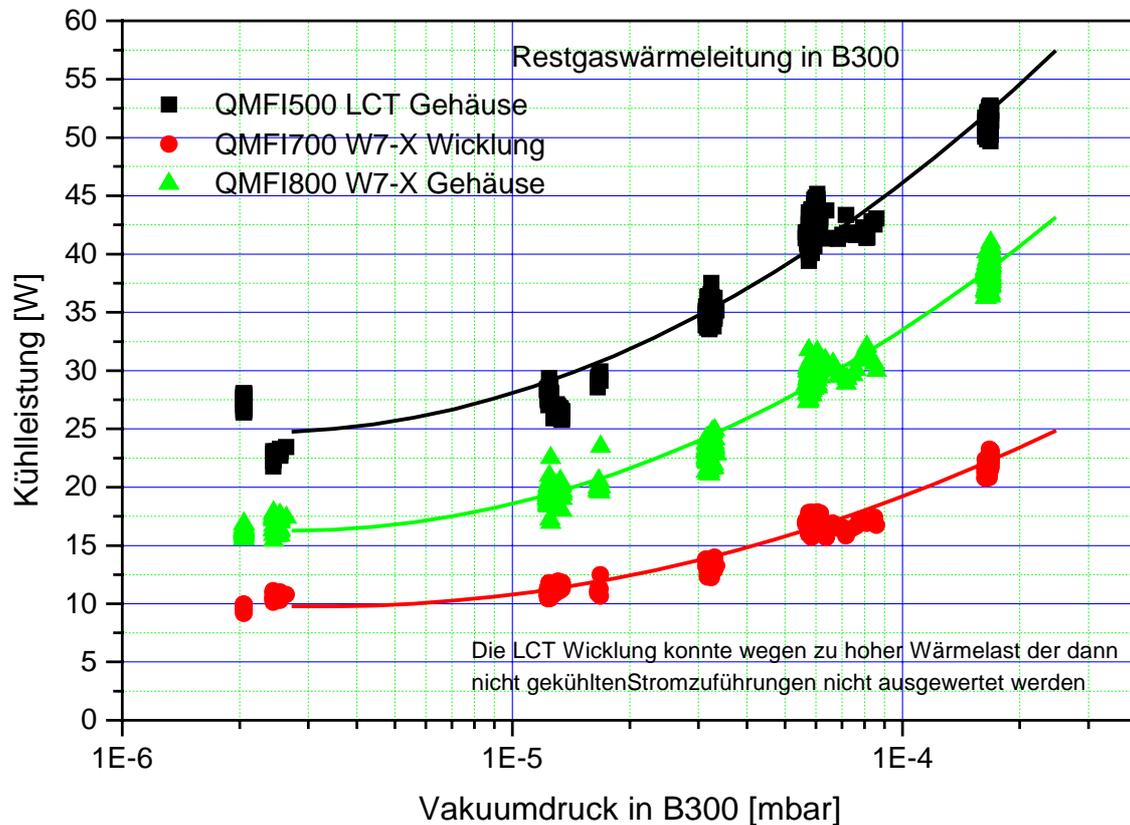


Abb. 2.2.5.2-1 Änderung der thermischen Last auf Wicklung und Gehäuse der W -X DEMO Spule und das Gehäuse der LCT-Spule mit dem Vakuumdruck

2.2.5.3 Thermische Verluste des Zwischenrahmens

Auch die thermischen Verluste des Zwischenrahmens kommen im Wesentlichen von der Wärmestrahlung. Die Festkörperwärmeleitung durch den dritten Fuß liegt rechnerisch bei 0,9 W, da aber dieser Fuß zusätzlich über ein ca. 1,3 m langes Rohrstück an die Zwischenstruktur angekoppelt ist kann dieser Wert vernachlässigt werden. Auch die 4 Spannstrangen brauchen nicht berücksichtigt werden, weil diese an die LCT-Spule angeschlossen sind. Ebenso kann der Wärmefluß zwischen LCT-Spule und Zwischenrahmen bedingt durch die geringe Temperaturdifferenz vernachlässigt werden.

Wärmestrahlung durch das LN₂ Schild

Für die Wärmestrahlung vom aktiv gekühlten LN₂ Schild auf den Zwischenrahmen mit einer Gesamtoberfläche von 33 m², welche aber zu ca. 2/3 von der LCT und W 7-X Spule verdeckt wird, errechnet man mit Gl. [2.2.5.2-1] eine Leistung von **4,9 W**.

Nimmt man an, daß auch die halbe Zwischenstruktur die nicht aktiv gekühlten Flächen des LN₂ Schildes sehen, so errechnet sich daraus eine Leistung von **13,7 W**.

Addiert man diese Werte so erhält man **18,6 W**, was wieder mit den Meßwerten von 18 W bei einem Vakuumdruck von 2×10^{-6} mbar gut übereinstimmt.

Restgaswärmeleitung auf den Zwischenrahmen

Nimmt man bei der Restgaswärmeleitung auf den Zwischenrahmen ebenfalls an, daß nur 1/3 der Fläche an der Wärmeübertragung beteiligt ist, weil der Rest von LCT und W 7-X Spule verdeckt sind, so errechnen sich mit dem aktiv gekühlten Teil **3,3 W** und mit dem nicht aktiv gekühlten **7,9 W**. Hier liegt die Summe mit **29,8 W** etwas über dem Meßwert von **26 W** gemäß Tabelle 1. Dies ist nicht verwunderlich, da die Annahme, daß 2/3 der Fläche abgeschirmt sind, nur sehr grob ist.

2.2.5.4 Thermische Verluste auf die Einspeisezone

Die gemessenen thermischen Verluste (Abb. 2.2.5.4-1) der Einspeisezone (Abb.2.2.5.5-3) waren mit ca. 6 W nicht besonders hoch, bewirkten aber, bedingt durch den geringen He-Massenstrom eine Temperaturerhöhung von ca. 0,35 K des Heliums vor Eintritt in die Wicklung, wie aus Abb. 2.2.3-2 ersichtlich ist.

Wärmestrahlung auf die Einspeisezone

Eine grobe Abschätzung der Einspeiseoberfläche ergab ca. 1 m^2 . Mit dieser Fläche errechnet sich eine Last vom aktiv gekühlten Teil des LN₂ Schildes von **0,3 W** und vom nicht aktiv gekühlten Teil von **5,2 W** mit der Annahme, daß der Emissionsgrad 0.1 ist, weil die Einspeisezone zum Teil mit Superisolation eingehüllt war.

Wärmelast durch Restgaswärmeleitung

Bei der Restgaswärmeleitung schätzt man als Summe vom aktiv gekühlten und nicht aktiv gekühlten Teil des LN₂ Schildes eine Last von ca. **1 W** bei einem Vakuumdruck von 2×10^{-5} mbar ab. Addiert man auch diesen Werte zu den Werten der Wärmestrahlung, so ergeben sich in der Summe **6,5 W**, was in etwa dem Meßwert in Abb. 2.2.3.5.4 -1 entspricht.

2.2.5.5 Restgaswärmeleitung durch bestehende Leckagen

Im Hüllrohr der negativen Stromzuführungen trat nach dem Kaltfahren eine Undichtheit von 1×10^{-1} mbar l/s auf, was zu einem Vakuumdruck in B300 von 2×10^{-5} mbar im Standbybetrieb und 5×10^{-5} mbar bei Strombetrieb führte. Der Druckanstieg im Vakuum beim Strombetrieb ist im dann höheren He-Druck in der Stromzuführung begründet. Die Komponenten W 7-X DEMO Spule, LCT-Spule, kalter Speicher. Meßkapillaren und He-Leitungen mit Ventilen hatten zusammen bei 4,5 K eine Leckrate unter 1×10^{-5} mbar l/s, was die Restgaswärmeleitung kaum beeinflusst.

Die Auswirkungen dieser erhöhten Restgaswärmeleitung auf die Ein- und Austrittstemperatur der ersten Doppellage der Wicklung sind in Abb. 2.2.5.5-1 dargestellt. Im oberen Teil sind die Verhältnisse ohne Strom und unten mit Strom in der W 7-X DEMO Spule dargestellt. Die Werte in den grün unterlegten Kästchen geben die Meßwerte, die in den braun unterlegten die Rechenwerte wieder.

Bei der Einspeisezone wurden beim Betrieb ohne Strom 20 % der Wärmelast als Restgaswärmeleitung gerechnet ($0,98 / 1,2 = 0,81 \text{ W}$). Hiermit ergibt sich eine Enthalpie am Eintritt in die Wicklung von -5,586 J/g, was einer Temperatur von 3,97 K entspricht. In gleicher Weise wurden die weiteren Werte ermittelt. Beim Betriebsfall Wicklung mit Strom wurden zu dem Wärmeeinfall ohne Restgaswärmeleitung die Verluste der Kontakte addiert.

Wie man aus dieser Abbildung sieht, war die Restgaswärmeleitung nicht entscheidend für die Ein- und Austrittstemperatur der W 7-X Wicklung. Den größten Beitrag zu den thermischen Verlusten lieferten die nicht aktiv gekühlten Flächen des LN₂-Schildes und das schlecht gekühlte Gehäuse.

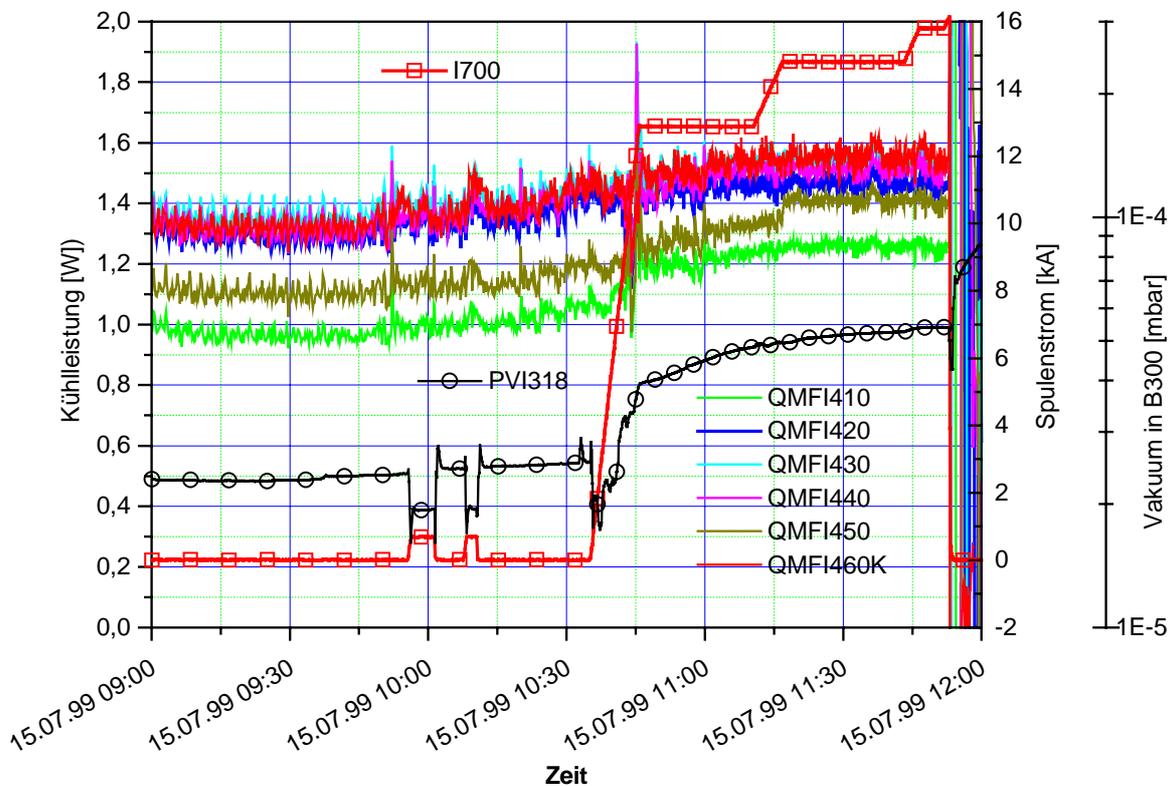
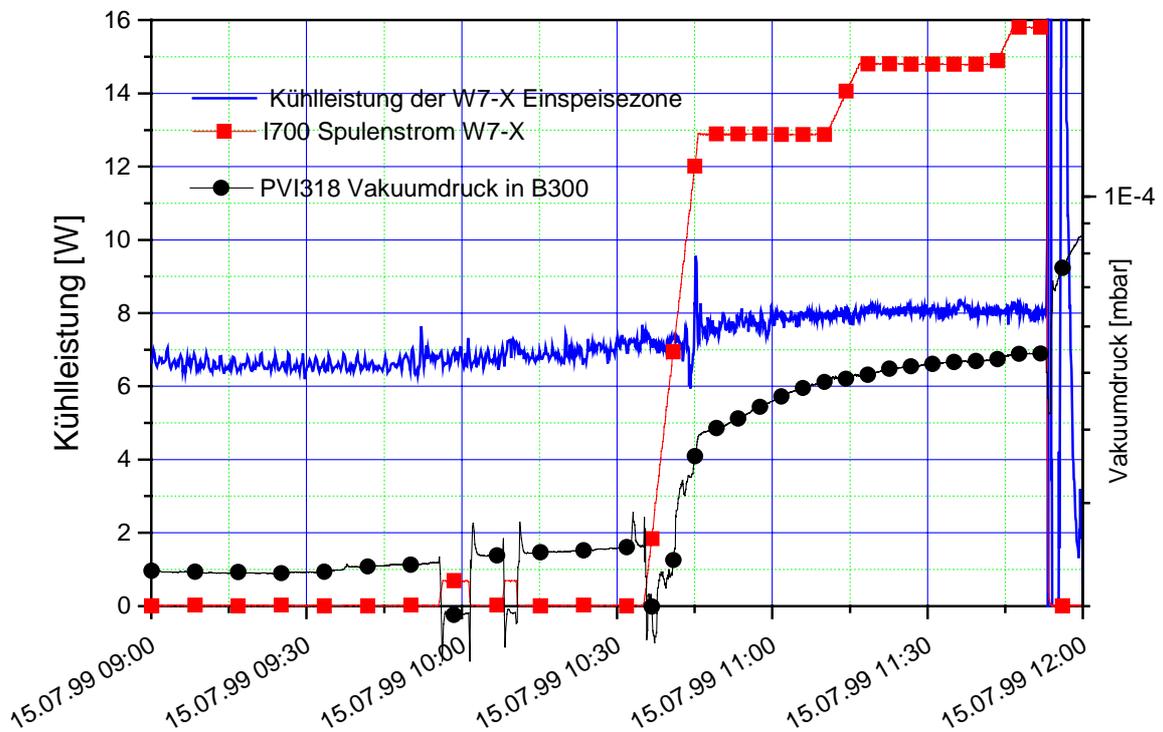


Abb. 2.2.5.4-1 Thermische Verluste der Einspeisezone, oben Gesamtverluste unten Verluste der Einzeleinspeisungen.

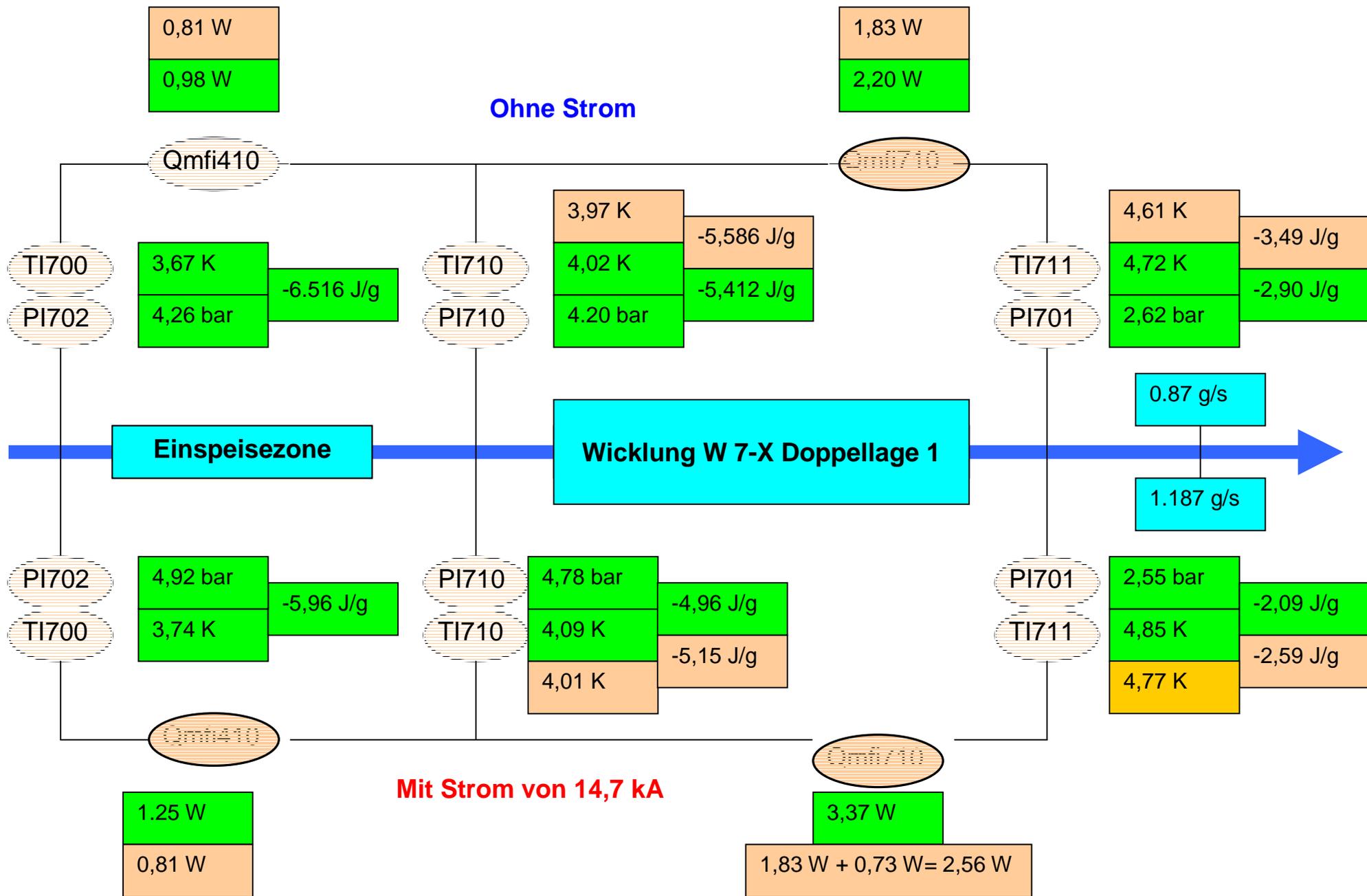


Abb. 2.2.5.5-1 Vergleich von Wärmelast und Temperatur in der W 7-X Wicklung mit und ohne Restgaswärmeleitung.

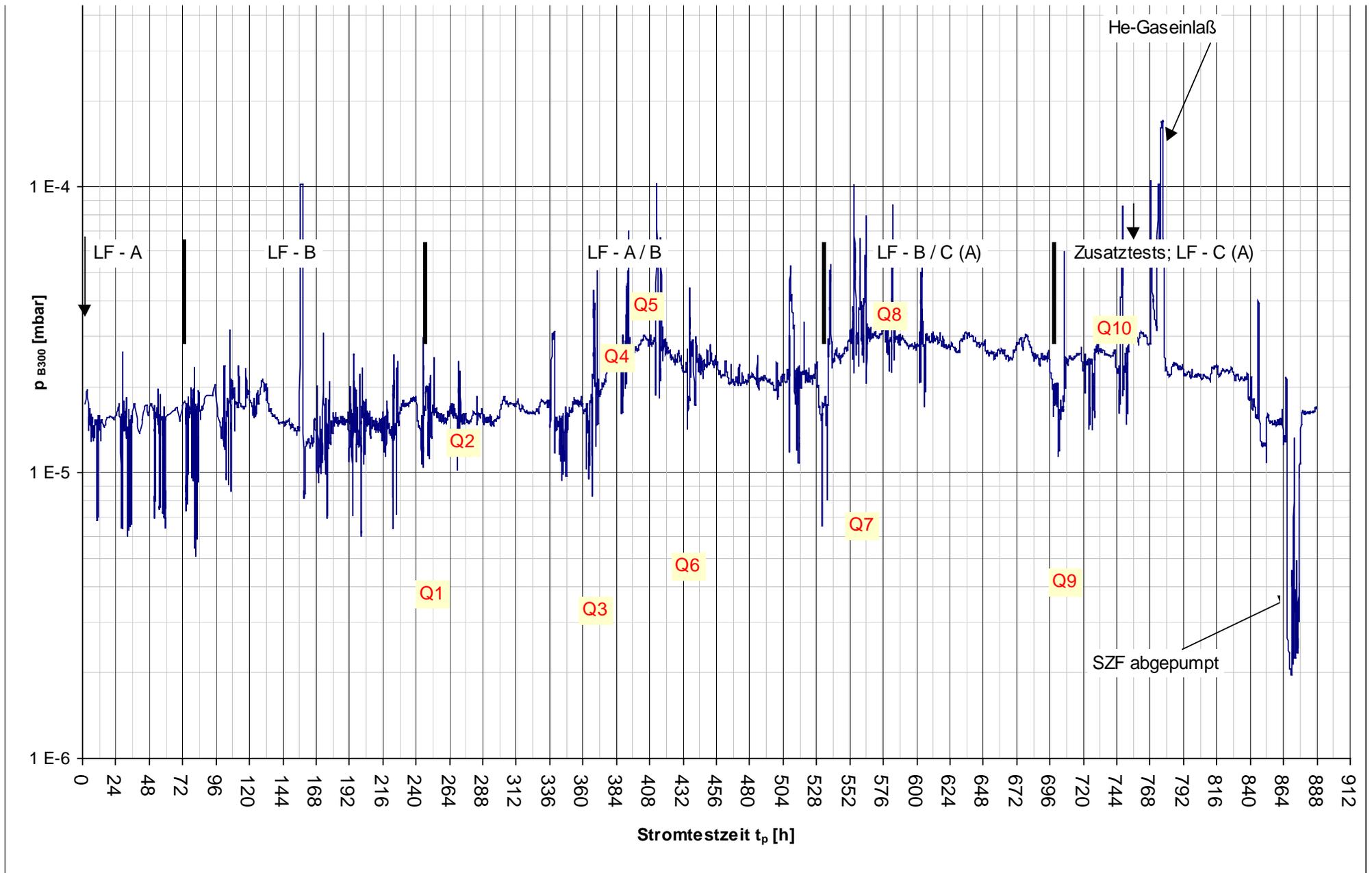


Abb. 2.2.5.5-2 Vakuumdruck in B300 während der gesamten Testzeit

Tab. 1 Zusammenfassung der Kühlkosten der W 7-X DEMO Spule

Betriebsweise	I ₇₀₀	T Ein Vert. TI700	ΔT Verteiler	T Ein Wickl. TI720	T Aus TI701	ΔT Wicklung	P Ein PI720	P Aus PI701	ΔP Wicklung	m _{Σ 710-760} Wicklung	m ₈₀₀ Gehäuse und Lager	m ₈₁₀ Zwischen- rahmen	Q _{Σ 710-760} Wicklung	Q ₈₀₀ Gehäuse	Q ₈₁₀ Zwischen- rahmen
Einheit	kA	K	K	K	K	K	bar	bar	bar	g/s	g/s	g/s	W	W	W
Lastfall A 4,5 K ohne Strom	0	4,65	0,25	4,90	5,20	0,30	6,9	3,3	3,6	9,6	12,4	8,4	10,8	21	24
Lastfall A 4,5 K I _{Quench} = 18,75 kA	17,0	4,65	0,25	4,90	5,35	0,45	6,9	3,5	3,4	9,6	12,4	8,4	19,0	21	24
Lastfall A 3,8 K ohne Strom	0	3,71	0,39	4,11	4,77	0,66	6,1	3,5	2,6	8,9	10,3	9,3	13,4	23,5	26
Lastfall A 3,8 K I _{Quench} = 19,88 kA	19,1	3,71	0,39	4,12	5,03	0,91	6,0	3,5	2,5	8,6	10,3	9,3	25,7	23,5	26
Lastfall C 3,8 K ohne Strom	0	3,65	0,38	4,03	4,61	0,58	4,0	2,5	1,5	6,1	7,3	7,7	11,8	23	26
Lastfall C 3,8 K I _{Quench} = 16,13 kA	14,7	3,74	0,36	4,10	4,97	0,87	4,9	2,6	2,2	8,0	13,5	5,5	24,4	24,8	26

Die Kühlleistungen können nicht von der DL2 auf alle DL's übertragen werden ($\Sigma DL's < 6 \times DL2$)

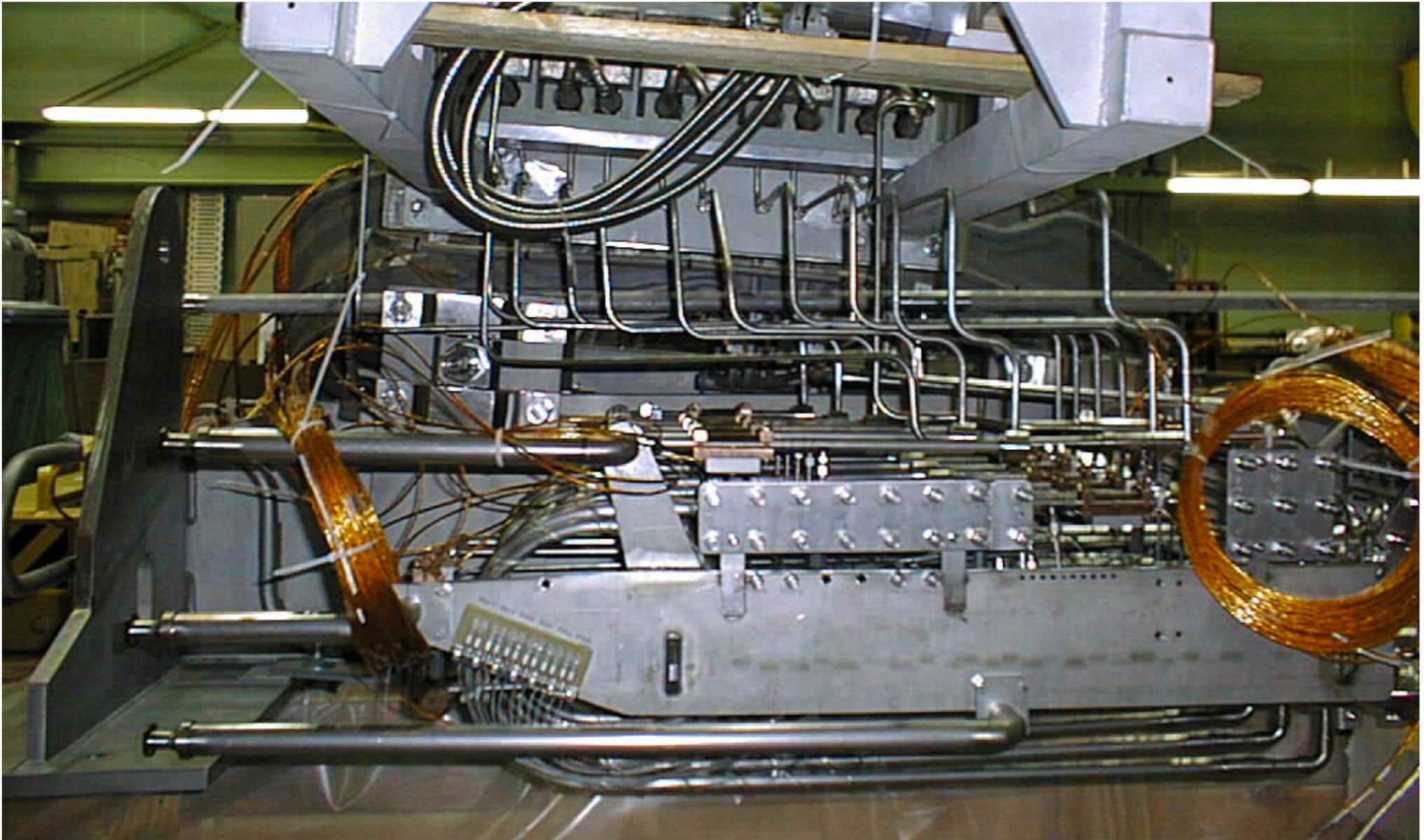


Abb. 2.2.5.5-3 Einspeisezone der W 7-X DEMO Spule bei der Montage

2.3 Sicherheitsentladung und Quenchverhalten

Für das kryogene Verhalten des Kühlsystems liegt kein prinzipieller Unterschied zwischen Quench und Schnellentladung vor, vorausgesetzt die Verzögerungszeit zwischen Quenchdetektion und Entladung liegt wie geplant im Bereich von 1-2 s, was bei den mit W 7-X durchgeführten Tests immer gegeben war. Bei den weiteren Betrachtungen werden daher auch nur das Quenchverhalten und die Rückkühlung nach einem Quench betrachtet

2.3.1 Quenchverhalten und Rückkühlung der W 7-X DEMO Spule im Lastfall A

Im nachfolgenden Teil des Berichts wird der Quench vom 29.6.99 mit dem maximalen Leiterstrom der W 7-X Spule von 19,88 kA exemplarisch für den Lastfall A (Test der W 7-X DEMO Spule ohne LCT Spule) näher betrachtet.

Bei diesem Test betrug die in der W 7-X Spule gespeicherte Energie kurz vor dem Quench 12,4 MJ (3,4 kWh).

- Integriert man die benötigten Kühlleistungen für die Rückkühlung in Abb. 2.3.1-1, so ergeben sich für die Wicklung 0,67 MJ und für das Gehäuse 0,51 MJ, was 1,18 MJ oder ca. 10% der gespeicherten Energie entspricht.
- Auch bei der Integration der elektrisch ausgekoppelten Energie in Abb. 2.3.1-2 kommt man auf ca. 90 %, so daß 10 % in der Spule verbleiben und vom Kryosystem bei der Rückkühlung abzuführen sind.
- Nach dem Quench war zuerst das Kryosystem zu stabilisieren, bevor mit der Rückkühlung begonnen werden konnte, daher der Zeitraum zwischen Quench und Rückkühlbeginn in den folgenden Diagrammen.
- In den Abbildungen 2.3.1-3 bis 2.3.1-6 sind die Temperaturverteilungen der einzelnen Komponenten dargestellt. Wie aus Abb. 2.3.1-3 ersichtlich, waren die Austrittstemperaturen der Wicklung bereits nach 2,5 Stunden wieder auf den ursprünglichen Wert abgesenkt. Die Oberflächentemperaturen der Wicklung (Abb. 2.3.1-4) kamen nur verzögert nach, was auf das noch wärmere Gehäuse zurückzuführen ist.
- Die He- Austrittstemperaturen aus dem Gehäuse waren nach ca. 3 Stunden wieder abgesunken (Abb. 2.3.1-5) während die Oberflächentemperaturen vom Gehäuse, bedingt durch die geringe Anzahl der Kühlkanäle ca. 4 Stunden für die Rückkühlung benötigten (Abb. 2.3.1-6).
- Druck- und Temperaturanstieg unmittelbar nach diesem Quench sind in Abb. 2.3.1-7 dargestellt. Hieraus ist zu entnehmen, daß der Druckanstieg am Austritt (PI701) wesentlich stärker war, was auch auf einen Quench in der Nähe des Wicklungsaustrittes hinweist. Der Temperaturanstieg am Austritt auf ca. 30 K wurde bei der späteren Rückkühlung wieder erreicht (Abb. 2.3.1-3).

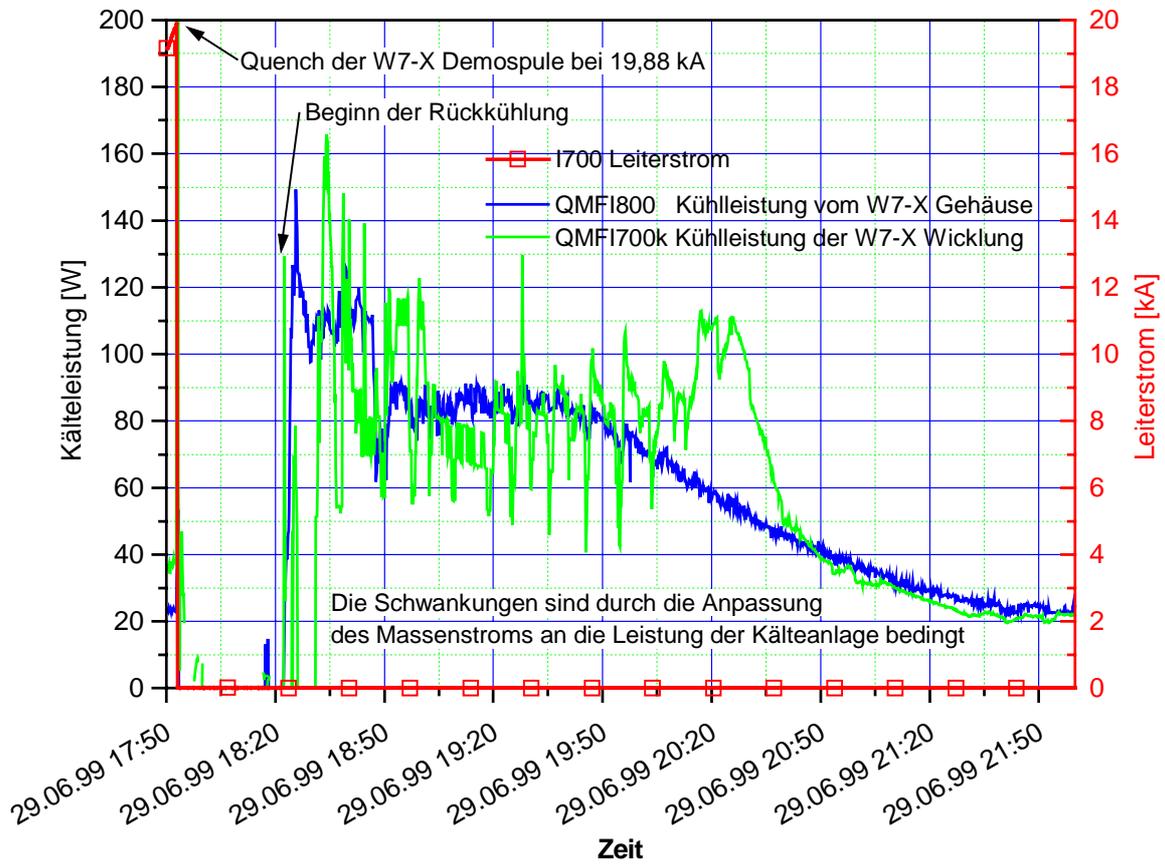


Abb. 2.3.1-1 Benötigte Kühlleistung der W 7-X DEMO Spule bei der Rückkühlung nach einem Quench von 19,88 kA im Lastfall A

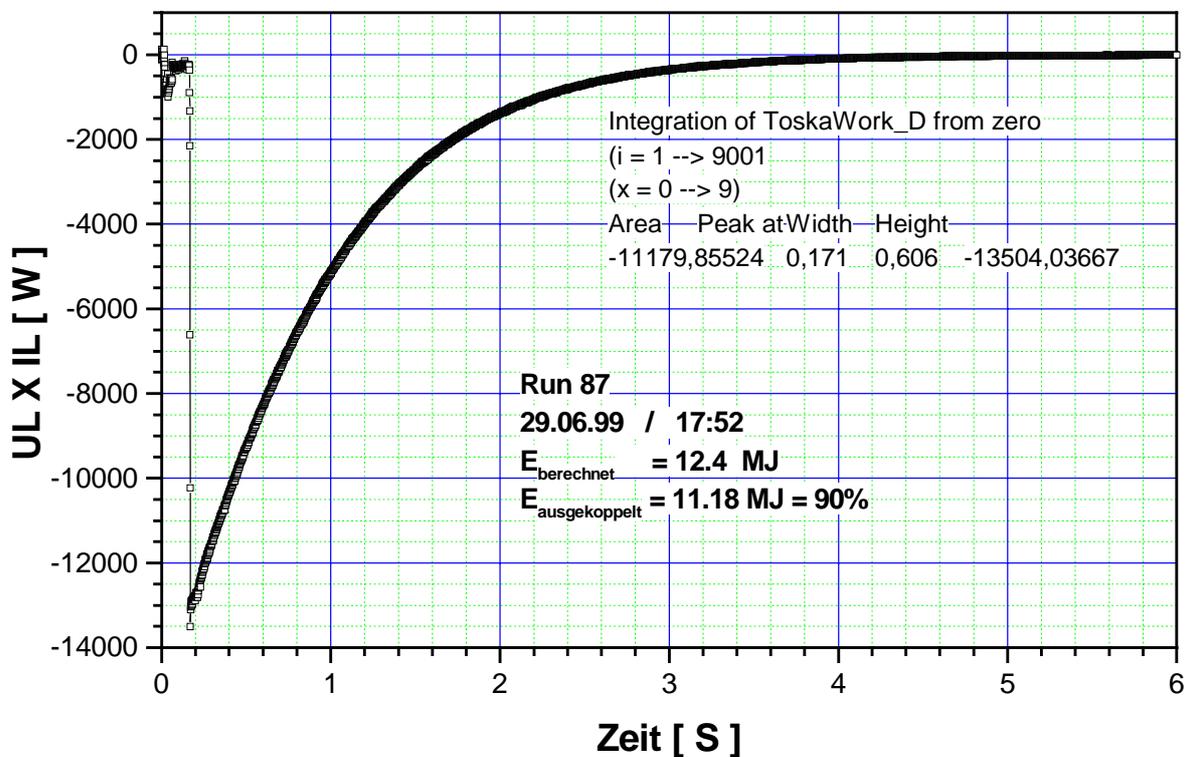


Abb. 2.3.1-2 Ausgekoppelte Energie bei einem Quench im Lastfall A

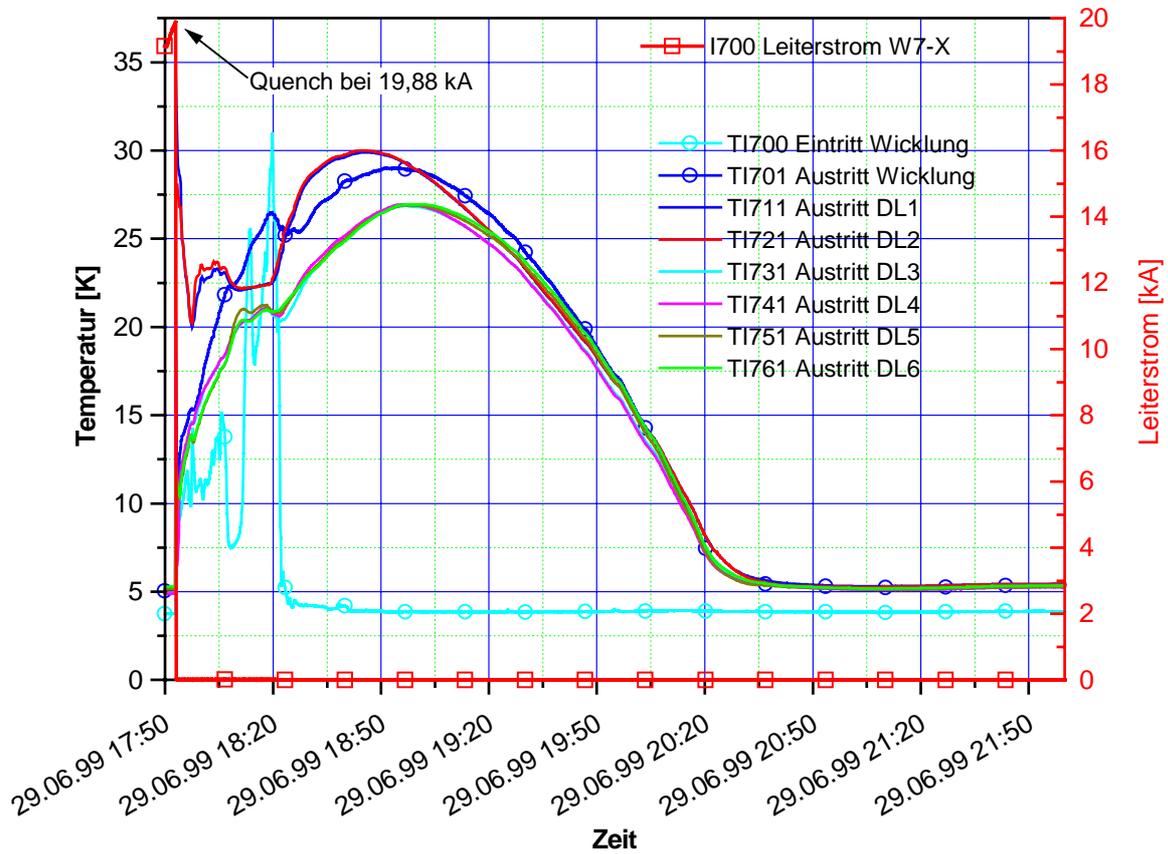


Abb. 2.3.1-3 Temperaturverteilung am Austritt der Wicklung nach einem Quench.

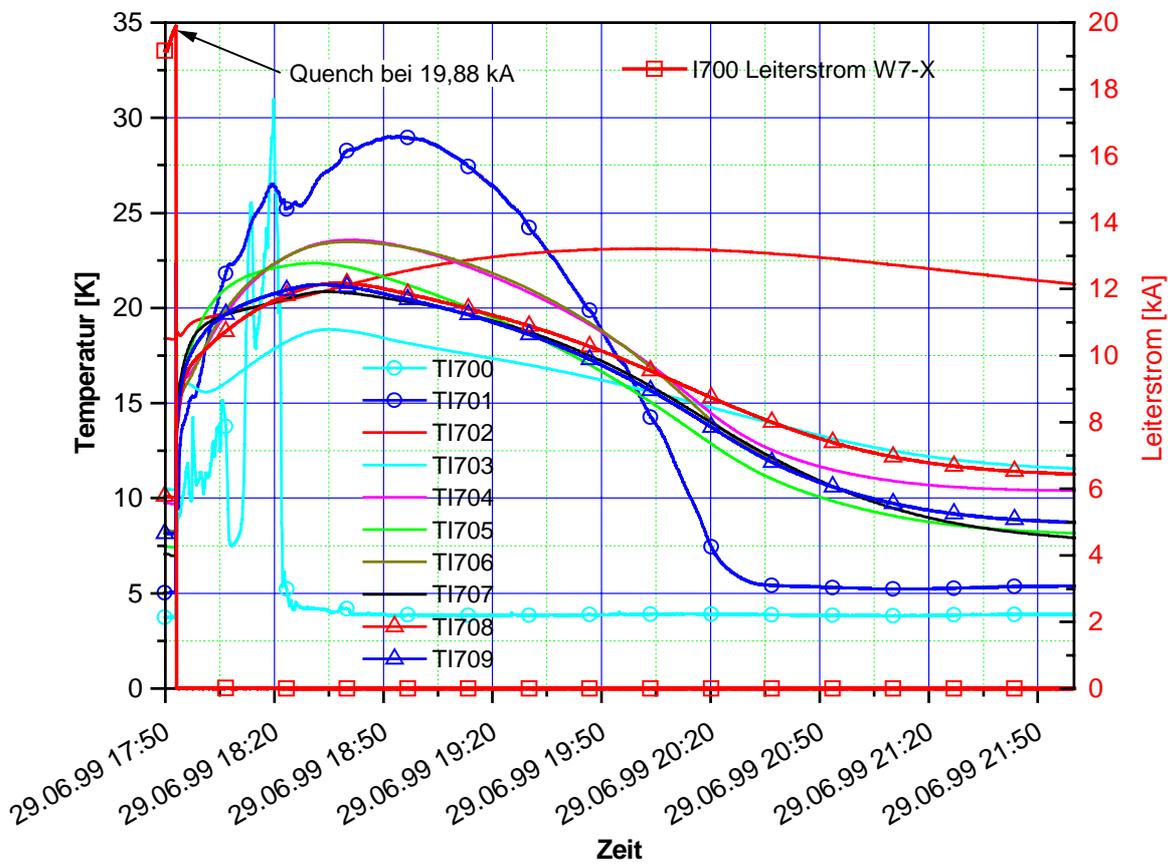


Abb. 2.3.1-4 Temperaturverteilung an der Wicklungsoberfläche nach einem Quench

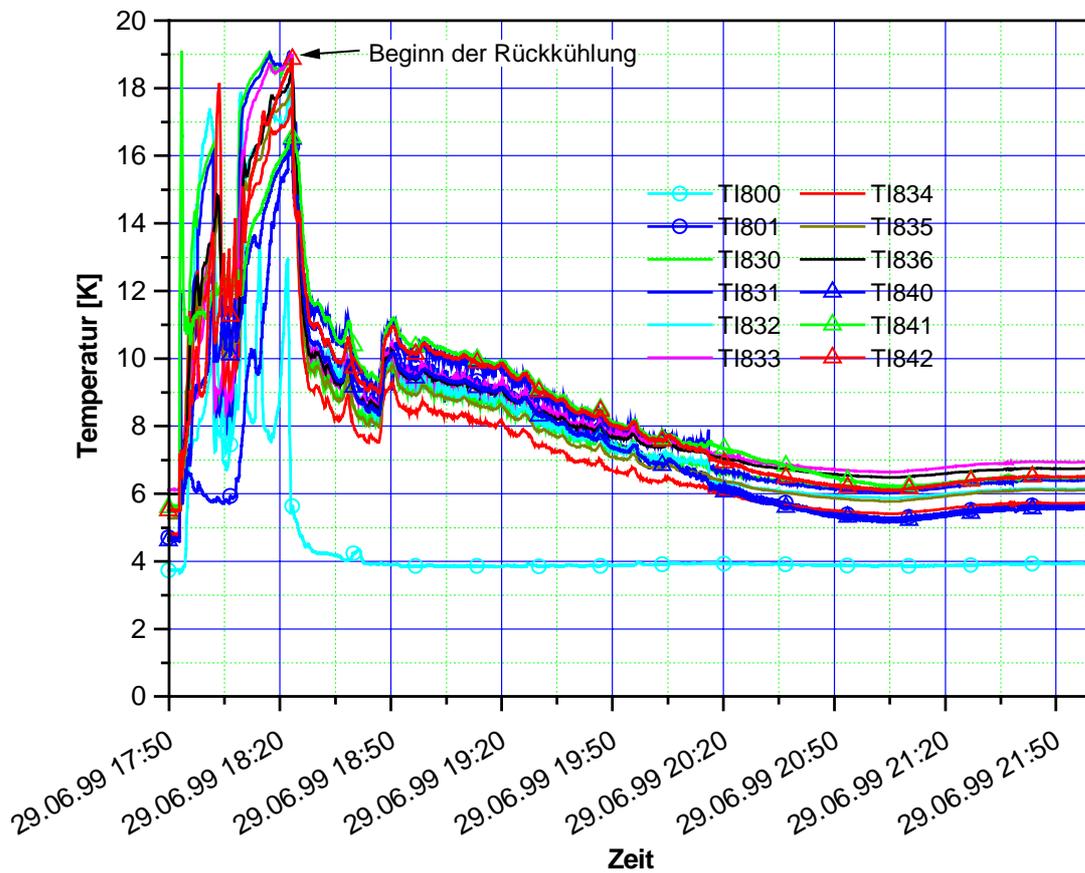


Abb. 2.3.1-5 Temperaturverteilung am Austritt der He- Kühlkanäle vom Gehäuse

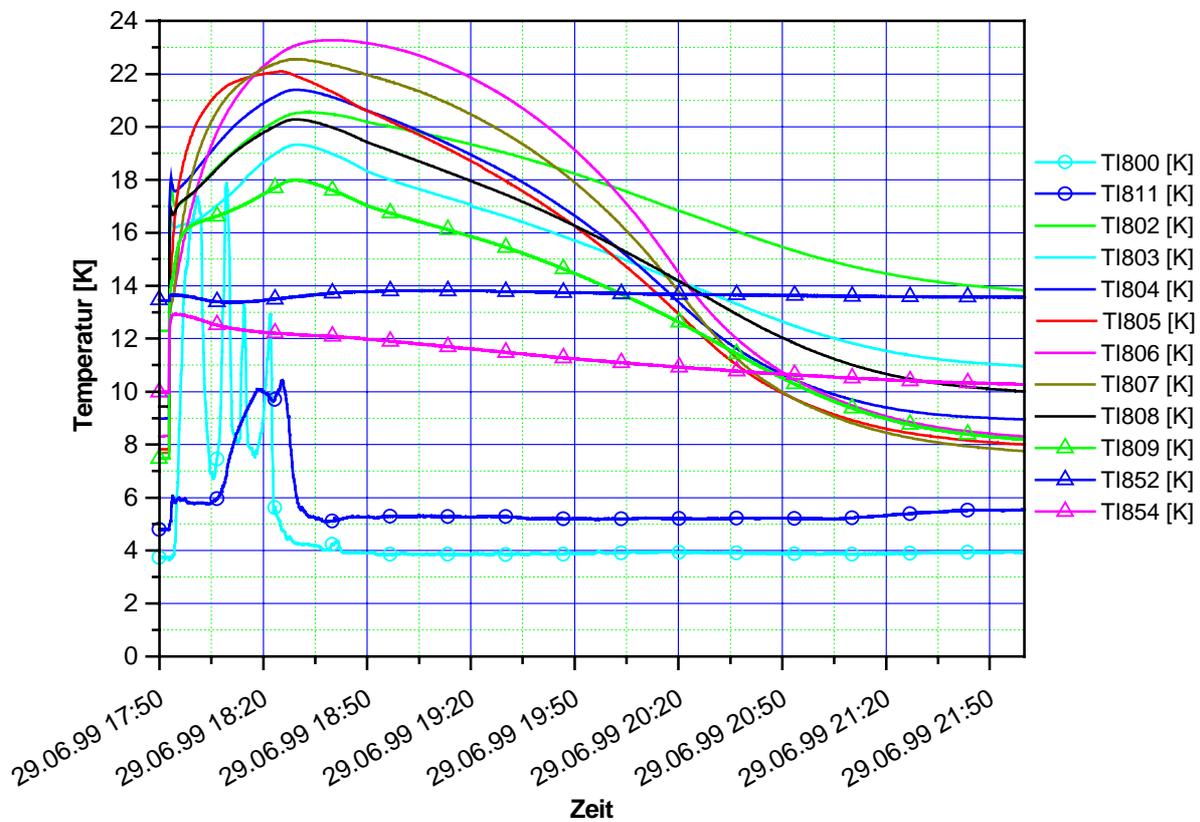


Abb. 2.3.1-6 Temperaturverteilung an Gehäuseoberfläche und Zwischenrahmen

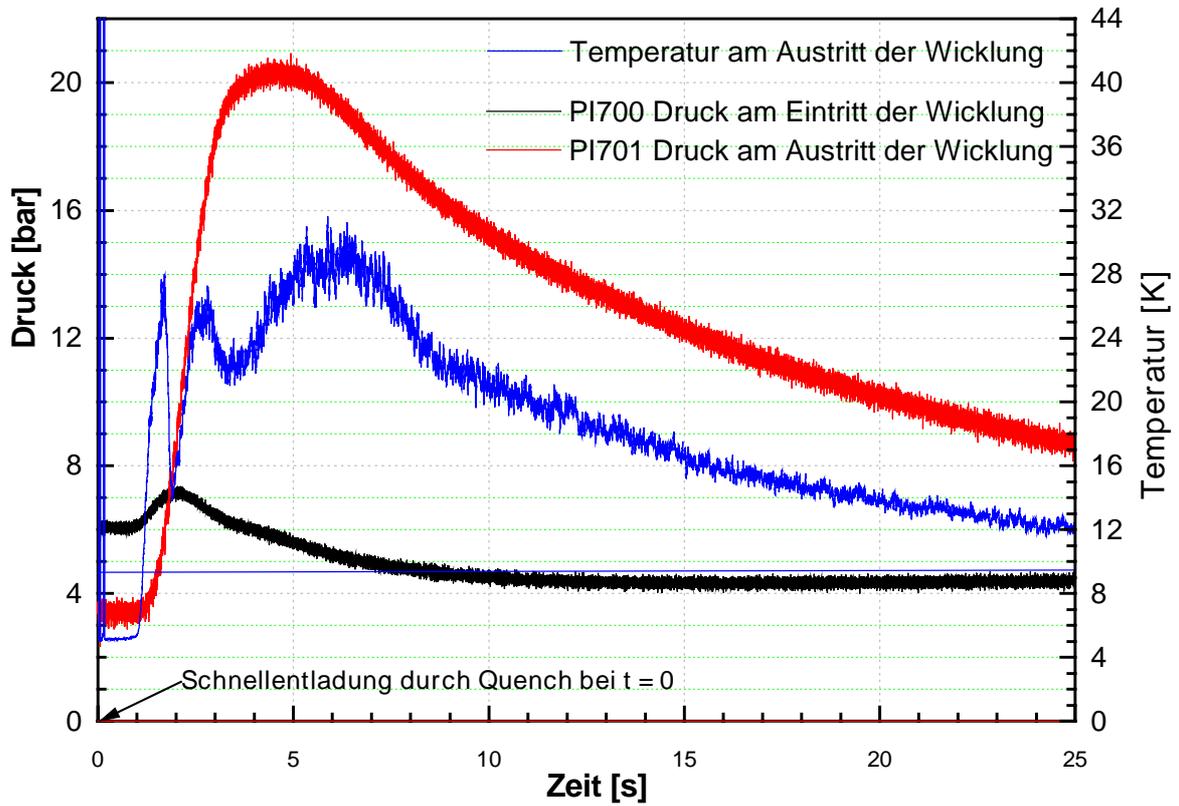


Abb. 2.3.1-7 Druck und Temperatur im Kühlsystem kurz nach einem Quench im Lastfall A

2.3.2 Quenchverhalten und Rückkühlung der W 7-X DEMO Spule im Lastfall C

Nachfolgend wird wieder der Test mit dem höchsten Leiterstrom in der W 7-X DEMO Spule von 16.73 kA im Lastfall C betrachtet. Dieser Test fand am 8.7.99 statt wobei der Quench mit der Nr. 8 um 14:34 erfolgte.

- Die benötigte Kälteleistung für die Rückkühlung der W 7-X DEMO Spule ist in der folgenden Abb. 2.3.2-1 dargestellt. Bedingt durch die parallele Rückkühlung der LCT Spule mußten die He Massenströme kontinuierlich angepaßt werden, um die Kälteanlage nicht zu überlasten. Dies führte zu den stark schwankenden Kälteleistungen wodurch eine Integration der Rückkühlleistung nicht sinnvoll ist, weil sie zu fehlerhaft wäre.
- Die elektrisch ausgekoppelte Energie ist über die Strom- und Spannungsmessung erfaßbar wie in Abb. 2.3.2-2 dargestellt. Allerdings kann auch hierüber nicht auf die vom Kryosystem abzuführende Energie geschlossen werden, weil bei der Entladung zusätzliche Energie von der gleichzeitig entladenen LCT Spule eingekoppelt wird. Dies ist auch der Grund dafür, daß die ausgekoppelte Energie größer ist als die gespeicherte. Es kann jedoch angenommen werden, daß wie beim Einzelspulentest ca. 10% der gespeicherten Energie die Wicklung und das Gehäuse erwärmten und anschließend vom Kryosystem abzuführen waren.
- In Abb. 2.3.2-3 sind die Austrittstemperaturen der Wicklung nach dem Quench und bei der Rückkühlung dargestellt. Die maximale Temperatur am Austritt (TI701) betrug hier kurzzeitig ca. 55 K und bei der Rückkühlung max. 35 K was geringfügig höher liegt als beim Einzelspulentest. Nach ca. 2,5 h waren die Temperaturen wieder auf die vorherigen Werte abgesunken.
- Abb. 2.3.2-4 zeigt die Temperaturen der Wicklungsoberfläche welche wie beim Einzelspulentest vom Gehäuse beeinflusst werden. In den nächsten Abb. 2.3.2-5 und 2.3.2-6 ist der Temperaturverlauf vom Gehäuse nach dem Quench dargestellt. Die He Austrittstemperaturen waren hier schneller wieder abgesenkt als beim Einzelspulentest (etwas größerer He- Massenstrom) aber die Rückkühlgeschwindigkeit wird durch die Wärmeleitung im Gehäuse bestimmt, so daß für die Rückkühlung wieder etwa 4 h notwendig waren.
- Druck und Temperatur unmittelbar nach dem Quench sind in Abb. 2.3.2-7 gezeigt. Der Druckanstieg auf 18 bar und der Temperaturanstieg auf ca. 55 K am Austritt der Wicklung zeigen, daß auch dieser Quench auf der Austrittsseite erfolgte.

Wie mit obigen Diagrammen gezeigt, war das kryogene Verhalten der W 7-X DEMO Spule im Lastfall A und C weitgehend identisch. Vom Kryosystem mußte allerdings im Lastfall C die LCT Spule nach einem Quench mit rückgekühlt werden, was erheblich höhere Kühlleistung erforderte.

Alle 10 Quenche wurden vom Kryosystem, **ohne** das Ansprechen von Sicherheitsventilen und damit verbundenen He Verlusten, sicher beherrscht.

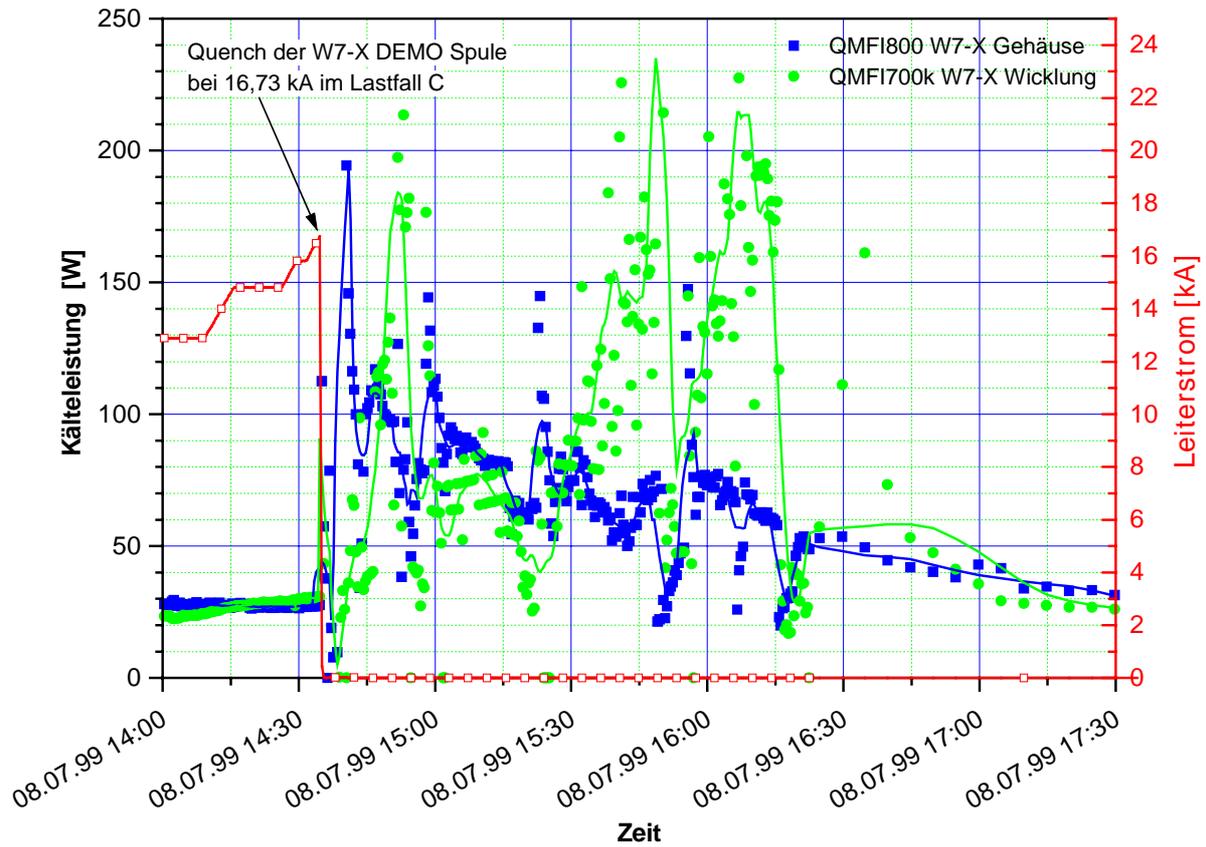


Abb. 2.3.2-1 Benötigte Kälteleistung der W 7-X DEMO Spule bei der Rückkühlung nach einem Quench von 16,73 kA im Lastfall C

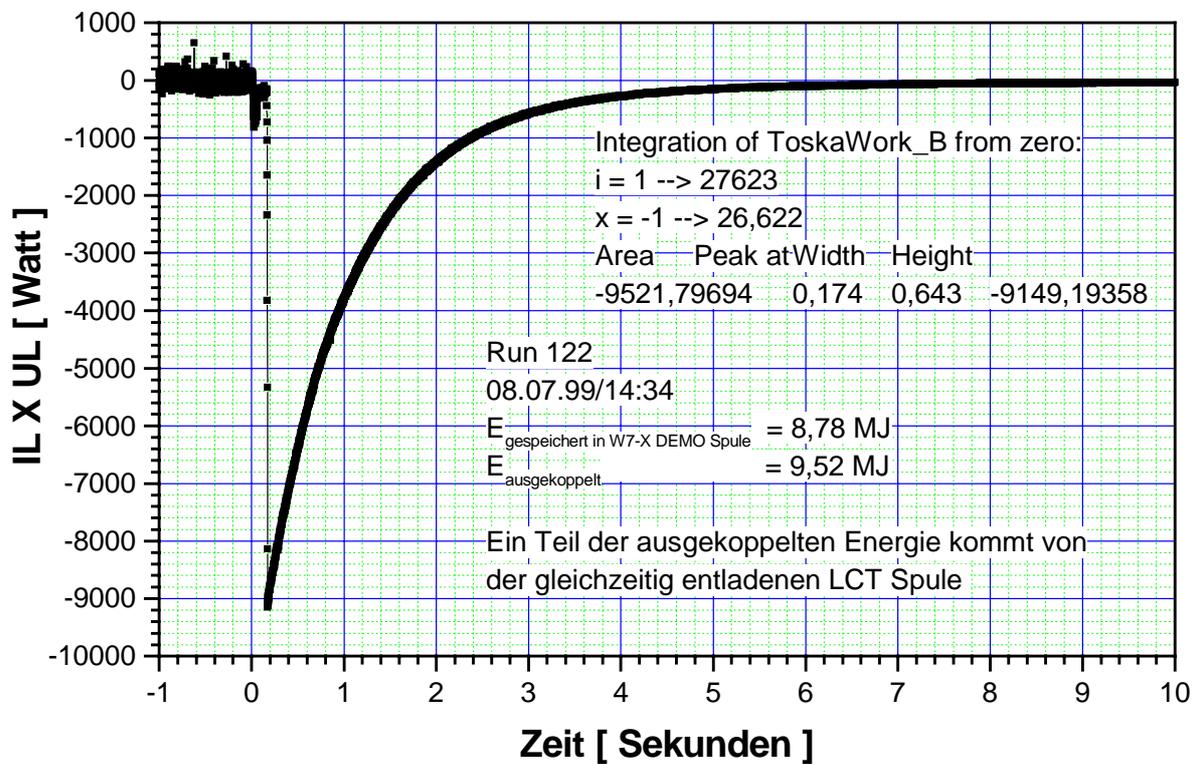


Abb. 2.3.2-2 Ausgekoppelte Energie nach einem Quench im Lastfall C

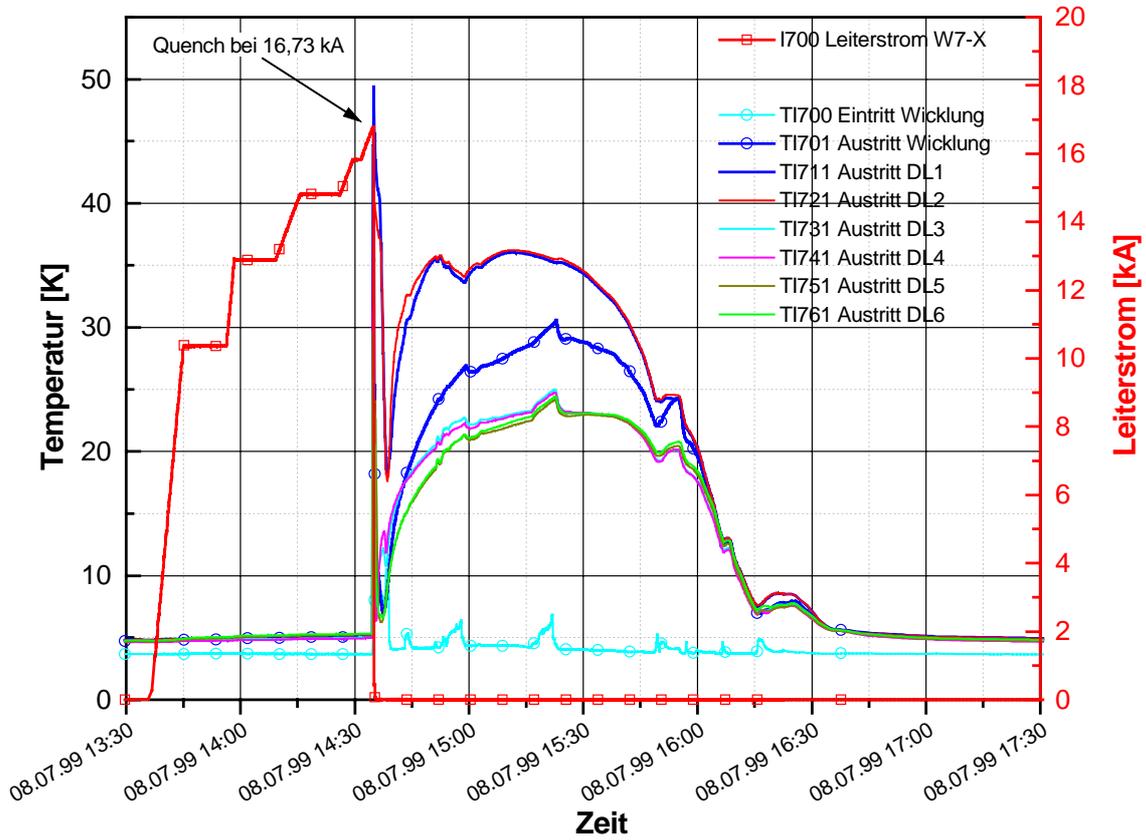


Abb. 2.3.2-3 Temperaturverteilung am Austritt der Wicklung nach einem Quench im Lastfall C

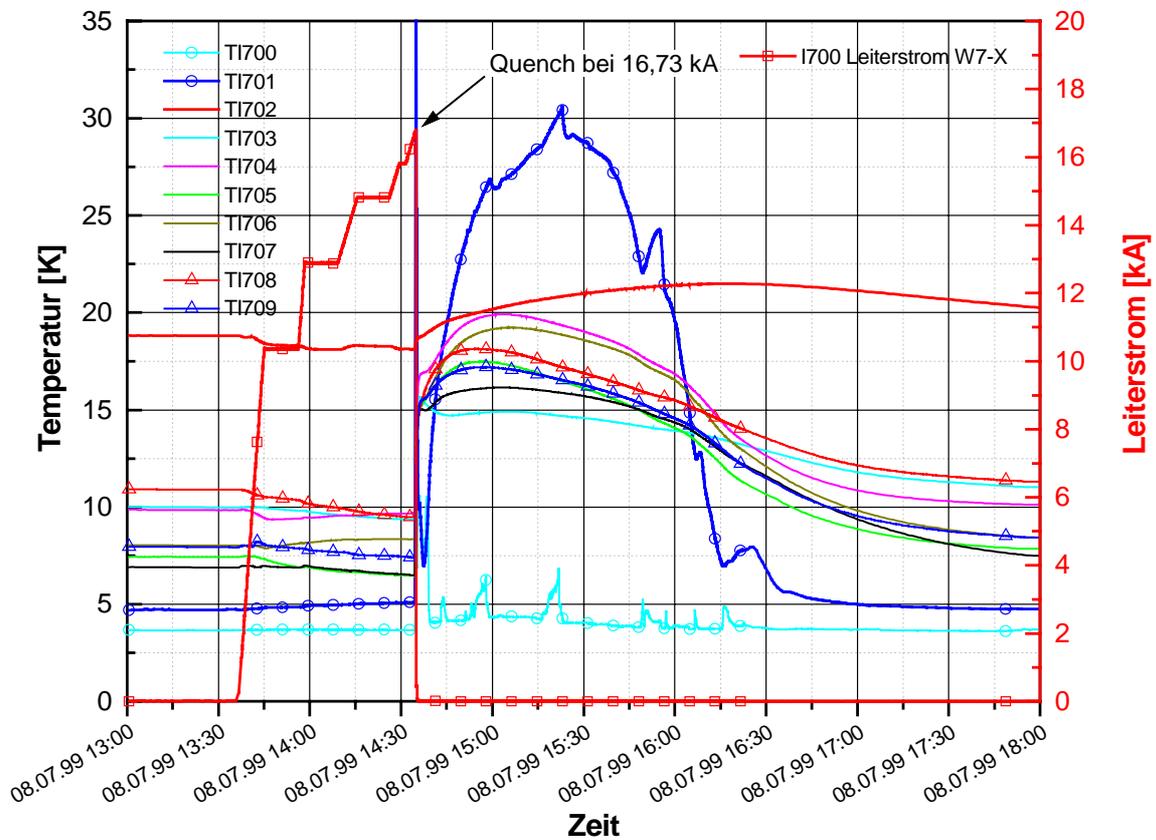


Abb. 2.3.2-4 Temperaturverteilung an der Wicklungs Oberfläche nach einem Quench im Lastfall C

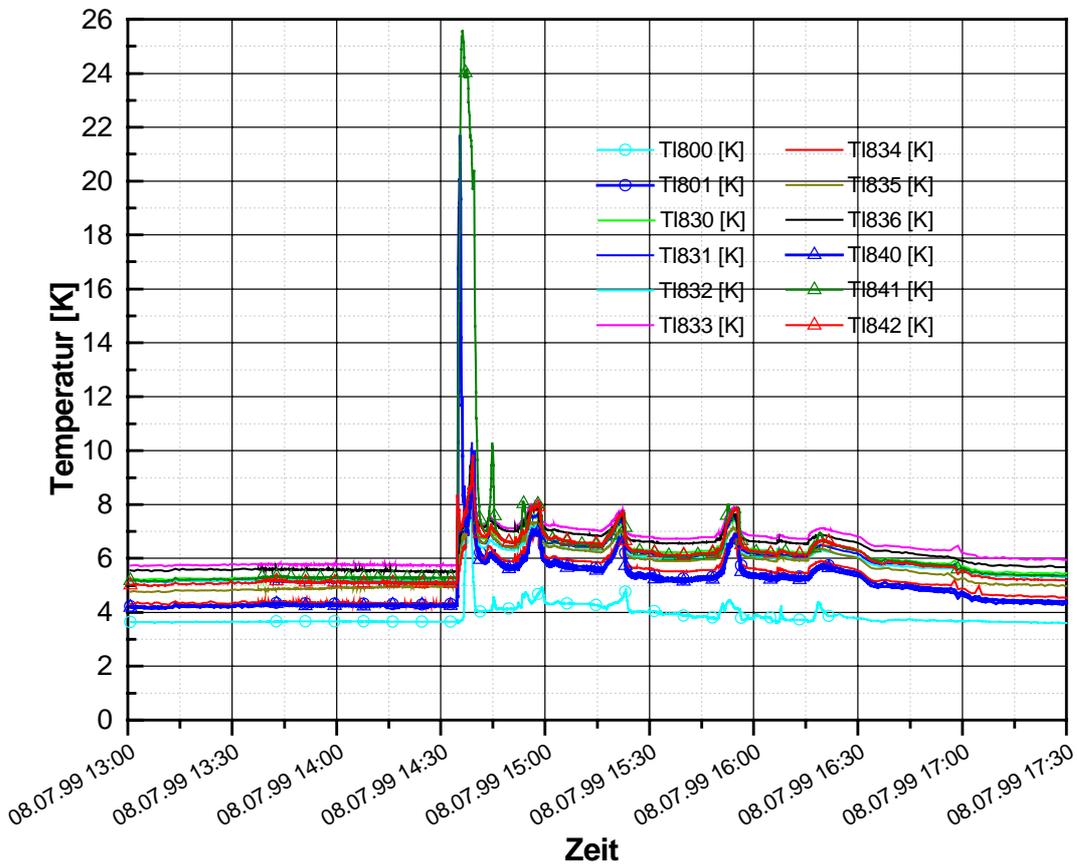


Abb. 2.3.2-5 Temperaturverteilung am Austritt der He- Kühlkanäle vom Gehäuse nach einem Quench im Lastfall C

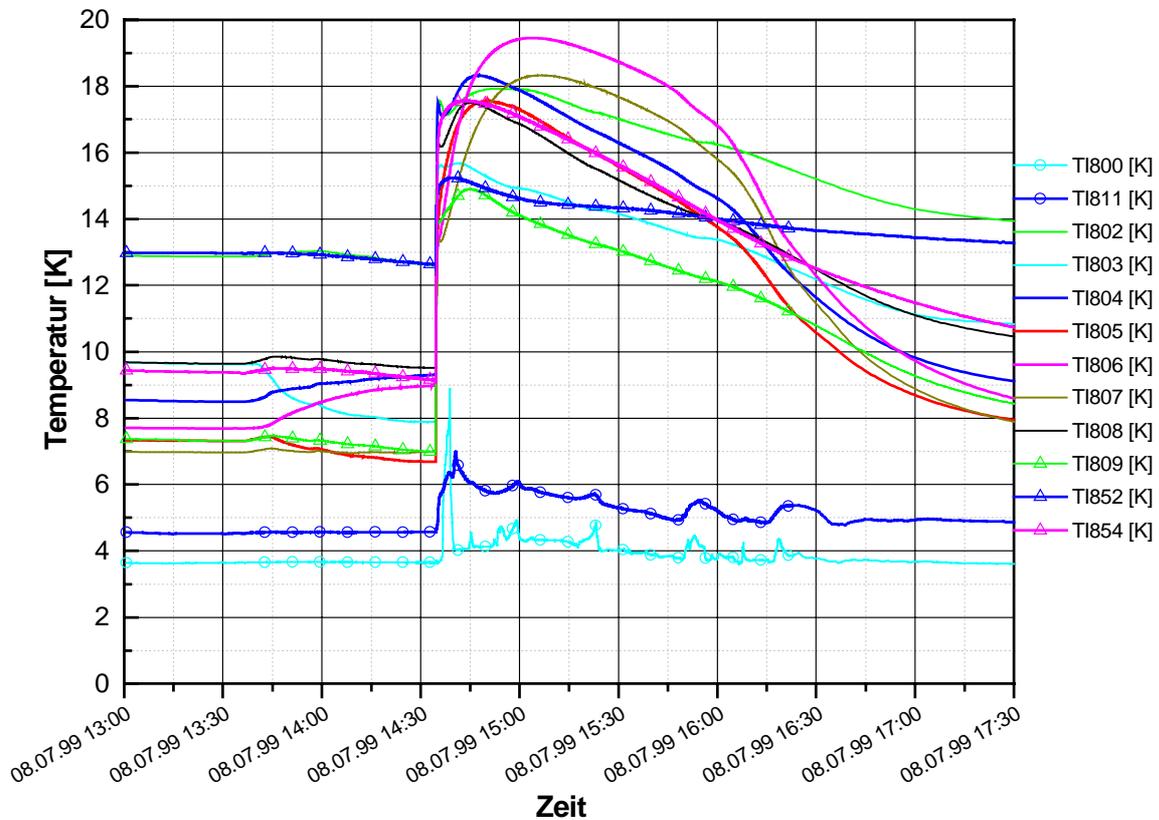


Abb. 2.3.2-6 Temperaturverteilung an der Gehäuseoberfläche und am Zwischenrahmen nach einem Quench im Lastfall C

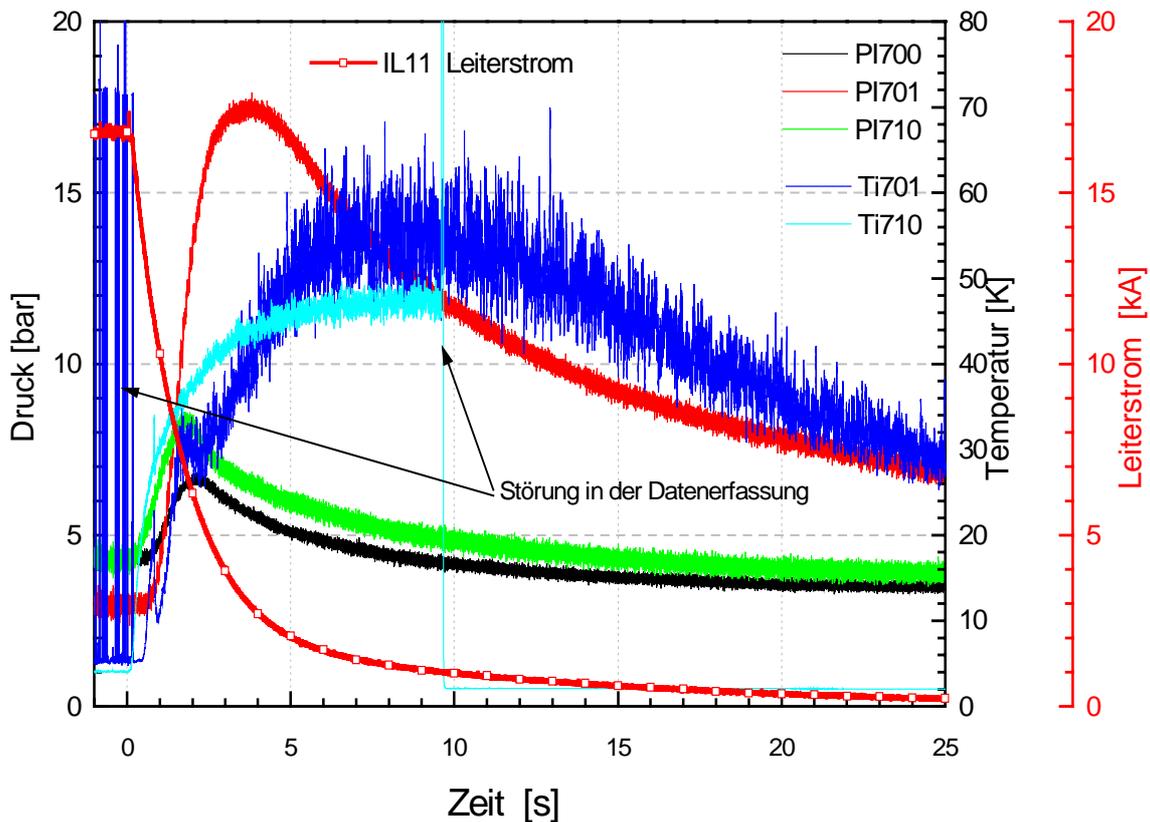


Abb. 2.3.2-7 Druck und Temperatur im Kühlsystem unmittelbar nach einem Quench im Lastfall C

2.4 Erwärmung der Testanordnung

Nach erfolgreichem Abschluß aller Tests gemäß Programm und Durchführung der vom IPP gewünschten Zusatztests wurde in Übereinstimmung mit IPP und Noell am 21. Juli 1999 um 11 Uhr mit der Erwärmung begonnen. Wie bei der Abkühlung war eine maximale Temperaturdifferenz von 40 K in der W 7-X DEMO Spule und im Zwischenrahmen einzuhalten. Erwartungsgemäß blieben die Lager kälter, so daß diese schon nach ca. 1 Tag aus der Temperatursteuerung herausgenommen wurden. Nachdem alle Temperatursensoren über 100 K anzeigten, wurde der Vakuumbehälter B300 mit N₂ bis zu einem Druck von 10 mbar geflutet, um die Erwärmung der Lager durch Restgaswärmeleitung zu beschleunigen. Wie in Abb. 2.4-1 zu sehen, konnte dies auch erreicht werden. Während der Wochenenden (Ende Juli und Anfang August) wurde die aktive Erwärmung gestoppt um Energie und Personal zu sparen, daher ist im Diagramm während dieser Zeit nur ein geringfügiger Temperaturanstieg zu sehen.

Im Zeitraum vom 3. - 5. August 1999 wurde ein Kaltfahrtstest für den späteren Betrieb der ITER TFMC gefahren. Bei diesem Test wurde die Kälteanlage gemeinsam mit dem Testobjekt kaltgefahren und ein He Massenstrom von 100 g/s realisiert wie er für die Abkühlung der TFMC notwendig ist. Hierdurch wurde die Erwärmung um ca. 1 Woche verzögert wie aus nachfolgendem Diagramm ersichtlich ist.

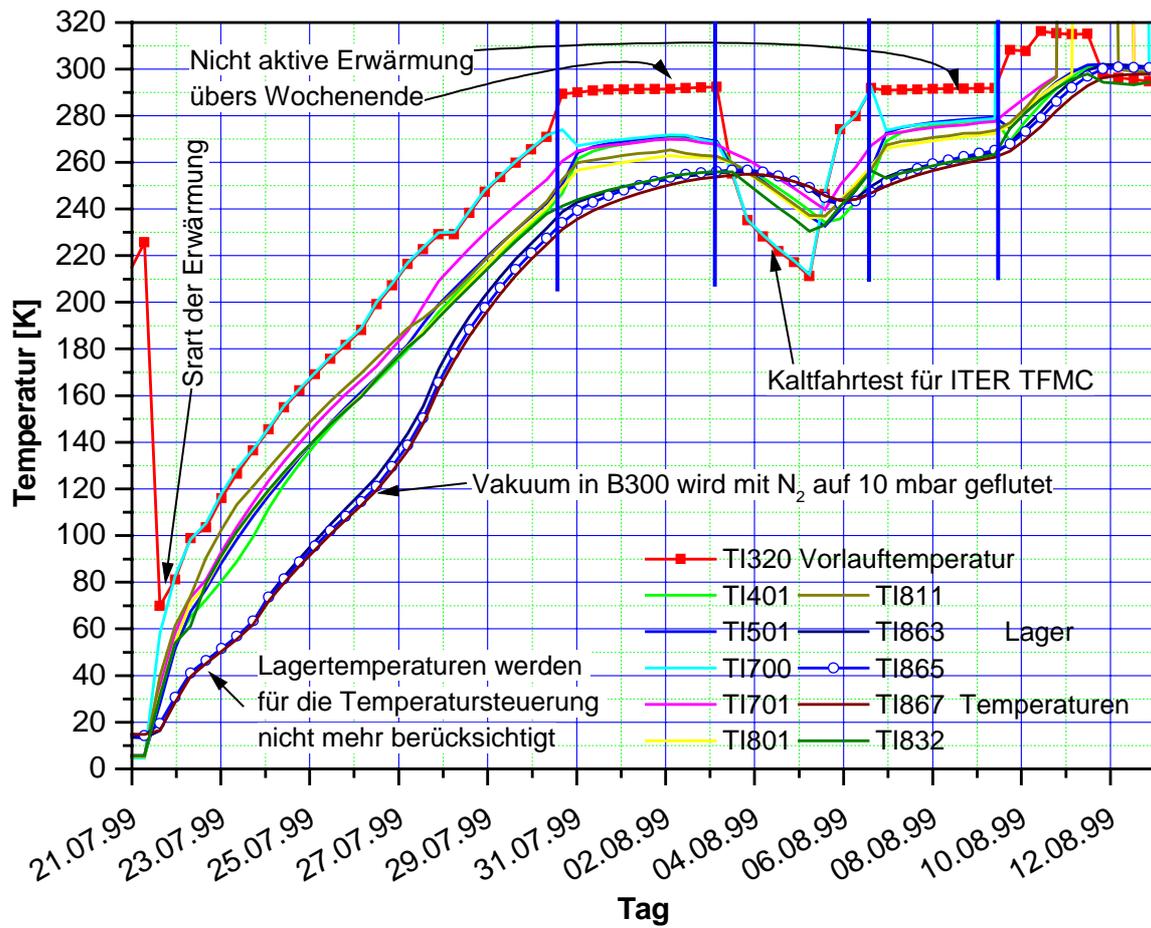


Abb. 2.4-1 Gesamte Erwärmung der W 7-X DEMO Spule

2.5 Zusammenfassung

Die Abkühlung von Wicklung und Gehäuse der W 7-X DEMO Spule war problemlos, die nicht optimal gekühlten Lager des Zwischenrahmens begrenzten die Abkühlgeschwindigkeit bei tieferen Temperaturen ($T > 80$ K). Trotzdem war eine sichere Abkühlung der gesamten Testeinrichtung mit einer Masse von 77 000 kg in 14 Tagen möglich.

Alle Tests der geplanten Lastfälle A, B, und C konnten erfolgreich durchgeführt werden. Während der gesamten Testdauer von 11 Wochen war der Betrieb aller Kryo- und Vakuumsysteme störungsfrei.

Der Test zeigte folgende Ergebnisse und Verbesserungsmöglichkeiten:

- Der stationäre Betrieb wurde durch die unzureichende Gehäusekühlung und den damit unerwartet hohen Wärmeeinfall in die Wicklung erschwert. Zusätzlich brachte der ungeklärte Wärmeeinfall in der Einspeisezone eine Temperaturerhöhung des Heliums vor Eintritt in die Wicklung. Beides konnte nur bedingt durch einen höheren He-Massenstrom ausgeglichen werden, da der hohe Druckverlust im Leiter dies begrenzte. Beim 3,8 K Betrieb führt zudem eine Entspannung zu einer Temperaturerhöhung auch ohne Wärmezufuhr.
- Bedingt durch die gewählte Doppellagenkühlung ist bei der W 7-X DEMO Spule nicht die niedere Eintrittstemperatur sondern die höhere Austrittstemperatur entscheidend für den maximal erreichbaren Spulenstrom. Hierdurch mußte der Betrieb auf eine möglichst niedere He- Austrittstemperatur optimiert werden.
- Die zum Teil während des gesamten Versuches offenen Rückschlagventile im Bypass zu den Venturis, verhinderten eine exakte Massenstrommessung in diesen Kühlkanälen. Dies erschwerte beim Betrieb die Beurteilung des Verhaltens der W 7-X DEMO Spule und bei der Auswertung die genaue Ermittlung der thermischen Last.
- Ein Leck in den Hüllrohren der Stromzuführungen führte während des Strombetriebes mit höherem Druck in den Stromzuführungen zur Verschlechterung des Isolationsvakuums. Dies beeinträchtigte den Betrieb zwar nicht, wie in 2.2.5.2-1 gezeigt, führte aber während es Tests immer wieder zu Diskussionen und zur Unsicherheit.

Das Quenchverhalten war problemlos und ohne He-Verluste beherrschbar und die Rückkühlung nach einem Quench ohne wesentliche Störung des Kühlsystems in 3-4 Stunden möglich.

Bei der Erwärmung konnte die schlechte Lagerkühlung zum Teil durch Flutung des Isoliervakuums mit N_2 ausgeglichen werden.

Die kryogene Eigenschaften der W 7-X DEMO Spule zeigten keine Veränderungen während der gesamten Tests von der Abkühlung, über den Testbetrieb mit entsprechenden Lastwechseln und Erwärmung nach dem Testbetrieb.

Die Dichtheit wurde vor der Abkühlung, bei Betriebstemperatur vor und nach den Tests sowie im wieder erwärmten Zustand geprüft. Die gemessene Leckrate lag außer beim Test am 20.7.99 immer unter dem spezifizierten Wert von $L < 10^{-6}$ mbar/s, aber bei diesem Test wurde das Meßergebnis durch das Leck in der Stromzuführung ($L = 1,3 \times 10^{-1}$ mbar l/s) verfälscht.

Insgesamt gesehen war es ein erfolgreicher und gelungener Test welcher nur durch gute Zusammenarbeit und engagierten Einsatz aller Beteiligten möglich war.

Teil 3: Elektromagnetisches Verhalten der W 7-X DEMO Spule

Teil 3: Elektromagnetisches Verhalten der W 7-X DEMO Spule

3.1 Quenchergebnisse der W 7-X DEMO Spule	175
3.1.1 Literatur	182
3.A Anhang	183
3.2 Das Quenchdetektions-System der W 7-X DEMO Spule	197
3.2.1 Das Quenchdetektions-System der Wicklung der W 7-X DEMO Spule	197
3.2.2 Das Quenchdetektions-System der supraleitenden Stromschienen der W 7-X DEMO Spule	199
3.2.3 Literatur	199
3.3 Sicherheitsentladung	202
3.3.1 Die Stromversorgung der W 7-X DEMO Spule beim Test in TOSKA	203
3.3.2 Die Stromversorgung der LCT DEMO Spule beim Test der W 7-X DEMO Spule in TOSKA	204
3.3.3 Literatur	205
3.4 Genauigkeit der Strommessung	209
3.4.1 Literatur	209
3.5 Ergänzende Untersuchungen	210
3.5.1 Bestimmung der Wärmeleitung Gehäuse – Wicklung	210
3.5.2 Bestimmung der Stabilitätsgrenze durch AC – Verluste der Wicklung	213
3.6 Bestimmung der Kontaktwiderstände	219
3.6.1 Doppellagenkontakte	219
3.6.2 Kontaktwiderstände zwischen den SL-Stromschienen und der W 7-X DEMO Spule bzw. den Stromzuführungen	220
3.6.3 Diskussion der Kontaktwiderstände	221
3.B Abschätzung der Kontaktwiderstände	223
3.7 Zusammenfassung	229

3.1 Quenchergebnisse der DEMO Spule

Während des Tests der W 7-X DEMO Spule sollten insgesamt drei Lastfälle gefahren werden, und zwar:

- ◆ Lastfall A: Einzelspulentest der DEMO Spule bis zum Quench
- ◆ Lastfall B: Betrieb der DEMO Spule mit 14.7 kA Leiterstrom im Hintergrundfeld der LCT-Spule (14 kA Leiterstrom)
- ◆ Lastfall C: Betrieb der DEMO Spule mit 18.3 kA Leiterstrom im Hintergrundfeld der LCT-Spule (Überlastfall)

Im Verlauf des Tests gab es zehn Quenche, die wie folgt eingeordnet werden können:

- ◆ 4 Quenche im Lastfall A, wobei in allen Fällen der Quench in der Doppellage DL1 (innere Lage) ausgelöst worden ist,
- ◆ 1 Quench im Lastfall B gerade beim Erreichen der Stromendwerte,
- ◆ 3 Quenche im Lastfall C, wobei in zwei Fällen der Quench in der Doppellage DL1 (innere Lage) ausgelöst worden ist und in einem Fall zunächst in DL3 und danach in DL2,
- ◆ 1 Quench der supraleitenden Stromschiene ((-)-Bus) während des Lastfalls A,
- ◆ 1 Quench in DL6 während des Sweep-Tests (Lastfall A).

Tabelle 3.1-1 enthält die zur Identifikation des jeweiligen Quenchs benötigten Parameter sowie die gemessenen Größen Quenchstrom I_Q und Ein- und Austrittstemperatur T_{in} bzw. T_{out} . Zusätzlich sind für alle Quenche die jeweilige Detektionszeit t_{det} und die Schaltzeit t_s angegeben.

Im folgenden wird der Quench, der während des Lastfalls B auftrat, zum Lastfall C gezählt, weil beide Fälle hinsichtlich Quenchorst und Kraftverteilung im Wicklungspaket praktisch gleich sind.

Zur Auswertung können prinzipiell folgende Messgrößen herangezogen werden:

1. Kompensierte Spannungen und Doppellagenspannungen (zur groben Bestimmung des Quenchorsts),
2. Druck- und Temperaturverläufe an Ein- und Austritt der einzelnen Doppellagen (zur Lokalisierung des Quenchursprungs)
3. Heliummassenströme an Ein- und Austritt der Doppellagen.

Alle in Frage kommenden Messgrößen sollten in der transienten Datenerfassung vorhanden sein, die mit einer wesentlich höheren Abtastrate (1 kHz) als die zyklische Datenerfassung (etwa 0,1 Hz) arbeitet. Um den Druckanstieg in der Wicklung während des Quenches zu reduzieren, sind die Rückschlagklappen parallel zu den am Eintritt der Doppellagen positionierten Venturirohren angeordnet. Bei Rückströmung öffnen sie dann. Das bedeutet, dass der durch die Venturirohre gemessene Heliummassenstrom während des Quenchs viel zu niedrig und deshalb nicht verwendbar ist. Zusätzlich bewirkt das kryotechnische

Interlocksystem der TOSKA-Anlage, welches für einen sicheren und störungsfreien Betrieb ausgelegt ist, dass die Drücke am Austritt der Doppellagen während des Quenchs durch Ventilöffnungen möglichst schnell abgebaut werden und somit nicht den theoretischen maximalen Wert erreichen. Die Temperaturverläufe an Ein- und Austritt der Doppellagen DL1 bis DL4 sind in der transienten Datenerfassung nicht beobachtbar sondern nur in der zyklischen Datenerfassung vorhanden und deshalb wegen zu geringer Ausleserate nur eingeschränkt benutzbar. Zusätzlich befinden sich die Temperatursensoren vor den Kontakten, d.h. den Spulenanschlüssen bzw. den Doppellagenverbindungen, was dazu führt, dass die Temperaturanstiege in den Kontakten, die durch die Joule'schen Verluste hervorgerufen werden, mitgemessen werden und die eigentlichen Leitertemperaturen verfälschen. Abbildung 3.1-0 zeigt schematisch die Anordnung der Temperatur- und Drucksensoren für eine ausgewählte Doppellage.

Somit bleiben nur noch die kompensierten Spannungen EK142, EK581 und EK9121, wobei das Vorzeichen bestimmt, welche der Doppellagen, deren Signale kompensiert werden, gequencht hat. Eine detaillierte Aussage über den Quenchursprung ist somit nicht möglich.

Die Abbildungen 3.1-1 und 3.1-2 zeigen die kompensierten Spannungen als Funktion der Zeit für den Lastfall A bzw. B/C. In Abbildung 3.1-3 sind die kompensierten Spannungen für die „Sonderfälle“ Bus-Quench und Quench während des Strom-Sweepens gezeigt.

Aus den gemessenen Spannungsanstiegen lassen sich sofort zwei Klassen von Quenchen ableiten:

- ◆ Nichtlineare Quenchausbreitung ohne Verzögerung (vorzugsweise Lastfall A) mit Quenchausbreitungsgeschwindigkeiten bis 90 m/s.
- ◆ Anfängliche lineare niedrige Quenchausbreitung und sich anschließende nichtlineare Quenchausbreitung (Lastfall B/C): Quenchausbreitungsgeschwindigkeiten von anfangs 6 – 10 m/s und danach zwischen 40 – 60 m/s.

Einen Quench der ersten Klasse erhält man, wenn der kritische Strom erreicht ist, weil dann die erzeugte Joule'sche Energie so groß ist, dass es zu einer stark beschleunigten Quenchausbreitung durch das unter Druck stehende Helium kommt (sog. Thermohydraulic quench back).

Ein Quench der zweiten Kategorie tritt dagegen auf, wenn der Leiter durch äußere Energiezufuhr partiell in die Normalleitung getrieben wird und der Quench sich erst aufbauen muß, weil in den benachbarten Kabelbereichen der kritische Strom noch nicht erreicht ist. Der Strom kann über die zwischen den Strands bestehende Querleitfähigkeit oder über die Kontakte umverteilt werden. Diese Signatur bekommt man z.B. auch dann, wenn man den Supraleiter durch einen externen Heizer quencht.

Beispiele für die beiden Quenchklassen traten z.B. beim Test der STAR-III Spule auf (Klasse 1 bei angehobener Temperatur bzw. bei höchstem Eigenfeld + STAR-Hintergrundfeld, Klasse 2 bei höchstem Eigenfeld).

Wir haben im folgenden drei verschiedene Darstellungen gewählt, um die erhaltenen Quenchströme mit den Erwartungswerten zu vergleichen, welche sich aus den Kurzprobenwerten der Einzeldrähte ergaben, die bei 4.2 K gemessen worden sind. Hierbei haben wir den Quench der Doppellage DL6, der während des Stromsweepens auftrat, nicht weiter betrachtet.

Der erwartete kritische Strom des Kabels als Funktion des Magnetfelds bei 4.2 K errechnet sich aus dem Mittelwert der Kurzprobenwerte der Einzeldrahtmessungen multipliziert mit der Anzahl der Drähte. Da der Temperaturanstieg entlang des Leiters einer Doppellage beträchtlich gewesen ist (s. Tabelle 3.1-1), ist die Kenntnis der Temperatur am Ort des Quenchs von zentraler Bedeutung für die Bewertung der Ergebnisse der Quenche. Hierzu benötigt man den Temperaturverlauf entlang des Leiters in der ersten Doppellage sowie die entsprechende Feldverteilung.

Die Maximalwerte des Magnetfeldes in der DEMO Spule hängen nun stark von der Substruktur des Wicklungspakets ab, weil der Abstand zwischen den stromtragenden Supraleiterkabeln jeder Windung vergleichbar mit dem Kabeldurchmesser ist. Durch den starken Temperaturanstieg in den Doppellagen ist nun nicht nur die Feldverteilung in der ersten Lage, sondern auch die entsprechende in der zweiten Lage wichtig, d.h. es müssen mindestens drei Lagen detailliert modelliert werden. Dies wurde am IPP mit dem Programm EFFI gemacht [3.1-1]. Es stellt sich folgendes heraus:

1. Das Maximalfeld für die beiden Lastfälle A und B/C ist wesentlich höher als die früher mit einer homogenen Stromdichte im Wicklungspaket berechneten Werte.
2. Der Maximalwert des Magnetfeldes liegt in der zweiten Windung der innersten Lage. Dies gilt sowohl für den Lastfall A als auch für B/C.
3. Der größte Wert des Magnetfeldes in der zweiten Lage liegt in der Windung 20, d.h. am Austritt der DL1. Er ist aber nur etwa 3% niedriger als der Maximalwert der innersten Lage.

In Tabelle 3.1-2 sind die Ergebnisse der Feldrechnungen für die Lastfälle A und C zusammengefasst. Zum Vergleich sind die Ergebnisse unter Verwendung einer homogenen Stromdichte im Wicklungspaket angegeben. Es sei noch erwähnt, dass die Verwendung eines rechteckigen Querschnitts bei der Modellierung der Einzelleiter eine leichte Überschätzung der Magnetfeldwerte bewirkt, weil der Querschnitt in Wirklichkeit rund ist. Wie groß der Effekt ist, ist nicht bekannt, man geht von etwa 2% aus. Abbildung 3.1-4 und 3.1-5 zeigen die Feldkonturen im Wicklungspaket für die Lastfälle A und C. Gleichzeitig sind Heliumein- und austritt durch Pfeile gekennzeichnet.

Mit Hilfe des Quenchcodes MAGS wurden die Verteilung der Komponente des Magnetfeldes senkrecht zur Stromrichtung entlang des Leiters der inneren Doppellage DL1 sowie die Temperaturverteilung bei gegebener Ein- und Austrittstemperatur bzw. den entsprechenden Drücken berechnet [3.1-2]. Hierzu wurde eine äußere Wärmelast so gewählt, dass die im Experiment erhaltenen Temperaturen erreicht wurden. Aus dem lokalen Magnetfeld ließ sich die kritische Temperatur T_C ermitteln. Die Abbildungen 3.1-6 und 3.1-7 zeigen die Temperaturdifferenz zwischen lokalem T_C und lokaler Temperatur T für die zwei unterschiedlichen Lastfälle. Man erkennt deutlich eine Sub-Struktur, die die Feldverteilung innerhalb einer Windung repräsentiert, sowie eine Grobstruktur, die die Feldvariation in axialer Richtung widerspiegelt. In Abbildung 3.1-8 ist das Temperaturprofil entlang des Leiters der DL1 aufgetragen. Wie erwartet, ist der Ort der höchsten Temperatur am Ende der innersten Lage, in der zweiten Lage geht die Temperatur infolge des Wärmetauschereffekts leicht zurück. Es fällt auf, dass in beiden Fällen die kleinste Temperaturdifferenz am Ende der DL1, also in der Nähe des Austritts liegt, d.h. Ort des höchsten Feldes und sehr hoher Temperatur (beinahe Maximaltemperatur) fallen zumindest für die Einzelspule (Lastfall A) und für die Twin-Konfiguration (LCT + W 7-X DEMO Spule, Lastfall C) zusammen, was natürlich eine sehr ungünstige Konstellation darstellt. Normalerweise strebt man eine Kühlung an, in welcher der Ort des höchsten Magnetfeldes dort liegt, wo die Temperatur am niedrigsten ist.

In Abbildung 3.1-9 und 3.1-10 sind die Heliumdrücke an Ein- und Austritt der Wicklung der DEMO Spule, PI700 bzw. PI701, für den Lastfall A bzw. C während des Quenches als Funktion der Zeit aufgetragen. Als Beispiel wurden die Quenche #3 und #8 ausgewählt. Das sind die Quenche der beiden Lastfälle mit den höchsten Quenchströmen. Man sieht deutlich, dass der Druckanstieg am Austritt wesentlich stärker ist als am Eintritt. Auch dies bestätigt die Ergebnisse der Rechnungen. Eine Ausnahme bildet der Quench #10, auf den wir am Ende des Abschnitts eingehen werden.

Auf Grund der Ergebnisse der Rechnungen mit MAGS wurde im folgenden die Austrittstemperatur aus den Doppellagen als repräsentative Temperatur für den Ort des Quenchs verwendet. Zusätzlich wurden die aus Rechnungen mit EFFI erhaltenen und in Teil 1 des Abschlußberichts genannten Maximalfeldwerte für Einzelspulen- und kombiniertem Betrieb durch die oben genannten Werte ersetzt. Aus den so erhaltenen maximalen Magnetfeldwerten wurde die kritische Temperatur abgeleitet: Die kritische Temperatur ist vonnöten, um die gemessenen Quenchströme auf entsprechende Werte bei 4.2 K umzurechnen bzw. um aus den erwarteten kritischen Strömen bei $T = T_{out}$ und den gemessenen Quenchströmen die erwartete „Current sharing“ Temperatur zu berechnen:

$$T_C = T_{C0} (1 - B_{out}/B_{c20})^{0.59}, \text{ mit } T_{C0} = 9.3 \text{ K und } B_{c20} = 14.5 \text{ T,}$$

$$I_Q(4.2) = (T_c - 4.2)/(T_c - T_{out}) I_Q(T_{out}),$$

$$T_{cs} = T_c - (T_c - T_{out}) I_Q(T_{out}) / I_c(T_{out}).$$

In Tabelle 3.1-3 sind die abgeleitenden Größen maximales Magnetfeld B_{max} , Magnetfeld am Austritt B_{out} , kritische Temperatur T_c , auf 4.2 K umgerechneter Quenchstrom $I_Q(4.2)$, erwarteter kritischer Strom bei 4.2 K $I_c(4.2)$ und erwartete Current-sharing Temperatur T_{cs} aufgeführt. Zusätzlich ist noch die Lorentzkraft $B_{out} \times I_Q$ angegeben. Im Fall des Quench der SL-Stromschiene wurde als Maximalwert des Magnetfeldes dem Hintergrundfeld von 0.74 T das Eigenfeld bei 19.18 kA von 0.76 T betragsmäßig überlagert.

Der Einfluss der Widerstände der Doppellagenverbindungen sowie der Endverschlüsse auf die Temperatur am Ein- bzw. Austritt des Leiters wurde mit Hilfe der im Abschnitt 3.6 angegebenen Widerstandswerte am Beispiel des höchsten im Experiment gefahrenen Leiterstroms von 19,88 kA abgeschätzt:

$$\dot{Q} = RI^2 = \dot{m} (H_2 - H_1),$$

wobei \dot{m} der Heliummassenstrom in der jeweiligen Doppellage und H_1 bzw. H_2 die Enthalpien am Ein-/Austritt in die entsprechende Doppellagenverbindung sind. Für die Doppellage DL1 erhält man eine Enthalpiedifferenz von 135 J/kg (Eintritt DL1) und 132 J/kg (Austritt DL1). Hieraus errechnet sich ein Temperaturanstieg von 4,07 K auf 4,11 K am Eintritt bzw. eine Temperaturabsenkung von 5,0 K auf 4,98 K am Austritt. Diese Temperaturdifferenzen von 0,04 K bzw. 0,02 K sind für die folgende Auswertung vernachlässigbar. Wegen des wesentlich größeren Widerstands der Doppellagenverbindung 5-6 gilt das natürlich nicht für die beiden beteiligten Doppellagen, wobei zu Gute kommt, dass die „schlechte“ Verbindung am Austritt der beiden DL liegt. Für die DL6 errechnet sich ein Temperaturanstieg von 4,21 K auf 4,30 K am Eintritt bzw. eine Temperaturabsenkung von 5,3 K auf 4,98 K am Austritt, was zu Temperaturdifferenzen von 0,09 K bzw. 0,32 K führt. Hierbei wurde der Einfluss der Einspeisezone nicht berücksichtigt (siehe Teil 2.2.5).

Abbildung 3.1-11 zeigt den erwarteten kritischen Strom bei 4,2 K als Funktion des Magnetfeldes sowie die auf 4,2 K umgerechneten Quenchströme. Zum Vergleich ist der Nennwert für W 7-X Torusbetrieb, 16 kA, mit eingezeichnet. Da die eingetragenen Quenchströme auf 4,2 K umgerechnete Werte sind, liegen sie klarerweise nicht auf der Kennlinie des Magnetsystems. Aber alle Quenche des Lastfalls A sowie der höchste Wert des Lastfalls C liegen auf einer Geraden, die etwa 90% der erwarteten Relation entspricht. Die anderen Werte des Lastfalls C, auch der Quench der DL3/DL2 liegen unterhalb dieser Linie. Das sind nun genau die Quenche, die zu der zweiten der oben beschriebenen Klassen gehören. Dies gilt insbesondere für den Quench #10, der bei einer abgesenkten Austrittstemperatur auftrat.

Abbildung 3.1-12 zeigt die gemessenen Quenchströme über den bei entsprechendem Magnetfeld und entsprechender Austrittstemperatur umgerechneten kritischen Strömen. Auch liegen die Quenche des Lastfalls A knapp unter der Winkelhalbierenden, die den Fall $I_Q(T_{out}) = I_C(T_{out})$ repräsentiert. Im Gegensatz dazu liegen zwei der Quenche des Lastfalls C unterhalb denjenigen des Lastfalls A. Zum Vergleich sind drei weitere Kurven eingezeichnet: Der sogenannte „limiting current“, d.h. der Strom, der $Stekly = 1$ entspricht sowie eine Kurve, die den Quenchströmen im Fall einer äußeren Störung von 10 mJ/cm^3 für eine Zeitdauer von 0.5 ms entspricht. Das bedeutet, dass die gemessenen niedrigeren Quenchströme des Lastfalls C gegenüber denjenigen des Lastfalls A erklärt werden können, wenn man eine äußere Störung von 10 mJ/cm^3 einrechnet. Da wir uns in den betrachteten Fällen schon bei etwa 80% des kritischen Stroms befinden, d.h. im Stabilitätsbereich des sogenannten „poor-cooled-regime“, wo nur noch die Enthalpie des Supraleiterkabels beiträgt, ist eine solch geringe Stabilitätsmarge verständlich.

Ein Sonderfall stellt der Quench der SL-Stromschiene dar, der sich im Bereich des „limiting current“ befindet. Dazu wird später noch etwas gesagt werden.

Abbildung 3.1-13 stellt die dritte Form der Darstellung der Ergebnisse dar. Hier ist die Temperaturdifferenz zwischen erwarteter „Current-sharing“ Temperatur T_{CS} und der Austrittstemperatur T_{out} als Funktion der Quench-Nummer aufgetragen. Man erkennt, dass im Lastfall A die Temperaturdifferenz zwischen 0.1 und 0.3 K beträgt. Der höchste Quench des Lastfalls C bedeutet eine Temperaturdifferenz von weniger als 0.1 K. Die beiden anderen Quenchwerte des Lastfalls C sowie der der DL3 liegen bei 0.4 K – 0.6 K. Noch weiter weg liegt in dieser Darstellung natürlich der Quenchwert der SL-Stromschiene.

Über die möglichen Ursachen einer externen Störung lässt sich folgendes sagen:

- ◆ Strandbewegungen sind unwahrscheinlich, weil sie durch die Lorentzkraft induziert wären, die jedoch im Lastfall A sogar größer war als in C (siehe Tabelle 3.1-3).
- ◆ Quench durch äußere Wärmelast ist ebenfalls auszuschließen, weil damit der Unterschied zwischen den Lastfällen A und C nicht erklärt werden kann, zumal keine Unterschiede hinsichtlich des Quenchorts und damit der Temperatur bestehen.
- ◆ Eine Bewegung des gesamten Wicklungspakets erscheint möglich, weil im nachhinein auch Schleifspuren an den Auflageflächen der LCT-Spule gefunden wurden. Dies wäre auch deshalb möglich, weil die Richtung der Lorentzkraft im Lastfall A verschieden von der in C gewesen ist. Das Wicklungspaket könnte sich also durchaus im Lastfall C bewegt haben. Zumal vor dem letzten Quench #10, der bei abgesenkter Temperatur durchgeführt worden ist, ein Quench des Lastfalls A (Sweeping und Quench von DL6) auftrat, d.h. die Kräfteverteilung war unterschiedlich. Es sieht sogar so aus, als ob die Spule leicht trainiert hätte: der zweite der beiden ersten Quenche im Lastfall C war höher als der erste und auch höher als der dritte. Als zusätzlichen Hinweis für eine Bewegung

des Wicklungspakets kann der Quench der DL3/2 des Lastfalls C dienen, da Setzeffekte auch an anderer Stelle des Wicklungspakets auftreten können. Vor dem dritten Quench wurde nochmals der Lastfall A gefahren, wodurch die Wicklung sich wieder anders in das Gehäuse eingepreßt hat. Die Schwachstelle könnte somit die Bettung des Wicklungspakets im Gehäuse sein (siehe Anhang 3.A und Teil 4).

Eine wichtige Frage ergibt sich aus den genannten Ergebnissen, wenn daraus Schlüsse für den Betrieb der Spulen in der Maschine gezogen werden sollen: Ist die Kraftverteilung während des Lastfalls C repräsentativ für die Torusanordnung des W 7-X?

- ◆ Wenn ja, dann ergibt sich die Frage nach der Reserve, die das Spulensystem im Schiefastfall hat. Während des Tests in der TOSKA-Anlage wurde bezüglich der mechanischen Spannungen etwa 100% der im sog. „low shear“-Fall zu erwarteten Werte erreicht, jedoch nicht mehr. Nun wird in den Serienspulen ein anderer Leiter mit höherem Cu:NbTi Anteil verwendet. Andererseits ist ein Teil der höheren Marge durch die 10%ige Reduktion der Windungszahl und der damit verbundenen Erhöhung des Leiterstroms wieder aufgebraucht worden.
- ◆ Wird die oben genannte Frage verneint, sind die Ergebnisse des Test nicht übertragbar auf die Maschine, d.h. es können keine Voraussagen für die Marge der Spulen im Torusverband gemacht werden.

Die Ergebnisse des DEMO Spulentests wurden dennoch benutzt, um die Stabilitätsgrenze für die Serienspulen im Torusverband abzuschätzen. Hierbei wurde das Programm HESTAB verwendet und die Leiterdaten benutzt, die für die STAR-IV Spule galten [3.1-3]. Als Eintrittstemperatur in die Wicklung wurde 3.8 K, als Temperaturdifferenz zwischen Ein- und Austritt 1 K angenommen. Alle Rechnungen wurden für einen Störpuls von 0.5 ms Dauer gemacht. Für diese Störzeitdauer erhält man die geringste Energiemarge. In allen HESTAB-Rechnungen wurde die Enthalpie der Aluminiumhülle nicht berücksichtigt. Dies ist deshalb gerechtfertigt, weil die Enthalpie des Supraleiterkabels im Bereich von 1 – 2 mJ/cm³ liegt und Aluminium infolge seiner wesentlich geringeren Dichte als z.B. Kupfer oder Edelstahl trotz des wesentlich größeren Querschnitts auch nur in der gleichen Größenordnung beiträgt. Abbildung 3.1-14 zeigt die berechnete Stabilitätsgrenze kurz vor dem Quench der DEMO Spule für alle 10 Quenche. Als Quench #12 und #13 wurden die erwarteten Stabilitätsgrenzen der Serienspulen für den Standardfall (16.15 kA, 6.2 T) sowie den „Low shear“ Fall (18.4 kA, 6.7 T) eingezeichnet. Als kritischer Strom des Supraleiters wurde der von EM-LMI gemessene Strandwert multipliziert mit 243 verwendet. Weiter wurde angenommen, dass die Feldverteilung in den Serienspulen der der DEMO Spule vergleichbar ist. Es zeigt sich, dass der Standardfall eine genügende Marge hat (56.5 mJ/cm³), was für den „Low shear“ Fall leider nicht gilt (14.2 mJ/cm³). Dabei schlägt der Temperaturgradient voll zu Buche. Da die Temperaturerhöhung zum größten Teil durch eine

erhöhte Wärmelast durch das Spulengehäuse herrührt, was an dessen ungenügender Kühlung liegt, sollte bei den Serienspulen großer Wert auf geringere Wärmelast gelegt werden. Zusätzlich bedeutet der „Low shear“ Fall eine höhere Kraftbelastung (123 kN/m) als im Lastfall C der DEMO Spule (maximal 114 kN/m). Zusätzlich wurde noch jeweils eine Rechnung mit einer Temperaturerhöhung in der Doppellage von 0.5 K für beide Fälle durchgeführt und für den Standardfall 120 mJ/cm³ und für den „Low shear“ Fall 25 mJ/cm³ erhalten (siehe Abbildung 3.1-14). In Abbildung 3.1-15

Ein spezieller Fall ist der Quench #5, d.h. der Quench des (-)-Pols der supraleitenden Stromschiene. Abbildung 3.1-16 zeigt den Spannungsabfall über beide Stromschienen als Funktion der Zeit. Zusätzlich ist noch der Spulenstrom eingezeichnet. Während der (+) Pol keinerlei Spannungsabfall zeigt, erkennt man beim (-)-Pol etwa 3 s vor dem Quenchtrigger ein kleines resistives Signal, das nach etwa 1 s wieder verschwindet. Etwa 0.4 s vor dem Quenchtrigger steigt dann die resistive Spannung exponentiell an. Offensichtlich hat es vor dem „Thermal runaway“ bereits eine resistive Zone gegeben, die wieder geschrumpft ist, ein sogenanntes „Recovery“. Wie aus Abbildung 3.1-12 hervorgeht, liegt der Quenchstrom wenig oberhalb des sog. „limiting current“, also des Grenzstroms für das Stekly-Kriterium $\alpha = 1$, wo der gesamte Strom wegen der guten Kühlung ohne Quench im elektrischen Stabilisierungsmaterial fließen kann. Wahrscheinlichster Eintrag einer Störenergie könnte eine Leiterbewegung eventuell mit Isolations- oder Bandagierungsablösung sein. Für letzteres spricht die Einseitigkeit des Energieeintrags. Beide Leiter waren auf eine größere Länge mechanisch miteinander verbunden.

Ein besonderer Fall ist der Quench #10 insofern, als die Heliumdrücke an Ein- und Austritt der Wicklung während des Quenchs fast nicht angestiegen sind. Abbildung 3.1-17 zeigt die zeitliche Entwicklung der Heliumdrücke. Das gleiche gilt im übrigen auch für die Temperatur am Eintritt. Eine Erklärung steht bisher noch aus.

3.1.1 Literatur

[3.1-1] E. Harmeyer, private Mitteilung

[3.1-2] R. Meyder, private Mitteilung

[3.1-3] K.P. Jüngst, R. Heller und W. Maurer, „Test der W 7-X Modellspule IV in STAR: Abschlussbericht“, Interner Bericht F1300024012/D, September 1998, unveröffentlicht

3.A Anhang

Die Schiefelast der Lastfälle B/C stellt eine extreme Belastung für die Spule dar, die unserer Ansicht nach im Torus-Betrieb nur als Störfall auftreten wird und eine sofortige Abschaltung nach sich ziehen sollte. Bei den Quenchen der Lastfälle B/C wurden deutliche Schlaggeräusche im Vakuumbehälter festgestellt. Daraus lässt sich schließen, dass sich im Rahmen gegenüber der LCT-Spule oder in den Widerlagern der DEMO Spule mechanische Spannungen aufgebaut haben, die kurzzeitig abgebaut wurden. Es ist anzunehmen, dass dieser Abbau zu einer anderen Verformung der DEMO Spule geführt hat. Diese ist ohne Zweifel mit Reibungskräften zwischen Wicklung und Gehäuse und damit mit Energieeintrag in die Wicklung verbunden.

Es kann nun folgende Abschätzung gemacht werden: Die mittlere Druckspannung ist mit etwa 5 MPa zwar sehr niedrig, allerdings treten Spitzenwerte von bis zu 100 MPa auf. Bei Annahme einer lokalen Flächenpressung zwischen Wicklung und Gehäuse von 100 N/mm^2 und einen Reibungsfaktor von 0,3 und einer Verschiebung von 0,1 mm wird eine Reibungsarbeit von $30 \text{ N/mm}^2 \times 0,1 \text{ mm} = 3 \text{ mJ/mm}^2$ erzeugt. Bei einer Fläche von 100 mm^2 resultiert ein Energieeintrag von 300 mJ. Bei 8 mm Isolationsdicke folgt ein Volumen von 800 mm^3 , was einer Masse von 1,8 g STYCAST entspricht (Dichte von STYCAST = $2,3 \text{ g/cm}^3$). Dies ergibt eine Enthalpie von 375 mJ/cm^3 oder 163 mJ/g, die das Volumen theoretisch auf 9 K bringen kann. Ferner ist noch zu berücksichtigen, dass die thermische Diffusivität der Aluminium-Hülle mehr als einen Faktor 200 größer ist als die für Edelstahl, was dazu führt, dass die erzeugte Wärme um den gleichen Faktor schneller in den Supraleiter gelangt. In unserem Fall sind das weniger als 1 ms.

Tabelle 3.1-1: Identifikationsparameter und Meßgrößen

V/P/T/S = Triggeridentifikation, t_{det} = Quenchdetektionszeit, t_s Schaltzeit (bis 12.7.99 nicht verwendbar), I_Q = Quenchstrom, T_{in} , T_{out} = Ein-/Austrittstemperatur der gequenchten Doppellage

Quench-Nr.	Test-Nr.	Datum	Zeit	V / P / T / S	Last-fall	Quench-Ort	t_{det} [s]	t_s [s]	I_Q [kA]	T_{in} [K]	T_{out} [K]	Bemerkung
1	76	24.06.99	18:16:36	8 8 1 4	A	DL1	0,32	2,22	18,49	4,8	5,37	bei Stromanstieg v. 17,9 kA auf 19,1 kA mit 5 A/s
2	78	25.06.99	14:01:09	8 9 1 2	A	DL1	0,31	2,19	18,75	4,81	5,34	bei Stromanstieg v. 17,0 kA auf 19,1 kA mit 5 A/s
3	87	29.06.99	17:52:29	8 9 1 9	A	DL1	0,33	2,22	19,88	4,07	5,00	bei Stromanstieg v. 19 kA auf 21 kA m. 5 A/s
4	94	30.06.99	16:22:26	8 11 1 1	B	DL1	0,60	2,22	14,78	4,16	5,02	bei Stromanstieg v. 10,3 kA auf 14,7 kA m. 20 A/s
5	97	01.07.99	15:40:50	8 11 1 3	A	Bus (-)	0,30	2,22	19,18	4,36	5,98	im Plateau nach 12 min. (geplant gem. 5.6. Testprogramm.)
6	103	02.07.99	12:40:46	8 11 1 14	A	DL1	0,37	2,21	19,54	4,04	5,01	bei Stromanstieg v. 19 kA auf 20 kA m. 5 A/s (Wiederholung mit erhöhtem Massenstrom)
7	116	07.07.99	19:15:35	8 15 1 1	C	DL3	0,72	0,18	16,10	4,12	5,09	bei Stromanstieg v. 15,7 kA auf 16,7 kA m. 5 A/s
8	122	08.07.99	14:34:13	8 15 1 9	C	DL1	0,30	0,17	16,73	4,08	5,02	unmittelbar nach Erreichung des 16,7 kA - Plateaus; Austrittstemperatur instabil
9	129	13.07.99	17:48:14	8 15 1 31	A	DL6	0,26	0,18	16,71	4,18	5,55	zykl. Dauerstromtest m. 16,6 kA +/- 110A (350A/s)
10	135	15.07.99	11:52:52	8 15 1 34	C	DL1	0,39	0,18	16,13	4,09	4,90	bei Stromanstieg v. 15,7 kA auf 16,7 kA m. 5 A/s

Tabelle 3.1-2: Hauptergebnisse der Magnetfeldrechnungen für die Lastfälle A und C. Der Leiterstrom in der DEMO Spule betrug 16.7 kA (Lastfall A) bzw. 14.7 kA (Lastfall B/C) und in der LCT-Spule 14 kA

	B_{\max} (Wicklung 2) in DL1 [T]	B_{\max} (Wicklung 10) in DL1 [T]	B_{\max} in DL 1 bei homogener Stromdichte [T]
Lastfall A	5,392	5,232	5,08
Lastfall C	6,398	6,194	6,068

Tabelle 3.1-3: Hauptergebnisse der Quenchruns

I_Q = Quenchstrom, B_{\max} = maximales Magnetfeld (Wicklung 2), B_{out} = Magnetfeld am Austritt DL1 (Wicklung 20), T_{in} , T_{out} = Ein-/Austrittstemperatur der gequenchten Doppellage, T_C = kritische Temperatur für $B = B_{\text{out}}$, T_{CS} = erwartete „current sharing“ Temperatur, $I_Q(4.2 \text{ K})$ = Quenchstrom, auf 4,2 K umgerechnet, $I_C(4.2 \text{ K})$ = erwarteter kritische Strom für $B = B_{\text{out}}$, $I_Q \times B$ = erreichte Linienkraft

Quench -Nr	Last fall	Quench ort	I_Q [kA]	B_{\max} [T]	B_{out} at T_{out} [T]	T_{in} [K]	T_{out} [K]	T_C [K]	T_{CS} [K]	$I_Q(4.2 \text{ K})$ [kA]	$I_C(4.2 \text{ K})$ [kA]	$I_Q \times B$ [kN/m]
1	A	DL1	18,49	5,97	5,79	4,8	5,37	6,88	5,55	32,77	37,16	107
2	A	DL1	18,75	6,05	5,87	4,81	5,34	6,85	5,49	32,93	36,50	110
3	A	DL1	19,88	6,42	6,23	4,07	5,0	6,68	5,21	29,36	33,54	124
4	B	DL1	14,78	6,42	6,22	4,16	5,02	6,68	5,59	22,07	33,62	92
5	A	Bus(-)	19,18	1,5*	1,5*	4,36	5,98	8,72	7,52	31,64	72,47	29
6	A	DL1	19,54	6,31	6,12	4,04	5,01	6,73	5,29	28,74	34,44	120
7	C	DL3	16,1	6,4	6,19	4,12	5,09	6,70	5,51	25,02	33,86	100
8	C	DL1	16,73	7,03	6,81	4,08	5,03	6,40	5,12	26,89	28,76	114
9	A	DL6	16,71	n.a.	n.a.	4,18	5,55	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
10	C	DL1	16,13	6,85	6,63	4,09	4,9	6,48	5,27	23,25	30,24	107

* = Eigenfeld + Hintergrundfeld

n.a. = nicht verfügbar

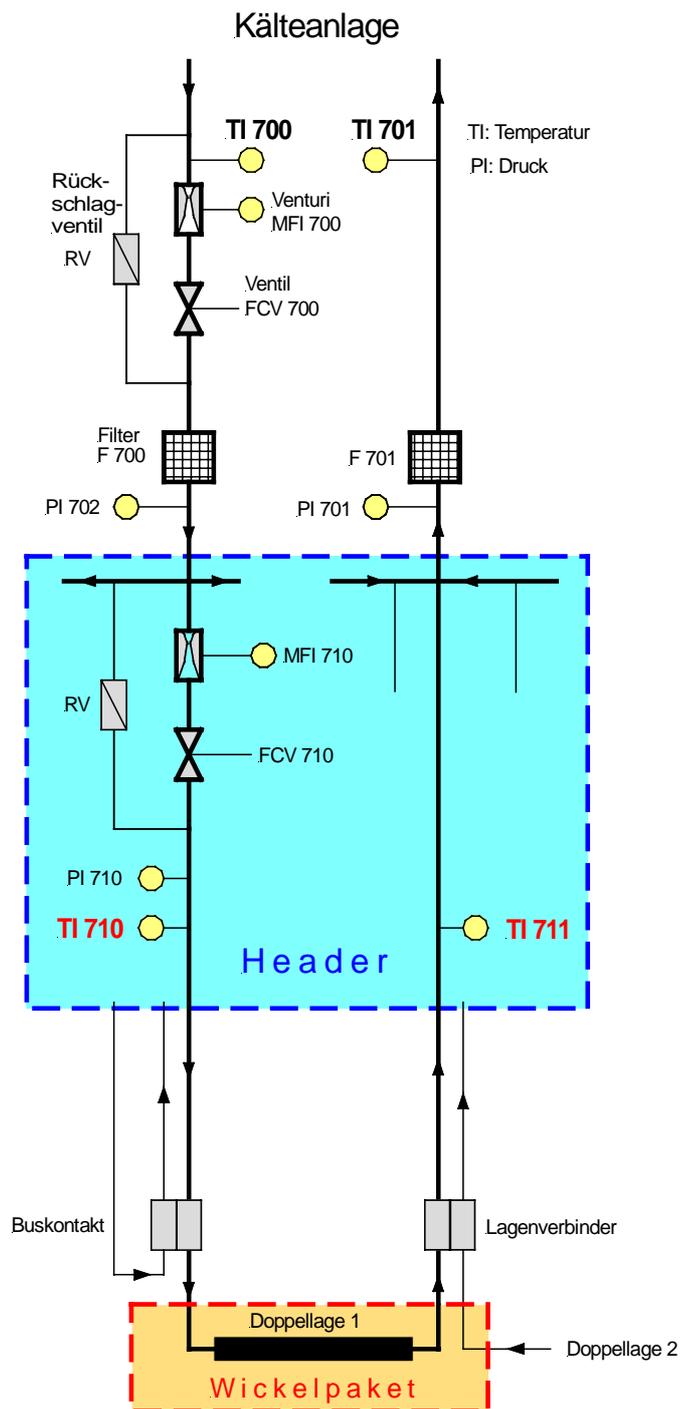


Abbildung 3.1-0: Schematische Anordnung der verschiedenen Sensoren im Bereich der Einspeisezone und der Doppellage DL1

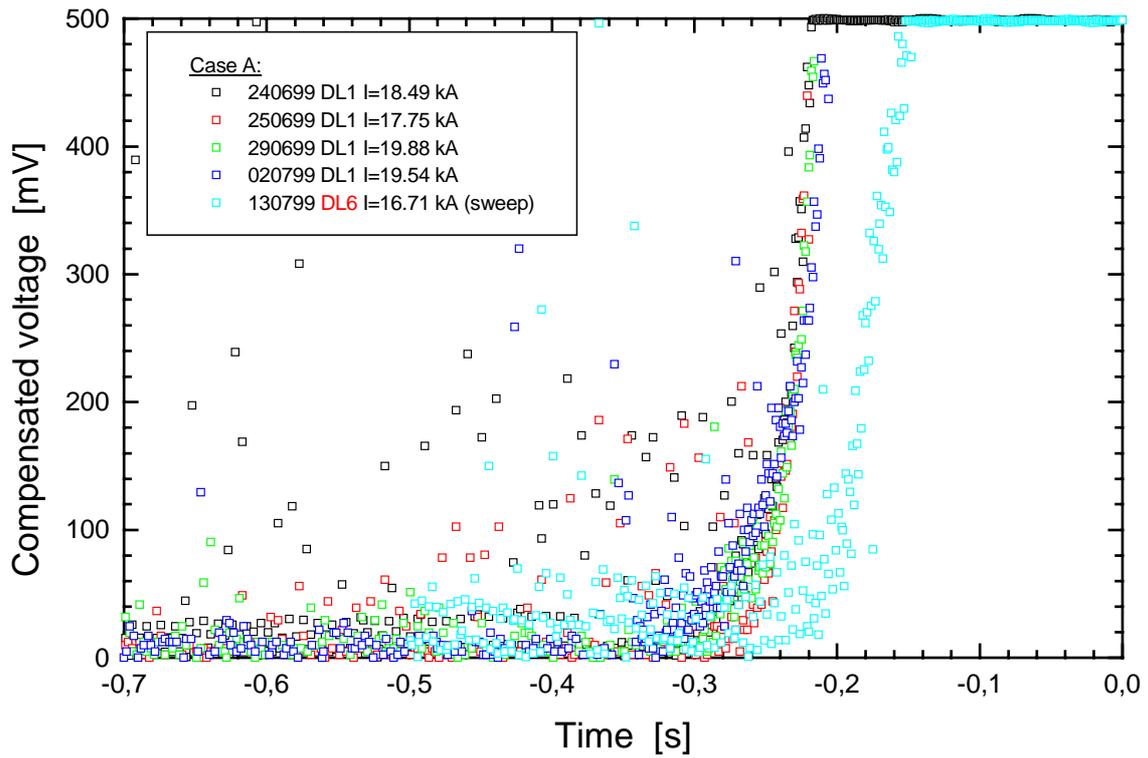


Abbildung 3.1-1: Kompensierte Doppellagenspannungen des Lastfalls A als Funktion der Zeit. Die Abtastrate betrug 1 kHz.

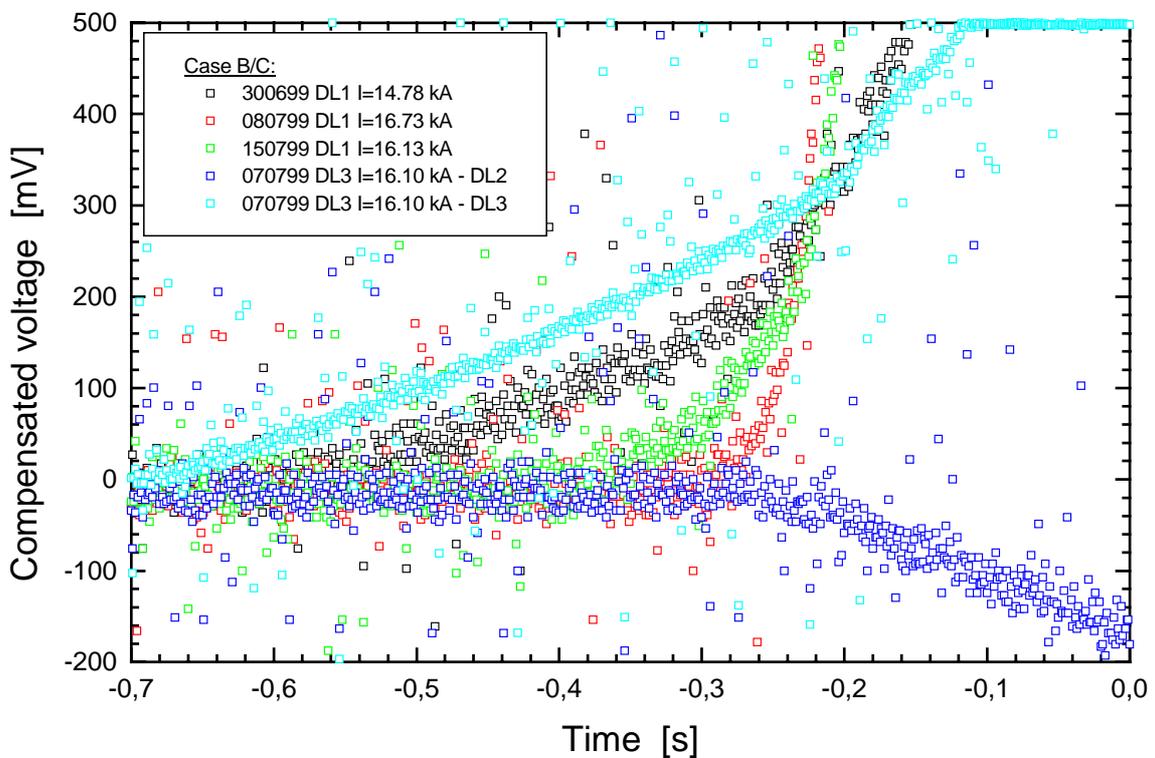


Abbildung 3.1-2: Kompensierte Doppellagenspannungen des Lastfalls C als Funktion der Zeit. Die Abtastrate betrug 1 kHz.

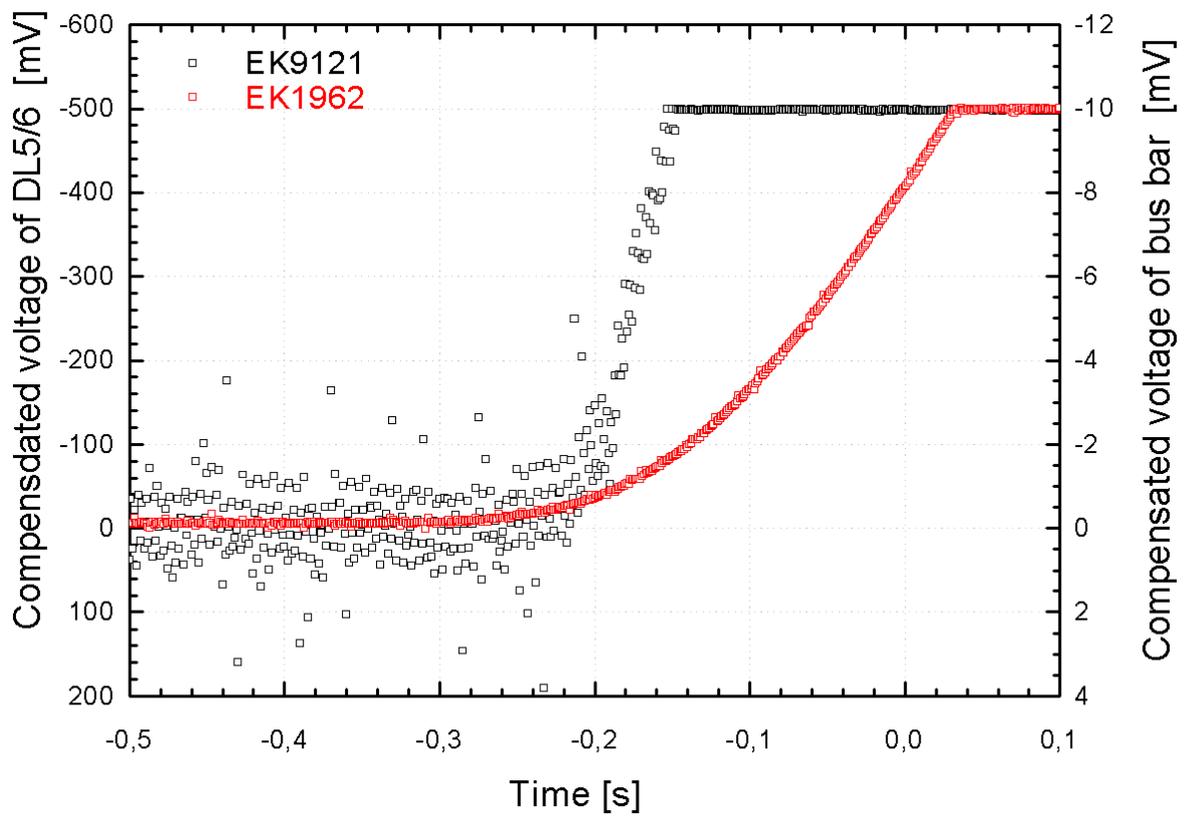


Abbildung 3.1-3: Kompensierte Doppellagenspannungen während des Quenches der SL-Stromschiene bzw. während des Strom-Sweepens als Funktion der Zeit. Die Abtastrate betrug 1 kHz.

W7X MODEL COIL 16.7 KA, LCT COIL 14.0 KA

20.01.00 11:14:39

GRID 1 X = 3.100*10¹

LOCAL SYSTEM: X(0) = 0.0000E+00 Y(0) = 0.0000E+00 Z(0) = 0.0000E+00
ALPHA = .00 BETA = .00 GAMMA = .00

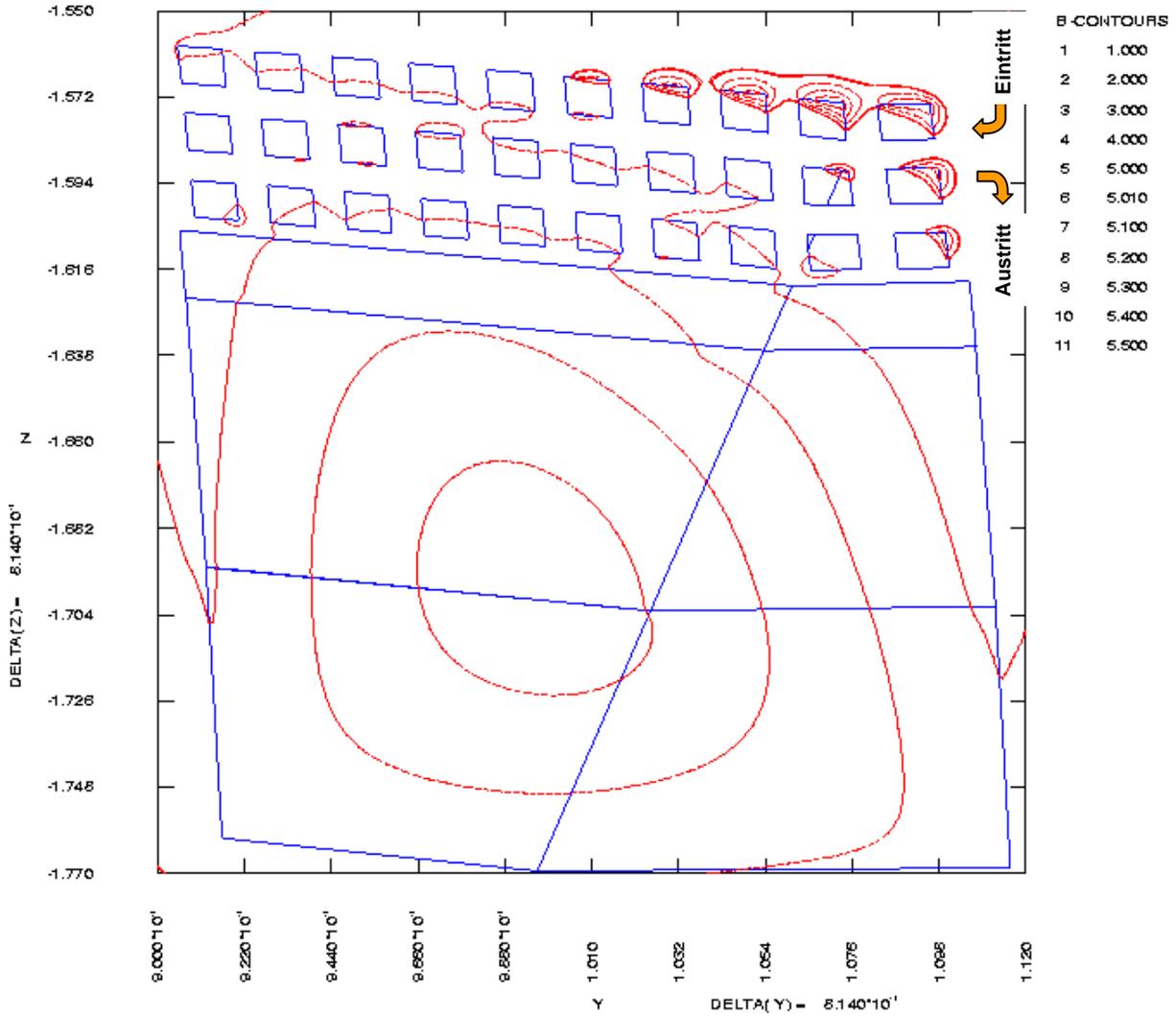


Abbildung 3.1-4: Feldkonturplot in der Wicklung der W7-X DEMO Spule am Ort des maximalen Magnetfeldes für den Lastfall A

W7X MODEL COIL 16.7 KA. LCT COIL 14.0 KA

19.01.00 17:38:22

GRID 1 X = $4.80 \cdot 10^1$

LOCAL SYSTEM: X(0) = $0.0002E+00$ Y(0) = $0.0002E+00$ Z(0) = $0.0002E+00$
ALPHA = .00 BETA = .00 GAMMA = .00

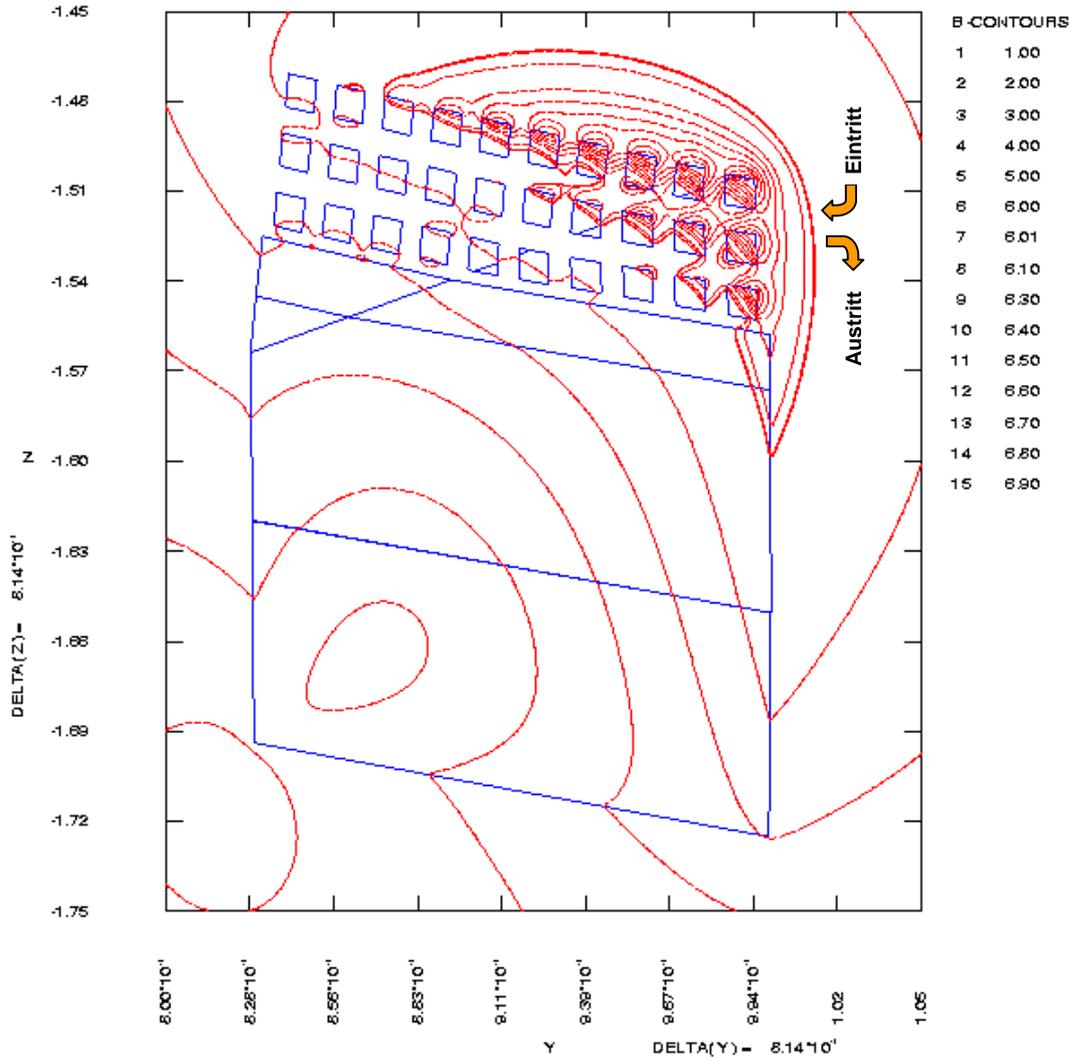


Abbildung 3.1-5: Feldkonturplot in der Wicklung der W7-X DEMO Spule am Ort des maximalen Magnetfeldes für den Lastfall C

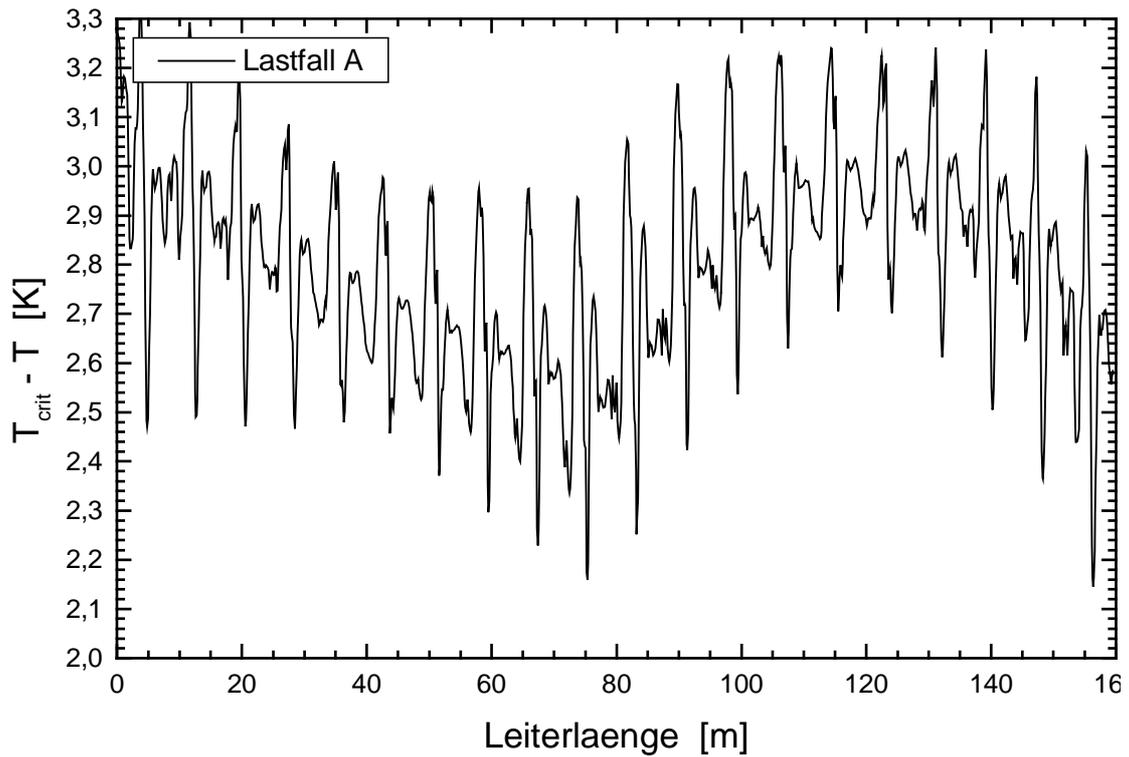


Abbildung 3.1-6: Temperaturdifferenz zwischen lokalem T_C und lokaler Temperatur T als Funktion der Leiterlänge der Doppellage DL1 für den Lastfall A

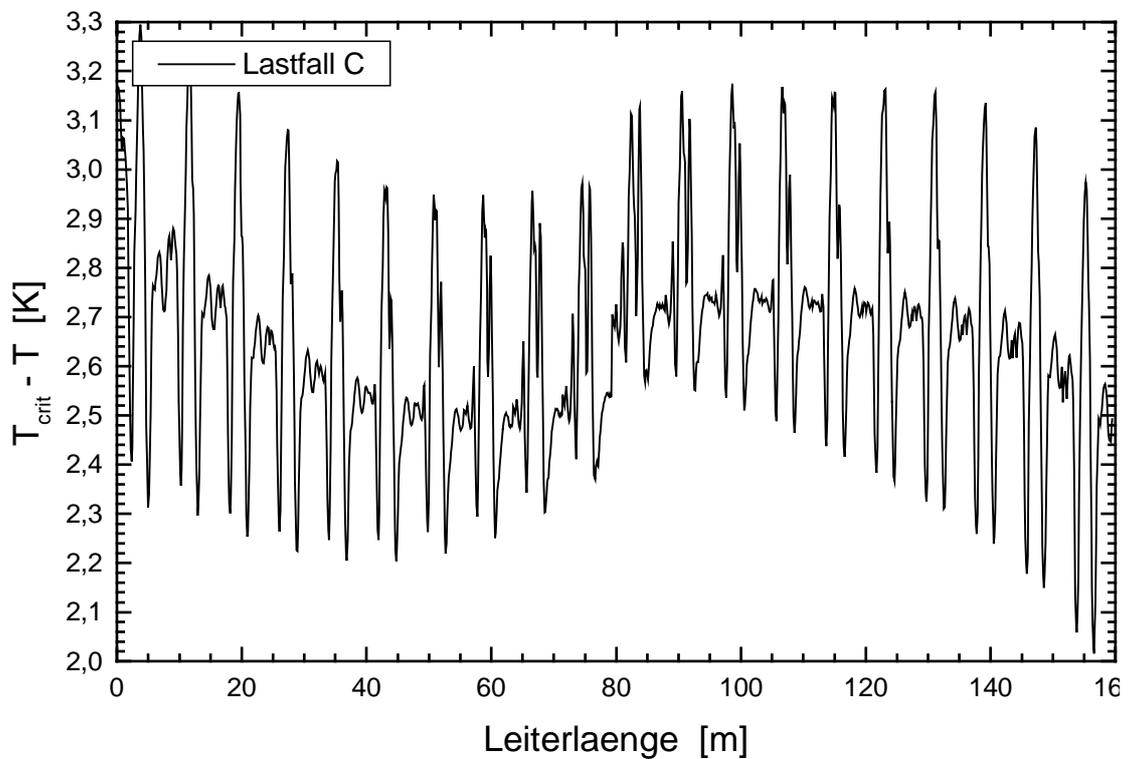


Abbildung 3.1-7: Temperaturdifferenz zwischen lokalem T_C und lokaler Temperatur T der Leiterlänge der Doppellage DL1 für den Lastfall C

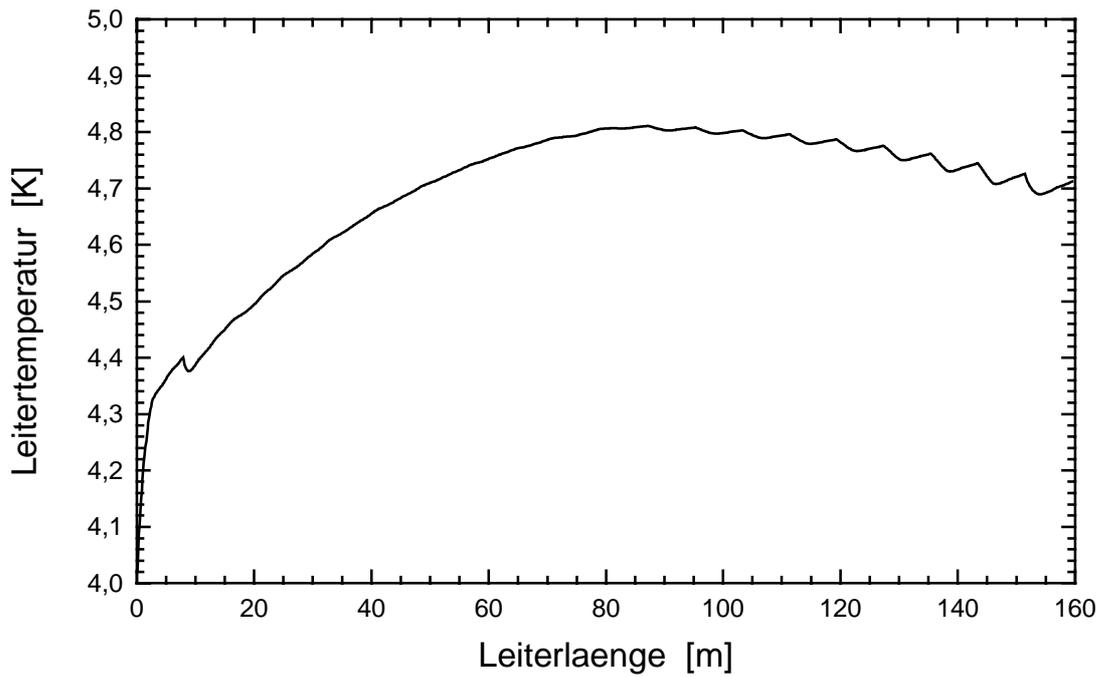


Abbildung 3.1-8: Temperaturprofil entlang des Leiters der Doppellage DL1

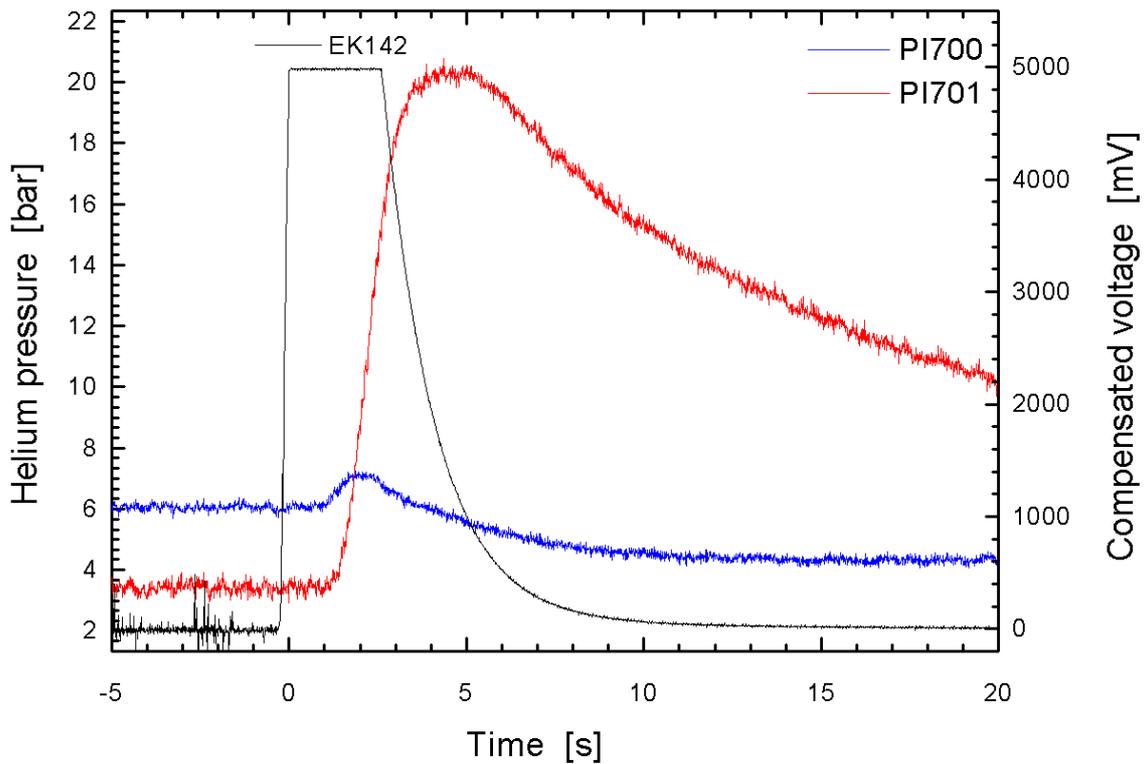


Abbildung 3.1-9: Heliumdruck am Ein- bzw. Austritt der Wicklung der DEMO Spule während des Quenches als Funktion der Zeit für den Quench #3, Lastfall A. Zur Lokalisierung des Quenchezitpunkts ist die kompensierte Spannung EK142 ebenfalls aufgetragen. Die Abtastrate betrug 1 kHz.

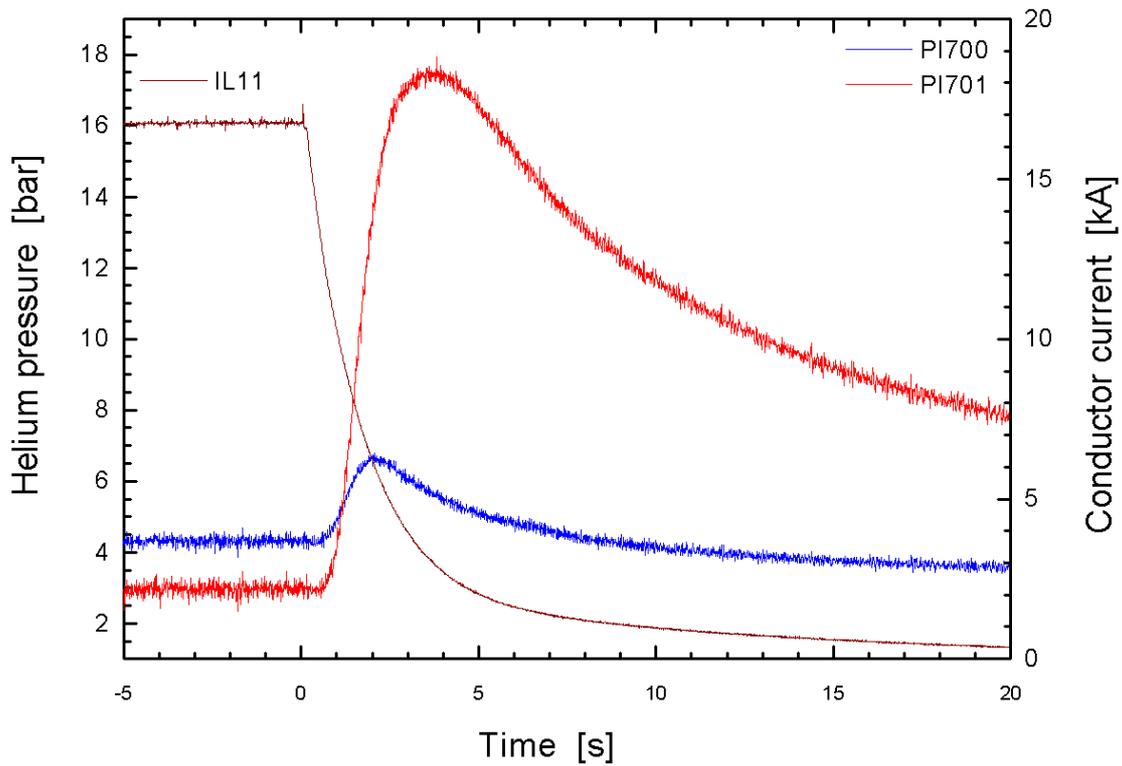


Abbildung 3.1-10: Heliumdruck am Ein- bzw. Austritt der Wicklung sowie Leiterstrom der DEMO Spule während des Quenches als Funktion der Zeit für den Quench #8, Lastfall C. Die Abtastrate betrug 1 kHz.

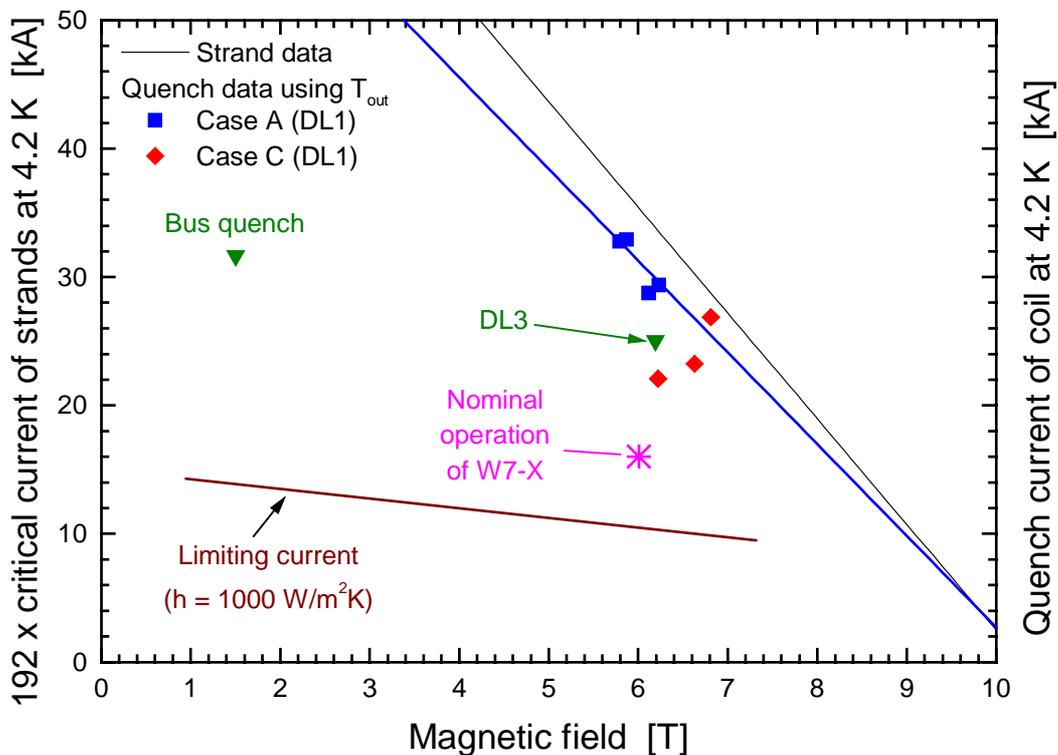


Abbildung 3.1-11: Erwarteter kritischer Strom bei 4.2 K als Funktion des Magnetfeldes sowie die auf 4.2 K umgerechneten Quenchströme. Der sog. „limiting current“ (Stekly = 1) ist ebenfalls dargestellt. Zum Vergleich ist der Nennwert für W 7-X Torusbetrieb, 16 kA, mit eingezeichnet

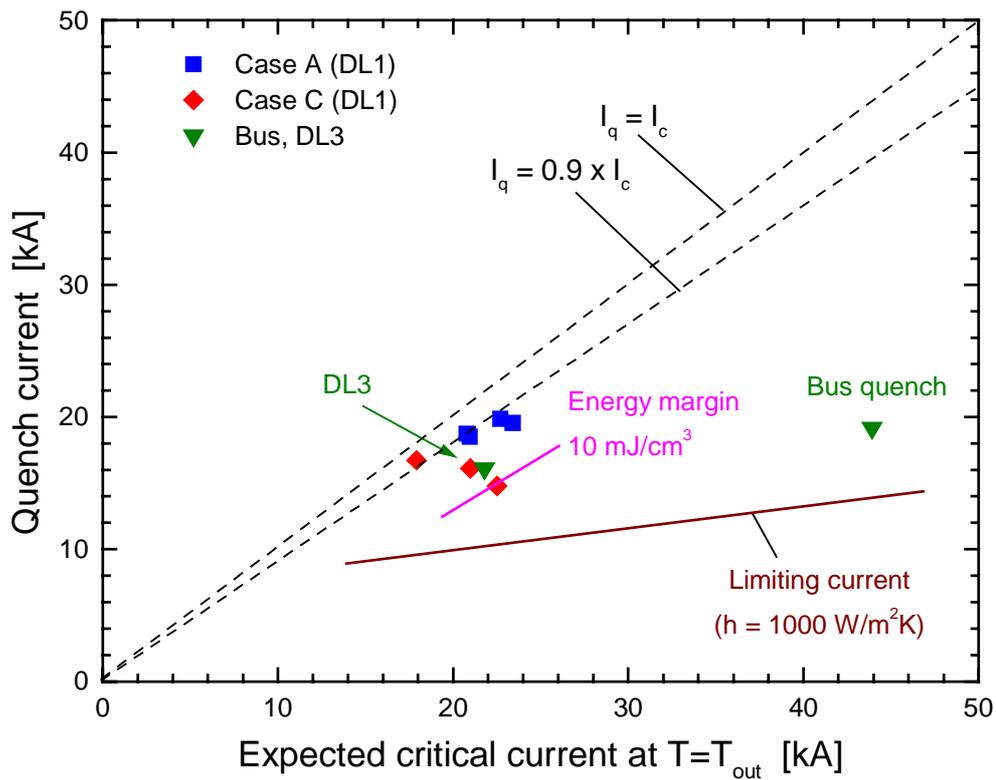


Abbildung 3.1-12: Gemessene Quenchströme über den bei entsprechendem Magnetfeld und entsprechender Austrittstemperatur umgerechneten kritischen Strömen. Zum Vergleich sind zwei weitere Kurven eingezeichnet: der sogenannte „limiting current“, d.h. der Strom, der $\text{Stekly} = 1$ entspricht, sowie eine Kurve, die den Quenchströmen im Fall einer äußeren Störung von 10 mJ/cm^3 für eine Zeitdauer von 0.5 ms entspricht

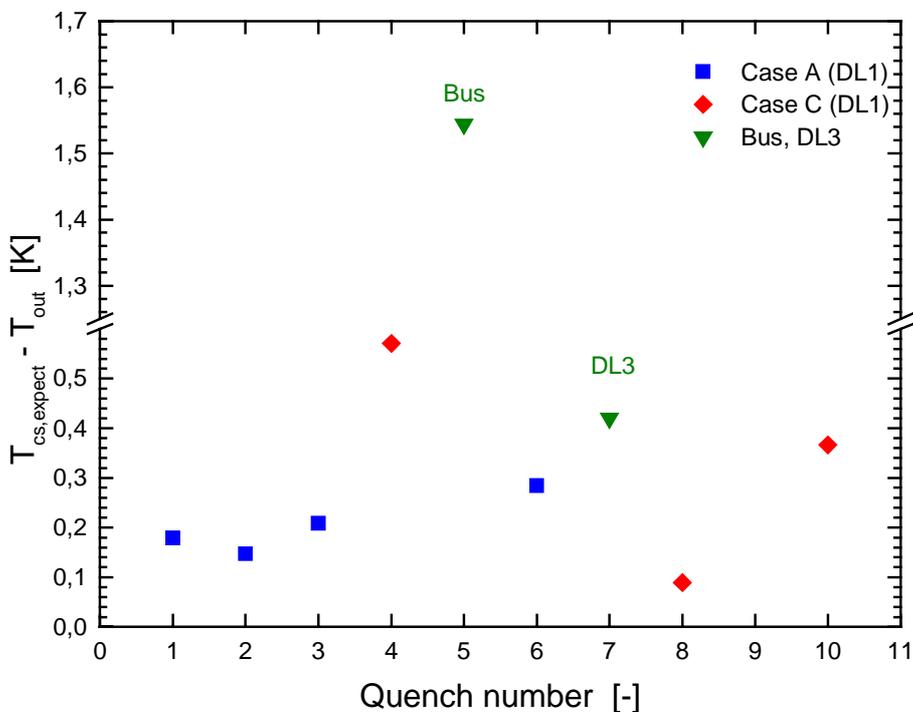


Abbildung 3.1-13: Temperaturdifferenz zwischen erwarteter „Current-sharing“ Temperatur T_{cs} und der Austrittstemperatur T_{out} als Funktion der Quench-Nummer

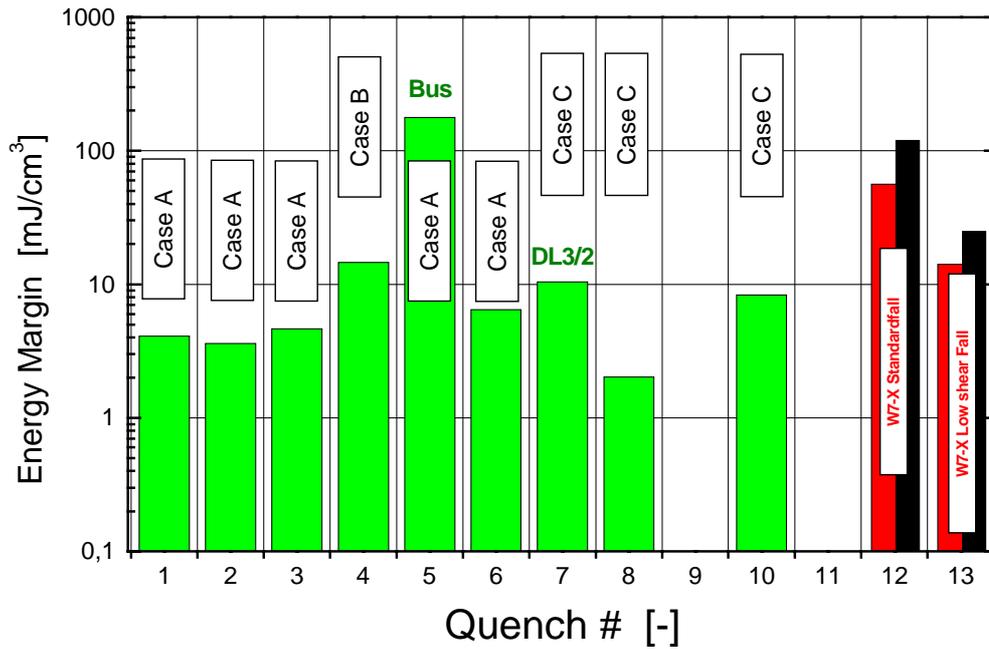


Abbildung 3.1-14: Berechnete Stabilitätsgrenze der W 7-X DEMO Spule für die Quenche 1 – 10 sowie die erwartete Stabilitätsgrenze der Serienspulen im Torusverband: Advanced Conductor bei 4.8 K (rot) bzw. 4.3 K (schwarz)

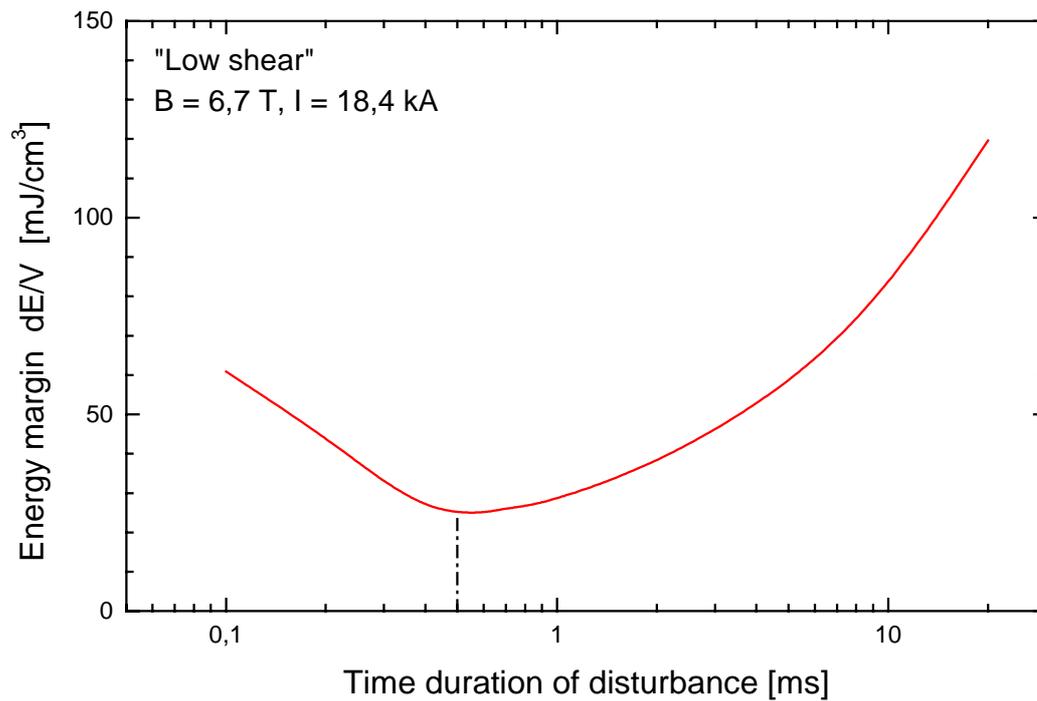


Abbildung 3.1-15: Berechnete Stabilitätsgrenze der W 7-X Serienspulen im Torusverband für den „low shear“ Fall mit einer Temperatur von 4,3 K als Funktion der Störzeitdauer

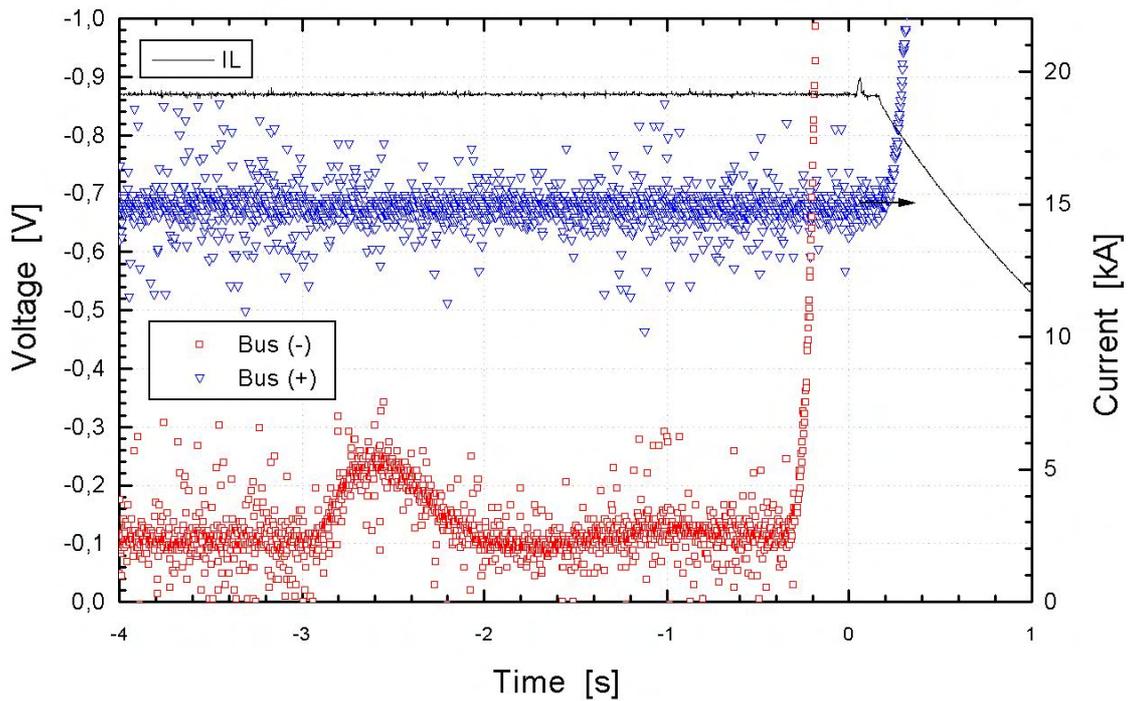


Abbildung 3.1-16: Spannungsabfall über die supraleitenden Stromschienen bzw. Spulenstrom als Funktion der Zeit für Quench #5. Die Abtastrate betrug 1 kHz.

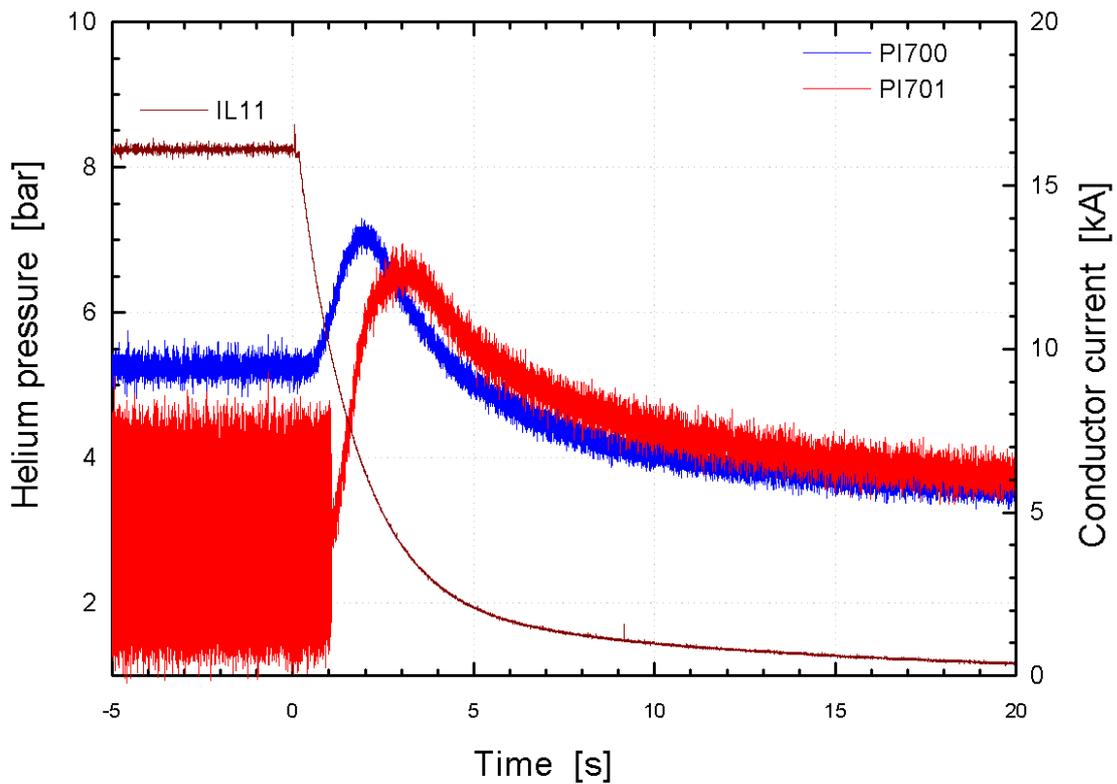


Abbildung 3.1-17: Heliumdruck am Ein- bzw. Austritt der Wicklung sowie Leiterstrom der DEMO Spule während des Quenches als Funktion der Zeit für den Quench #10, Lastfall C. Die Abtastrate betrug 1 kHz.

3.2 Das Quenchdetektions-System der W 7-X Spule

Bei dem Test der W 7-X Spule mussten die supraleitende Wicklung und die supraleitenden Stromschienen zwischen den Anschlüssen an der Wicklung und den kalten Enden der Stromzuführungen bezüglich auftretender spontaner Quenche überwacht werden.

3.2.1 Das Quenchdetektions-System der Wicklung der W 7-X Spule

Die Wicklung der W 7-X Spule besteht aus 6 Doppellagen. Für die Quenchdetektion werden die Spannungen zweier Doppellagen mittels einer Brückenschaltung miteinander verglichen. Bei richtigem Abgleich der Brücke (mittels Potentiometer zwischen den Zweigwiderständen) verschwinden in der Brückendiagonale alle induktiven Komponenten und nur ohmsche Spannungen bleiben übrig (Abb. 3.2.1-1). Dazu gehört auch die Rückwirkung von Wirbelströmen im Gehäuse, was unter Umständen eine höhere Triggerschwelle erforderlich macht. Zur Auswertung wird die Brückenspannung verstärkt und auf einen Wert oberhalb der Triggerschwelle begrenzt. Nach Filterung durch ein RC-Glied mit einstellbarer Zeitkonstante wird das Signal einem Doppelkomparator mit festen Schwellen zugeführt. Die Wahl der Auslöseschwellen (für jeweils eine Doppellage) erfolgt durch Variation der Vorverstärkung.

Zur Kalibrierung kann mit kleinen sägezahnförmigen Strömen (einige 10 A, 0,5 – 1 Hz) dann der induktive Spannungsanteil zu einem Minimum abgeglichen werden. Diese Messung kann bereits im normalleitenden Zustand bei Raumtemperatur durchgeführt werden. Die beste Empfindlichkeit wird jedoch im supraleitenden Zustand erreicht.

Bei der W 7-X Spule wurde eine untere Spannungsschwelle von 100 mV eingestellt.

Der Quenchdetektor ist eine spezielle Entwicklung, die für die im ITP betriebenen supraleitenden Magnete eingesetzt wird [3.2.1-1]. Der Quenchdetektor überwacht nach dem "fail safe" – Prinzip seine Funktion, so dass ein Drahtbruch der Signalleitungen oder Ausfall von Bauteilen sofort mit dem Abfall des Relais einen Triggerpuls für Einleitung der Sicherheitsentladung in einen Entladewiderstand auslöst.

Die Quenchdetektoren der W 7-X Spule hatten einstellbare Auslöseschwellen bei 0,1, 0,2, 0,5, 1, 3 und 10 V. Außerdem konnte noch eine Abschaltzeitkonstante (Verzögerung) in Stufen von 0,01, 0,02, 0,05, 0,1, 0,2, 0,5, 1, 2, 5, und 10 s eingestellt werden, um kurzzeitige Störspannungen durch eine Integration zu eliminieren. Das Triggersignal wird dann ausgelöst, wenn das Integral

$$\int U \cdot dt \quad (3.2.1-1)$$

den eingestellten Wert erreicht hat.

Für alle Tests waren die Quenchdetektoren auf 0,5 V Ansprechschwelle bei 0,5 s Verzögerung eingestellt ($\int U \cdot dt \sim 0,25 \text{ Vs}$).

In Abb. 3.2.1-2 ist der Anstieg der resistiven Spannung für alle Quenche der W 7-X Spule dargestellt. Danach wird nach ca 260 ms nach dem Beginn des Quenches der Trigger für die Entladung ausgelöst. Das gemessene Spannungintegral (3.2.1-1) variiert zwischen 0,4 Vs und 1,1 Vs. Es ist damit ca. 2 bis 4 mal größer als der von der Einstellung erwartete Wert. Die Abweichung ist damit erklärbar, dass das RC-Glied jeweils nur über einen bestimmten Zeit- oder Frequenz-Bereich als echter Integrator wirkt.

Jede Brücke wurde über zwei Quenchdetektoren überwacht, deren Triggerausgänge über ein logisches "und" verknüpft waren. Nur wenn beide Quenchdetektoren ansprachen, kommt es zur Auslösung einer Abschaltung. Spricht nur ein Quenchdetektor an wird ein Alarm gemeldet. Dadurch wird eine höhere Betriebssicherheit gegen Störungen erreicht, da nach jeder Sicherheitsentladung 2 – 3 Stunden zur Rückkühlung und Wiederherstellung der kryogenen Betriebsparameter erforderlich sind.

Die Güte der erreichbaren Kompensation des induktiven Spannungsanteils lässt sich mit der Restinduktivität ausdrücken. Diese ist diejenige Induktivität, die sich bei einer bestimmten Stromrampe und des Wertes der nicht mehr kompensierbaren Spannung ergibt nach:

$$LR = UR / (dl/dt) \quad (3.2.1-2)$$

Sie betrug für die W 7-X Spule bei einer Stromrampe von 20 A/s in der Größenordnung von 0,5 mH.

Im Vergleich dazu sind die gemessenen Restinduktivitäten anderer Spulen mit verschiedenen Arten der Kompensation des induktiven Spannungsanteils in Tabelle 3.2.1-1 zusammengestellt.

Tabelle 3.2.1-1: Gemessene Restinduktivitäten anderer Spulen mit verschiedenen Arten der Kompensation des induktiven Spannungsanteils

Spule	Restinduktivität	Kompensationsart
LCT Spulen	64 – 120 mH	Externe Kompensations-spulen
EURATOM LCT Spule	0,34 – 1,35 mH	Brücke aus zwei parallel gewickelten Leitern einer Doppelscheibenwicklung
POLO	0,5 μH	Kompensationsleiter: Leiter-Innenrohr
POLO	1 μH	Kompensationsleiter: Beigewickelter Draht

3.2.2 Das Quenchdetektions-System der supraleitenden Stromschienen der W 7-X Spule

Für das supraleitende Stromschienensystem der W 7-X Spule wurde die induktive Spannung jeder Stromschiene mit einem parallel geführten Draht kompensiert (Abb. 3.2.1.-1). Die Spannungsdifferenz der Potentialabgriffe wird dem Quenchdetektor gleichen Typs mit einer höheren Empfindlichkeit zugeführt. Der Vorteil dieser Schaltung ist, dass kein Abgleich mit Pulsbetrieb mehr durchgeführt werden muss. Es genügt die stationäre Kompensation einer eventuell vorhandenen Restspannung (z. B. Thermospannung). Bezüglich der Funktionen gilt das in Abschnitt 3.2.1 Gesagte. Auch hier wird jede Schiene (pos. und neg. Polarität) mit je zwei Quenchdetektoren überwacht. Diese sind über ein logisches "und" miteinander verknüpft analog zu Abschnitt 3.2.1.

Die Einstellung war in Spannungsschwellen von 1, 2, 5, 10, 30 und 100 mV und Verzögerungsstufen von 0,01, 0,02, 0,05, 0,1 0,2, 0,5 1, 2, 5 und 10 s wählbar. Die Einstellung für den gesamten Test war eine Spannungsschwelle von 30 mV mit 0,5 s Verzögerung ($\int U \cdot dt \sim 15 \text{ mV} \cdot \text{s}$)

Die Restinduktivität lag bei einer Stromrampe von 5 A/s in der Größenordnung von einigen μH .

Die benutzten Quenchdetektionssysteme für Spule und supraleitende Stromschiene haben für alle aufgetretenen Quenche die Sicherheitsentladung ausgelöst. Es gab keine Sicherheitsentladungen, die nachweisbar von den Quenchdetektionssystemen ausgelöst wurden, ohne das ein Quench vorlag.

3.2.3 Literatur

[3.2.1-1] G. Nöther et al., Cryogenics 1989 Vol 29 December, pp. 1148 – 1153

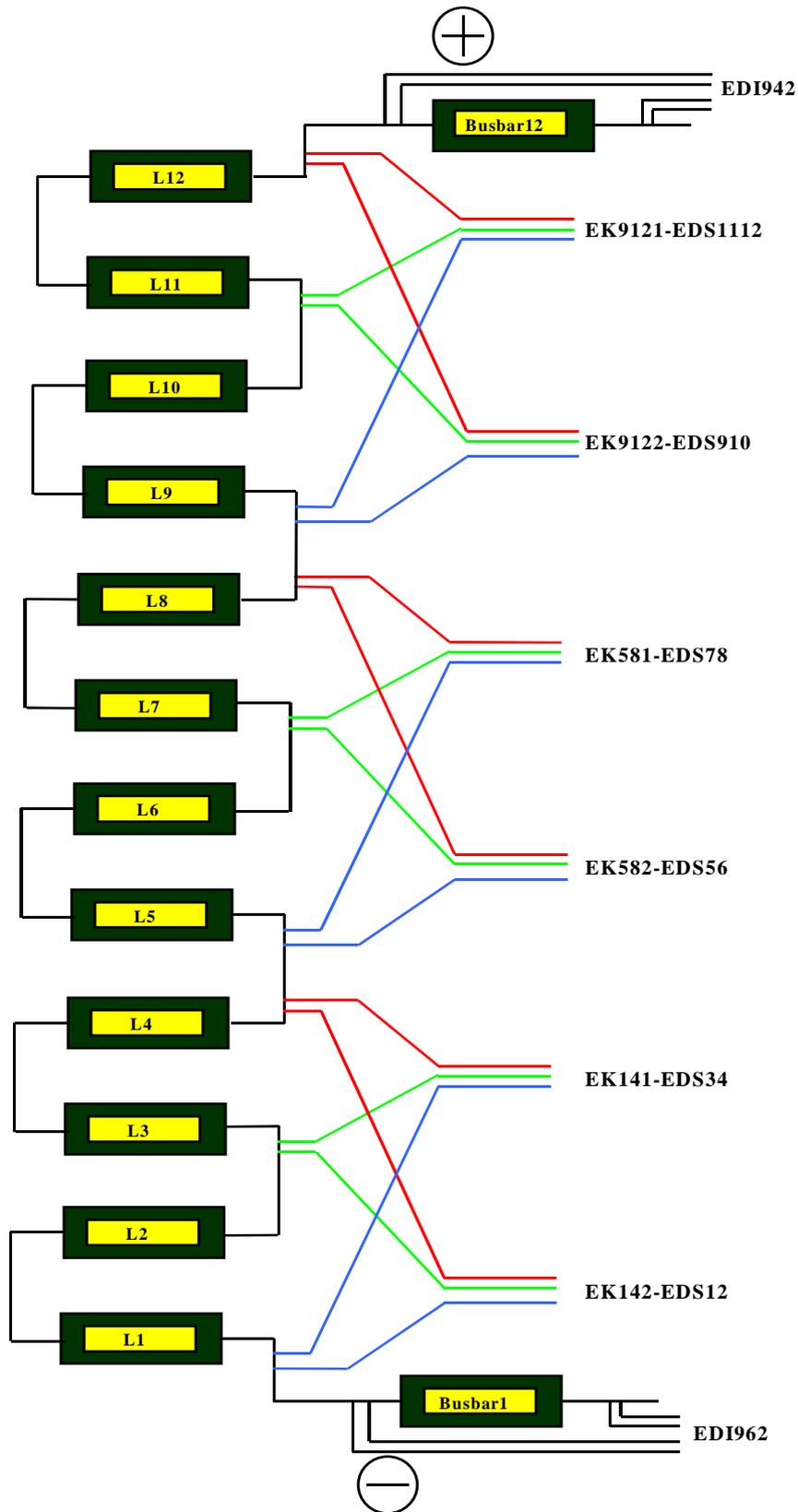


Abbildung 3.2.1-1: Das Quenchedetektions-System der W 7-X Spule. Je zwei Doppellagen bilden den Zweig einer Brücke, mit der der induktive Spannungsanteil kompensiert wird. Bei den supraleitenden Stromschienen wird der induktive Spannungsanteil mit einem dicht an der Schiene geführten parallelen isolierten Draht kompensiert.

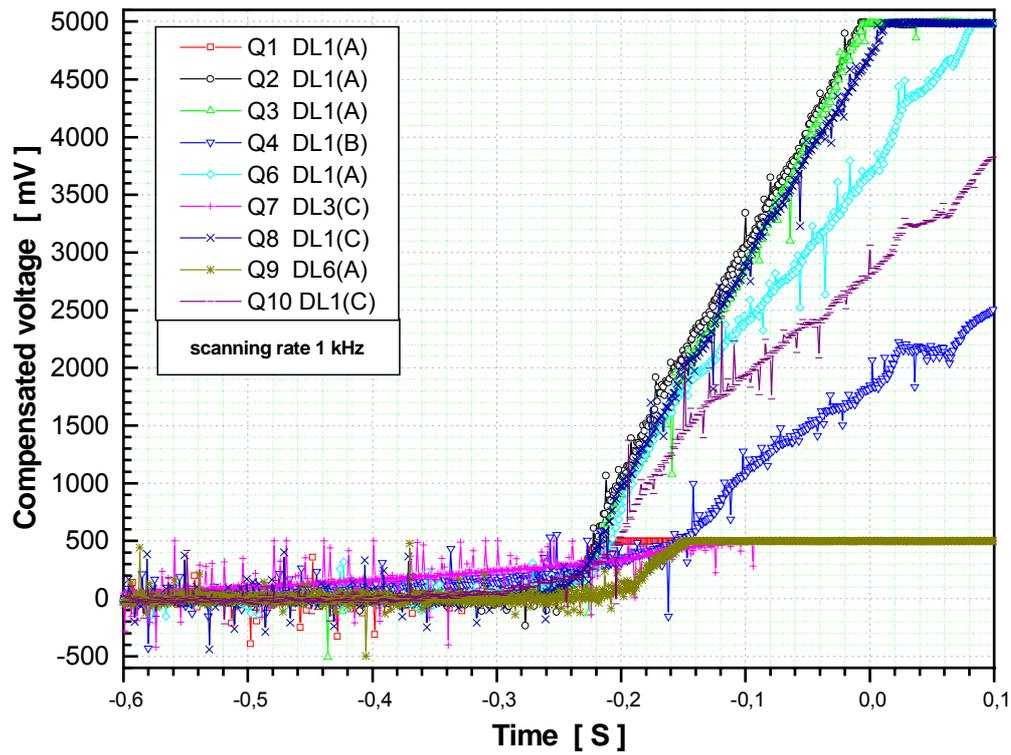


Abbildung 3.2.1-2: Der Anstieg der resistiven Spannung für alle Quenche der W 7-X Spule

3.3 Sicherheitsentladung

Ein sehr wichtiger elektrischer Schaltkreis in der Stromversorgung eines Supraleitermagneten ist eine Schaltanlage, mit der im Falle des Übergangs in die Normalleitung (Quench) die magnetisch gespeicherte Energie aus dem Supraleitermagnet herausgenommen werden muss. Schon bei der Auslegung muss dies durch den Kupferquerschnitt im Supraleiterkabel und der zulässigen elektrischen Entladespannung berücksichtigt werden [3.3-1].

Der Zusammenhang zwischen Spulenstrom I , Entladespannung U , magnetisch gespeicherter Energie E und der Enladezeitkonstante τ lässt sich für die Entladung der Spule in einen Widerstand durch die Gleichung

$$E = U \cdot I \cdot \tau/2 \quad (3.3-1)$$

beschreiben. Für den Schaltvorgang der Energieauskopplung wird im Prinzip die Schaltung in Abb. 3.3-1 benutzt. Die Stromversorgung ist über Trennschalter (ST) mit der positiven und negativen Stromschiene verbunden, die an der Spule angeschlossen ist. Der Entladewiderstand (R) ist der Spule (L) parallel geschaltet. Ein Kurzschlusspfad wird über zwei parallel geschaltete Lichtbogenschalter ($S1$, $S2$) und einem Lichtbogenschalter ($S3$) in Serie gebildet. Durch diese Anordnung wird sichergestellt, dass beim Schließen oder Öffnen des Kurzschlusspfades bei Versagen eines Schalters die Entladung noch ohne Störung abläuft. Damit besitzt die Schaltung eine einfache Redundanz. Die Steuerung des Schaltkreises erfolgt über eine speicherprogrammierbare Steuerung (SPS), die über eine parallel laufende Relaischaltung redundant abgesichert ist.

Im Falle der Auslösung der Sicherheitsentladung werden die Lichtbogenschalter geschlossen. Das Netzgerät wird auf negative Spannung (-30 V) geschaltet, was gleichbedeutend damit ist, dass das Netzgerät jetzt wie ein Wechselrichter Energie in das Drehstromnetz zurückspeisen kann. Die Spule wird dann durch Schließen von $S1$, $S2$ über den Zweig ($S1$, $S2$, $S3$) kurzgeschlossen. Die Trennschalter (ST) trennen den Entladekreis vom Netzgerät und die Lichtbogenschalter öffnen alle gleichzeitig. Der steigende Widerstand des Lichtbogens kommutiert den Strom auf den Widerstand (R), wo dieser dann mit einer Zeitkonstante von einigen Sekunden exponentiell abklingt. Das Netzgerät ist im Falle eines Netzgeräteausfalls mit einem Überspannungsschutz (OV) geschützt. Ebenso ist ein weiterer Kurzschlusspfad mit einem strombegrenzenden Widerstand vorhanden, damit ein lichtbogenfreies Öffnen der Trennschalter (ST) auch unter diesen Randbedingungen möglich ist. Die Steuerung der Schaltanlage korrespondiert mit der Steuerung der Kryoversorgung und umgekehrt. Im ersten Fall müssen vor der Sicherheitsentladung bestimmte Ventile umgesteuert werden, um

Druckanstiege und Gasverluste zu vermeiden. Im zweiten Fall muss bei Störungen der Heliumversorgung eine Sicherheitsentladung eingeleitet werden. Diese Vernetzungen werden über die Mess-, Steuer-, und Regeltechnik kontrolliert.

Die beiden benutzten Stromversorgungen und Schaltanlagen für die W 7-X Spule und LCT Spule basieren auf den oben beschriebenen Funktionsprinzip, sind jedoch in der Detailfunktion aufgrund der benutzten Schalter und zur Abdeckung anderer Funktionen modifiziert.

Die Steuerung ist so ausgelegt, dass die beiden Schaltanlagen der W 7-X und der LCT Spule zusammen oder auch getrennt betrieben werden können.

Die typischen Daten der elektrischen Entladekreise der W 7-X und LCT Spule sind in Tabelle 3.3-1 zusammengestellt

Tabelle 3.3-1: Daten der elektrischen Entladekreise für die Nennwerte der Spulen für das W 7-X Testprogramm

	LCT	W 7-X
U [kV]	1,75	0,368 (< 0,7)*
I [kA]	14	14,7
R [Ω]	0.125	0,025 (0,033)*
L[H]	1,57	0,063
τ[s]	12,56	2,52 (1,9)*

* für Ströme > 14,7 kA

3.3.1 Die Stromversorgung der W 7-X Spule beim Test in TOSKA

Für den Test der W 7-X Spule in TOSKA wurde die POLO Schaltanlage in Verbindung mit dem 30 kA Netzgerät (12 pulsiger Thyristorgleichrichter der Firma ABB, Turgi, Schweiz) eingesetzt. Den Schaltkreis zeigt die Abb. 3.3.1-1. Diese Anlage hat vier verschiedene Betriebsmoden, wovon hier nur der Betriebsmodus der Sicherheitsentladung genutzt und beschrieben wird [3.3.1-1].

Der Strom wird vom Netzgerät über die geschlossenen Schalter S0 und ST in die Spule eingespeist. Bei der Auslösung einer Sicherheitsentladung wird das Netzgerät nach 15 ms in den Wechselrichterbetrieb geschaltet, d. h. die Spannung am Ausgang geht auf die maximale negative Spannung von ca. – 30 V. Die magnetisch gespeicherte Energie beginnt sich über den Wechselrichter in das Drehstromnetz zu entladen. Nach kurzer Zeit (ca. 50 ms) schließt S2 den Kurzschlusspfad S2, E1, S1 und der Spulenstrom wird in ca. 20 ms auf den Kurzschlusspfad kommutiert. Danach schließt der Kurzschließer SN des Netzgerätes und

anschließend trennt der Schalter S0 den Strompfad zum Netzgerät auf. Nach ca. 100 ms Stromfluss durch den Kurzschlusspfad öffnet der Lichtbogenschalter S1 und kommutiert den Strom in ca. 10 ms auf den Entladewiderstand R1. Somit beginnt nach ca. 180 ms nach dem Auslösepuls der exponentielle Abfall des Stromes in der Spule. Im Falle des Versagens von S1 übernimmt automatisch die Sprengsicherung E1 die Stromkommutierung auf den Entladewiderstand. Eine typische Schaltfolge der Stromkommutierung zeigt Abb. 3.3.1-2.

Für den Test der W 7-X Spule wurde bis zum Nennstrom von 14,7 kA ein Entladewiderstand R1 von 25 mΩ eingesetzt, über 14,7 kA ein Entladewiderstand R1 von 33 mΩ. Dies korrespondiert mit einer Zeitkonstante τ von 2,5 s bzw. 1,9 s für den Test der W 7-X Spule als Einzelspule.

Die typische Zeit der Quenchausbreitung bis zur Auslösung des Schaltvorganges durch den Quenchdetektor beträgt ca. 250 ms (Abschnitt 3.2.1) und in Ausnahmefällen bis zu 600 ms (siehe Abschnitt 3.1). Mit der Schalt- und Entladezeit (äquivalente Rechteck-Pulszeit) ergibt sich demnach für die Zeitsumme

$$(250 \text{ ms} + 180 \text{ ms} + \tau/2) = 1,69 \text{ s bzw. } 1,38 \text{ s} \quad (3.3.1-1)$$

für die noch ein konstanter Stromfluss durch den Leiter für die "Hot spot" Berechnung anzusetzen ist. Die Detektions- und Schaltzeit beträgt 25 –30 % der Zeitsumme, so dass bei einer Verkleinerung der Zeitsumme nur mit der Reduzierung der Entladezeit effektiv eine Zeitverkürzung des Stromflusses erreicht werden kann.

3.3.2 Die Stromversorgung der LCT Spule beim Test der W 7-X Spule in TOSKA

Die LCT Spule wird mit dem 50 kA Netzgerät (12 pulsiger Thyristorgleichrichter, ABB, Turgi, Schweiz) in Verbindung mit der 20 kA Schaltanlage betrieben (Abb. 3.3.2-1). Das Funktionsprinzip ist das des Schaltkreises in Abb. 3.3-1. Der Kurzschlusspfad über die Schalter 13.1 und 13.2, 3.1 und 3.2, 4.1 ist aufgrund spezieller Eigenschaften der Lichtbogenschalter 3.1 und 3.2 (AEG, GERAPID 6000) etwas anders aufgebaut. Außerdem kann der Entladewiderstand vor der eigentlichen Entladung zugeschaltet werden, um z. B. bei schnellem Pulsbetrieb der Spule unnötige Verluste im Entladewiderstand zu vermeiden.

Bei Auslösung der Entladung schaltet das Netzgerät nach 15 ms auf Wechselrichterbetrieb und beginnt die LCT Spule in das Drehstromnetz zu entladen. Nach ca. 115 ms schließt der Kurzschlusspfad und übernimmt den Strom in etwa 9 ms. Nach 240 ms vom Triggerzeitpunkt schließen die Schalter 11.1 und 11.2. Ein kleiner Teilstrom von etwa 5 % fließt jetzt vom Kurzschlusspfad in diesen Zweig. Nach 390 ms öffnen die Trennschalter 2.1 und 2.2. Der

Kurzschlusspfad übernimmt wieder den vollen Spulenstrom, der nach 580 ms vom Triggerzeitpunkt durch Öffnen der beiden Lichtbogenschalter 3.1 und 3.2 in 10 ms auf den Entlade-widerstand 6.2 kommutiert wird. Nach 594 ms vom Triggerzeitpunkt beginnt der exponen-tielle Stromabfall.

Bei Versagen eines der Lichtbogenschalter wird analog zum vorher beschriebenen Kreis die Sprengsicherung 4.1 ausgelöst. Die zeitliche Streuung der Schaltzeitpunkte hängt auch von der unterschiedlichen Dauer der Kommutierungsvorgänge bei der jeweiligen Stromstärke ab und beträgt ca. +/- 50 ms.

Der Entladevorgang der LCT Spule beginnt somit 414 ms später als der der W 7-X Spule. Sowohl Rechnungen als auch das Experiment haben gezeigt, dass wegen der geringen Kopplung (17%) der beiden Spulen dies keine negative Auswirkung auf eine der Spulen hat [3.3.2-1]. Nach den Betrachtungen der Zeitsumme (Gleichung 3.3.1-1) ergibt sich

$$(0,414 \text{ s} + \tau/2) = 6,7 \text{ s} \quad (3.3.2-1)$$

Da die LCT Spule nicht quencht (Quenchindikationszeit 0), beträgt die Schaltzeit nur etwa 6 % der Zeitsumme.

3.3.3 Literatur

- [3.3-1] P. Komarek, Hochstromanwendung der Supraleitung, Teubner Studienbücher, B. G. Teubner, Stuttgart, 1995, pp. 130ff

- [3.3.1-1] M. Darweschad et al., Fusion Engineering Design 36 (1997) pp. 227-250

- [3.3.2-1] V. Marchese, Interner Bericht F130.0024.012/D, Institut für Technische Physik, Forschungszentrum Karlsruhe, Oktober 1998 unveröffentlichte Notiz

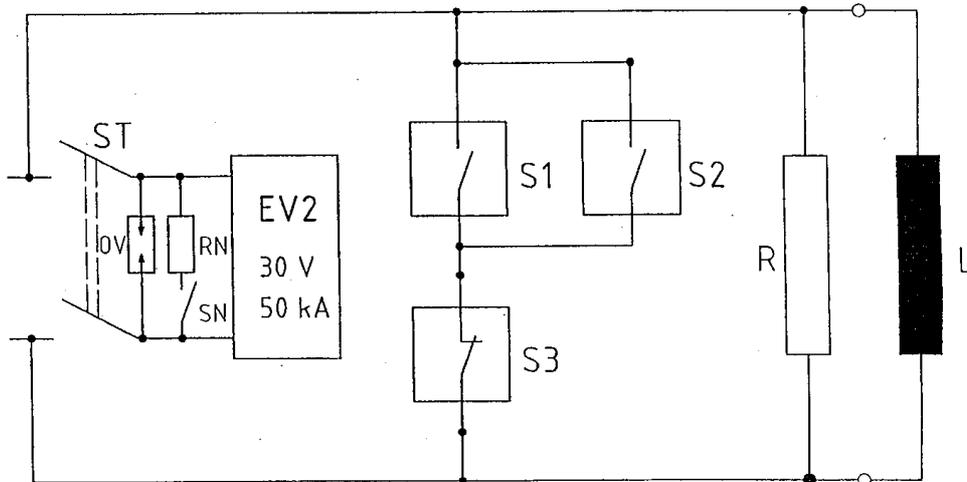


Abbildung 3.3-1: Prinzipschaltbild zur Entladung eines Supraleiters in einen Widerstand (EV : Hochstromversorgung; RN : Strombegrenzungswiderstand; OV : Überspannungsschutz; SN : Schließer; S1, S2, S3 : Gleichstrom-Lichtbogenschalter)

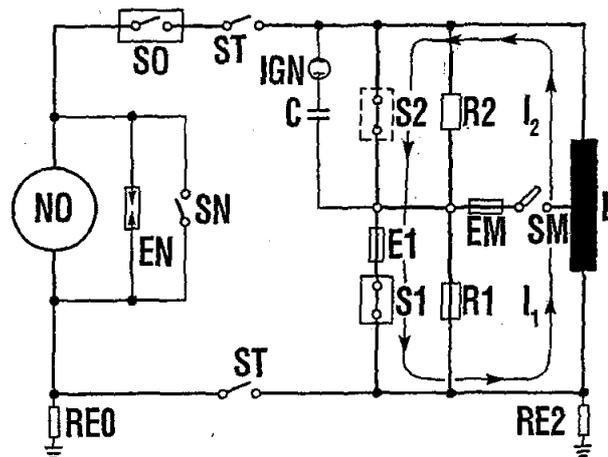


Abbildung 3.3.1.-1: POLO Schaltkreis: Es wird nur der Sicherheitsentladungsmodus genutzt, bei dem der Spulenstrom von dem Kurzschlusspfad S2, E1, S1 durch Öffnen des Gleichstrom-Lichtbogenschalters S1 auf den Widerstand R1 kommutiert wird. (NO : Stromversorgung; EN : Überspannungsschutz; SN : Schließer; SO : Öffner; ST : Trennschalter; IGN : Ignitron; C : Kapazität; S2 : Vakuumschalter; E1 : Sprengsicherung; S1 : Gleichstrom-Lichtbogenschalter; R2 : Hochspannungsentladewiderstand; R1 : Niederspannungsentladewiderstand = Sicherheitsentladewiderstand; EM : Sprengsicherung; SM : Vakuumschalter; RE0, RE2 : Erdungswiderstände; L : Spule)

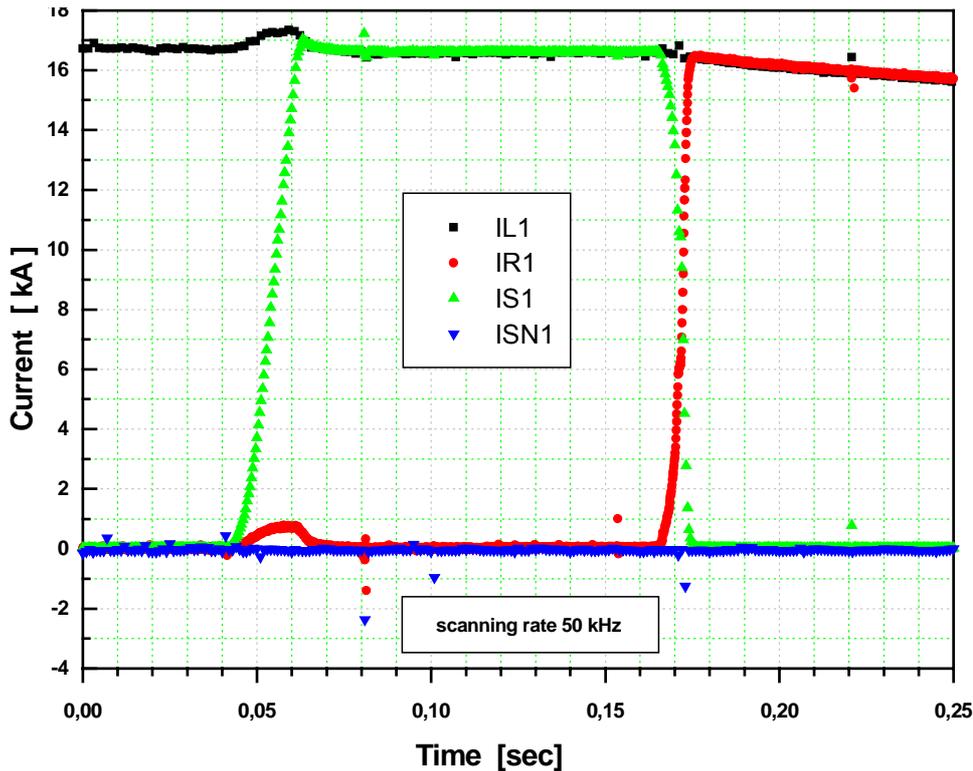


Abbildung 3.3.1-2: Die Stromkommutierungs-Vorgänge zur Einleitung der Sicherheitsentladung der W 7-X Spule mit der POLO Schaltanlage. Der Strom- und Spannungspuls, der bei der Aufkommutierung auf den Kurzschlusspfad auftritt, ist nicht verständlich. Er ist anlagenspezifisch und könnte durch Flußänderungen von magnetisierten Stahlbeton-Gebäudeteilen durch die Stromumverteilung hervorgerufen werden. (IL1: Spulenstrom; IR1: Strom durch den Entladewiderstand; IS1: Strom durch den Pfad mit dem Schalter S1; Strom durch den Pfad mit dem Schalter SN)

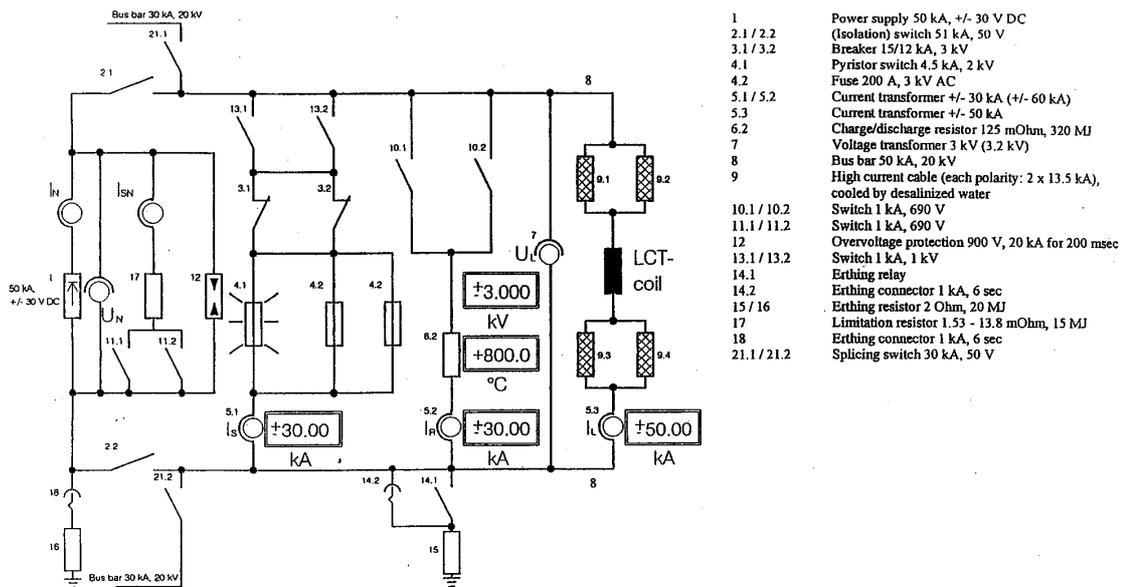


Abbildung 3.3.2-1 Die Schaltanlage der LCT Spule

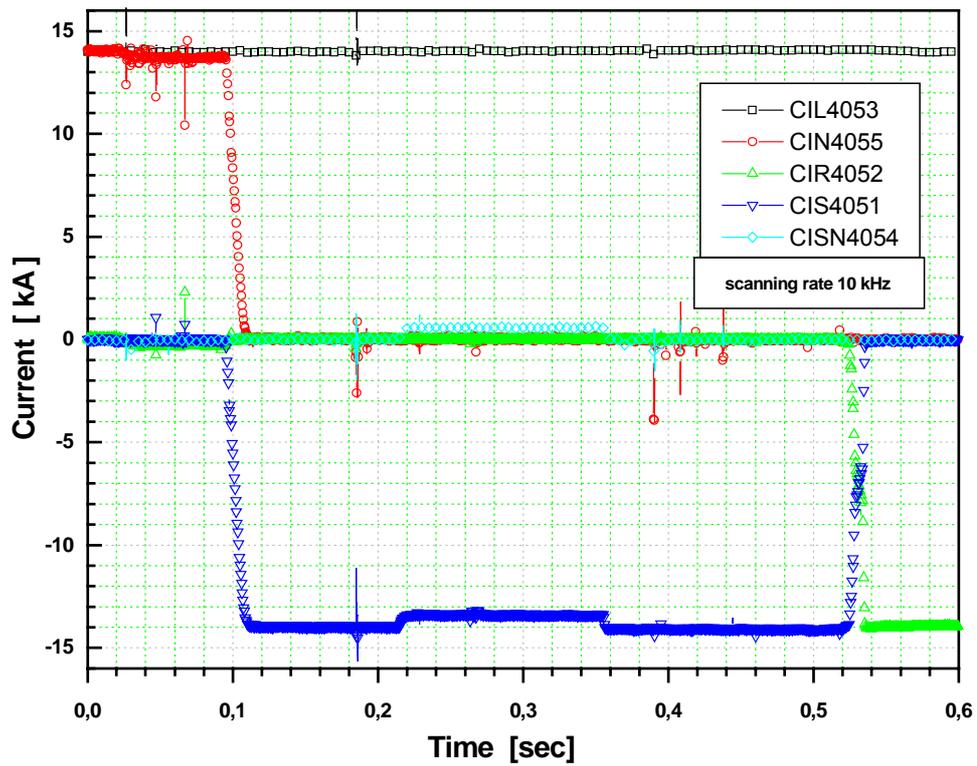


Abbildung 3.3.2-2: Die Stromkommutierungs-Vorgänge zur Einleitung der Sicherheitsentladung der LCT Spule mit der LCT Schaltanlage (CIL: Spulenstrom; CIN: Strom des Netzgerätes; CIR: Strom durch den Entladewiderstand; CIS: Strom durch den Kurzschlusspfad der Leistungsschalter)

3.4 Genauigkeit der Strommessung

Die Spulenströme in den Schaltkreisen werden mit kommerziell erhältlichen Stromwandlern der Firma LEM gemessen. Die Genauigkeitsklasse (ICE 185) +/- 0,1 % vom Nennwert [3.4-1]. Daraus ergeben sich folgende Absolutwerte für die Strommessung, die in Tabelle 3.4-1 zusammengestellt sind.

Tabelle 3.4-1 :Absolutwerte der Genauigkeit der Strommessung für die Schaltanlagen

Stromfehler (absolut)	Polo Schaltanlage	LCT Schaltanlage
ΔI	+/- 30 A	+/- 50 A

Diese Messgenauigkeit ist um eine Größenordnung besser als die Genauigkeit, mit der die Quenchströme von Supraleiterkabeln bestimmt werden können.

Die Ist-Werterfassung des 30 kA Netzgerät erfolgt mit einem Nullflusswandler der Firma Földi, der die LEM-Wandler noch um eine Genauigkeitsklasse übertrifft. Dieser Wandlertyp ist extrem empfindlich gegen externe magnetische Streufelder. Bei 87 % des Nennstromes der Konfiguration (W 7-X + LCT), was einer Summen-Amperewindungszahl von ca. 8,7 MA entspricht, waren die auftretenden Streufelder an der Stelle des Wandlers ca. 3,4 mT. Dies führte im Kern bereits zu Flussdichten, die nicht mehr kompensierbar waren. Der Wandler ging auf Störung verbunden mit einer Abschaltung des Netzgerätes.

Da eine magnetische Schirmung mit Eisenblechen nicht ausreichend war, mussten als Ist-Wertgeber die Wechselstromwandler benutzt werden. Damit konnte der Experimentierbetrieb erfolgreich fortgesetzt werden, wobei eine geringere Genauigkeit beim Strom-Ist-Wert akzeptiert werden musste. Dies war jedoch nicht von Bedeutung, da die Strommessung auch noch mit den LEM-Wandlern erfolgte.

3.4.1 Literatur

[3.4-1] Datenblatt der Firma LEM

3.5. Ergänzende Untersuchungen

3.5.1. Bestimmung der Wärmeleitung Gehäuse – Wicklung

Die vom IPP gewünschte Zusatzuntersuchung zur Wärmeleitung erfolgte kurz vor Abschluß des regulären Testprogrammes im **4.5 K – Betrieb**, ohne Strom, bei kontinuierlich betriebener Wicklungs-, Bus- und Rahmenkühlung (gemäß nachfolgendem Diagramm), durch Abschaltung der Gehäusekühlung (MFI800).

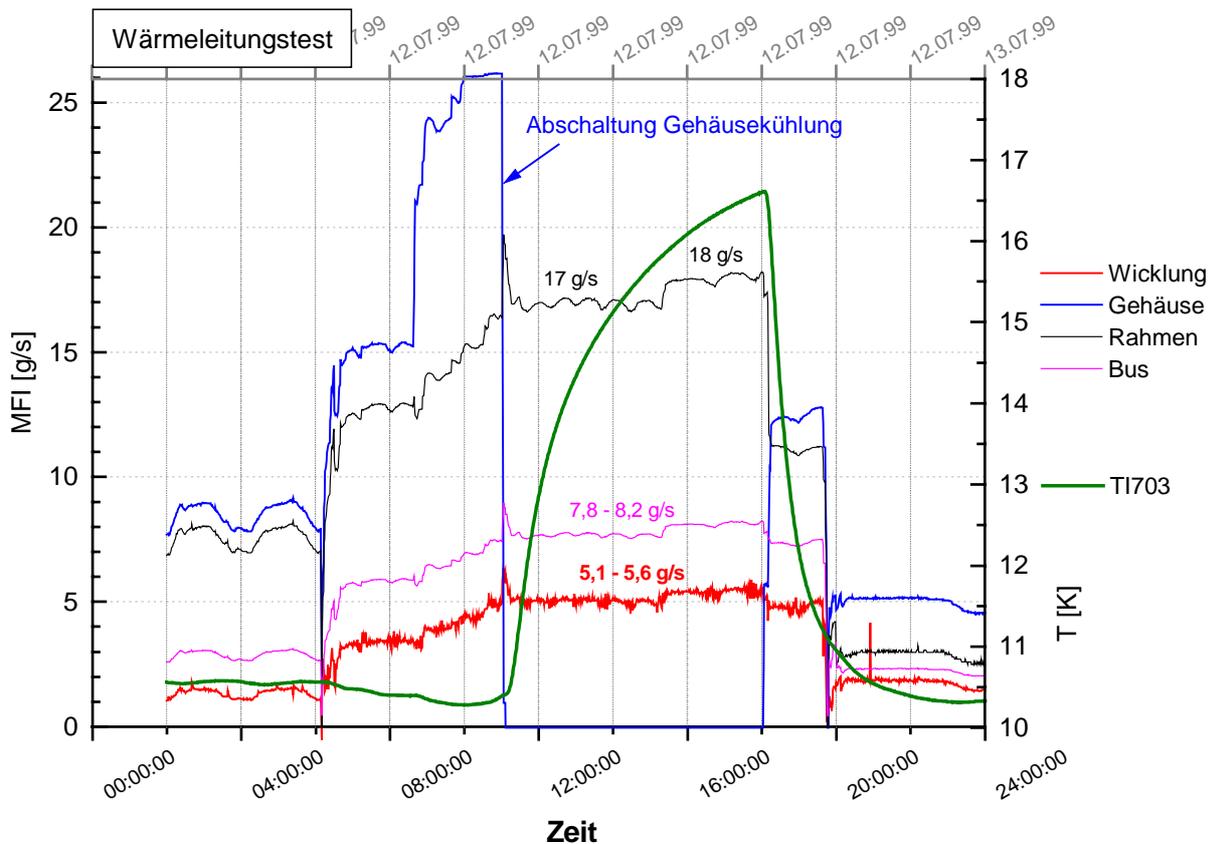


Abb. 3.5.1 a: Zusatzuntersuchung - Wärmeleitungstest

Die auf der Außenisolation des Wickelpaketes gemessenen „Wicklungs“ – Temperaturen (TI702 bis TI709) sind einzeln und auch als Mittelwert (TWO) in nachfolgendem Diagramm (Zeitbereich 0 – 24 Stunden) zusammengefaßt.

In diesem Diagramm ist auch die relative Kühlleistung, als Summe der für die 6 Doppellagen ermittelten Einzelleistungen (QMFI710K – QMFI760K), normiert auf den Ausgangszustand unmittelbar vor Abschaltung der Gehäusekühlung, mit eingetragen.

Vor dem Test wurden möglichst gute, thermisch stationäre Bedingungen realisiert. Aufgrund der großen Zeitkonstanten war es innerhalb der geplanten Testzeit nicht möglich, auf den thermisch eingeschwungenen Endzustand zu warten.

Die einfache Zeitkonstante () für die Meßstelle T1702 lag nach Hochrechnung der Meßwerte, mittels zweifach linear - exponentieller Regression, über 11 Stunden.

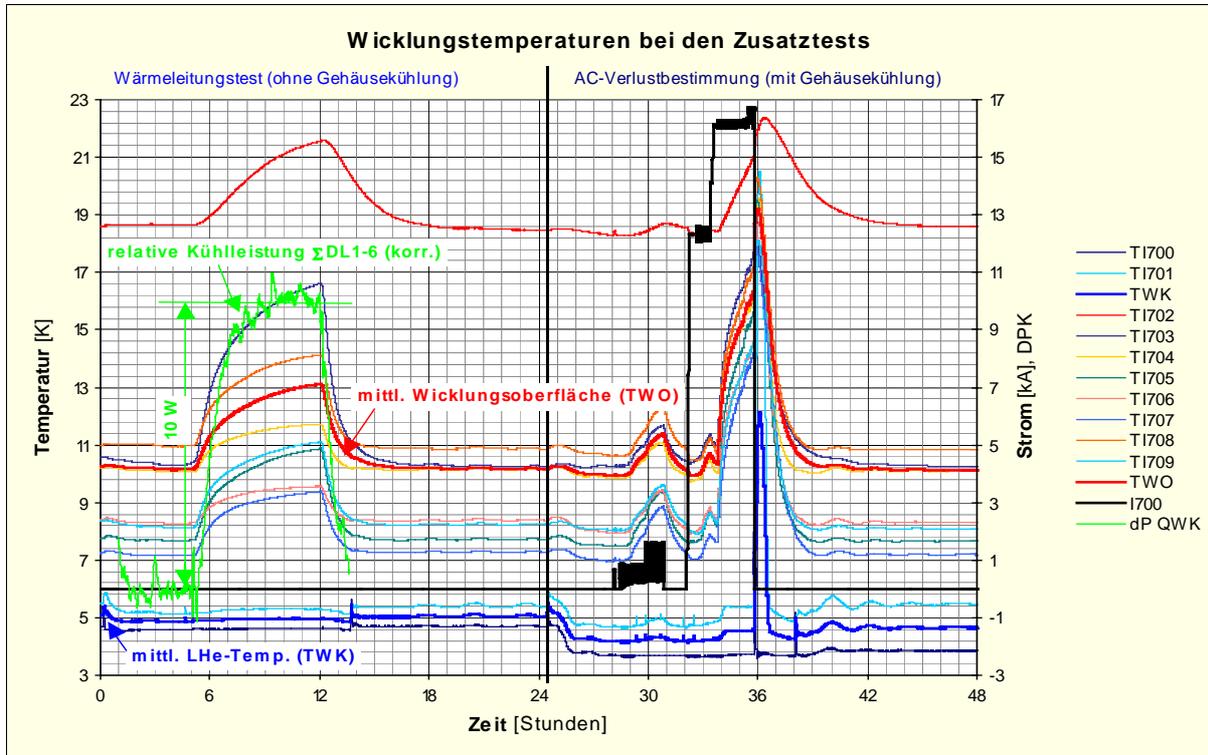


Abb. 3.5.1 b: Zusatzuntersuchung – Wärmeleitungstest und AC- Verluste

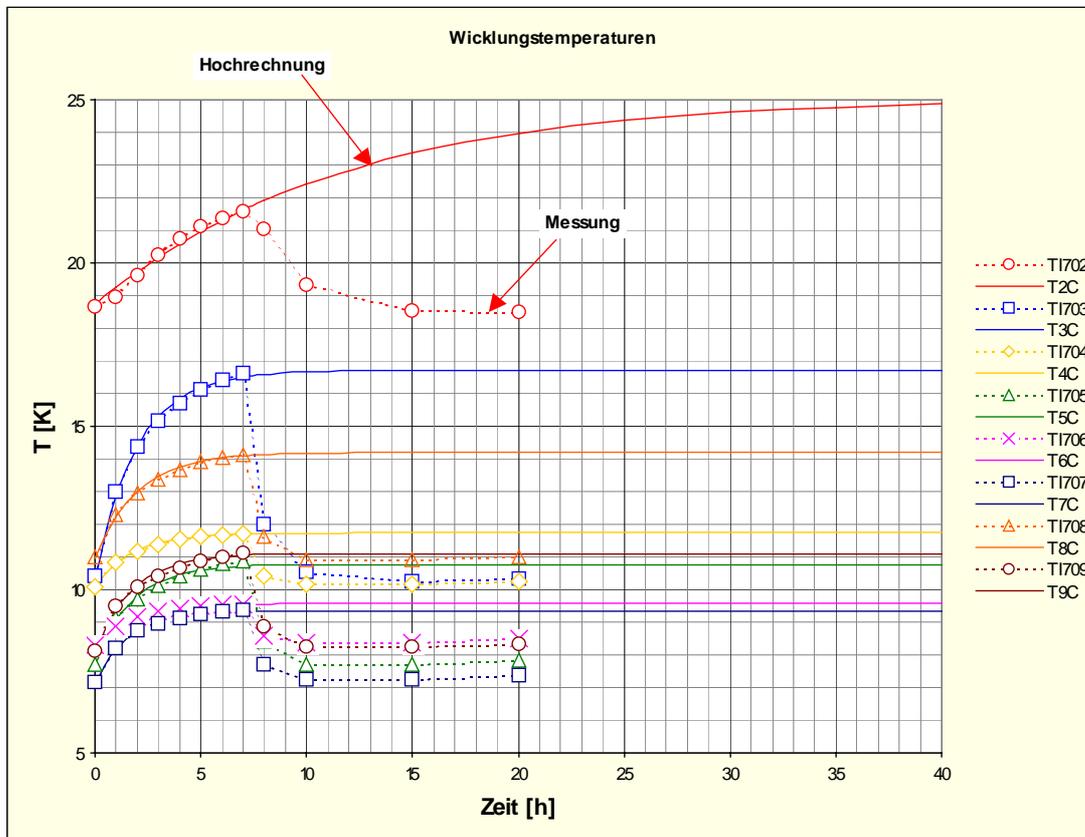


Abb. 3.5.1 c: Zusatzuntersuchung – Auswertung zum Wärmeleitungstest

Wicklungsflächen – Temp.

		TI702	TI703	TI704	TI705	TI706	TI707	TI708	TI709	Tm
Messung	min	18,46	10,25	10,05	7,67	8,27	7,15	10,84	8,11	10,10
	max	21,59	16,61	11,73	10,88	9,56	9,37	14,13	11,11	13,12
	ΔT	3,13	6,37	1,67	3,21	1,28	2,22	3,29	3,00	3,02
Hochrechnung $y = T_Q \pm \Delta\delta * e^{-t/\tau}$	T_0	18,70	10,34	10,05	7,73	8,28	7,14	10,97	8,09	10,16
	T_Q nach τ_{max}	25,06	16,70	11,73	10,77	9,57	9,35	14,19	11,10	13,56
	$ \Delta\delta $	6,36	6,36	1,68	3,04	1,29	2,21	3,22	3,01	3,40
	τ	11,36	1,99	1,74	1,77	1,74	1,59	2,03	1,79	3,00
	ΔT_{max}	6,60	6,45	1,68	3,21	1,30	2,22	3,35	3,01	3,48

Bei Annahme einer mittleren Temperaturerhöhung im thermisch ausgeglichenen Zustand (aus vorstehender Hochrechnung) von $\Delta T_{max} \approx 3,5$ K,

einer abgeschätzten Oberfläche des Wickelpaketes (Leiterpaket) von $A_W = 6,45$ m² und einer mittleren Gesamtdicke von Isolation (5 mm) und Bettung von $d = 30$ mm, errechnet sich aus der aufgebrachten Kühlleistung von $P_W = 10$ W

gemäß: $\lambda = P_W * d / (A_W * \Delta T_{max})$

eine mittlere Wärmeleitfähigkeit λ von $10 \text{ W} * 0,03 \text{ m} / (6,45 \text{ m}^2 * 3,5 \text{ K}) = \mathbf{0,013 \text{ W/m} * \text{K}}$ bzw.

ein mittlerer Wärmeübergangswert von $k_{\ddot{u}} = 0,43 \text{ W/m}^2 * \text{K}$.

Unterteilt man nach LCT- und Tankseite, läßt die am Anschlußkasten liegenden Meßstellen T_{702} und T_{703} aufgrund ihrer abweichenden Positionierung außer Betracht und benutzt dann für eine grobe Abschätzung vereinfachend nur die halben Werte (5W, 3,23m²), ergibt sich für die Tankseite bei $\Delta T_{max} = 2,11$ K (gemittelt):

$\lambda = \mathbf{0,022 \text{ W/m} * \text{K}}$ bzw. ein Wärmeübergangswert von $k_{\ddot{u}} = \mathbf{0,73 \text{ W/m}^2 * \text{K}}$

für die LCT- Seite bei $\Delta T_{max} = 2,81$ K:

$\lambda = \mathbf{0,017 \text{ W/m} * \text{K}}$. bzw. $k_{\ddot{u}} = \mathbf{0,57 \text{ W/m}^2 * \text{K}}$

Im Mittel also etwa $0,02 \text{ W/m} * \text{K}$. bzw. $k_{\ddot{u}} = \mathbf{0,65 \text{ W/m}^2 * \text{K}}$.

Unter Verwendung des mittleren Wärmeübergangswertes errechnet sich für die thermischen Verluste der Wicklung:

$$Q = A_W * k_{\ddot{u}} * \lambda T = 6,45 \text{ m}^2 * 0,43 \text{ W/m}^2 * \text{K} * 4 \text{ K} = \mathbf{11 \text{ W}}$$

Dieser Wert entspricht recht gut der Messung im 4,5 K – Betrieb (siehe Abschlußbericht, Teil 2.2.5.1, Auswertung von Herrn Zahn).

Bei Anwendung des, ohne der atypischen Meßstellen T_{702} und T_{703} bestimmten Wärmeübergangswert $k_{\ddot{u}} = 0,65 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$, errechnet sich eine Leistung von 16,8 W, die für eine Abschätzung noch recht gut mit der Messung übereinstimmt. Für eine genauere Betrachtung müßte allerdings auch die Position des Meßaufnehmers, zwischen Isolation und Bettung sowie der Meß- und Hochrechnungsfehler, einbezogen werden.

3.5.2. Bestimmung der Stabilitätsgrenze durch AC – Verluste der Wicklung

Der Test gliedert sich in zwei Teile wobei zuerst die reinen AC – Verluste bestimmt werden sollten. Bei allen Tests zu diesem Thema wurde nur die DEMO Spule alleine (Lastfall A) erregt. Die Kühlbedingungen entsprachen dem **3,8 K – Betrieb** dieses Lastfalls, bei nahezu konstanten Massenströmen (MFI700, 800, 810). Der Test begann unter thermisch stabilen, ausgeglichenen Temperaturbedingungen

Aus technischen Gründen war keine Stromrichtungsumkehr möglich. Daher begannen die Tests bei einem mittleren Gleichstrom von 0,54 kA der mit $\pm 305 \text{ A}$ sinusförmig moduliert wurde. Die max. Stromänderung betrug zu Anfang ca. 10 A/s und nach einigen Zwischenstufen am Ende des ersten Teils 102 A/s (ergibt etwa 67 mHz).

Da die Wicklungstemperaturen unter diesen Bedingungen nur wenig und relativ langsam anstiegen, wurden die Testparameter auf 0,93 kA $\pm 675 \text{ A}$, ca. 131 A/s (40 mHz) geändert.

Auch hierbei blieben die Auswirkungen auf die Temperaturen noch so gering, daß kein erkennbarer Gleichgewichtszustand innerhalb der veranschlagten Testzeit erreichbar schien.

Eine Auswertung dieser Testreihe ist somit wegen der hohen Unsicherheiten problematisch.

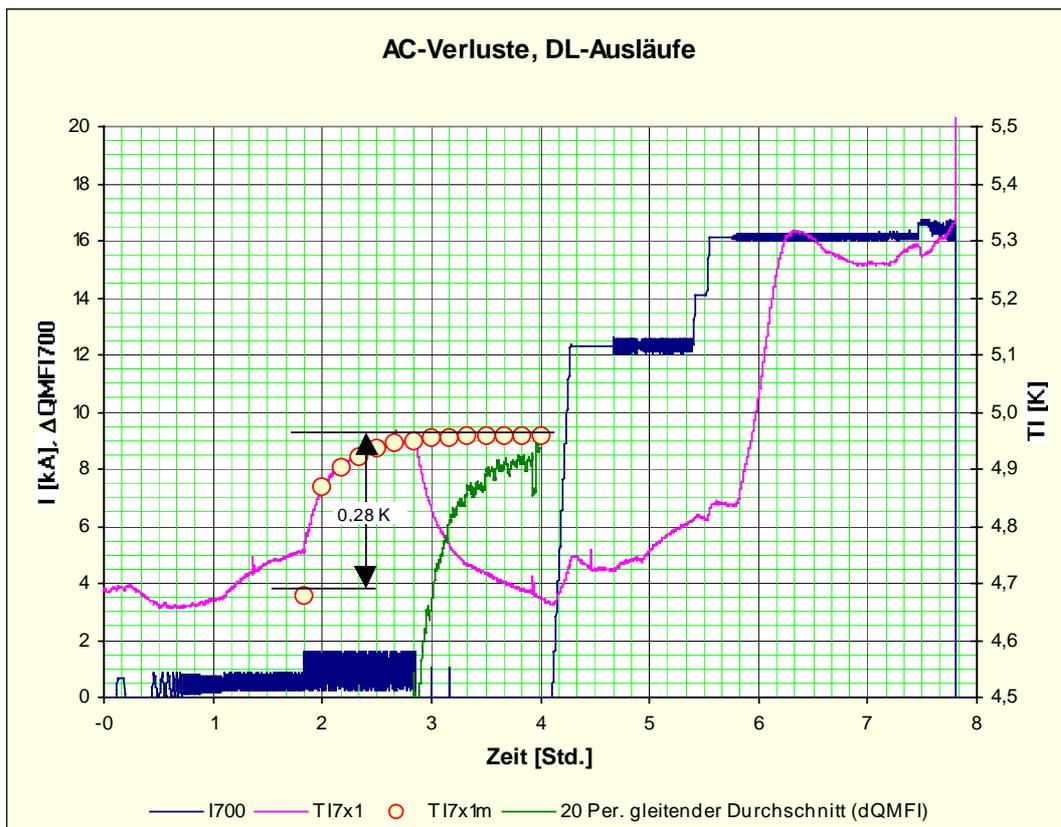


Abb. 3.5.2 a: Zusatzuntersuchung – AC- Verluste, Auswirkung auf Doppellagentemperaturen

In dem vorstehendem Diagramm bilden die Meßwerte der gemittelten Auslauftemperaturen aus den 6 Doppellagen (TI7x1), in dem Zeitfenster von t [h:mm] = 1:50 - 2:50, die Datenbasis für die Hochrechnung bis $t = 4:00$, auf einen thermisch eingeschwungenen Zustand (TI7x1m).

Obwohl für die Hochrechnung der zuvor bereits erkennbare leichte Temperaturanstieg aus dem Vortest nur bedingt berücksichtigt werden konnte, läßt sich aber zumindest abschätzen, daß bei diesem „current-sweeping“ – Test etwa **8,53 W** auf einer gesamten Leiterlänge von knapp 1020 m (8,4 mW/m) zu einem Temperaturhub von ca. **0,28 K** führen würde.

Nach einer Rückkühlphase (ohne Strom) von gut einer Stunde begann der zweite Testteil. Diesmal wurde zügig auf einen mittleren Gleichstrom von 12,3 kA gefahren und nach einer etwa 25 minütigen Wartezeit bei konstanten Strom und Kühlbedingungen dann mit ± 235 A moduliert (sinusförmig). Die max. Stromänderung lag bei ca. 140 A/s (98 mHz).

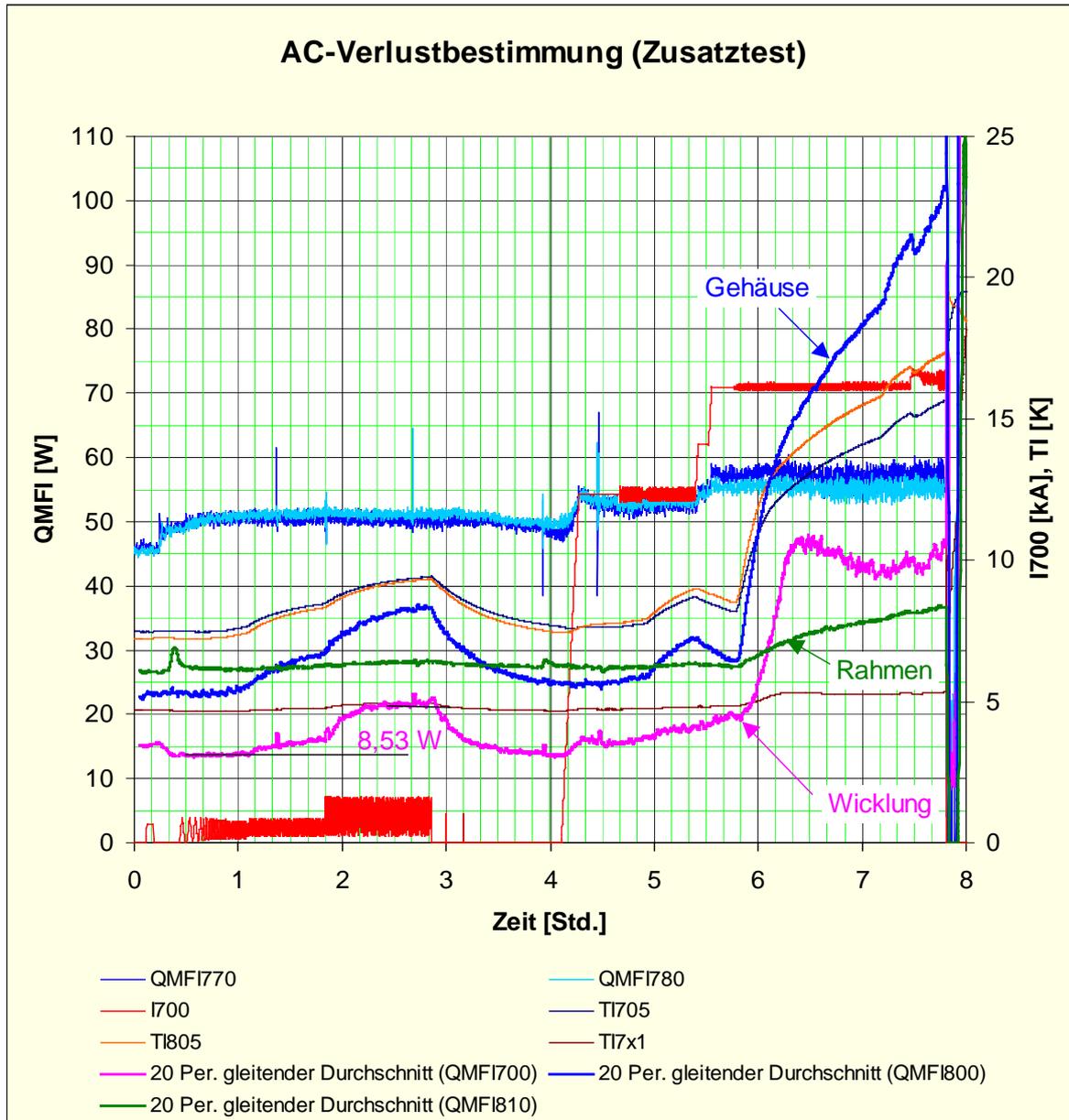


Abb. 3.5.2 b: Zusatzuntersuchung – AC- Verluste in Komponenten

Die Einstellung der „sweep“ – Amplitude mußte wegen der noch zu geringen Temperaturänderungen nach etwa 15 Minuten auf ± 275 A (36 mHz) erhöht werden. Da auch dieser Betrieb nicht den erwünschten Anstieg der Wicklungstemperaturen zur Folge hatte, beschloß man, nach Rücksprache mit Herrn Dr. Schauer, den Test bei einem höheren mittleren Gleichstrom fortzusetzen.

Nach zweistufiger Erhöhung auf 16,1 kA und etwa 10 minütiger Beruhigungszeit startete der erste „sweep“ – Test mit ± 100 A (100 A/s, 0,75 Hz), wurde dann auf ± 127 A (85 A/s, 0,49 Hz) und in einer letzten Stromstufe auf 16,4 kA mit ± 90 A (0,5 Hz) sowie, ca. 1 Minute vor dem Quench, noch auf ± 345 A (435 A/s, 0,2 Hz) erhöht. Die max. Feldänderung erreichte in der letzten Stromstufe 30 mT/s (im Vergleich STAR IV: 33 mT/s über 11 min stabil und bei 165 mT/s nach 4 s Quench). Die Reduzierung der, entsprechend den gewählten Stufen des

mittleren Gleichstroms, jeweils erreichten Stromanstiegszeiten, ist durch die Regelungsgrenzen des verwendeten Netzgerätes bedingt.

Der Quench trat dann 0,5 s nach dem letzten Maximalwert von 16,7 kA bei 16,5 kA auf. Er konnte an Hand der Quenchspannungen (EK9121/9122, EDS1112) sicher in der 6. Doppellage lokalisiert werden.

Wie aus vorherigem Diagramm ersichtlich, führten Wirbelströme im Gehäuse zum Anstieg aller, auf der Gehäuseoberfläche gemessenen, Temperaturen (i. M. um rund 9 K auf 18 K). Die konstant betriebene Gehäusekühlung konnte diesen Temperaturanstieg nicht mehr kompensieren.

Nahezu parallel zu den Gehäusetemperaturen stiegen auch die Temperaturen auf dem Wickelpaket kontinuierlich mit an. Im nächsten Diagramm ist die letzte Testphase am Beispiel der betragsmäßig etwa im mittleren Bereich liegenden Temperaturen TI705, 805 und der Auslauftemperatur von DL6 (TI761) wiedergegeben.

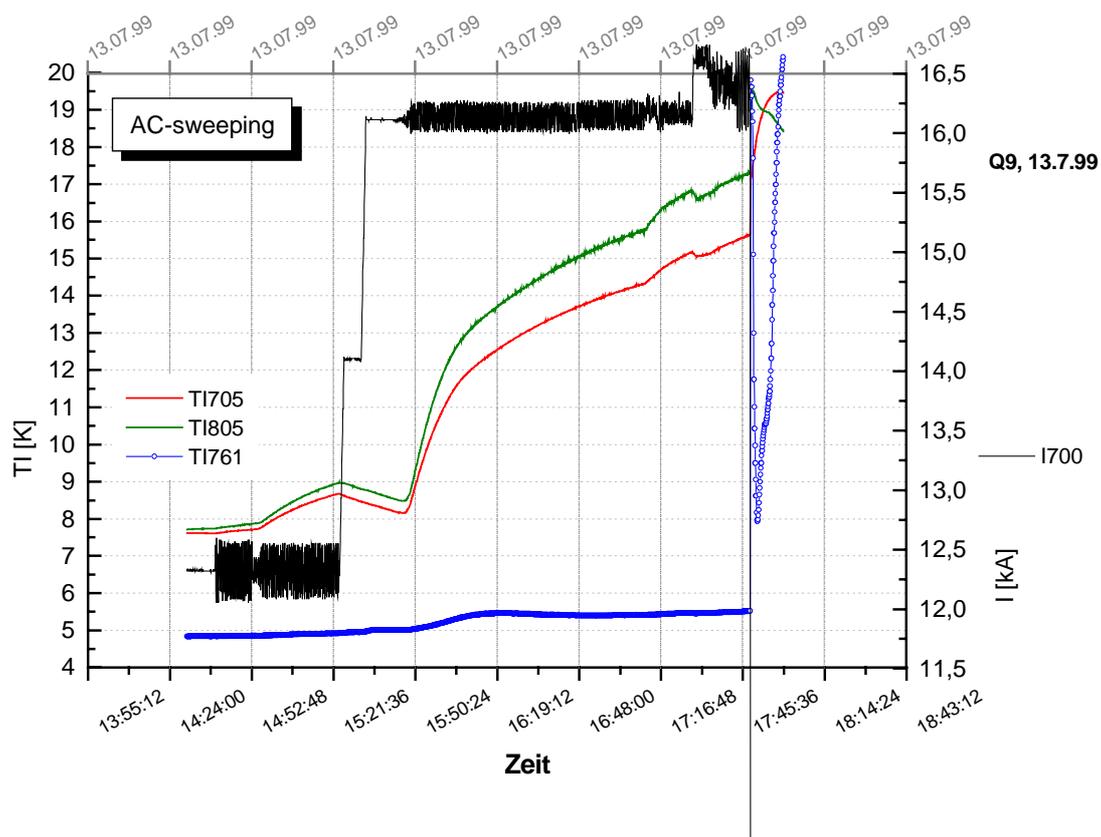


Abb. 3.5.2 c: Zusatzuntersuchung – AC-Verluste, mittlere Temperaturen am Gehäuse u. Wickelpaket

Dieser Temperaturverlauf muß der Wärmeleitung vom Gehäuse auf das Wickelpaket zugeordnet werden, da die LHe – Auslauftemperaturen aller 6 Doppellagen in dem betreffenden Zeitabschnitt relativ konstant blieben.

Zu einer ähnlichen Wirbelstromerwärmung kam es dabei auch am Zwischenrahmen.

Die Kühlleistung der massenflußmäßig korrigierten Doppellagen (QMFI710K-QMFI760K) stieg in der 16,1 kA – Stufe nach rund 15 Minuten Testzeit im Mittel bis 62 W an. Danach fiel sie ab und stagnierte bei ca. 58,2 W über einen längeren Zeitraum (ca. 80 Minuten) bis fast zum Quencheintritt. Es läßt sich aus dem Verlauf ein Leistungshub von **41,2 W** incl. DC-Kontaktwiderstand u. Restgaswärmeleitungsanteilen abschätzen, wobei der untere Bezugslevel wegen der vorangegangenen Strombeanspruchung relativ willkürlich angenommen werden mußte. In Abb. 3.5.2d sind neben dem Stromverlauf und einer Gehäusetemperatur, die Verluste im Gehäuse, den beiden Bussen, der massenflußmäßig unkorrigierte Doppellagensgesamtverlust und zugehörige Einzelverluste in den 6 Doppellagen dargestellt.

Läßt man einmal die Stromwärmeverluste in den Kontakten außer Betracht, dann zeigt der Test zumindest, daß bei einem mittleren Leiterstrom von 16,1 kA der CIC – Leiter mit **Verlusten** (AC, Strahlung und Restgaswärmeleitung) **von rund 40 mW/m ohne Stabilitätsverlust** über eine längere Zeit betreibbar ist. Die Auslegung des Leiters erfolgte für 6 mW/m für alle geplanten Lastfälle. Allerdings führt die wirbelstrombedingte Erwärmung im Spulengehäuse letztlich zu Betriebseinschränkungen, sofern die verfügbare Kühlung nicht in der Lage ist diesen Wärmeanteil abzuführen.

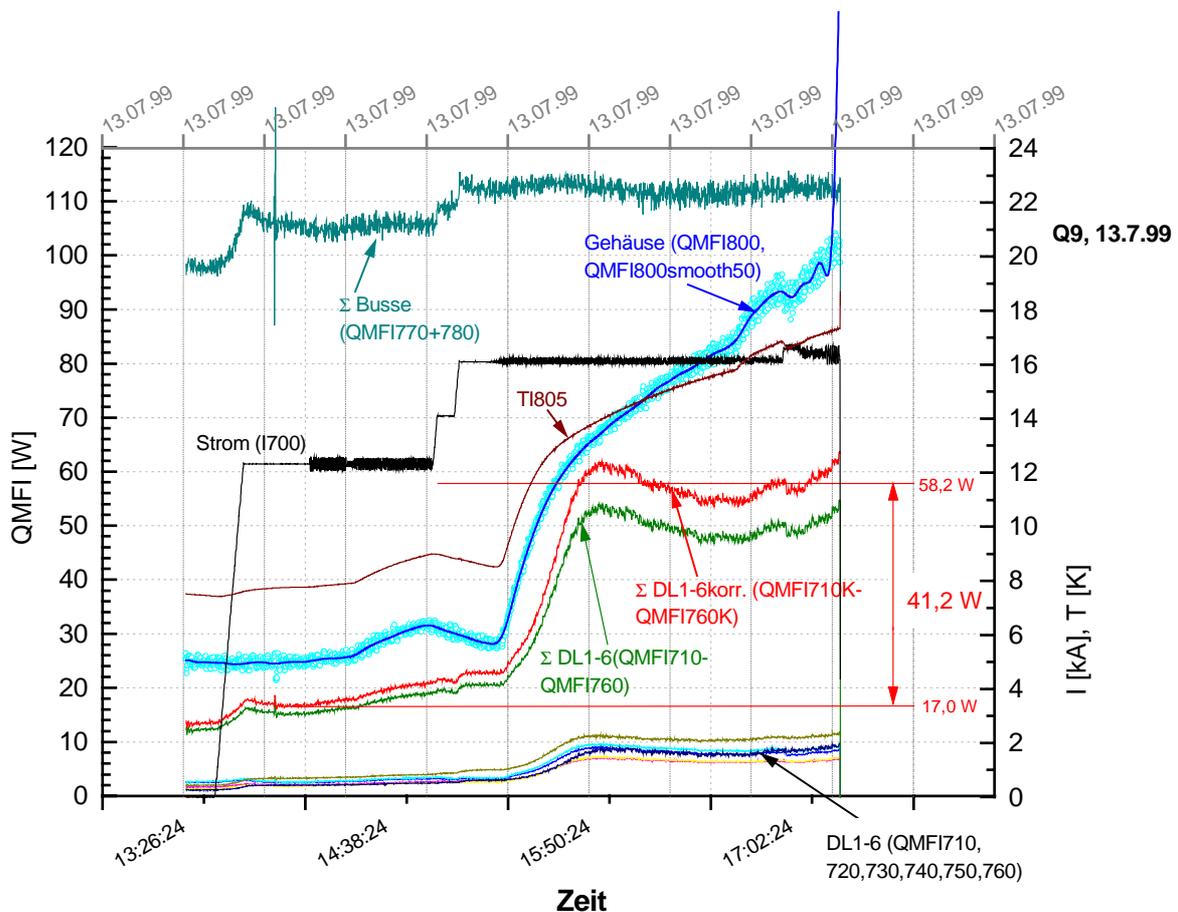


Abb. 3.5.2 d: Zusatzuntersuchung – AC- Verluste in den 6 Doppellagen

Die max. Austrittstemperatur der 6. Doppellage blieb mit 5,5 K noch unter der bei höchstem Strom im Lastfall A gemessenen Temperatur. Der Quench trat erstmals in der 6. Doppellage auf, die sich in einem deutlich niedrigerem Feld befindet.

Aus der Summe vorgenannter Feststellungen sind Veränderungen, bedingt durch den Wärmeeinfluß vom Gehäuse, als auslösende Quenchursache nicht mehr auszuschließen.

Es scheint daher relativ unwahrscheinlich, daß unter den gegebenen Testbedingungen, AC-Verluste im supraleitenden Kabel den Quench Nr. 9 unmittelbar ausgelöst haben.

3.6 Bestimmung der Kontaktwiderstände

3.6.1 Doppellagenkontakte

Da die Widerstände der Kontakte zwischen den einzelnen Doppellagen elektrisch nicht gemessen werden konnten, weil keine passenden Spannungsabgriffe an den entsprechenden Stellen existierten, wurde versucht, aus dem Unterschied in den gemessenen thermischen Verlusten jeder der Doppellagen ohne und mit Leiterstrom Aussagen über die Größe der Widerstände machen zu können. Abbildung 3.6-1 zeigt schematisch die Anordnung der Doppellagenverbindungen mit den Strömungsrichtungen des Heliums.

Hierzu wurde exemplarisch ein Testlauf herangezogen, wo ein Leiterstrom von 14.75 kA über längere Zeit gefahren worden war. Die thermischen Verluste wurden hierbei gemäß den Angaben in Abschnitt 2 auf die tatsächlichen Massenströme korrigiert. Abbildung 3.6-2 zeigt die thermischen Verluste der Doppellagen DL1 bis DL6 sowie den entsprechenden Leiterstrom als Funktion der Zeit. Extra markiert sind die beiden Bereiche, aus denen die Verlustwerte entnommen wurden. In Abbildung 3.6-3 sind die abgeleiteten Verluste für die einzelnen Doppellagen dargestellt.

Hieraus können allerdings nicht direkt die Doppellagenwiderstände abgeleitet werden, weil zu den thermischen Verlusten der einzelnen Doppellage die Verlustanteile der zugehörigen zwei Kontakte zu zählen sind. Es wurde hier das folgende Verfahren gewählt: Unter der Annahme, dass jede Doppellagenverbindung je zur Hälfte vom Helium der zugehörigen Doppellagen gekühlt werden, sowie unter der Annahme, dass die Widerstandsanteile der Doppellage 1 etwa gleich groß sind, ergeben sich gemäß Anlage 3.B folgende Doppellagenkontaktwiderstände:

$$R_{DL12} = 1,0 \text{ nOhm}$$

$$R_{DL23} = 1,66 \text{ nOhm}$$

$$R_{DL34} = 4,32 \text{ nOhm}$$

$$R_{DL45} = 2,48 \text{ nOhm}$$

$$R_{DL56} = 14,34 \text{ nOhm}$$

$$R_{Bus(-)} = 0,51 \text{ nOhm}$$

$$R_{Bus(+)} = 0,87 \text{ nOhm}$$

Anzumerken ist, dass die Widerstände der Endverschlüsse natürlich größer sind als angegeben, weil sie ja durch die SL-Stromschienen gekühlt werden, welche wegen des wesentlich höheren Massenstroms einen größeren Teil der Joule'schen Verluste abführen.

Die 50% Aufteilung zwischen den einzelnen Doppellagen erscheint dagegen wegen des annähernd gleichen Massenstroms gerechtfertigt.

3.6.2 Kontaktwiderstände zwischen den SL-Stromschienen und der DEMO-Spule bzw. den Stromzuführungen

Die Kontaktwiderstände der Klemmverbindungen zwischen den SL-Stromschienen der LCT Spule bzw. der W 7-X DEMO Spule und den entsprechenden Stromzuführungen sind mittels Spannungsabgriffen gemessen worden. Abbildung 3.6.4 zeigt die gemessenen Spannungsabfälle als Funktion des Leiterstroms. Hieraus ergeben sich folgende Kontaktwiderstände:

$$R_{(-)\text{-LCTBus}} = 4,84 \text{ nOhm}$$

$$R_{(+)\text{-LCTBus}} = 4,83 \text{ nOhm}$$

$$R_{(-)\text{-W 7-X Bus}} = 18,6 \text{ nOhm}$$

$$R_{(+)\text{-W 7-X Bus}} = 18,8 \text{ nOhm}$$

Beide Kontaktpaare haben, wie man sieht, sehr unterschiedliche Werte, während sie innerhalb des betreffenden Paares fast gleich sind. Hierauf wird in Abschnitt 3.6.3 noch eingegangen werden.

Die Übergangswiderstände der Klemmverbindungen zwischen der DEMO Spule und den SL-Stromschienen bzw. zwischen den Stromschienen und den Stromzuführungen sind auch mittels der thermischen Verluste (d.h. kalorimetrisch) gemessen worden. Abbildung 3.6.5 zeigt die thermischen Verluste der (-)- bzw. (+)-Stromschienen als Funktion der Zeit, wobei wieder der Testlauf 45 verwendet wurde (wie in Abschnitt 3.6.1). Vergleicht man die elektrisch bestimmten Widerstände mit den kalorimetrisch bestimmten Verlusten der SL-Stromschienen, so fällt auf, dass letztere sehr viel größer sind. Als weitere mögliche Quellen für einen Beitrag zu den Stromschienenverlusten sind zu nennen:

- Restgaswärmeleitung und
- Festkörperwärmeleitung von den Stromzuführungen.

Zu ersterem sei dabei angemerkt, dass sich durch ein Leck im Stromzuführungsvakuum, welches sich im Strombetrieb vergrößerte, das Tankvakuum verschlechterte und sich dadurch die Verluste auf die Stromschienen durch Restgaswärmeleitung erhöhten. Allerdings bewegten sich diese Verluste in der Größenordnung von zehntel Watt, was bei einer Grundlast von mehr als 30 W pro Stromschiene vernachlässigbar ist. Die Verluste durch Festkörperwärmeleitung von den Stromzuführungen sind nicht vorhanden, da die Temperaturen, die oberhalb der Klemmkontakte auf den Stromzuführungsleitern gemessen wurden, niedriger sind als die Austrittstemperatur des Heliums aus den SL-Stromschienen. Da aber die Kupfertemperaturen der Stromschienenkontakte stromzuführungsseitig nicht

niedriger sein können als die Heliumaustrittstemperaturen (anderenfalls würden die Kupferkontakte das Helium kühlen), ergibt sich somit ein Temperaturgradient zu den Stromzuführungen hin, d.h. die Stromzuführungen kühlen die Klemmkontakte mit.

Somit bleiben als Quelle für die Stromschienenverluste nur die Ohm'schen Verluste. Somit ergeben sich gemäß Anlage 3.B folgende Kontaktwiderstände in den Stromschienen:

$$R_{(+)-Bus} = 52,3 \text{ nOhm}$$

$$R_{(-)-Bus} = 37,1 \text{ nOhm}$$

Das bedeutet, dass die Kontakte der SL-Stromschienen am spulenseitigen Ende, die ja baugleich mit denen am stromzuführungsseitigen Ende sind, auch vergleichbare Widerstände besitzen, die jedoch wesentlich größer sind als diejenigen der Doppellagenverbindungen der DEMO-Spule.

$$R_{(+)-Spulenseite} = 52,3 \text{ nOhm} - 18,8 \text{ nOhm} = 33,5 \text{ nOhm}$$

$$R_{(-)-Spulenseite} = 37,1 \text{ nOhm} - 18,6 \text{ nOhm} = 18,5 \text{ nOhm}$$

Selbst unter Berücksichtigung der Tatsache, dass die Klemmverbindungen durch die Anwesenheit zweier zusätzlicher Grenzflächen (Kupfer-Indiumfolie, Indiumfolie-Kupfer, siehe weiter unten) einen höheren Widerstand als die Doppellagenverbindungen haben sollten, ist auch hier eine Verbesserung dringend geboten. Glücklicherweise war die Kühlung in den Kontakten der Stromschienen gut genug, um die Joule'schen Verluste im Strombetrieb abführen zu können. Anderenfalls wäre ein stabiler Betrieb der DEMO Spule bis zu einem Leiterstrom von fast 20 kA unmöglich gewesen.

3.6.3 Diskussion der Kontaktwiderstände

Abbildung 3.6.6 zeigt die Widerstände der Doppellagenverbindungen und der Klemmverbindungen zwischen DEMO Spule bzw. Stromzuführungen und den SL-Stromschienen. Auch hieraus ersieht man den wesentlich höheren Widerstand, den die Klemmverbindungen haben, im Vergleich zu den Doppellagenverbindungen. In Abbildung 3.6-7 ist der Aufbau der Doppellagenverbindung bzw. der Klemmverbindung schematisch dargestellt. Bei den vier Spulen- und Stromzuführungsanschlußkontakten handelt es sich um geschraubte und mit einer Indiumzwischen-schicht kontaktierte Kupferplatten, bei denen auf der zum Kontakt abgewandten Seite, die eingepreßten SL-Subkabel liegen. Die Doppellagenverbindungen bestehen dagegen aus einem einzigen Kupferkontaktstück mit beidseits eingepreßten SL-Subkabeln. Dieser Kontaktaufbau führt prinzipiell zu kleineren Kontaktwiderständen.

Der Gesamtwiderstand der Verbindungen setzt sich also im wesentlichen aus den verschiedenen Grenzflächenwiderständen zusammen:

Doppellagenverbindung:

Kupfer(SL) /Kupfer(Kontakt) + Kupfer(Kontakt)/Kupfer(SL)

Klemmverbindung:

Kupfer(SL)/Kupfer(Kontakt) + Kupfer(Kontakt)/Indiumfolie
+ Indiumfolie/Kupfer(Kontakt) + Kupfer(Kontakt)/Kupfer(SL)

Hieraus folgt zwangsläufig, dass die Klemmverbindungen höhere Widerstände haben sollten. Eine weitere Ursache für den erhöhten Verlustanteil dürfte auch die Verwendung von Spannschrauben mit nachlassender Vorspannung gewesen sein (Vollschaftschrauben ohne Dehnstück, beige stellt von der Firma Noell, die zu einer Reduktion der Flächenpressung auf ca. 30% während der Abkühlung und im Test führten). Diese Tatsache erklärt auch den geringeren Widerstand der Klemmkontakte zwischen den Stromschienen der LCT-Spule und deren Stromzuführungen, weil hier Dehnschrauben verwendet worden sind.

3.B Abschätzung der Kontaktwiderstände

kalorimetrisch bestimmte Verlustleistungen: Meßstrom: daraus ber. Ersatzwiderstand:

a) Doppellagen:

$P_1 := 0.22 \cdot W$	$I := 14.75 \cdot 10^3 \cdot A$	$R_{L1} := \frac{P_1}{I^2}$	$R_{L1} = 1.011 \cdot 10^{-9} \Omega$
$P_2 := 0.29 \cdot W$		$R_{L2} := \frac{P_2}{I^2}$	$R_{L2} = 1.333 \cdot 10^{-9} \Omega$
$P_3 := 0.65 \cdot W$		$R_{L3} := \frac{P_3}{I^2}$	$R_{L3} = 2.988 \cdot 10^{-9} \Omega$
$P_4 := 0.74 \cdot W$		$R_{L4} := \frac{P_4}{I^2}$	$R_{L4} = 3.401 \cdot 10^{-9} \Omega$
$P_5 := 1.83 \cdot W$		$R_{L5} := \frac{P_5}{I^2}$	$R_{L5} = 8.411 \cdot 10^{-9} \Omega$
$P_6 := 1.75 \cdot W$		$R_{L6} := \frac{P_6}{I^2}$	$R_{L6} = 8.044 \cdot 10^{-9} \Omega$

b) SL-Stromschienen:

$P_{B_plus} := 11.37 \cdot W$	$R_{B_plus} := \frac{P_{B_plus}}{I^2}$	$R_{B_plus} = 5.226 \cdot 10^{-8} \Omega$
$P_{B_min} := 8.07 \cdot W$	$R_{B_min} := \frac{P_{B_min}}{I^2}$	$R_{B_min} = 3.709 \cdot 10^{-8} \Omega$

Annahmen:

- 1) hälftige Aufteilung der Verlustanteile in allen DL
- 2) gleiche Widerstandsanteile in DL1

$R_{12} := \frac{1}{2} \cdot R_{L1}$	$R_{12} = 5.056 \cdot 10^{-10} \Omega$		
	$R_{21} := R_{12}$	$R_{K1} := R_{12} + R_{21}$	$R_{K1} = 1.011 \cdot 10^{-9} \Omega$
$R_{22} := R_{L2} - R_{21}$	$R_{22} = 8.273 \cdot 10^{-10} \Omega$		
	$R_{31} := R_{22}$	$R_{K2} := R_{22} + R_{31}$	$R_{K2} = 1.655 \cdot 10^{-9} \Omega$
$R_{32} := R_{L3} - R_{31}$	$R_{32} = 2.16 \cdot 10^{-9} \Omega$		
	$R_{41} := R_{32}$	$R_{K3} := R_{32} + R_{41}$	$R_{K3} = 4.321 \cdot 10^{-9} \Omega$
$R_{42} := R_{L4} - R_{41}$	$R_{42} = 1.241 \cdot 10^{-9} \Omega$		
	$R_{51} := R_{42}$	$R_{K4} := R_{42} + R_{51}$	$R_{K4} = 2.482 \cdot 10^{-9} \Omega$
$R_{52} := R_{L5} - R_{51}$	$R_{52} = 7.17 \cdot 10^{-9} \Omega$		
	$R_{61} := R_{52}$	$R_{K5} := R_{52} + R_{61}$	$R_{K5} = 1.434 \cdot 10^{-8} \Omega$

über Kontaktspannungsmessung direkt bestimmter Widerstand:

Verbindung Stromzuführung (SZ) – Bus

$$R_{B_plus_SZ} = 18,8 \text{ nOhm}$$

$$R_{B_min_SZ} = 18,6 \text{ nOhm}$$

Zusammen mit den kalorimetrisch bestimmten Gesamtverlusten ergibt sich für den Spulenanschluß:

$$R_{B_plus_Demo} = R_{B_plus} - R_{B_plus_SZ}$$

$$R_{B_plus_Demo} = 3,35 \cdot 10^{-8} \Omega$$

$$R_{B_min_Demo} = R_{B_min} - R_{B_min_SZ}$$

$$R_{B_min_Demo} = 1,85 \cdot 10^{-8} \Omega$$

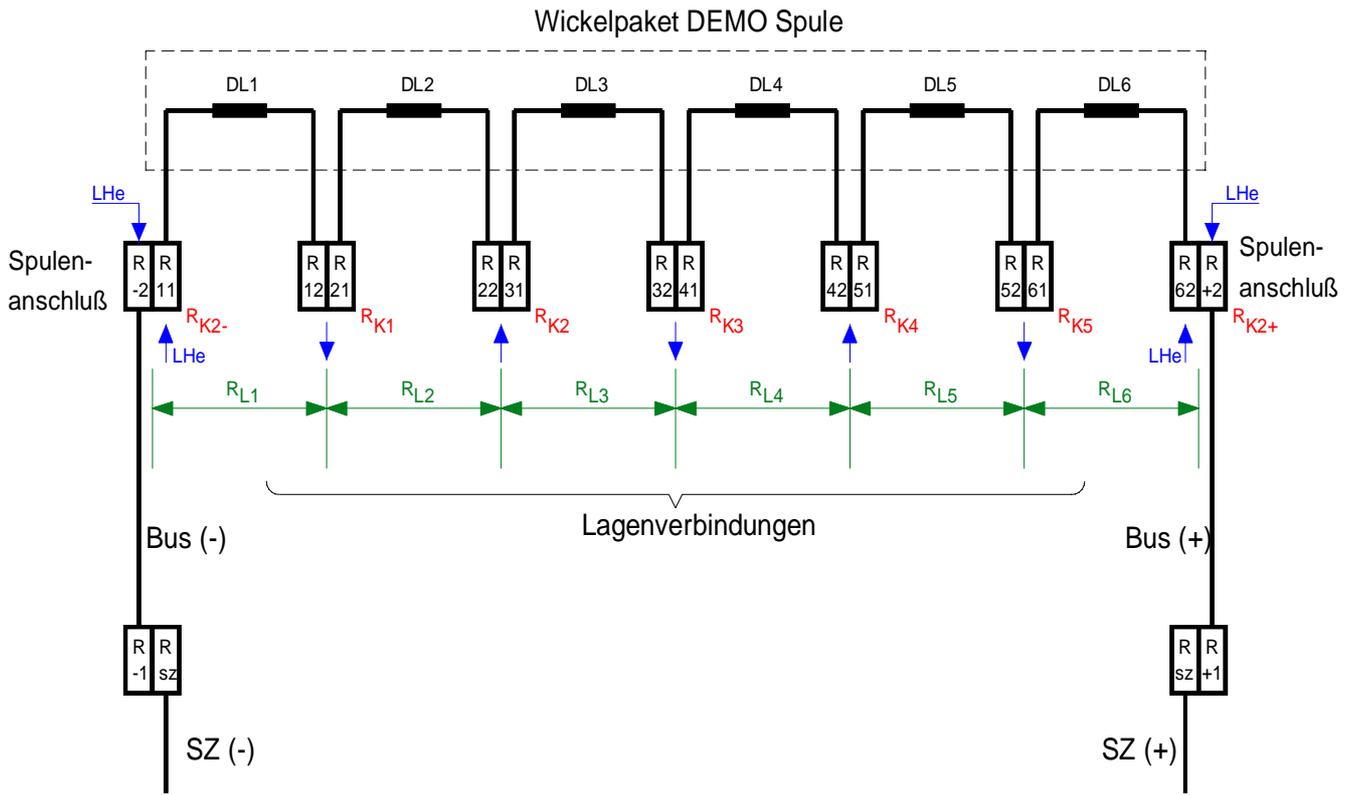


Abbildung 3.6-1 Schematische Darstellung der Dopellagenverbindungen und der Strömungsrichtungen

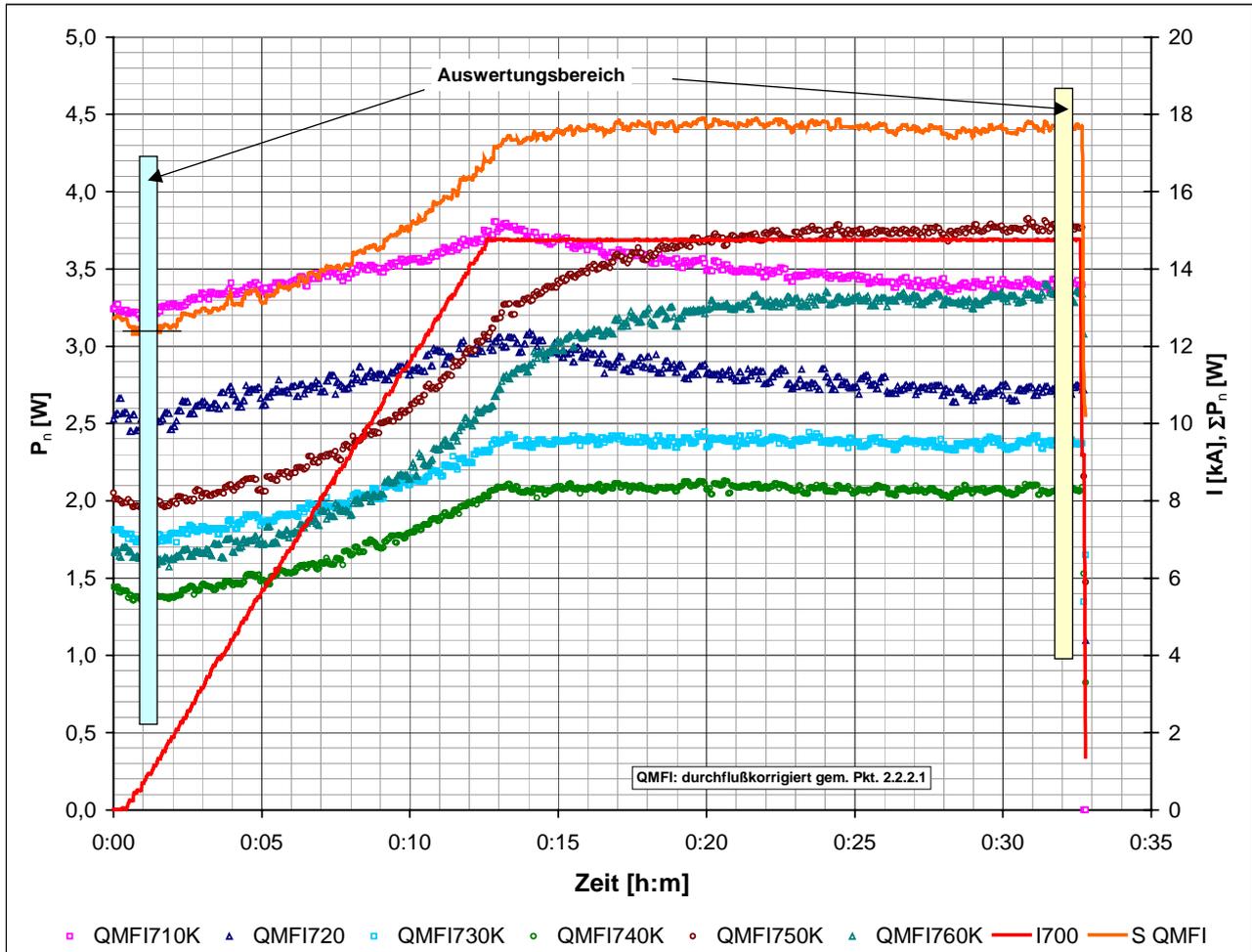


Abbildung 3.6-2 Gemessene Verluste in den einzelnen Doppellagen als Funktion der Zeit für einen Leiterstrom von 14.75 kA

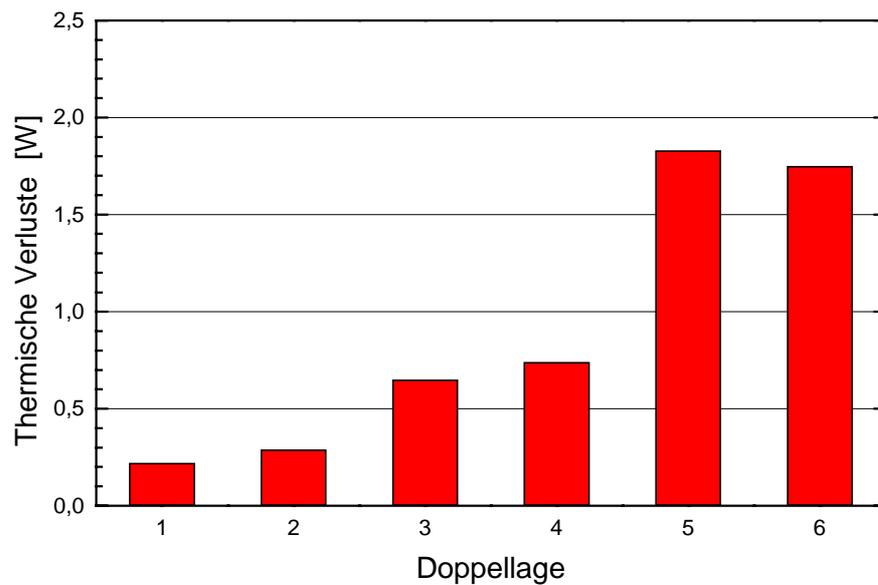


Abbildung 3.6-3 Thermische Verluste der Doppellagen 1 bis 6

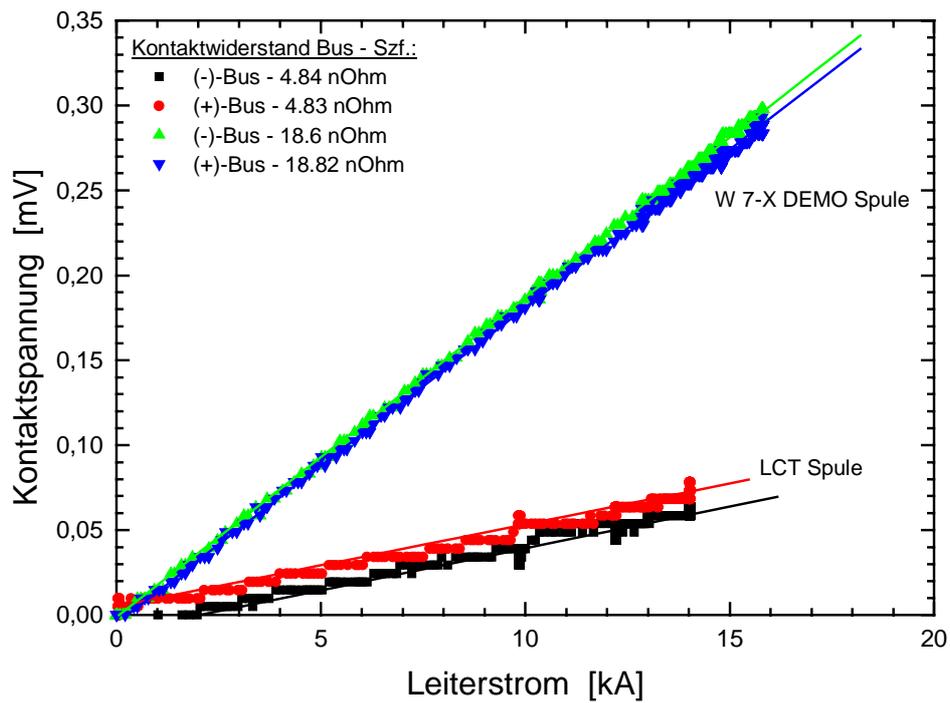


Abbildung 3.6.4 Spannungsabfall über die Kontakte zwischen Stromschiene und Stromzuführung als Funktion des Leiterstroms

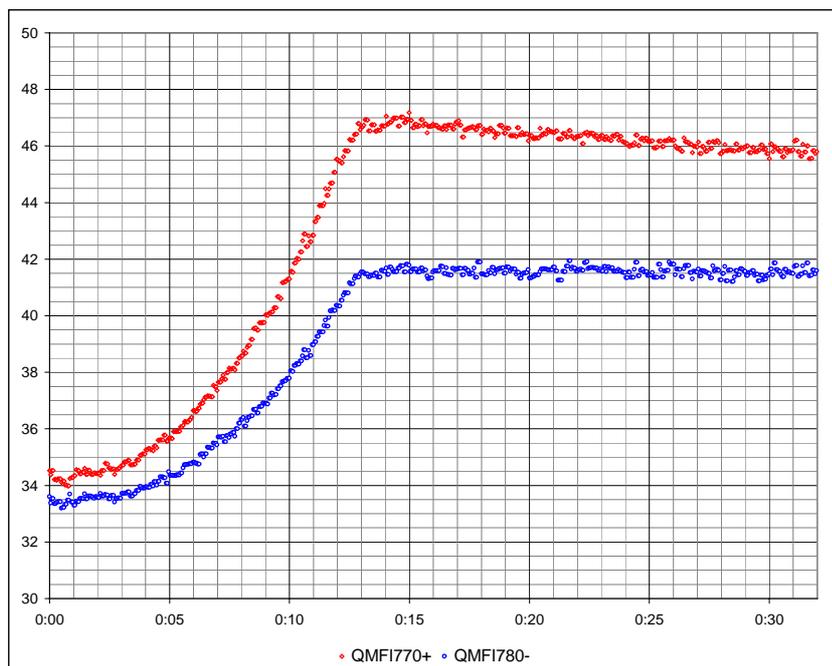


Abbildung 3.6.5 Thermische Verluste der SL-Stromschiene in Watt als Funktion der Zeit

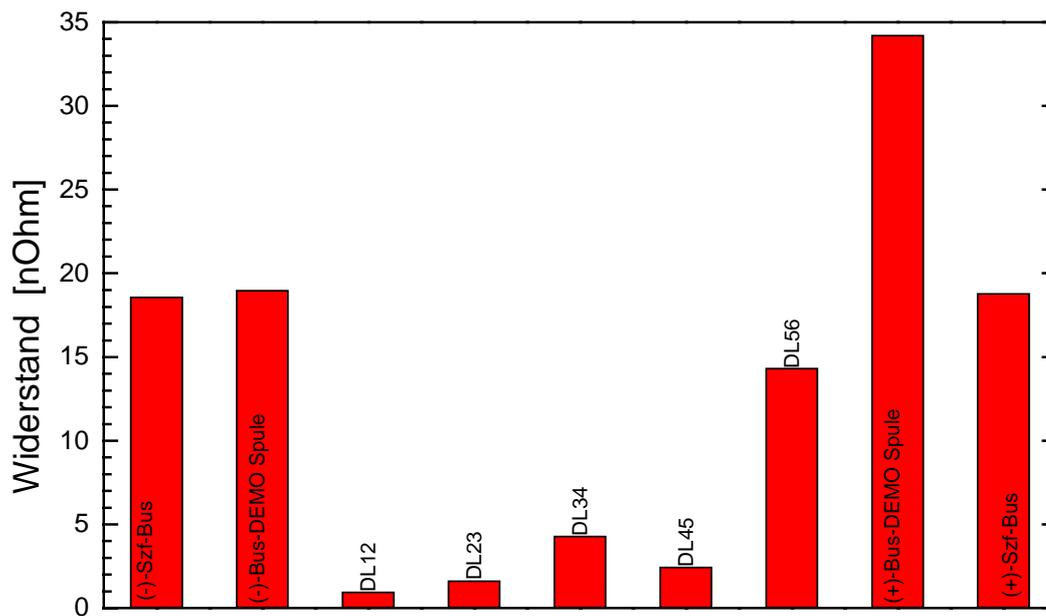


Abbildung 3.6.6 Widerstände der Doppellagenverbindungen und der Klemmverbindungen zwischen der DEMO Spule bzw. den Stromzuführungen und den SL-Stromschienen

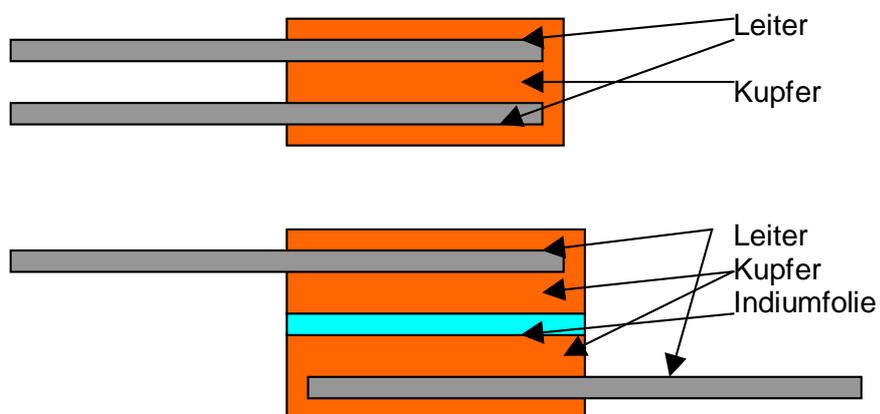


Abbildung 3.6-7 Schematische Darstellung des Aufbaus der Doppellagenverbindungen in der DEMO Spule (oben) bzw. der Klemmverbindungen zwischen DEMO-Spule und SL Stromschiene bzw. SL-Stromschiene und Stromzuführungen (unten)

3.7 Zusammenfassung

1. Das Quenchdetektionssystem der W 7-X DEMO Spule hat problemlos gearbeitet, wobei die dem Leiter eigene sehr hohe Quenchausbreitungsgeschwindigkeit zu recht kurzen Detektionszeiten führte.
2. Im Lastfall A erreichte die W 7-X DEMO Spule knapp 90% des kritischen Stromes, der sich durch Extrapolation aus dem mittleren kritischen Strom der Supraleiterdrähte ergeben würde, wie sie der Hersteller angegeben hat (siehe Teil 1 des Abschlussberichts). Unter der Annahme, dass der gemessene Quenchstrom nicht kraftbegrenzt ist, kann man die bei Austrittstemperaturen zwischen 5 K und 5,4 K gemessenen Quenchströme für 6,2 T, bei 4,2 K umrechnen und erhält einen Erwartungswert von knapp 30 kA.
3. Im Lastfall C hat die Spule trainiert. Hierzu einige einleitenden Bemerkungen: die DEMO Spule muss sich für den jeweiligen Lastfall im Gehäuse neu positionieren. Diese andere Positionierung ist notwendigerweise immer mit der Erzeugung einer Störenergie verbunden. Darauf weisen auch die mechanischen Messungen hin: manche Sensoren zeigen, dass die Kraftübertragung erst zu einem späteren Zeitpunkt beginnt. Die Spule wurde allerdings bei den Tests extremen Lastfällen ausgesetzt: Einzelspule und extreme Schiefast, wobei letzterer Fall für den W 7-X Magneten nicht den Normalbetrieb darstellt sondern einen Störfall, der eine Sicherheitsentladung zur Folge haben dürfte/müsste. Sie erreichte im dritten Anlauf 16,73 kA bei einer Austrittstemperatur von 5,02 K, was den nach dem Lastfall A erreichten kritischen Werten entspricht. Nach Unterbrechung durch die Sweep-Tests (Einzelspulentest, d.h. Lastfall A) bis zum Quench erreichte die Spule trotz abgesenkter Eintrittstemperatur nur noch 16,13 kA. Dieses Verhalten lässt sich nur durch Energieeintrag in Folge von Bewegung erklären, wobei Strandbewegungen ausgeschlossen werden können, weil damit der Unterschied zwischen Lastfall A und C nicht verständlich wäre. Wahrscheinlicher erscheint vielmehr eine Bewegung des gesamten Wicklungspakets oder ein Teil desselben, was durch eine Abschätzung auch untermauert wurde. Durch die gute thermische Ankopplung des Supraleiterkabels an die gut leitende Leiterhülle ergibt sich eine hohe Empfindlichkeit des Kabels gegen äußeren Energieeintrag. Dies ist insbesondere dann von Bedeutung, wenn der Leiter oberhalb des sog. "limiting current" betrieben wird, d.h. für $Stekly > 1$. Dann ist nämlich das die Supraleiterdrähte umgebende Helium nicht mehr so effektiv und die Enthalpie des Kabels beginnt dominant zu werden. Abschätzungen der Stabilitätsgrenze haben ergeben, dass die Energiemarge des Supraleiterkabels zwischen 1 und 5 mJ/cm^3 betragen hat. Dies erscheint plausibel. Im Gegensatz dazu betrug die Energiemarge für die "Trainingsquenche" zwischen 9 und 15 mJ/cm^3 .

4. Eine Extrapolation der erzielten Ergebnisse auf die Serienspulen (Annahme: gleiche Temperatur- und Magnetfeldverteilung) ergab für den Standardfall eine genügend große Energiemarge, was für den "low shear" Fall nicht gesagt werden kann. Abhängig von der erwarteten Temperatur am Ort der kleinsten Marge, d.h. Austritt der DL 1, erhält man 14 mJ/cm^3 (4,8 K) bzw 25 mJ/cm^3 (4,3 K), wobei auch hier wieder zu Buche schlägt, dass sich der Leiter weit oberhalb des "limiting current" befindet.
5. Die Doppellagenverbindungswiderstände schwankten zwischen 1 nOhm und 14,3 nOhm und zeigen somit eine ungenügende Reproduzierbarkeit. Da den Autoren der genau Herstellungsprozess nicht bekannt ist, können auch keine Aussagen über die mögliche Ursache gemacht werden. Die Stromschienenseitigen Klemmkontakte der Spule zeigten noch erheblich höhere Widerstandswerte (zwischen 19 und 34 nOhm), was dazu führte, dass die Stromschienen genausoviel He-Massenstrom benötigten wie die gesamte Wicklung. Selbst unter Berücksichtigung der Tatsache, dass die Klemmverbindungen durch die Anwesenheit zweier zusätzlicher Grenzflächen (Kupfer-Indiumfolie, Indiumfolie-Kupfer) einen höheren Widerstand als die Doppellagenverbindungen haben sollten, ist auch hier eine Verbesserung dringend geboten.
6. In Erweiterung des eigentlichen Testprogramms wurden Untersuchungen zur Wärmeleitung durch die Wicklungsbettung und zur AC-Stabilität durchgeführt. Aus der Kühlleistung, der Geometrie und dem hochgerechneten Temperaturhub bei abgeschalteter Gehäusekühlung wurde eine mittlere Wärmeleitfähigkeit von $0,02 \text{ W/mK}$ abgeleitet. Reine AC-Verluste, d.h. ohne Gleichstromanteil, von $8,4 \text{ mW/m}$, führten zu einem Temperaturhub von ca. $0,28 \text{ K}$. Bei weiteren Versuchen, AC-Verluste durch "sweeping" des mittleren Gleichstromes zu erzeugen, quenchte der Leiter vorzeitig infolge wirbelstrombedingter zugeführter hoher Verluste. Es konnte aber nachgewiesen werden, dass der Leiter bei einem Strom von $16,1 \text{ kA}$ Verlusten von rund 40 mW/m ohne Stabilitätsprobleme über längere Zeit standhält.

Teil 4: Mechanisches Verhalten der W 7-X DEMO Spule

Teil 4: Mechanisches Verhalten

4.1:	Bewertung der Meßgenauigkeit der mechanischen Sensoren GDI und GRI	235
4.2:	Bewertung der horizontalen Abstützung	239
4.3.	Mechanisches Verhalten der Testanordnung	243
4.3.1.	Abstützkonzept und Belastungen	243
4.3.2.	Verformungsmessung	245
4.3.2.1.	Meßaufbau	245
4.3.2.2.	Meßvorbereitungen	245
4.3.2.3.	Abkühlung und Lastfall A	246
4.3.2.4.	Lastfall B und C	248
4.3.2.5.	Zusammenfassung zur Verformungsmessung	249
4.3.3.	Dehnungsmessung	250
4.3.3.1.	Meßaufbau	250
4.3.3.2.	Abkühl- und Aufwärmvorgang	251
4.3.3.3.	Lastfall A	253
4.3.3.4.	Lastfall B und C	255
4.3.3.5.	Zusammenfassung zur Dehnungsmessung	256
	Anlagen zu Teil 4.3	258

4.1 Bewertung der Messgenauigkeit der mechanischen Sensoren GDI und GRI

Zur Messung der Gehäuseverformung war die W 7-X Spule mit 11 potentiometrischen Wegaufnehmer bestückt. Die Aufnehmer wurden mit 100 mV Konstantspannung versorgt, damit waren die Verformungsmessungen des Gehäuses beim Abkühlen als auch beim Erregen gewährleistet. Die Gesamtlängslänge der einzelnen Sensoren war 50 mm. Die Voreinstellung an den Sensoren war derart, dass sowohl die beim Abkühlen des Gehäuses erwartete Schrumpfung als auch die durch Magnetkräfte berechnete Verformung beim Auferregen gemessen werden konnten. Aus zunächst nicht nachvollziehbaren Gründen haben 5 Sensoren beim Erregen der Spule keine Messwertänderung gezeigt.

(Siehe Anhang: Funktionsprüfung an dem potentiometrischen Wegaufnehmer GDI 878).

Die mechanischen Spannungen am Spulengehäuse wurden mit Dehnungsmessstreifen (Rosetten) in Halbbrückenschaltung gemessen. Die Brückenspeisespannung für die Halbbrücken war 5V, 225 Hz. Auf der Basis vorhandener FEM Berechnung waren insgesamt 10 Rosetten an der Südseite (zur LCT Spule) als auch Nordseite (zur Tankwand) des Gehäuses appliziert.

Die Erfassung der Messsignale wurde über ein Hottinger Vielstellen – Meßgerät realisiert, die Zykluszeit war ca. 3 Sekunden. Die Umrechnung der Messsignale in physikalische Einheiten erfolgte in dem OS / 2 PC.

(Abb. 4.1-1 TOSKA SYSTEM COMPONENTS)

Potentiometrische Wegaufnehmer GDI

Hottinger Vielstellen Meßgerät, Umschalteinheit UMH 3203 , 100 mV Eingang

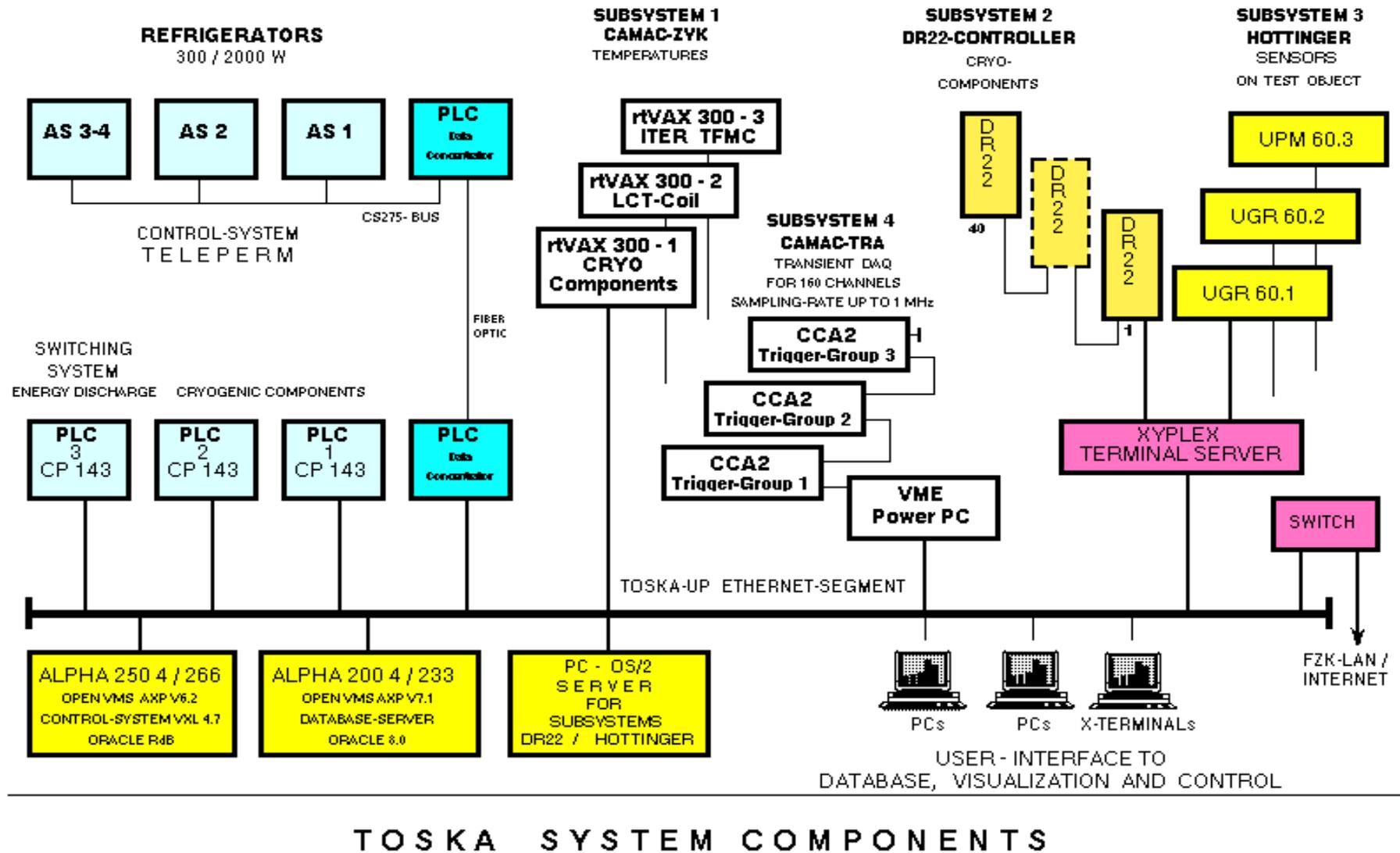
Auflösung gemäß Spezifikation	= ± 10 µV
Auflösung GDI gemäß Spezifikation	= ± 25 µm
Systemgenauigkeit	= ± 40 µm

Dehnungsmessstreifen / Rosetten GRI

Hottinger Vielstellen - Meßgerät, Umschalteinheit UMH 3202 , 5 Volt, 225 Hz

Auflösung gemäß Spezifikation	= ± 1 µm / m
Auflösung gemäß Kalibrierung	= ± 1 µm / m
Systemgenauigkeit	= ± 5 µm / m

Abb. 4.1-1 : Datenerfassung der TOSKA Anlage



Anhang

Funktionsprüfung an den potentiometrischen Wegaufnehmern

Beim Test der W 7-X Spule in der TOSKA Anlage haben 5 aus 11 an der W 7-X Spule installierten potentiometrischen Wegaufnehmer in allen Strombetrieben keine Anzeigen gebracht. Gemäß vorliegenden Angaben waren jedoch merkliche Verformungsänderungen am Spulengehäuse berechnet worden. Drei der "suspekten" Sensoren sollten eine Kontraktion und zwei Sensoren eine Dehnung messen.

Nach vorliegenden Meßdaten waren die Sensoren während des gesamten Testbetriebes funktionsfähig, so daß von dieser Seite nichts auf einen elektrischen Sensorausfall deutet. Inwieweit die Verformungsänderung des Spulengehäuses die indirekt auf den Sensor übertragen wurde, wirklich stattgefunden hat, kann nicht nachvollzogen werden.

Nach Abschluß des Testbetriebes wurden alle Sensoren im belüfteten Tank B 300 auf Funktion in der gegebenen Installation an der Spule durch manuelle Positionsänderungen an dem beweglichen Teil des Sensors geprüft. Alle Sensoren haben entsprechend der Positionsänderung die Werte am Bildschirm richtig angezeigt bzw. gespeichert, d.h. alle Sensoren waren funktionsfähig.

Einer der "suspekten" Sensoren (GDI 878) wurde zusätzlich in einem Kryostaten auf Funktion bei Betriebstemperatur von ca. 9 K überprüft. Im Gegensatz zur Installation an der W 7-X Spule wurde die Verformungsänderung jedoch direkt über einen V₂A Stab auf den Sensor übertragen. Wie in beiliegenden Kurve zu ersehen gab es keinerlei Anzeichen die auf einen Ausfall deuten.

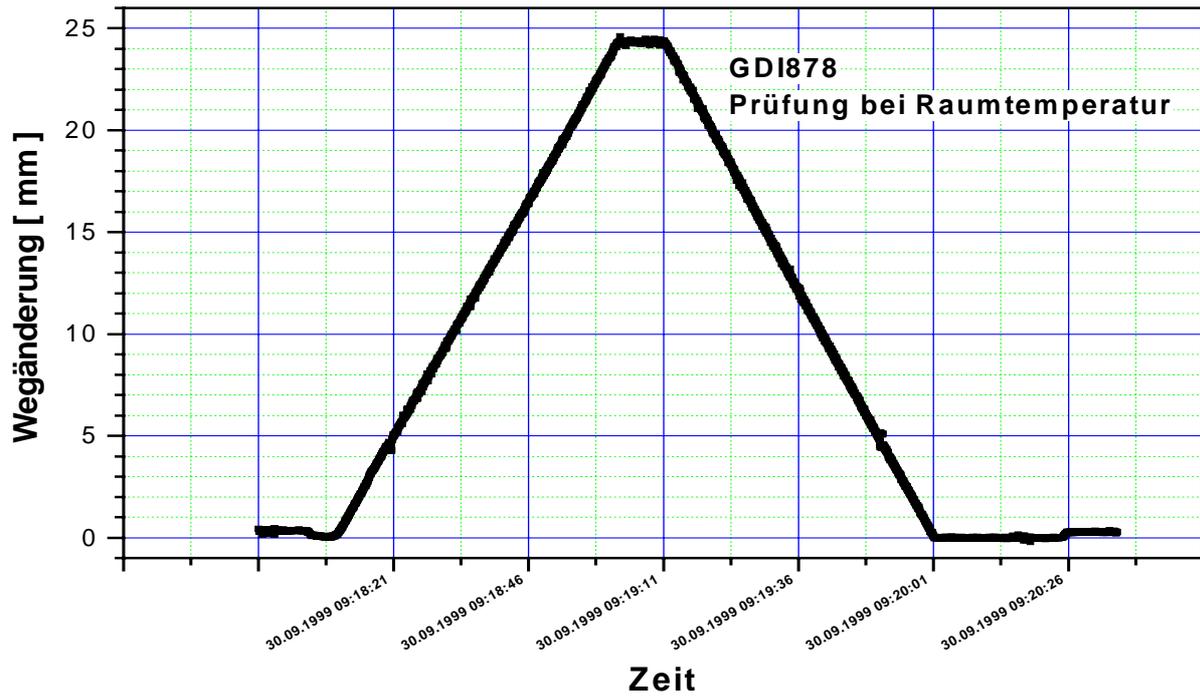
Vorliegenden Meßdaten sowohl vor als auch nach dem Testbetrieb geben keinen Hinweis warum die angesprochenen 5 Sensoren keine Verformungsänderung angezeigt haben. Die Signalverarbeitungselektronik und Auswertesoftware hat einwandfrei funktioniert.

Eine Erklärung warum die Sensoren keine Meßwertänderungen beim Erregen der W 7-X Spule gebracht haben ist basierend auf den vorgenannten Untersuchungen nicht möglich.

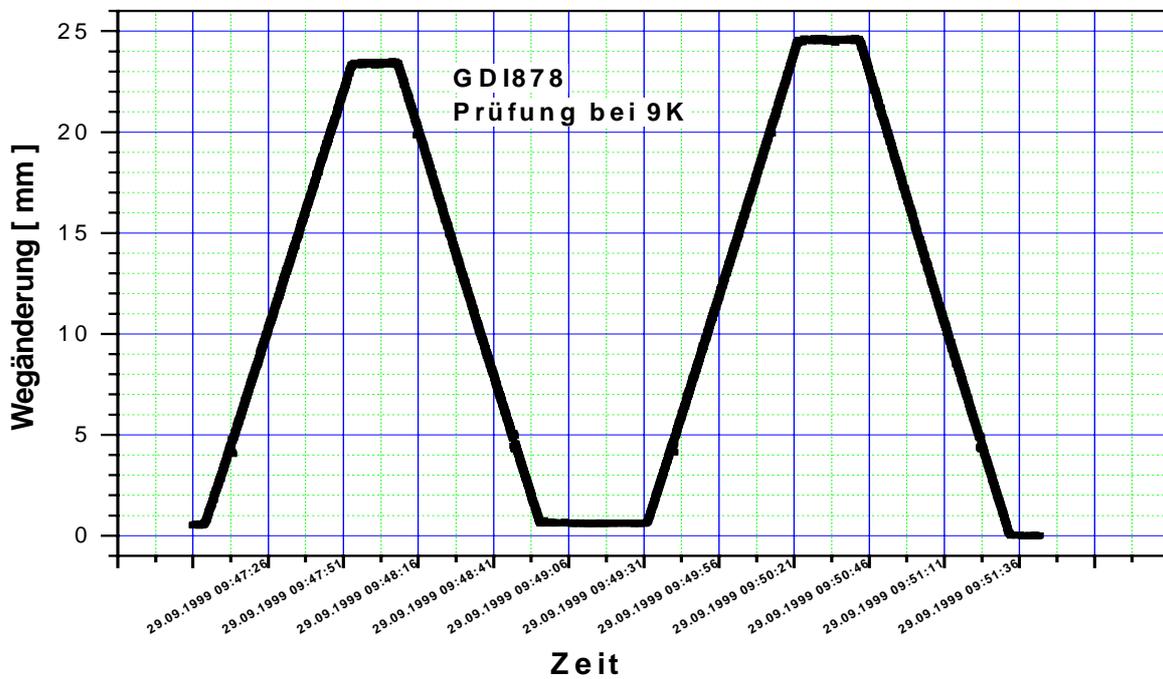
Vorliegend Kurven zeigen die Meßdaten beim Test von Sensor GDI 878 im Kontrollkryostaten:

Messung bei T = Raumtemperatur

Messung bei T = 9K



1. Potentiometerprüfung bei Raumtemperatur



2. Potentiometerprüfung bei 9 K

4.2 Bewertung der horizontalen Abstützung

Wie in Abb. 4.2-1 dargestellt sind die horizontalen Spannstangen an der LCT Spule befestigt d. h. die Kraftwirkung zwischen den beiden Spulen hat auf die betrachteten Meßwerte keinen Einfluß.

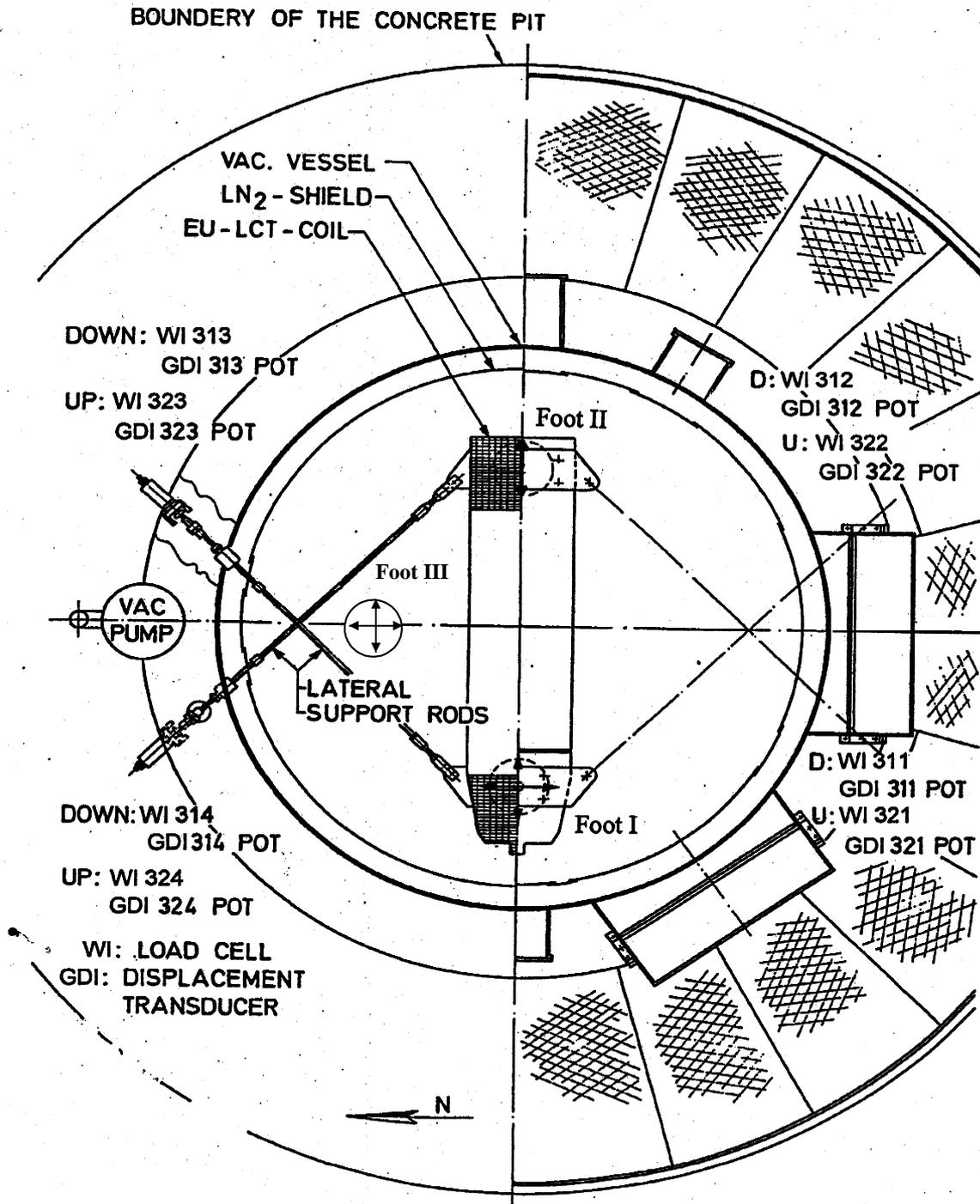


Abb. 4.2-1: Die Abstützung und Abspannung der Testkonfiguration W 7-X Spule und LCT Spule

Die abgeleiteten Meßwerte in Abb. 4.2-2 zeigen die integralen magnetischen Kräfte beim Erregen der Spulenordnung mit der ferromagnetischen Umgebung.

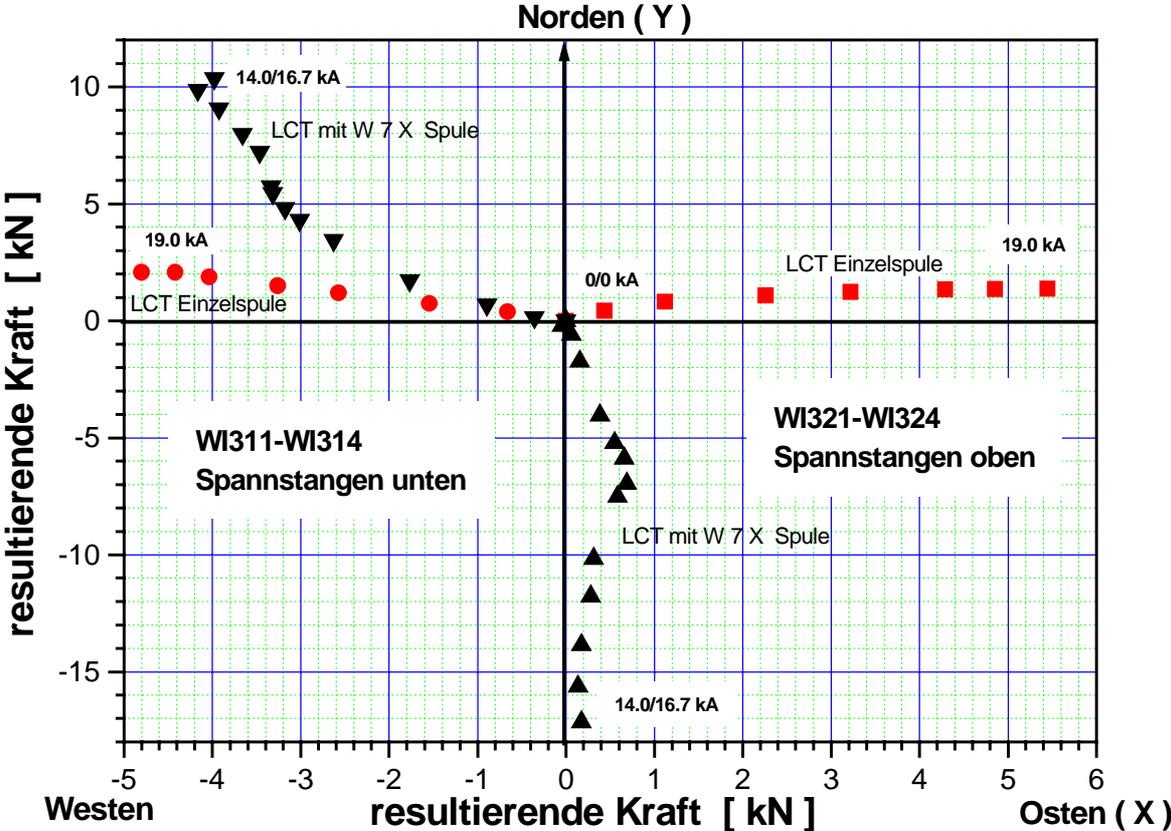


Abb. 4.2-2: Die resultierenden Kräfte auf die oberen und unteren Spannstangen zur seitlichen Abstützung der Testkonfiguration

Die abgeleiteten Kräfte (Abb. 4.2-2) an den unteren Spannsträngen ergeben eine gute Übereinstimmung sowohl in Richtung als auch im Betrag der Kräfte mit den gemessenen Bewegungen an Lager 1 und 2.

Lager 3 wird beim Erregen der Spulen annähernd entlastet d. h. das Gewicht der W 7-X Spule wird auf die Lager 1 und 2 der LCT Spule transferiert.(Figur 4.2-3)

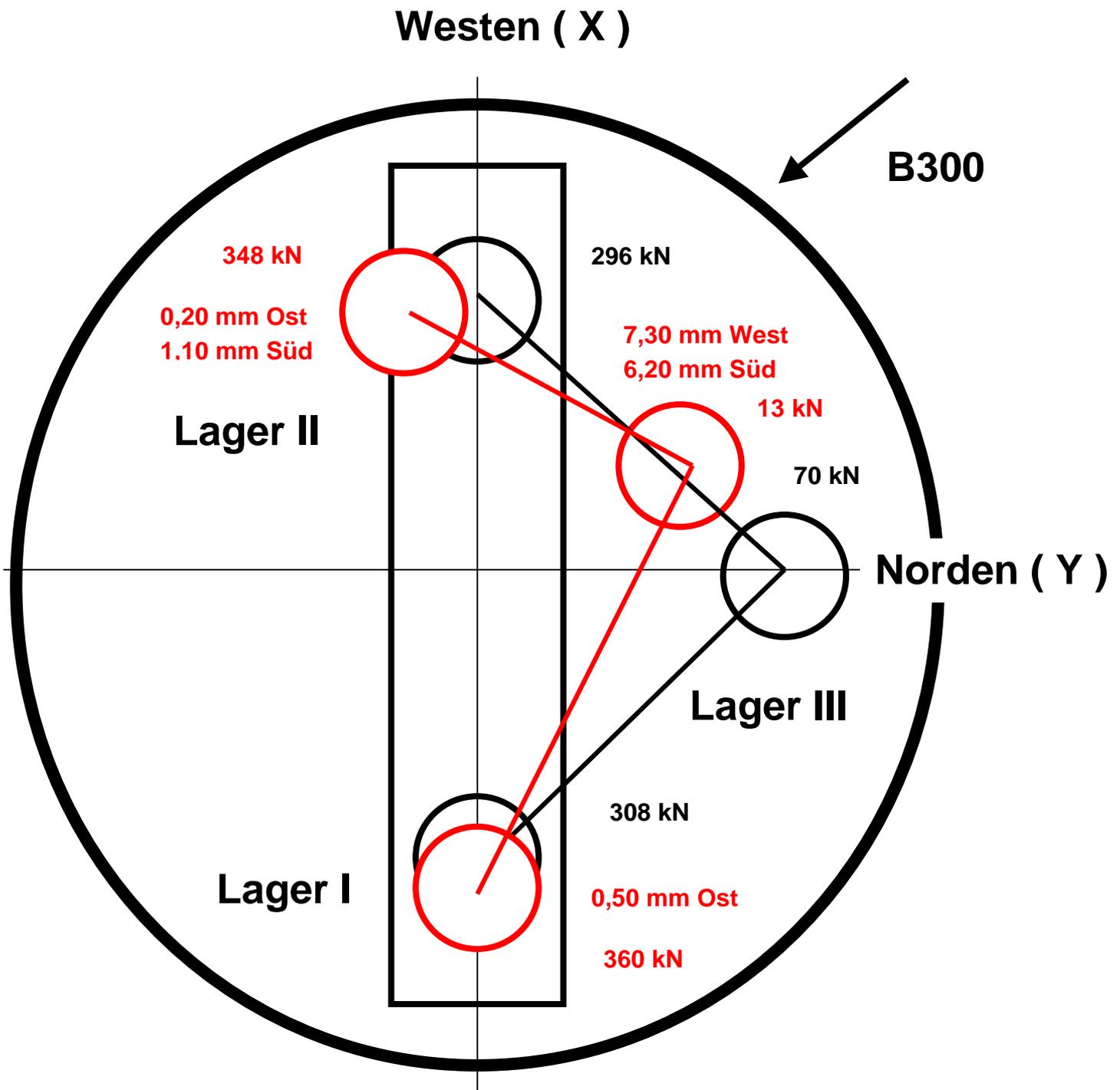
Nach dem Ausbau der W 7-X Spule mit Stützrahmen zeigte sich an Hand von Schleifspuren, daß sich die W 7-X Spule nach oben bewegt hat. Dadurch erklärt sich die Entlastung von Lager 3.

Das Summengewicht von Lager 1 und 2 ergibt sich aus der Gewichtsübertragung der W 7-X Spule mit 57 kN als auch der magnetische Wechselwirkung der Konfiguration mit der ferromagnetischen Umgebung.

Beim 1.8 K LCT Einzelspulentest vergrößerte sich das Gewicht an Lager 1 und 2 beim Erregen auf den vergleichbaren Stromwert wie beim W 7-X Test um jeweils 20 kN pro Lager was über die magnetische Wechselwirkung zu erklären ist. Bei der Addition dieser beiden Werte ergibt sich eine sehr gute Übereinstimmung mit der gemessenen Gewichtszunahme von 112 kN.

Die resultierenden Kräfte in beiden Abspannebenen (Abb. 4.2-2) unterscheidet sich merklich von dem LCT Einzelspulentest.

Während sich die untere Abspannebene lediglich im Betrag in Nord-Süd Richtung unterscheidet ist die obere Ebene sowohl in Betrag als auch Richtung verschieden was sich durch die gegebene Testanordnung erklärt.



Figur 4.2-3 : Auswirkung beim Erregen der Testkonfiguration auf die Lager durch die Krafteinwirkung der ferromagnetischen Umgebung

Die Lastverteilung der Lager vor und nach dem Erregen sowie deren Positionsverschiebungen (Schwarz : vor dem Erregen, Rot : nach dem Erregen)

4.3. Mechanisches Verhalten der Testanordnung

4.3.1 Abstützkonzept und Belastungen

Gemäß Technischer Spezifikation des IPP vom 6.9.1993 soll mit der „W 7-X DEMO Spule“ die Herstellbarkeit und **Betriebsicherheit** einer nichtplanaren, supraleitenden Magnetspule, die ähnlich den späteren Serienspulen aufgebaut ist, demonstriert werden. Dazu muß neben der Erfüllung wichtiger elektrischer und kryogener Anforderungen im TOSKA – Test auch der Nachweis geführt werden, daß die im späteren Torusverband vorausbestimmten, repräsentativen, mechanischen Materialbeanspruchungen mit ausreichender Sicherheit beherrscht werden.

Entsprechend dem gewählten Abstütz- und Bettungskonzept hat der SpulenhHersteller auf Basis der Geometrie- und Materialdaten und einer vom IPP vorgegebenen Kraftdichteverteilung (aus EFFI), für die Abkühlung sowie drei definierter Lastfälle, ein FEM – Berechnungsmodell (ANSYS) erstellt, mit dessen Hilfe die auftretenden Spannungen und Verformungen berechnet wurden. Dabei stellen die Lastfälle A und B Nennlastfälle ohne und mit Hintergrundfeld dar, für die eine ausreichende Sicherheit nach dem Stand der Technik nachzuweisen war. Der Lastfall C entspricht einem Überlast- oder Störfall, bei dem die DEMO Spule zwar nicht zerstört werden darf aber bei einem Sicherheitsfaktor 1 lokal bleibende Veränderungen durch Fließen von Material oder Mikrobrüche in der Bettung und Isolation einkalkuliert sind.

Das Abstützsystem umfaßt das Spulengehäuse (incl. kraftschlüssiger Bettung), die drei Lagerungselemente (Drucklager) und den Zwischenrahmen mit Druckstegen zur Krafteinleitung (durch die Verstärkungsbänder) auf das Gehäuse der LCT Spule. Es ist so ausgelegt, daß im kombinierten Betrieb, bei **Anziehung** beider Spulen mit Wechselwirkungskräften bis zu 13,1 MN (entsprechend dem geplanten höchsten Belastungsfall C), die mechanische Auslegungsreserve bestimmt werden kann.

Die kardanisch aufgebauten und mit Gleitflächen versehenen Lager gewährleisten die freie Bewegung der voll erregten Spule in der x – z - Ebene, bei gleichzeitiger Druckbeanspruchung (–y - Richtung) bis ca. 4,36 MN (\approx 450 t) pro Lager ([Anlage 4.3.1](#)).

Zur Vermeidung von unerwünschten Bewegungen im Anschlußbereich, ist der obere Teil des Spulengehäuses zum Zwischenrahmen über drei Spannelemente (dienen gleichzeitig zur Lagejustierung) fixiert. Damit ist die Verformung der Spule, radial nach unten (-z) und zur Seite (\pm x), vom Rest der Anordnung weitgehend entkoppelt.

Die Lager übertragen nahezu ausschließlich nur noch Druckkräfte auf den Zwischenrahmen. Der resultierende Kraftvektor steht, abgesehen von der vergleichsmäßig geringen Gewichtskraft, senkrecht zur Spulenebene. Das resultierende Drehmoment zwischen den Spulen wurde durch Verschiebung der DEMO Spule zu Null kompensiert.

Infolge der elektromagnetischen Kräfte werden bei dem gewählten Abstützsystem in dem nichtplanarem Spulenwickelpaket durch Kessel- und Seitenkräfte, Schub- und Scherspannungskombinationen erzeugt, die zumindest rechnerisch, betrags- und richtungsmäßig vergleichbar mit denen im späteren Spulenverband sind, allerdings lokal verschieden sein können. Die lokale Position solcher „hot spots“ ist bei Annahme eines homogenen Verbundmaterials im allgemeinen unbedeutend. Aufgrund der relativ kleinen Verformungen kann eine Rückwirkung auf die Stromfadenposition im Test vernachlässigt werden.

Nach dem Ergebnis der FEM – Berechnung treten im vorgesehenen Testprogramm keine unzulässig hohen Spannungen auf, die zu einem Versagen der DEMO Spule führen könnten.

Um Aussagen zur tatsächlichen Verformung und den auftretenden Spannungen bei der Abkühlung sowie unter den drei Lastfällen machen zu können, wurde die DEMO Spule mit zahlreichen, tiefemperaturerprobten Verformungsaufnehmern und Dehnmeßrosetten bestückt. Die Position der Meßstellen ergab sich aus den Ergebnissen des FEM – Berechnungen und den Montagemöglichkeiten.

4.3.2 Verformungsmessung

4.3.2.1 Meßaufbau

Die Verformung der DEMO Spule wurde mittels Spannseilen zwischen ausgewählten Punkten, an 11 Stellen des Gehäuseumfangs, in der z – x – Ebene, **mit potentiometrischen Wegaufnehmern** (XRLP 50B/05, Fa. MEKO – Technik) bestimmt. Der Aufbau einer kompletten Wegmeßstelle ist in der Noell – Zeichnung Nr. 225388 dargestellt. Die exakte Position der Meßstellen mit den Bezeichnungen GDI 871 bis GDI 878 sowie GDI 880, GDI 882 und GDI 884 ist aus der Noell – Zeichnung Nr. 225381 entnehmbar. Zur schnelleren Übersicht der nachfolgenden Beschreibungen, ist die Position der Meßstellen in einer Skizze vereinfacht **dargestellt (Anlage 4.3.2.1)**.

Auf Grundlage der FEM – Berechnungen des Herstellers (Noell-Dokumentation, Ordner 11 und 12: „Abschlußbericht über die Berechnung der Demonstrationsspule für das Stellaratorexperiment W 7-X“, Auftrag: 100/45024802, 1998) wurden entsprechend den drei Lastfällen Erwartungswerte (Referenzwerte) bestimmt, mit denen die gemessenen Verformungen zu vergleichen sind.

Die Verformungen sind als **relative Änderung** des Abstandes zweier definierter Punkte am Gehäuse (Aufweitung oder Kontraktion) infolge Temperaturänderung oder Erregung zu einem definierten Ausgangszustand (z. B. Zustand vor einem Stromtest) zu betrachten und wurden daher bei der Auswertung vor jedem Testfall rechnerisch auf Null gesetzt. Da dieses Meßprinzip praktisch keine Aussage zur absoluten Verformung zuläßt, können laterale Verschiebungen quer oder schräg zur Verbindungslinie (Meßlinie) der Meßpunkte und Verdrehungen des Spulenquerschnittes nicht bestimmt werden. Diese Einschränkung war bekannt und hätte, wegen des Fehlens räumlich fester Bezugspunkte (Temperaturgang) im TOSKA – Kryostaten, nur mit erheblichem Aufwand (optisches 3D- Meßsystem) umgangen werden können. In der Konsequenz sind alle gemessenen Verformungen als resultierende, relative Abstandsänderung genau genommen nur unter der Voraussetzung nutzbar, daß sie exakt dem FEM – Modell folgen.

Alle Meßwerte wurden in einem Subsystem („Hottinger Multiplexer“ mit Umschalteneinheit und OS/2 PC) der FZK Prozeßdaten – Verarbeitungsanlage aufbereitet (Umrechnung auf physikalische Einheiten, Visualisierung) sowie in Echtzeit während der Tests selektiv beobachtet und parallel dazu in der ORACLE® – Datenbank archiviert.

4.3.2.2 Meßvorbereitungen

Vor der Abkühlung und nach der Wiederaufwärmung erfolgte ein Funktionstest für jede Meßstelle. Alle 11 Wegaufnehmer (Potentiometer) sind separat, vor ihrer Montage an dem Gehäuse der DEMO Spule, erfolgreich am FZK auf ihre Funktion einzeln und in der Meßkette bei Betriebstemperatur geprüft worden.

Sämtliche Meßstellen wurden bei Raumtemperatur so kalibriert, daß sowohl der jeweilige Momentanwert als auch der größte Erwartungswert mit Sicherheit innerhalb der max. möglichen Meßstrecke von ca. 50 mm liegt.

Bei dieser Kalibrierung war festzustellen, daß die Rückstellkraft der verwendeten Edelstahlfedern für die gegebenen Reibwerte (Potentiometer, Umlenkkopf) etwas zu schwach war. Dadurch kam der Wegaufnehmer, nach einer probeweisen Verstellung mitunter nicht mehr auf die Anfangsposition. Diese Abweichung war später im Testbetrieb nicht mehr auffällig, d. h. die Werte unmittelbar vor und nach einem Stromzyklus liegen innerhalb der Meßgenauigkeit von $\pm 40 \mu\text{m}$.

Der dadurch bedingte **Positionierungsgrundfehler** (eine Art „Totgang“) betrug über der gesamten Testdauer max. $\pm 1 \text{ mm}$. Die Langzeitanalyse aller Meßstellen weist im Verlauf der Nullpunktlinie wiederholt kleinere Sprünge auf (**Anlage 4.3.2.2a**).

Im Vergleich der Abweichungen zwischen den Meßwerten unmittelbar nach einem Strompuls zu den direkten Ausgangswerten, ist der relative Meßfehler mit $\pm 1/10 \text{ mm}$ aber vernachlässigbar.

Die auf $1/_{100}$ mm angegebenen Erwartungswerte aller Verformungen sind dementsprechend zu bewerten.

Eine Verstärkung der Federn kam nicht in Frage, da die Gefahr bestand, daß entweder die Meßseile reißen oder sich in den Teflon – Umlenkkopf einschneiden und festsetzen könnten (Anlage 4.3.2.2b).

4.3.2.3 Abkühlung und Lastfall A

Bereits bei der Abkühlung ergab sich, daß zunächst bis etwa 200 K nur eine Meßstelle (GDI 880), dann weitere fünf Meßstellen (GDI 871, 882, 873, 884, 875) keine Veränderung bzw. nur sporadische, kleinere Sprünge, im kontinuierlich über der Zeit mitgeschriebenen Meßwert zeigten (Anlage 4.3.2.3a). Alle anderen gemessenen Verformungen wurden erwartungsgemäß kleiner. Der an allen Meßstellen erkennbare Sprung bei etwa 40 K ist in einer Meßstörung begründet.

Für den **Lastfall A** sind Erwartungswerte angegeben worden, die sich auf einen Auslegungsstrom von 27,5 kA beziehen. Daher müssen alle Erwartungswerte (100 %) entsprechend den Stromquadrat – Verhältnis von Prüfstrom zu Auslegungsstrom ($= 19,0 / 27,5 \text{ kA})^2$) umgerechnet werden, solange von einem linearem Verhalten ausgegangen werden kann.

Die ersten Auswertungen während und kurz nach dem Test berücksichtigen diesen Umstand leider nicht und weisen daher generell bei Lastfall A höhere Erwartungswerte aus. In diesem Bericht ist der Fehler korrigiert und als Erwartungswert der Umrechnungswert als EW2 gekennzeichnet.

Es zeigt sich bereits bei den ersten Stromtests, daß bei fünf Verformungsstrecken GDI 878, 880, 882, 884 und 871 kein, über dem Grundrauschen liegender, Wert meßbar ist. Die anderen Meßstellen reagieren zwar stromabhängig, liefern aber durchweg bei allen Strömen kleinere Werte als erwartet (Anlage 4.3.2.3 b - d). Auffallend ist, daß die bei der Abkühlung scheinbar ausgefallenen Meßstellen GDI 873 und 875 im Strombetrieb wieder arbeiten, dagegen die Meßstelle GDI 878 sich umgekehrt verhält.

Zunächst wurde vermutet, daß einige oder sogar alle Meßaufnehmer durch Restfeuchtigkeit oder Fettspuren im Potentiometer oder am Umlenkkopf festgefroren sein könnten und erst durch die strombedingte Aufweitung des Spulengehäuses „frei gerissen“ wurden. Die Meßstellen, bei denen eine Kontraktion des Gehäuses vorausgesagt wurde, könnten dann nur durch die Federkraft zurückgestellt werden. Wenn die Feder, wie gesagt, etwas zu schwach ist, bestünde die Möglichkeit, daß die festgefrorenen Meßaufnehmer nicht frei kommen und daher die Anzeige unverändert bleibt.

Diese Vermutung wird durch das entgegenstehende Verhalten der Meßstellen GDI 871 und GDI 884, die bei Belastung zu einer Vergrößerung der Meßlänge führen müßten, nicht gestützt. Die für diese Meßstellen vorausgesagte Verlängerung würde bei einer festen Einspannung zwangsläufig zum Reißen des Seiles oder zur Öffnung der Einhängeöse führen. Nach dem Test konnten keine derartigen Veränderungen festgestellt werden.

Unmittelbar nach dem Aufwärmen der Testanordnung wurde die gesamte Verformungsmeßkette vom Potentiometer bis zur Datenanzeige am Kontrollmonitor überprüft. Zusätzlich erfolgte bei Kryotemperatur ein separater Funktionstest des abgebauten Aufnehmersystems GDI 878. In keinem Fall konnte eine Fehlanzeige oder ein Ausfall festgestellt werden. Außerdem wurde, ebenfalls ohne Befund, überprüft, ob durch Magnetfeldeinfluß oder Verbiegung des Tragwinkels der Wegaufnehmer blockiert werden kann.

Nach der FEM – Berechnung ist auszuschließen, daß eine Verdrehung des Gehäuses an den betroffenen acht Querschnitten zu einer Verkürzung des Meßweges führte, die wiederum exakt durch die kesselkraftbedingte Aufweitung kompensiert wird.

Erst viel später, bei der detaillierten Analyse der Verformungsmeßergebnisse, konnte eine plausible Erklärung für den „scheinbaren Ausfall“ der fünf und die zu niedrigen Meßwerte an den anderen Meßstrecken gefunden werden.

Zum direkten Vergleich der Verformungen mit den Erwartungswerten und zur Prüfung der Stromquadrat – Proportionalität im Lastfall A, dienen Testlauf Nr. 44, 97 und 126. Dabei liefern Nr. 44 und 126 die Verformungswerte bei 7,4 und 14,8 kA (50% und 100% Nennstrom) zu zwei deutlich auseinander liegenden Testzeitpunkten. Testlauf Nr. 97 liefert die Werte für den Überstromfall mit 18,2 bzw. 19,2 kA. Der 100% Erwartungswert gilt für 19,0 kA.

Bei einem Vergleich der Testläufe Nr. 44 und Nr. 126 (gleiche Belastungen) fallen Unterschiede pro Meßstelle von bis zu 1,45 mm auf ([Anlage 4.3.2.3e](#)). Dabei muß berücksichtigt werden, daß beide Tests relativ weit auseinander liegen und die DEMO Spule zwischenzeitlich 17 hohe (mindestens bis Nennstrom) und unterschiedliche (alle Last- u. Quenchfälle!) Belastungen erlebte. Der Einfluß des vorgenannten Positionierungsgrundfehlers ist hierbei vernachlässigbar gering. Die Meßwerte vor und nach den einzelnen Tests weichen nur um max. 0,09 mm voneinander ab. Als Ursache für die Unterschiede erscheinen geringe Veränderungen im Ablastungsverhalten der DEMO Spule („Setzeffekt“) innerhalb ihrer Bettung plausibel.

Abgesehen von dem „scheinbaren Ausfall“ der fünf Meßsysteme liegen die max. bei diesem Lastfall ermittelten Verformungen um etwa 18 – 64 % (0,5 – 2,1 mm) unter den Erwartungswerten ([Anlage 4.3.2.3f](#)). Diese Abweichung ist zwar relativ hoch, aber selbst ohne Berücksichtigung der später angegebenen Erklärung zur Bettungsproblematik, liegt sie, gemessen an den gegebenen meß- und rechentechnischen Randbedingungen, im Rahmen der Leistungsfähigkeit des vorliegenden FE – Modells und des gewählten Meßsystems. So berücksichtigt z. B. das FE – Modell nicht die versteifende Wirkung der drei großen Stützrohre für den Kraftschluß vom Gehäuse über die Lager zum Zwischenrahmen. Im FE – Modell erfolgt die Abstützung an diesen Stellen punktförmig. Durch die angeschweißten Stützrohre wird die Verformung des Gehäuses in jedem Fall reduziert.

Bei Bedarf läßt sich diese Problematik in ergänzenden Untersuchungen jederzeit nochmals aufgreifen und vertiefen. Da die Abweichungen grundsätzlich erklärbar sind und die Gehäusekonstruktionen von DEMO Spule und Serienspulen sich erheblich unterscheiden, wird im Rahmen des Abschlußberichtes darauf verzichtet.

Zur Beurteilung der Qualität der Bettung des Wickelpaketes im Gehäuse ist eine Darstellung der kraftabhängigen, mechanischen Größen über dem Stromquadrat hilfreich.

$$F R I^2 * (1 + k), \text{ mit } k=0 \text{ im Lastfall A}$$

In der vorstehenden allgemeinen Beziehung ist k ein Proportionalitätsfaktor, der vom Lastfall abhängt und > 0 ist, wenn die DEMO Spule mit Hintergrundfeld der LCT Spule erregt wird. Aufgrund der am jeweiligen Ort der Meßstelle unterschiedlich superpositionierten Feldkomponenten und daraus sich ergebenden Kraftwirkungen (im wesentlichen sind das die Lateral- und Kesselkraft), kann im Prinzip bei den Lastfällen B und C ein beliebiger Wert > 0 für k gewählt werden. Um die mechanischen Meßergebnisse, die in Abhängigkeit vom Strom dargestellt werden sollen, neben der Beurteilung des Linearitätsverhaltens, auch betragsmäßig besser vergleichbar zu machen, wurde in den entsprechenden Diagrammen ein mittlerer Wert für k benutzt, der für alle Lastfälle bei Nennstrom bestimmt, etwa zu dem gleichen Nulldurchgang (zwischen 100 ... 200 kA²) führt.

Es zeigt sich, daß die Verformung der Spule im Lastfall A erst ab einer gewissen Strombelastung beginnt, d. h. keine „denkbare“ Verbindungslinie zwischen den Meßwerten läuft durch den Koordinatenursprung ([Anlage 4.3.2.3g](#)).

Aus den Meßwerten wurde eine Regressionsgerade errechnet und diese dazu farblich korrespondierend in das Diagramm hinzugefügt. Die Meßwerte weisen zu der Regressionsgeraden nur eine verhältnismäßig geringe Streuung auf. Verlängert man diese Regressionsgerade zum Nullpunkt, läßt sich ein „negativer Offset“ von typisch 0,5 ... 2,2 mm abschätzen. Im Vergleich dazu, liegt der vorzeichenmäßig negative Erwartungswert von drei der „scheinbar ausgefallenen“ fünf Meßstellen, mit max. 0,3 mm bei Nennstrom berechnet, innerhalb dieses „Offsets“. Es ist schon alleine deshalb möglich, daß diese Meßstellen keine stromabhängigen Verformungen liefern.

Wie im folgenden Kapitel noch weiter ausgeführt wird, macht dieser „Offset“ knapp 10 % des max. bestimmten Verformungswertes aus.

Eine erste Erklärung liegt in der Bettung begründet. Es ist möglich, daß die Vorspannung des Wickelpaketes nicht wie erwartet ausgereicht hat, um bei der Abkühlung auf Kryotemperatur, sich völlig auf Null abzubauen. Unterstellt man weiterhin, daß die verbliebene Vorspannung vielleicht noch 10 % ausmachte, dann benötigt das auf den Innenring des Gehäuses aufgeschrunpfte Wickelpaket bei diesem Lastfall zum Abbau der Restvorspannung nahezu 80 % des Nennstromes. Dieser Vorgang verursacht eine, der Wirkung der Stromkraft in z – Richtung entgegen gerichteten, Aufweitung (Entlastung) des Wickelpaketes. Erst danach führt die weitere Erhöhung des Stromes zu den vorausberechneten Verformungsrichtungen an den Meßstrecken. Für diese Überlegung ist es noch nicht einmal notwendig, Ablösungen (Spaltbildungen) zwischen Wickelpaket und Bettung anzunehmen.

In den FEM – Berechnungen wurde von isotropen, linearen Materialeigenschaften sowie einer, bei Betriebstemperatur im stromlosen Zustand, vorspannungs- und spaltfreien Wickelpaketlage innerhalb der Bettung ausgegangen. Dieser angenommene 10 % - Effekt verursacht zwar Abweichungen in den so berechneten Verformungen und Dehnungen, beeinflußt aber die grundsätzliche Funktion der Bettung nicht negativ. Wesentlich problematischer wären vorhandene oder sich bildende Spalte, die zu lokalen oder globalen Bewegungen des Wickelpaketes im Betrieb führen könnten.

Aufgrund der schon anfangs genannten Unterschiede zwischen Pulsen mit gleichen Belastungen, ist bei den geringen Verformungen im unteren Verformungsbereich (< 2 mm) des Lastfalls A, ein exakter Nachweis zur Stromquadrat – Proportionalität, zu der mehrere Testläufe erforderlich sind, nur begrenzt möglich.

Trotzdem kann davon ausgegangen werden, daß auch bei diesen niedrigeren Kraftbeanspruchungen keine Linearitätsabweichungen aufgetreten sind.

4.3.2.4 Lastfall B und C

Da wegen Erreichung der Quenchgrenze der Lastfall C nicht bis zum vorgesehenen Strom (18,3 kA in der DEMO Spule und 14,0 kA in der LCT Spule) gefahren werden konnte, wurden in dieser Auswertung als Erwartungswerte die Daten für **Lastfall B** (14,7 kA / 14,0 kA) zugrunde gelegt. Daher entfällt hier eine Umrechnung wie bei Lastfall A.

Auch bei diesem Lastfall blieben wieder die gleichen, zuvor angegebenen, Meßstrecken ohne Reaktion, in scheinbar unveränderter Lage, während der gesamten Stromflußdauer ([Anlage 4.3.2.4a](#)).

Aufgrund der höheren Ströme und dementsprechend höheren Kräfte liegen die gemessenen Verformungen bei fast allen Stromstufen oberhalb der kritischen Meßempfindlichkeit und erreichen mit max. 15 mm fast 90 % des Erwartungswertes. Gemessen an diesem Höchstwert, kann der „Nullpunktoffset“ als 10% Effekt eingestuft werden.

Abgesehen von dem beschriebenen „scheinbaren Ausfall“ der fünf Meßsysteme liegen die maximal bei diesem Lastfall gemessenen Verformungen um etwa 9 – 34 % (0,5 – 3,7 mm) unter den Erwartungswerten ([Anlage 4.3.2.4b](#)). Damit sind im Vergleich zu Lastfall A, die Abweichungen deutlich kleiner (nur noch etwa halb so groß). Die im Diagramm enthaltenen Angaben „diagonal, horizontal, vertikal“ beschreiben die typische Lage des Spanenseiles in Bezug zur Einbaulage der Spule im Kryostat. Die gewählte Darstellung sollte ursprünglich eine Hilfestellung für das Verstehen der Ausfälle bei den fünf Meßstrecken sein.

An Hand dieses Lastfalls kann der Nachweis für die Stromquadrat – Proportionalität im Lastfall B / C exzellent demonstriert werden ([Anlage 4.3.2.4c](#)).

Auch diesmal wurden wieder für jede Meßstelle die aus den Verformungswerten gebildeten Regressionsgeraden (aber jetzt nur bis Nennstrom) zur Bewertung der Meßwertstreuung verwendet. Die Berechnung berücksichtigt das Hintergrundfeld der LCT Spule mit einem Faktor $k=4,47$. Nach dem Ergebnis von Lastfall A war zu erwarten, daß auch diesmal, unter Zugrundelegung der zuvor beschriebenen nichtlinearen Bettungscharakteristik, die Regressionsgeraden nicht durch den Koordinatenursprung verlaufen.

Aufgrund der wesentlich höheren Lateralkräfte reduziert sich vermutlich der Bettungseinfluß auf die Höhe der Verformungswerte, so daß bei dieser Belastung die Abweichung zwischen Meß- und Erwartungswert kleiner ausfällt.

Die Streuung der Meßwerte ist so gering, daß ein zum Stromquadrat, streng lineares Verformungsverhalten bis zum Nennstrom eindeutig vorliegt und ausnahmslos während des gesamten Tests nachweisbar ist.

Oberhalb der Nennströme beider Spulen knickt der Verlauf leicht ab, was sich durch den dann konstant gebliebenen Strom (Kraftkomponente) in der LCT Spule begründet.

Die Kurven in dem Diagramm sind entsprechend der Einbaulage (LCT-seitig / tankseitig) und den Lastfällen B / C gekennzeichnet. Für die „scheinbar ausgefallenen“ fünf Meßstellen sind wegen der besseren Übersicht die diskreten Meßpunkte weggelassen.

4.3.2.5 Zusammenfassung zur Verformungsmessung

Die gemessene Verformung des Gehäuses an den ausgewählten Meßstellen der DEMO Spule liegt unter den aus der FEM – Berechnungen abgeleiteten Erwartungswerten. Diese Abweichung ist im Lastfall A mit durchschnittlich 1,3 mm Meßwert zu 3,6 mm Rechenwert größer als im Lastfall B / C mit 9,0 mm zu 11,4 mm. Insgesamt liegen, unter Berücksichtigung der gegebenen Meß- und Rechengenauigkeiten, die Abweichungen aber innerhalb eines akzeptablen Bereiches.

Eine Erklärung für die niedrigeren Meßwerte liegt, ohne Zweifel, an der im FEM – Modell nicht berücksichtigten Versteifungswirkung der drei großen Lagerstützen auf das Gehäuse.

Unterschiede an gleichen Meßstellen, bei vergleichbaren Belastungen, die zwischen zeitlich deutlich distanzierten Testläufen festzustellen sind, lassen auf – wenn auch geringe – Veränderungen im Ablastungsverhalten der DEMO Spule innerhalb ihrer Bettung schließen.

Der „scheinbare Ausfall“ von fünf Meßstrecken, für den zunächst keine meßtechnische Erklärung gefunden werden konnte wird verständlich, wenn man von einer nichtlinearen Bettungscharakteristik ausgeht. Die Ursache dafür könnte an einer, nicht ganz auf Null abgebauten, Vorspannung des Wickelpaketes im Gehäuse liegen. Diese kann – je nach Meßlage – zusammen mit dem Bestreben der Spule bei zunehmenden Strom größer, eben sowie kreisförmig (Kesselkraft) werden zu wollen, die Verformungen teilweise kompensieren. Unabhängig von der letztlich zutreffenden Ursache handelt es sich dabei um einen etwa 10 % - Effekt, der keine negative Auswirkungen auf die Funktionalität der Bettung hat, sondern nur die vorspannungsfrei berechneten Verformungen in geringem Maße beeinflusst.

Um künftig Unsicherheiten bei ähnlichen Untersuchungen zu vermeiden, sollte entweder ein unabhängiges, optisches 3D- Meßsystem vorgesehen oder zumindest eine Art leichter (nichtleitender, unmagnetischer) „Schubstangen“ verwenden. Dazu müßte allerdings der eigentliche Sensor (Potentiometer) in axialer Linie zur jeweiligen Schubstange liegen, was bei der DEMO Spule nach ihrer Fertigstellung nicht mehr realisierbar war.

4.3.3 Dehnungsmessung

4.3.3.1 Meßaufbau

Zur Messung der Dehnung und damit zur Berechnung der mechanischen Spannungen wurden Dehnmeßstreifen (DMS) verwendet. Diese waren an 10 zuvor aus der FEM – Berechnung ausgewählten, hochbeanspruchten Punkten der Gehäuseoberfläche aufgeklebt.

Um den Einfluß des Magnetfeldes zu kompensieren, wurde jeder Meß – DMS mit einem Kompensations – DMS zu einer Halbbrücke zusammen geschaltet. Der Meß – DMS war auf dem Spulengehäuse, der Kompensations – DMS auf einem aufgeschraubten, spannungsfrei bleibenden Kompensationsblock (IPP – Eigenbau, siehe Noell - Dokumentation zur Instrumentierung) aufgeklebt. Meß – als auch Kompensations – DMS, lagen sich gegenüber, in nahezu gleicher Position und Ausrichtung zum Magnetfeld.

Der Anschluß, die Positionierung und Ausrichtung der DMS – Rosetten ist im Manual zum DEMO Spulentest beschrieben. Alle zehn DMS – Rosetten waren auf den Seitenflächen des Gehäuses der DEMO Spule, nahe dem Spulinnenrand (GRI 802, 807 mehr am Spulenaußenrand), angeordnet. Von den mit GRI 801 bis GRI 810 bezeichneten Rosetten befanden sich 6 auf der LCT- und 4 auf der Tankseite des Gehäuses (Anlage 4.3.3.1).

Jeweils drei DMS – Halbbrücken sind als Meß- und Kompensations – DMS in einer Rosette im Winkel von 0°, 45° und 90° zusammengefaßt. Dabei ist die Achse der 45° DMS (ϵ_{45}) tangential zur Spulenumfangsrichtung ausgerichtet.

Aus den drei gemessenen GRI_{a,b,c} - Dehnungen (ϵ_0 , ϵ_{45} , ϵ_{90}) in $\mu\text{m/m}$ bzw. ppm lassen sich über die **Hauptdehnungen** gemäß:

$$\epsilon_{1,2} = \epsilon_m \pm \sqrt{(\epsilon_0 - \epsilon_m)^2 + (\epsilon_{45} - \epsilon_m)^2} \quad \text{mit} \quad \epsilon_m = \frac{\epsilon_0 + \epsilon_{90}}{2}$$

sowie den E-Modul und die Poisson-Zahl ($\mu = 0,3$) für Stahl,

die **Hauptspannungen** HD1GRI und HD2GRI in N/mm² bzw. MPa:

$$\sigma_i = \frac{E}{1 - \mu^2} \left[\epsilon_i + \mu \epsilon_j \right] \quad \text{mit} \quad i = 1,2 \quad \text{und} \quad j = 2,1$$

und die **Vergleichsspannung** (v. Mises) SIGMA berechnen:

$$\sigma_v = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1 \sigma_2}$$

Den Erwartungswerten in allen Lastfällen gem. der FEM – Berechnungen des Herstellers liegt ein E-Modul von 185 GPa zugrunde. Die Meßwertverarbeitung der TOSKA – Anlage benutzt für alle mechanischen Spannungsberechnungen dagegen 210 GPa und archiviert auch dementsprechend die Daten. Da die veröffentlichten Angaben zum E-Modul von Stahl und Aluminium über einen relativ großen Wertebereich streuen, wurde vom Hersteller bei den FEM – Berechnungen aus Sicherheitsgründen von einer mehr konservativen Annahme ausgegangen.

Die hier dargestellten Ergebnisse und Vergleiche basieren, soweit nicht anders angegeben, auf einem E-Modul von 185 GPa.

Die Erwartungswerte der Spannungen (SEQV, SZ, SX) und Dehnungen (diz, dix) sind der Dokumentation der Fa. Preussag-Noell GmbH, Ordner 11 und 12 zur FEM – Berechnung (Band 1 und 2) entnommen.

Dabei wurden für jede DMS – Meßstelle aus den Farbplots die beiden Grenzlinien des betreffenden Farbbalkens als minimaler und maximaler Wert verwendet. In der TOSKA – Testdatenarchivierung sind die korrespondierenden Spannungen mit SIGMA, HD1GRI, HD2GRI und die direkt vergleichbaren z – Dehnungen (Umfangsrichtung) mit GR1b bezeichnet. Außerdem basieren die Erwartungswerte für diz, dix auf einer DMS – Länge von 3 mm und müssen für einen Vergleich mit den z - Dehnungs – Meßwerten GR1b durch 3 dividiert werden.

4.3.3.2 Abkühl- und Aufwärmvorgang

Die für den **Abkühlvorgang** vorliegenden Meß- und Rechenwerte sind so niedrig (≤ 41 MPa), daß keine generelle Interpretation möglich ist.

Die Meßwerte werden allerdings zusammen mit denen der Aufwärmung benutzt, um eine grobe Aussage zur Bettungsqualität liefern zu können. Meßtechnisch sind hierbei die nicht unerhebliche Verstärkerdrift über mehr als zwei Wochen Meßzeit sowie mehrere, in beiden Phasen wiederholt aufgetretene, Systemausfälle, mit nicht ausschließbaren Nullpunktverschiebungen, zu berücksichtigen. Es wird darauf hingewiesen, daß im Verlauf der Aufwärmung ein interner Kühlversuch des FZK für den nachfolgend geplanten ITER-Test zwischengeschoben wurde, der zu wiederholten Temperatur-, Druck und Massenstromänderungen führte.

Vor Beginn der Abkühlung wurden alle DMS – Meßstellen elektrisch auf Null gesetzt. Demzufolge steigen im zeitlichen Verlauf die gemessenen Dehnungen und daraus berechneten Spannungen an, was physikalisch natürlich umgekehrt passiert ([Anlage 4.3.3.2 a](#)). Das bei erhöhter Gehäuse-temperatur vergossene (kältere) Wickelpaket führt bei Abkühlung auf Raumtemperatur durch Schrumpfung zu einer Vorspannung die sich dann bei Abkühlung auf Kryotemperaturen wieder nahezu völlig abbaut. Ursache ist der höhere Wärmeausdehnungskoeffizient des dominierenden Aluminiumanteils, der zu einer stärkeren Verkleinerung des Wickelpaket führt und dadurch das Gehäuse entlastet. Stellt man die hierfür benutzte Vergleichsspannung nicht über der Zeit sondern der Temperatur dar und denkt sich die Abszisse umgekehrt aufgetragen, dann entspricht die Darstellung bis auf die letzten 70 K recht gut der bekannten thermischen Dehnung von Edelstahl ([Anlage 4.3.3.2 b](#)).

Um eine Aussage zur Qualität der Bettung machen zu können, bedarf es dem Vergleich mit der **Aufwärmung** ([Anlage 4.3.3.2 c](#)). Wegen des vorgenannten ITER- Tests dauert die Aufwärmung insgesamt deutlich länger. Das führte zu einer sehr hohen Anzahl von Meßpunkten, die für die Auswertung ausgedünnt werden mußte. Die Nullstellung erfolgte unmittelbar vor der Aufwärmung noch bei Tieftemperatur, so daß diesmal die Meßkurven physikalisch direkt interpretierbar sind. Der Kurvenverlauf ähnelt dem der Abkühlung, allerdings bei etwas zu höheren Temperaturen verschobenem Minimum und auf geringerem Spannungsniveau ([Anlage 4.3.3.2 d](#)).

mechan. Vorspannung aufgrund der Bettung								
Vergleichsspannung [Mpa]								
	Aufwärmung			Abkühlung			Abw.	Bem.
	kalt	warm	Diff.	warm	kalt	Diff.		
σ809	1,6	41,6	40,0	0,3	15,9	15,6	256%	Messwert instabil
σ808	2,3	43,6	41,3	0,2	41,3	41,1	100%	ok
σ807	1,9	26,6	24,7	0,3	26,9	26,6	93%	ok
σ810	1,5	35,6	34,1	0,2	37,0	36,8	93%	ok
σ805	0,7	27,1	26,4	0,2	35,6	35,4	75%	ok
σ802	1,3	28,1	26,8	0,5	37,4	36,9	73%	ok
σ801	0,8	17,1	16,3	0,5	25,3	24,8	66%	
σ806	2,3	34,0	31,7	0,4	53,7	53,3	59%	
σ804	0,9	25,5	24,6	0,5	42,9	42,4	58%	
σ803	0,3	8,3	8,0	0,5	17,8	17,3	46%	Messung gestört
i. M.			27,4				33,0	

Trotz Verzicht auf eine nähere Interpretation des Kurvenverlaufes, ist deutlich erkennbar, daß die Vorspannung sich bei Erwärmung auf Raumtemperatur wieder aufbaut. In vorstehender Tabelle sind jeweils nur die Endwerte berücksichtigt und daraus die Spannungsdifferenzen bestimmt.

Die Meßstellen GRI807, 808 und 810 stimmen recht gut überein, d. h. die ursprüngliche Vorspannung in der Bettung ist bei Raumtemperatur zu mehr als 90% wieder erreicht. Bei den Meßstellen GRI802 und 805 werden immerhin noch akzeptable 73 - 75% des Anfangswertes erreicht. Für GRI801, 804 und 806 liegt der Wert zwischen 58 und 66% und bei GRI803 beträgt er nur 46%. Die GRI803 zeigt aber bei der Abkühlung einen großen Sprung um mehr als 6 MPa (vermutlich Meßstörung).

Ausnahme ist GRI809 bei der nach der Aufwärmung die Vorspannung von 16 auf 40 MPa angestiegen ist! Allerdings läuft der Wert nach Erreichung der Kryotemperatur (Referenzpunkt für den Vergleich) anschließend noch von 15,9 MPa auf 29 MPa hoch. Nimmt man diesen Wert, dann beträgt die Abweichung "nur" 139 statt 256%.

Trotz vorgenannter Einschränkungen kann man nach dem Test feststellen, daß wahrscheinlich eine Umverlagerung in den Vorspannungen der Bettung stattfand, ihre grundsätzliche Funktion wurde dadurch aber nicht wesentlich beeinflusst oder gar zerstört.

Nach den unter 4.3.1 genannten Randbedingungen ist eine solche Veränderung aufgrund der Testbelastungen bis in den Überlastbereich akzeptabel.

4.3.3.3 Lastfall A

Eine Zusammenfassung der Auswertung von vier repräsentativen Testläufen, die für die Lastfälle A und B stehen, zeigt die folgende Tabelle. Lastfall C ist nicht enthalten, da kein direkter Vergleich mit den Erwartungswerten, aufgrund des im Test nicht erreichten Stromes, möglich ist.

Auswertung der DMS- Daten "W7-X Demospule"

	Seite	DMS-Meßstelle GRI...	SEQV [Mpa]				Prüfstrom I _p [kA]	SIGMA (100%) [Mpa]	kleinste Abweichung zum Fehlerbalken	
			I _D =27,5 kA		I _D =19,0 kA				[Mpa]	%
			max	min	max	min				
Lastfall: A (run 44/97)	LCT	804	407	350	194	167	275	81	71	
		805	350	293	167	140	96	-44	-45	
		806	179	122	85	58	89	4	4	
		803	65	8	31	4	23	-8	0	
		801	65	8	31	4	11	-20	0	
		808	407	350	194	167	119	-48	-40	
	Tank	802	122	65	58	31	44	13	0	
		807	350	293	167	140	163	-4	0	
		809	464	407	221	194	204	10	0	
		810	464	407	221	194	120	-74	-62	

Hinweis 1: SEQV berechneter max. / min. Erwartungswert der "Vergleichsspannung" (v. Mieses) gem. Noell FEM Rechnung, Band 2, Seite 6.200, umgerechnet auf 19,0 kA
SIGMA aus zykl. Datenerfassung berechnete "Vergleichsspannung", umgerechnet auf E-Modul 185 GPa

	Seite	DMS-Meßstelle GRI...	SEQV [Mpa]	
			I=14,7/14,0 kA	
			max	min
Lastfall: B (run 111)	LCT	804	620	544
		805	544	467
		806	544	467
		803	315	238
		801	315	238
		808	544	467
Tank	802	315	238	
	807	467	391	
	809	620	544	
	810	391	315	
Lastfall: B (run 116)	LCT	804	620	544
		805	544	467
		806	544	467
		803	315	238
		801	315	238
		808	544	467
Tank	802	315	238	
	807	467	391	
	809	620	544	
	810	391	315	

	Prüfstrom I _p [kA]	SIGMA (100%) [Mpa]	kleinste Abweichung zum Fehlerbalken	
			[Mpa]	%
14,796	700	80	11	
	279	-188	-68	
	436	-31	-7	
	208	-30	-15	
	215	-23	-11	
	235	-232	-98	
14,795	454	139	31	
	476	9	2	
	500	-44	-9	
	192	-123	-64	
	697	77	11	
	278	-189	-68	
14,795	435	-32	-7	
	208	-30	-14	
	214	-24	-11	
	236	-231	-98	
	454	139	31	
	475	8	2	
14,795	500	-44	-9	
	191	-124	-65	

Hinweis 2: SEQV berechneter max. / min. Erwartungswert der "Vergleichsspannung" (v. Mieses) gem. Noell FEM Rechnung, Band 2, Seite 6.204, Lastfall B mit W7-X/LCT: 14,7/14,0 kA
SIGMA aus zykl. Datenerfassung berechnete "Vergleichsspannung", umgerechnet auf E-Modul 185 GPa

Aus den archivierten Meßdaten aller Stromtests sind repräsentativ in diesem Bericht für den **Lastfall A**, die Testläufe Nr. 44 und Nr. 97 verwendet. Testlauf Nr. 44 (gem. Testprogramm – Punkt 3.2.10/12) und Testlauf Nr. 97 (gem. Testprogramm – Punkt 5) stehen als Referenz für das mechanische Verhalten der DEMO Spule im Einzelspulentest vor und nach dem kombinierten Test mit der LCT Spule.

Sämtliche Strompulse wurden grundsätzlich, hinsichtlich der max. erreichten mechanischen Dehnungen (und daraus berechneten Spannungen), einer Veränderung zu vorherigen vergleichbaren Beanspruchungen sowie der Stromquadrat – Proportionalität, während des gesamten Tests kontrolliert. Die dabei festgestellten Unterschiede liegen entweder innerhalb der Meßgenauigkeiten von $\leq \pm 5$ ppm oder des Zeitabstandes zwischen der Nullstellung (Reset) und dem Beginn des

Stromanstiegs. War dieser Abstand zu groß, kam es durch Verstärkerdrift zu einer leichten Abweichung in den Absolutwerten.

Zunächst ist im Vergleich von Meß- und Erwartungswerten, sowohl bei den z – Dehnungen als auch berechneten Vergleichsspannungen, für alle Meßstellen eine globale Übereinstimmung erkennbar ([Anlage 4.3.3.3 a + b](#)).

Außerdem liegen mit zwei Ausnahmen (GRI 804, 810) alle Vergleichsspannungen innerhalb (GRI 801, 802, 803, 806, 807, 809) des Erwartungsbereiches bzw. darunter (GRI 805, 808). Für die letztgenannten zwei Meßstellen beträgt bei optimistischer Interpretation die größte Abweichung zum nächstliegenden min. / max. Erwartungswert des Toleranzbandes -44 MPa (-45%).

Die beiden Ausnahmen bilden die Meßstelle GRI 804 mit $+81$ MPa ($+71\%$) und GRI 810 mit -74 MPa (-62%).

Obwohl die Abweichungen unter Berücksichtigung der gegebenen FEM – Berechnungsmöglichkeiten keinen Anlaß zur Beunruhigung geben, wäre es zur „Abrundung“ sicherlich angebracht, in einer separaten Untersuchung, die Ursachen hierfür abzuklären. Ein wesentlicher Ansatzpunkt ist die schon angesprochene, versteifende Wirkung der mächtigen Stützzylinder an den Krafeinleitungspunkten zu den drei Lagerfüßen, die im FEM – Modell nur als Punktlast und somit nicht realitätsnah genug berücksichtigt wurden.

Die **Stromquadrat – Proportionalität** ist für alle Meßstellen gut erkennbar und bis zum Testende uneingeschränkt gegeben ([Anlage 4.3.3.3 c](#)). Auffallend war in diesem Zusammenhang zunächst, daß im Gegensatz zu den Verformungen die Vergleichsspannungen in der gewählten Darstellung keinen „Offset“ erkennen lassen. Dieser Umstand widerspräche der im vorhergehenden Abschnitt angenommenen nichtlinearen Bettungscharakteristik, da sofort mit dem Strom Spannungen auf dem Gehäuse sichtbar werden.

Erst eine detailliertere Auswertung der Dehnungen, die speziell den unteren Kraftbereich über den Stromanstieg mit einbezieht, lies in der v. Mises Vergleichsspannung leichte Abweichungen im Verlauf der Meßpunkte erkennen, die durch zwei unterschiedliche Steigungen charakterisiert sind ([Anlage 4.3.3.3 d](#)). Es erschien daher sinnvoll die Meßwerte so aufzuteilen, daß jeweils zwei getrennte Regressionsgeraden pro Meßstelle zur Anwendung kommen können.

Um den "Knickpunkt" in der Steigung der beiden Regressionsgeraden genauer zu bestimmen, mußte die Meßwertzuordnung zu der fiktiven Stromgrenze solange verschoben werden, bis beide Regressionsgeraden eine optimale Bestimmtheitszahl nahe 1 aufwiesen (bei 1 liegen alle Meßpunkte exakt auf der Regressionsgeraden; bei Null passen Meßpunkte und Regressionsgerade nicht zusammen).

Der "Knickpunkt" ist mit einer roten Vertikallinie markiert. Diese Linie liegt bei ca. 90 kA². Es gibt allerdings zwei Kurven (GRI801, 803) die beim besten Willen keiner Regressionsgeraden im unteren Strombereich folgen. Um das Diagramm nicht zu überfüllen sind nur ausgewählte, repräsentative Regressionsgeraden eingetragen.

Deutlich wird die Abweichung erst bei Analyse der Hauptspannungen ([Anlage 4.3.3.3 e](#)). Trägt man σ_1 über dem Stromquadrat (der Einfachheit halber und aus Zeitgründen nur für den Lastfall A untersucht) auf, dann zeigt sich der Linearitätsknick bei fast allen Meßstellen, aber ganz besonders bei GRI804.

Die Vergleichsspannung errechnet sich aus der Überlagerung der beiden Hauptspannungen und „verwischt“ den Effekt, da die zweite Hauptspannung σ_2 kleiner ist und fast unbeeinflusst von der Linearitätsabweichung bleibt.

Dieser Umstand korrespondiert mit dem Ergebnis der Verformung und erhärtet die zuvor aufgestellte These zur bestehenden Restvorspannung in der Bettung im stromlosen Zustand. Es zeugt von der festen und sehr wahrscheinlich spaltfreien Bettung des Wickelpaketes, daß sofort mit dem Strom Spannungen im Gehäuse aufgebaut werden, die sich nach Abbau der Vorspannung in Ihrer Tendenz ändern bzw. umverteilen.

4.3.3.4 Lastfall B und C

Die **Lastfälle B und C** zeigen hinsichtlich der allgemeinen Tendenz ein ähnliches Bild wie zuvor beschrieben. Für die Auswertung wurden die Testläufe Nr. 111 (gem. Testprogramm – Punkt 6.2.10) und 116 (gem. Testprogramm – Punkt 7.2.) als repräsentativ verwendet. Beide Testläufe sind unter stabilen Kühlbedingungen in fünf gut vergleichbaren Stromstufen bis zum Maximalstrom bzw. Quench gefahren worden.

Der Lastfall C stellt die höchste mechanische Belastung der DEMO Spule im Test dar. Hierbei sollte gem. Testprogramm der Strom in der LCT Spule bis 14,0 kA und in der DEMO Spule bis 18,3 kA gefahren werden. Dieser Lastfall war vorgesehen um die mechanische Reserve der DEMO Spule nachzuweisen. Wie im Teil 3 bereits berichtet, wurde bei 100% Hintergrundfeld ein max. Strom in der DEMO Spule von 16,73 kA während des Hochfahrens (Testlauf Nr.122), unmittelbar vor dem Quench erreicht.

Die Wechselwirkungskraft zwischen beiden Spulen (W 7-X und LCT) erreichte dabei 12 MN. Da dieser Wert noch in der transienten Stromanstiegsphase beim Quench lag, eignet er sich nicht so gut für eine Auswertung der mechanischen Daten. Im ausgewählten Testlauf Nr. 116 trat immerhin noch eine Wechselwirkungskraft von 11,6 MN auf.

Die größten Abweichungen zu den Erwartungswerten des **Lastfalls B** zeigen die Meßstellen GRI 805, 808 und 810 mit $-123 \dots -232$ MPa ($-64 \dots -98\%$). Bei diesen Meßstellen liegen die gemessenen Spannungen unter den Erwartungswerten ([Anlage 4.3.3.4 a - d](#)).

Um hier eine genauere Aussage treffen zu können, müßte die dem FEM – Modell zu Grunde liegende Segmentierung verfeinert werden. An der LCT- seitigen Meßstelle GRI 805 wirkt sich klar die Versteifung durch das Stützrohr aus. Die beiden anderen Meßstellen sind dagegen schwieriger zu beurteilen, da sich die Spulenform in diesem Bereich lateral und über einen relativ kurzen Bereich stark ändert. Die berechneten Spannungen - „hot spots“ sind relativ klein und nahezu punktförmig lokalisiert. Bei einer Verfeinerung des FEM – Gitternetzes und exakter Zuordnung der beiden Meßpunkte wäre die Übereinstimmung sicher noch etwas besser.

Alle anderen Meßstellen zeigen eine gute Übereinstimmung zur FEM – Berechnung.

Eine Ausnahme bildet die Meßstelle GRI 802, bei der sich ein größerer Meßwert ($+ 139$ MPa / $+31 \%$) als berechnet ergab. Hier zeigt sich auch wieder die Wirkung der Abstützung wo, durch die Anziehung der beiden Spulen, ein Biegemoment auf der tankseitigen Gehäuseseite hinzukommt.

Die gemessene z – Dehnung stimmt an allen Meßstellen richtungsmäßig mit den Erwartungswerten überein.

Auch bei dieser Belastung ist wieder die Stromquadrat – Proportionalität der Spannungen an allen Meßstellen, bis zum Haltepunkt der LCT Spule (14,0 kA), sehr gut erkennbar und somit erfüllt ([Anlage 4.3.3.4 e + f](#)). Oberhalb dieser Strommarke wird nur noch die W 7-X – Spule weiter erregt (der Feldbeitrag von der LCT Spule bleibt konstant), was zu einer Änderung in der Beanspruchung führt und woraus der leichte Knick resultiert.

Als erste Erklärung für die niedrigeren, gemessenen Spannungen an den meisten Meßstellen bietet sich auch hier wieder der Einfluß der Lagerstützen an. Auch das etwas zu grobe FEM – Modell führt insbesondere an Stellen lokal erhöhter Beanspruchung zwangsläufig zu Abweichungen zwischen Messung und Rechnung.

Es muß aber auch noch eine andere Beobachtung erwähnt werden. Nach Aufwärmung der gesamten Testanordnung und Ausbau der DEMO Spule wurden mehrere **Schleifspuren** von bis zu 8 mm Länge an den Lagerflächen zum Zwischenrahmen gefunden, die auf eine nach oben gerichtete Bewegung der Spule um ca. 3 mm deuten. Diese Vermutung wird unterstützt durch Kraft- und Bewegungsmessungen an den drei Lagern zur Gewichtsablastung der gesamten Testanordnung und den vier horizontalen Abspannungen der LCT Spule zum Kryostat (Zugstangen).

Einer nachträglichen, erweiterten Auswertung seitens FZK zufolge, waren bei den untersuchten Lastfall A – Tests allerdings keine erkennbaren Bewegungs- und Kraftänderungen feststellbar, woraus geschlußfolgert werden darf, daß die Spule zum Zwischenrahmen selbst nicht grundsätzlich verklemmt gewesen sein kann. Die drei Lager haben demnach bestimmungsgemäß funktioniert und die Bewegung der DEMO Spule nicht behindert.

Lager III, das unter dem tankseitigen Ausleger des Zwischenrahmens der DEMO Spule im wesentlichen deren Gewichtskraft trägt, bewegt sich im Lastfall B (C) um ca. 9,6 mm nach Südwest und wird bei Erregung um ca. 57 kN entlastet. Die beiden anderen Lager I und II, unter der LCT Spule, werden dabei mit zusätzlich 104 kN belastet. Die Differenz erklärt sich wie unter 4.2. bereits angegeben aus der ferromagnetischen Rückwirkung der Umgebung (Stahlbeton).

Um die erregte DEMO Spule bei ca. 12 MN Wechselwirkungskraft (Anziehungskraft) gegen die Gewichtskraft anzuheben, bedarf es **einer nach oben (+z) gerichteten Kraftkomponente von ca. 1,2 MN** (Haftreibungszahl: $\mu_R \approx 0,1$). Aus den Feldrechnungen von Herrn Dr. Maurer würde diese Kraft erst bei einer vertikalen Verschiebung der magnetischen Achsen beider Spulen von rund 260 mm auftreten.

Eine solche Verschiebung ist beim Einbau des Zwischenrahmens zusammen mit der DEMO Spule in TOSKA praktisch unmöglich, da der vertikale Spielraum der meisten Druckstege, die durch die Verstärkungsbänder der LCT Spule durchgreifen, max. nur 10 mm beträgt. Einer Fehljustierung der DEMO Spule zum Zwischenrahmen widersprechen die vorliegenden Meßprotokolle des Herstellers sowie die stichprobenartige Maßkontrolle anlässlich der Abnahme. Um dennoch einen evtl. begangenen systematischen Fehler zu entdecken, müßte die Testanordnung nachträglich nochmals vermessen werden.

Der Aufwand hierfür ist aber, an Betracht des im günstigsten Fall zu gewinnenden Ergebnisses für das Verständnis des mechanischen Verhaltens der DEMO Spule, zu hoch.

Die Verschiebung kann als Folge der mittig auftretenden Durchbiegung des gesamten Zwischenrahmens, in y – Richtung, bei den Lastfall B / C – Tests nicht ausgeschlossen werden, da entgegen der Annahme in den FEM – Berechnungen das Gehäuse der LCT Spule nicht ideal steif ist.

Es ist in diesem Zusammenhang aber auch zu erwarten, daß bei einer so großen, zusätzlichen, Kraft das vorausberechnete Ablastungsverhalten der DEMO Spule beeinflusst wird. Da dieser Effekt nur im kombinierten Betrieb auftritt, ist er nicht für die im Lastfall A festgestellten und über die nichtlineare Bettungscharakteristik erklärbaren, niedrigeren Verformungen und Spannungen relevant.

4.3.3.5 Zusammenfassung zur Dehnungsmessung

Die gemessenen Dehnungen und die daraus berechneten Spannungen liegen an den meisten Meßstellen des DEMO Spulengehäuses im Erwartungsbereich der FEM – Berechnung.

Es gibt drei nennenswerte Abweichungen im **Lastfall A**, mit Vergleichsspannungen von –74 bis +81 MPa (-62 bis +71%) zum Rechenwert, die sich aus vereinfachenden Annahmen (Krafteinleitungsbereiche zu den Lagern, Knotenabstand) im FEM – Modell erklären lassen.

Zur Ermittlung der mechanischen Reserve war im Lastfall C vorgesehen, die DEMO Spule im Hintergrundfeld der LCT Spule bis zu einem Strom von 18,3 kA zu erregen.

Im Test erreicht wurde – quenchbedingt – nur ein max. Strom von 16,7 kA (91 %). Kraftmäßig bedeutet dieses Limit **83,3 %** der geplanten integralen mechanischen Beanspruchung.

Die Auswertung bezieht sich aus den im Vortext erwähnten Gründen, auf **Lastfall B** mit 14,7 kA in der DEMO Spule und 14,0 kA in der LCT Spule. Die Vergleichsspannung liegt hier an 6 Meßstellen im Erwartungsbereich. Bei den restlichen 4 Meßstellen kommt es zu Abweichungen von –232 bis +139 MPa (-98 bis +31%).

Die Erklärung ist sehr wahrscheinlich wiederum in den vorgenannten, gewählten Vereinfachungen zu finden.

Während aller Tests war die Stromquadrat – Proportionalität der Dehnungen sowie Spannungen bis zum Maximalstrom erfüllt. Allerdings konnten insbesondere in den berechneten Hauptspannungen kleinere Linearitätsabweichungen nachgewiesen werden, die die bereits bei den Verformungen entwickelte Hypothese hinsichtlich einer nichtlinearen Bettungscharakteristik stützen.

Insgesamt betrachtet und mit Blick auf die komplexe Spulengeometrie, kann von einer guten Übereinstimmung von Messung und Rechnung gesprochen werden. Zur genaueren Bestimmung der im Test dennoch festgestellten lokalen Abweichungen, wäre eine Wiederholung der FEM – Berechnungen auf Basis eines verfeinerten Modells nötig. Da aber die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf die Serienspulen in dieser Feinheit praktisch nicht möglich ist, erscheint der Aufwand kaum gerechtfertigt.

Die generelle Eignung des gewählten Bettungskonzeptes der DEMO Spule, welches auch bei den Serienspulen zur Anwendung kommen soll, wird durch den Test in jedem Fall voll bestätigt.

Nach dem Testergebnis scheint auf dem ersten Blick sogar eine um etwa 10 % höhere Vorspannung bei Raumtemperatur günstiger, die aber andererseits durch das unerwünscht höhere Risiko der Spaltbildung zwischen Wickelpaket und Bettung nicht zweckmäßig erscheint. Außerdem ist es nicht sicher, ob die angestrebte Vorspannung in dieser Feinheit über die gesamte Fertigung für alle Spulentypen überhaupt sicher realisiert werden kann.

Zum Schluß sei noch erwähnt, daß nach dem Ausbau, im Rahmen einer sorgfältigen Inspektion, äußerlich **keine nennenswerten Beschädigungen** an der DEMO Spule, den Lagern, dem Zwischenrahmen und der LCT Spule festgestellt wurden.

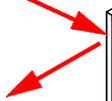
Allerdings weisen vereinzelt, mehrere Millimeter lange Schleifspuren an den Lagern auf eine, nach oben gerichtete Bewegung der DEMO Spule. Dies belegen auch Dehnmessungen im Lastfall B / C an der Gewichts- und Seitenabstützung der gesamten Testanordnung im TOSKA – Kryostaten. Einzelne GFK – Ausgleichskappen an den Druckstegen des Zwischenrahmens sind leicht beschädigt.

Da in den FEM – Berechnungen eine für diese Bewegung nötige Kraft nicht vorkommt, kann eine Rückwirkung auf das erwartete Ablastungsbild der DEMO Spule solange nicht ausgeschlossen werden, bis deren Ursache verstanden ist. Obwohl es bisher noch keine schlüssige Erklärung für die entdeckten Schleifspuren gibt, muß auch dieser Vorgang als untergeordnetes Randproblem in der gesamten Testbeurteilung eingeordnet werden.

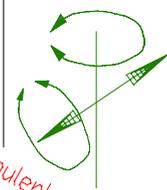
Anlagen zu Teil 4.3

- 4.3.1 Zwischenstruktur (Übersichtsdarstellung)
- 4.3.2.1 Skizze zur Position der Aufnehmer
- 4.3.2.2 a Langzeitanalyse (Nullpunktstabilität)
- 4.3.2.2 b Foto eines GDI- Sensors
- 4.3.2.3 a Abkühlung (Origin)
- 4.3.2.3.b Verformung (Origin), LF-A, #44
- 4.3.2.3.c Verformung (Origin), LF-A, #97
- 4.3.2.3.d Verformung (Origin), LF-A, #126
- 4.3.2.3.e Verformungsvergleich (Excel), LF-A, #44 + #126
- 4.3.2.3.f Verformungen d. Meßstellen (Excel), LF-A, #44 + #97
- 4.3.2.3.g Verformungen über I^2 (Excel), LF-A, #44 + #97
- 4.3.2.4.a Verformung (Origin), LF-B / C, #111
- 4.3.2.4.b Verformungen d. Meßstellen (Excel), LF-B / C, #111
- 4.3.2.4.c Verformungen über I^2 (Excel), LF-B / C, #111
- 4.3.3.1 Skizze zur Position der Aufnehmer
- 4.3.3.2 a Abkühlung (Excel), Sigma-Zeit
- 4.3.3.2 b Abkühlung (Excel), Sigma-Temperatur
- 4.3.3.2 c Aufwärmung (Origin), Sigma-Zeit
- 4.3.3.2 d Aufwärmung (Excel), Sigma-Temperatur
- 4.3.3.3 a DMS-Ausw. Sigma d. Meßst. (Excel), LF-A, #44 + #97
- 4.3.3.3 b DMS-Ausw. Z-Dehng. d. Meßst. (Excel), LF-A, #44 + #97
- 4.3.3.3 c DMS-Ausw. I^2 (Excel), LF-A, #44 + #97
- 4.3.3.3 d DMS-Ausw. I^2 Vergleichsspg. (Excel), LF-A, #103
- 4.3.3.3 e DMS-Ausw. I^2 Hauptspg. (Excel), LF-A, #103
- 4.3.3.4 a DMS-Ausw. Sigma d. Meßst. (Excel), LF-B / C, #111
- 4.3.3.4 b DMS-Ausw. z-Dehng. d. Meßst. (Excel), LF-B / C, #111
- 4.3.3.4 c DMS-Ausw. Sigma d. Meßst. (Excel), LF-B / C, #116
- 4.3.3.4 d DMS-Ausw. z-Dehng. d. Meßst. (Excel), LF-B / C, #116
- 4.3.3.4 e DMS-Ausw. I^2 (Excel), LF-B / C, #111
- 4.3.3.4 f DMS-Ausw. I^2 (Excel), LF-B / C, #116

Reaktionskräfte zur Gewichtsbalance



Freiheitsgrade Spulenlager 2



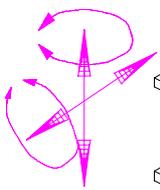
Fixpunkt in X-Z-Ebene



Spulenlager 2
ca. 2,7 MN

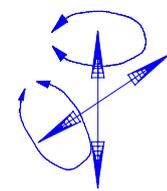
2 x 20000 N (Gewicht Spule mit Gehäuse ca. 4000 KG)

Freiheitsgrade Spulenlager 1



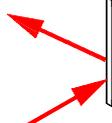
Spulenlager 1
ca. 4 MN

Freiheitsgrade Spulenlager 3



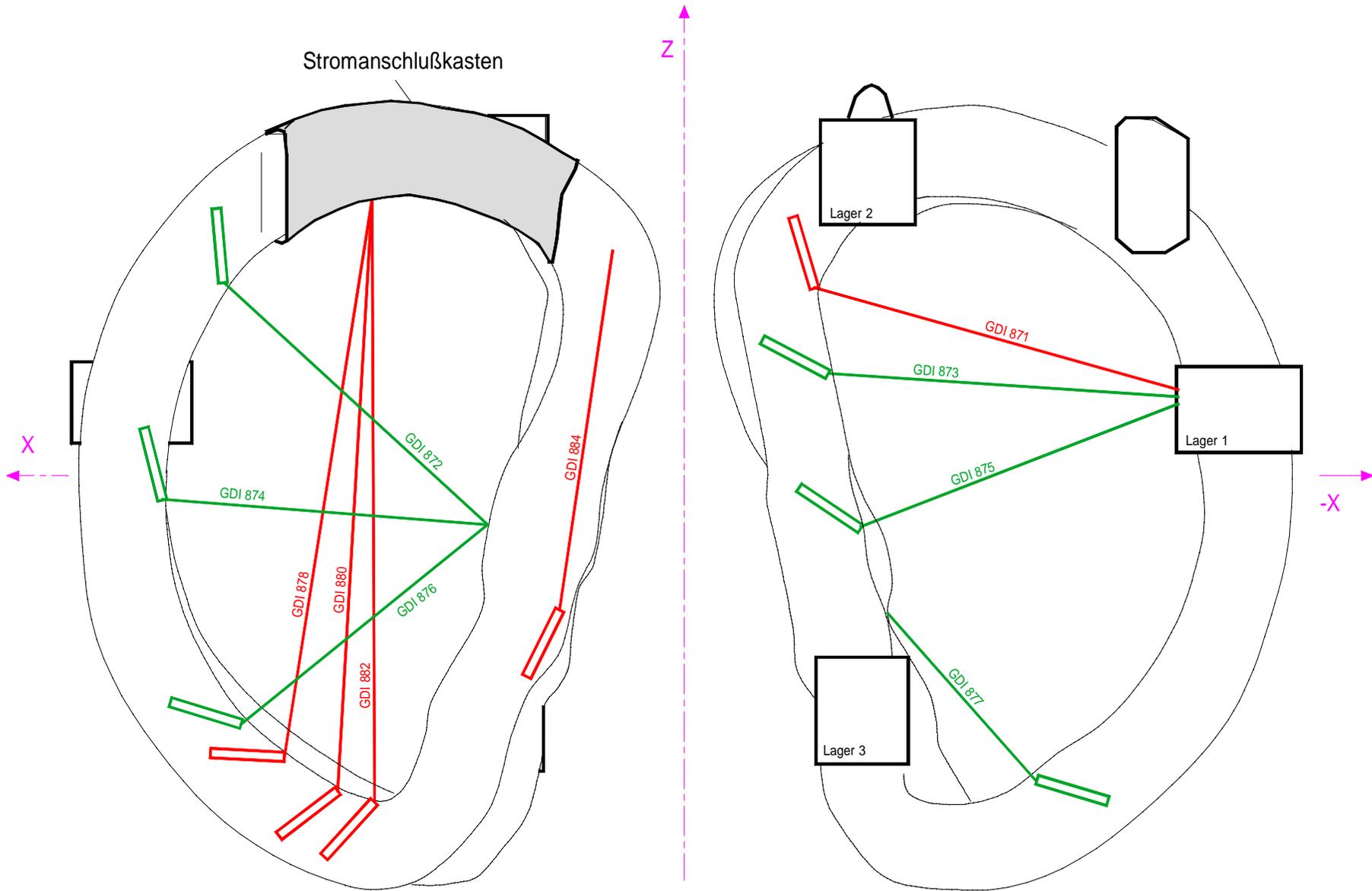
Spulenlager 3
ca. 4 MN

Reaktionskräfte zur Gewichtsbalance



Gewichtablastung mit Loslager : 117000 N
(Gewicht Spule mit Gehäuse ca. 4000 kg)
(Gewicht des Tragrahmen ca. 5000 kg)
(Gewicht der Lager: 3 x 900 = 2700 kg)

Darstellung der Verformungsmeßstrecken an der W7-X Demospule



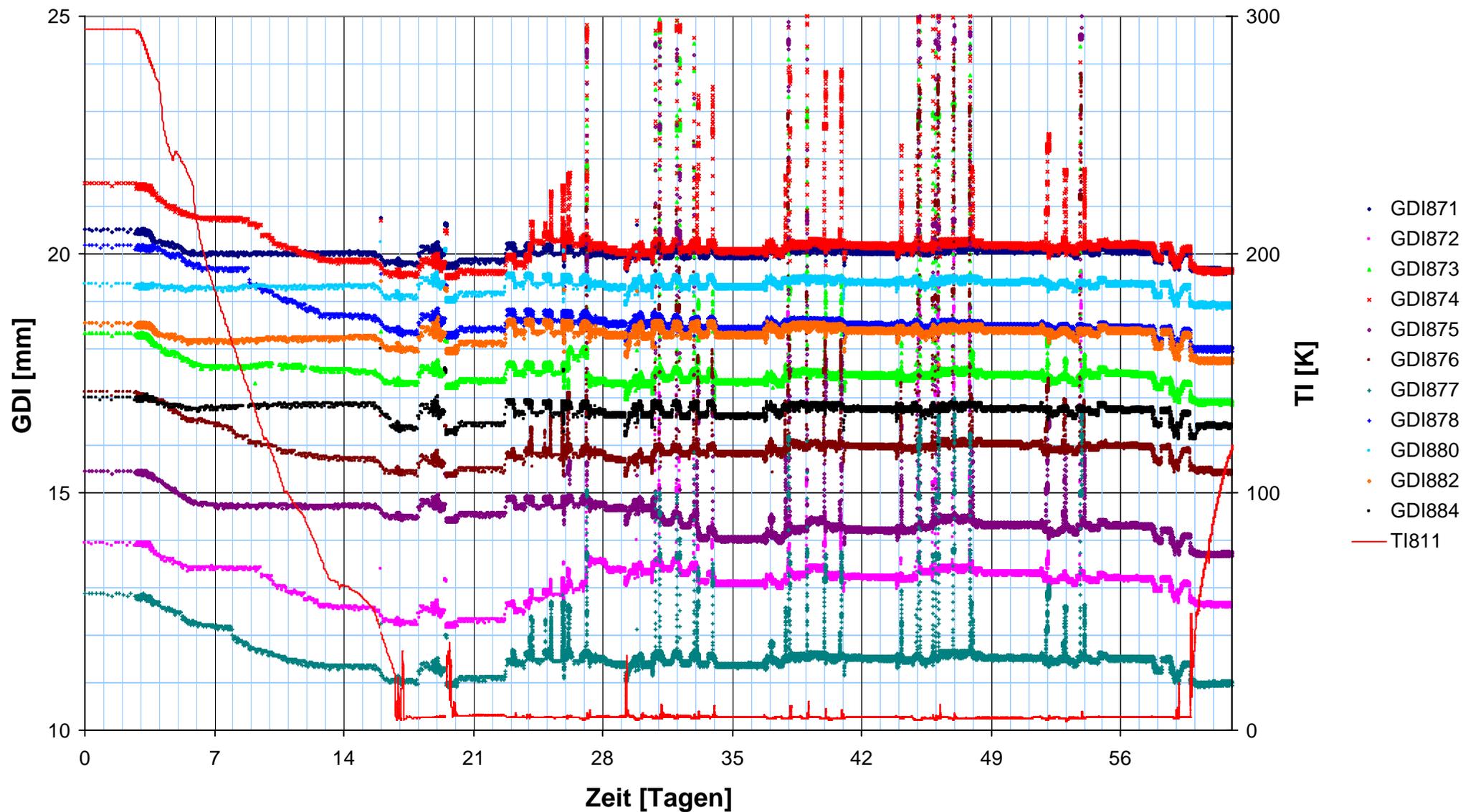
rot: keine Verformung erkennbar

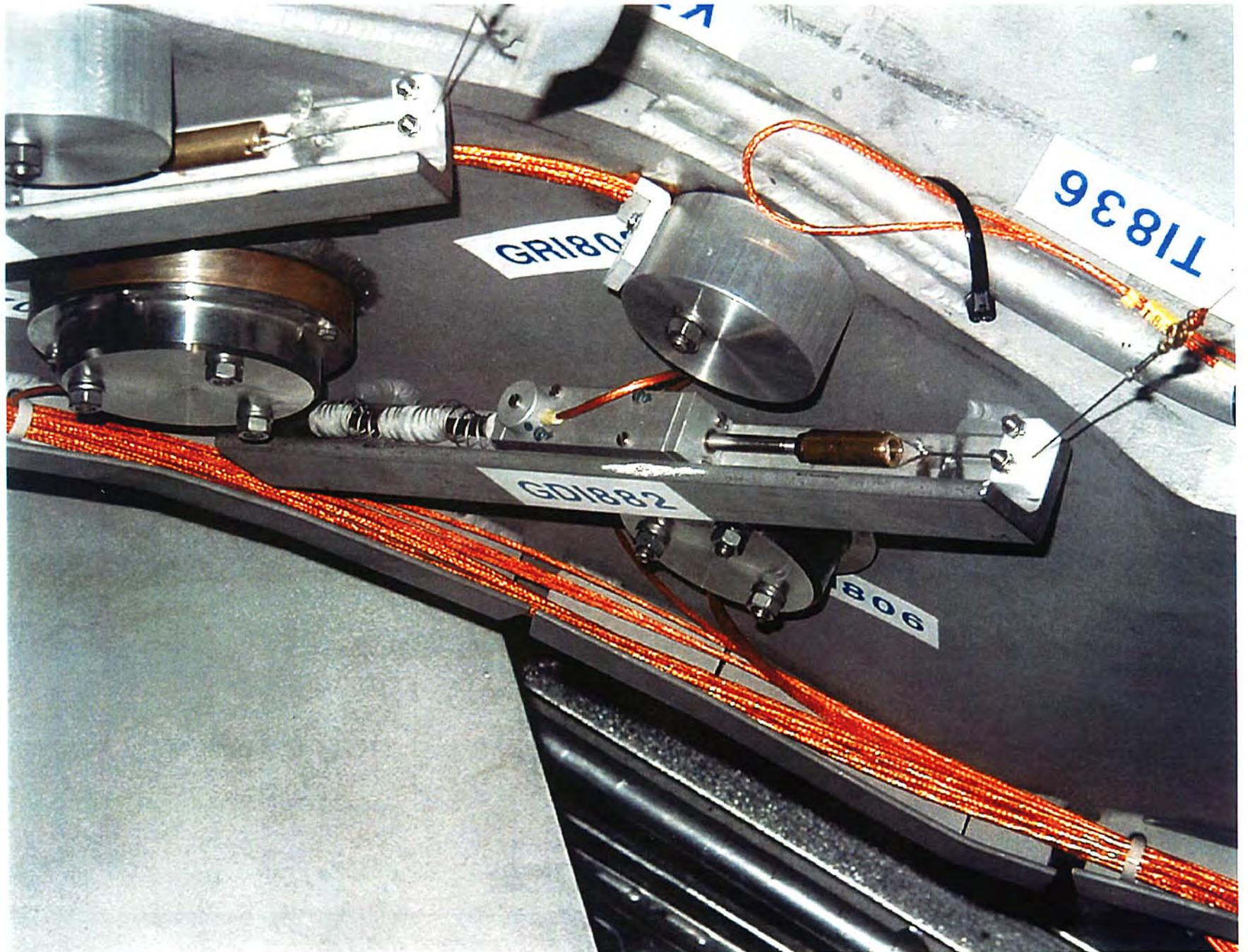
grün: stromquadratproportionale Verformung

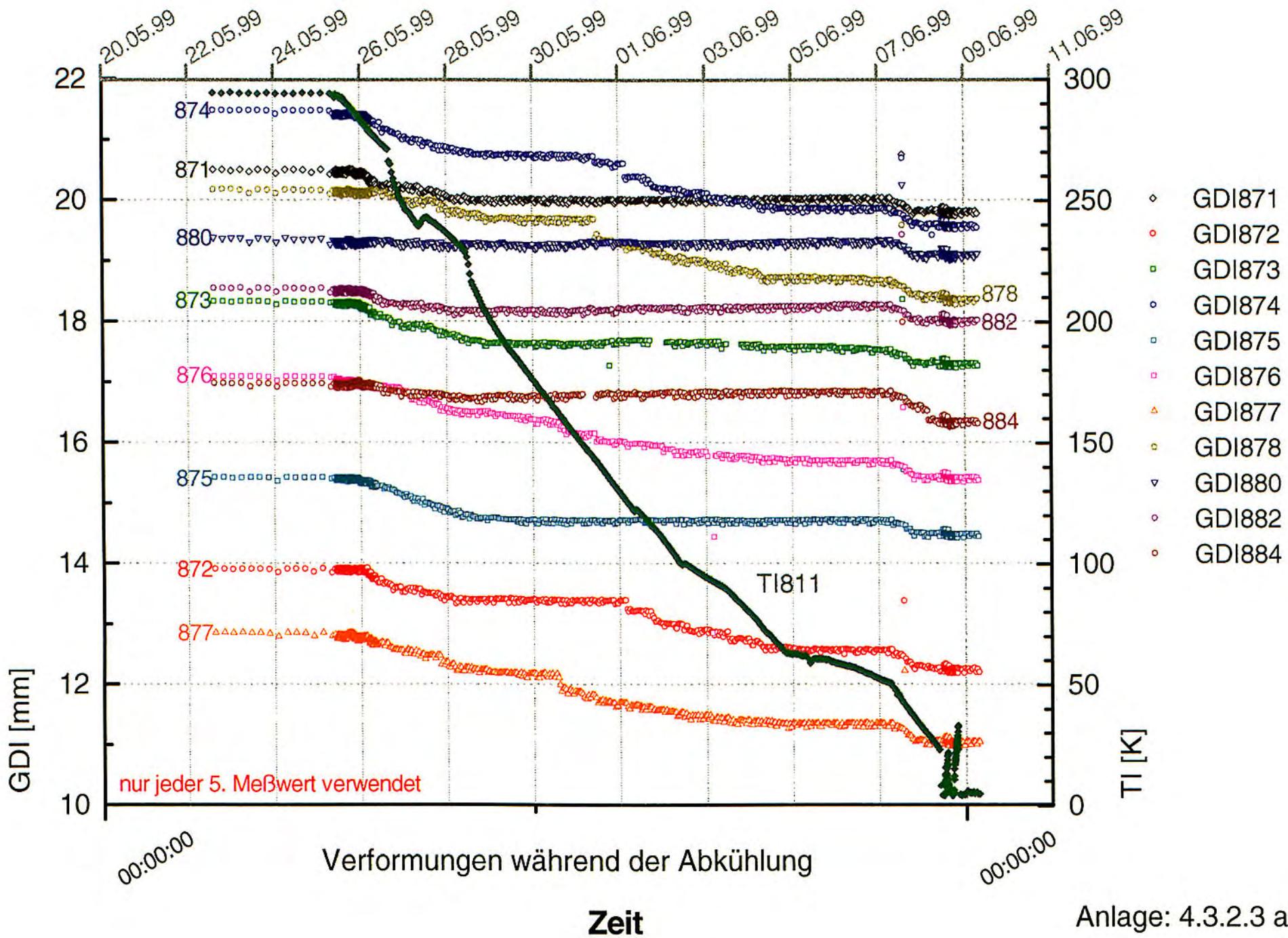
Tank-Seite

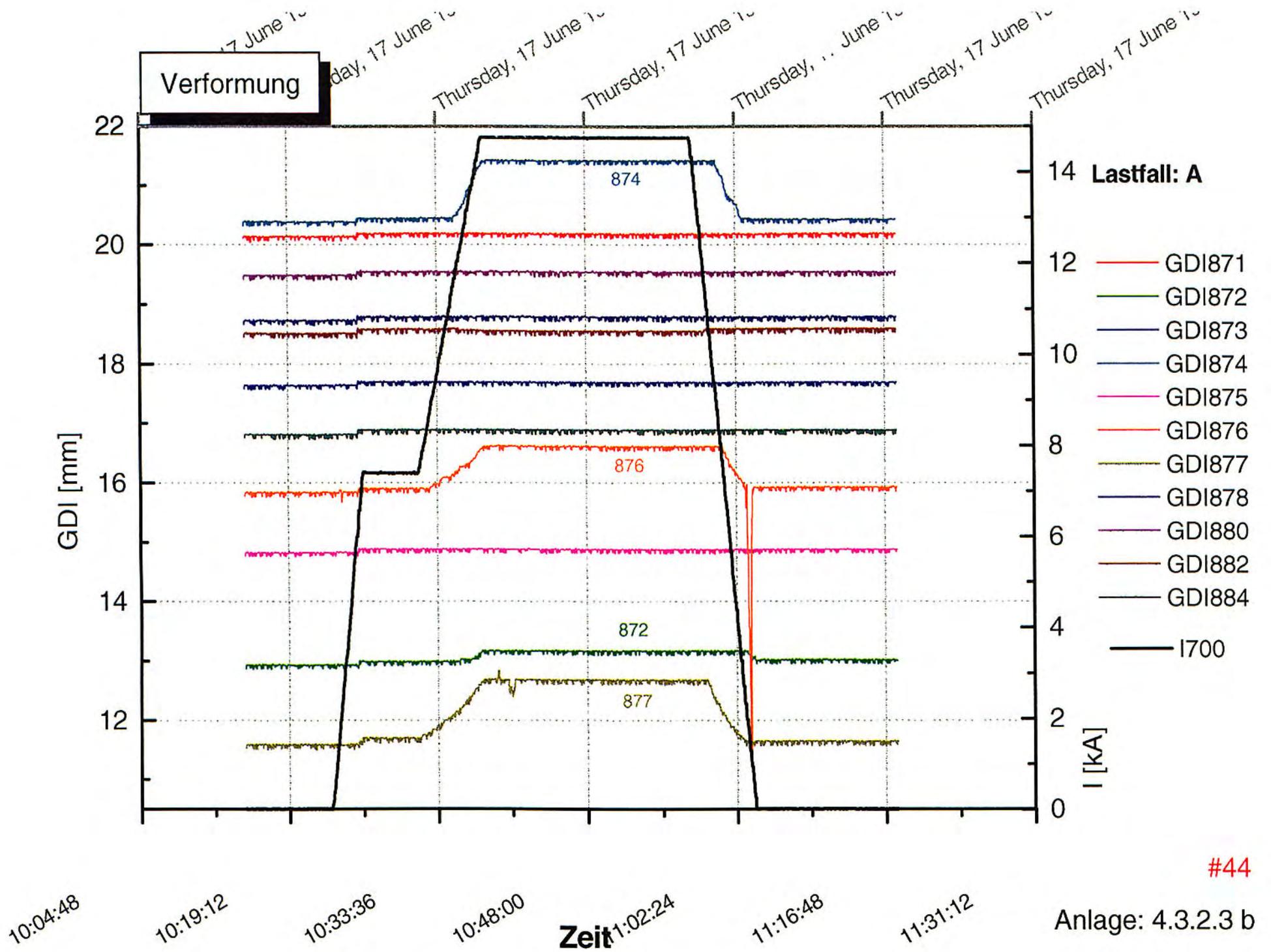
LCT-Seite

Langzeit - Verformungsverlauf

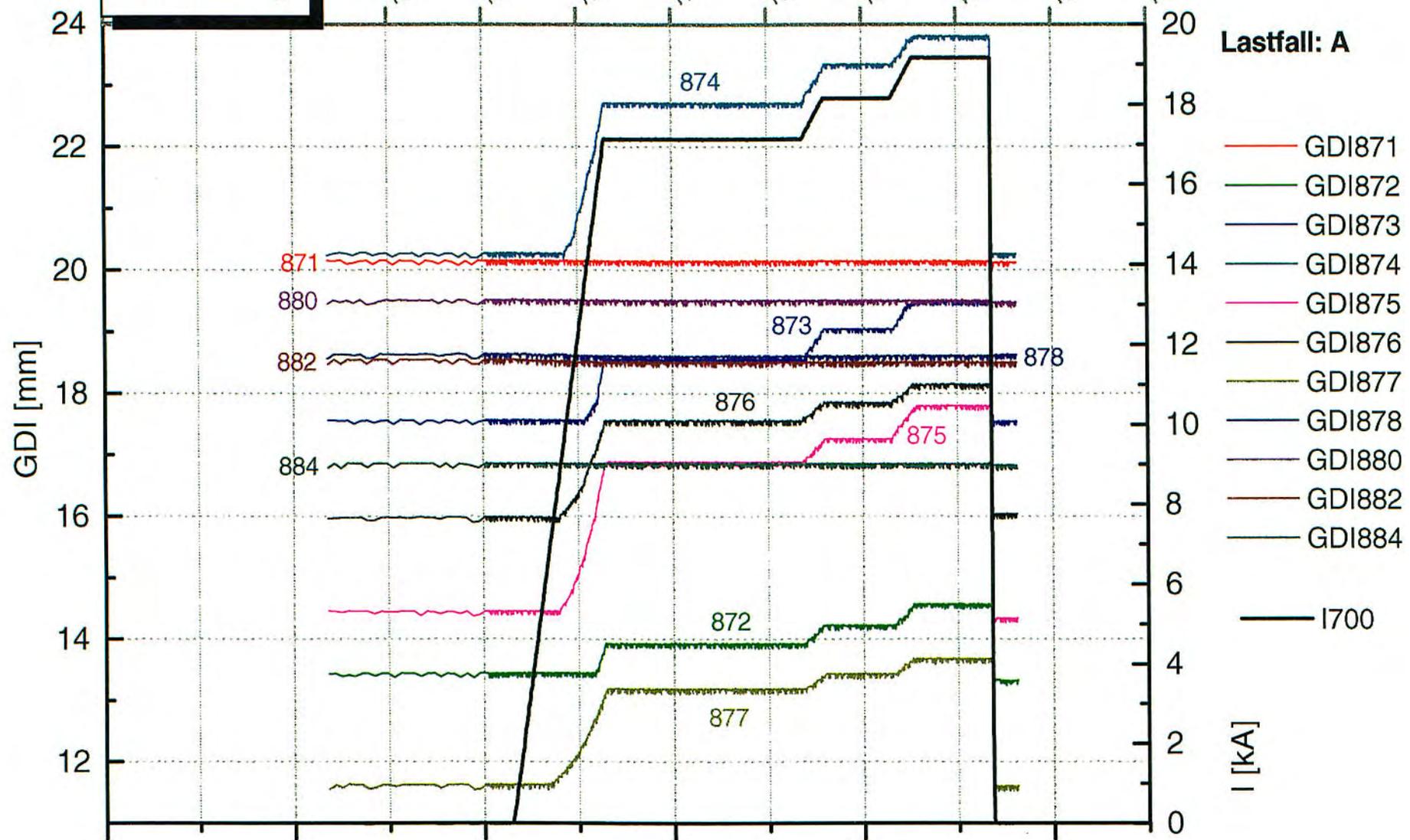








Verformung



Lastfall: A

- GDI871
- GDI872
- GDI873
- GDI874
- GDI875
- GDI876
- GDI877
- GDI878
- GDI880
- GDI882
- GDI884
- I700

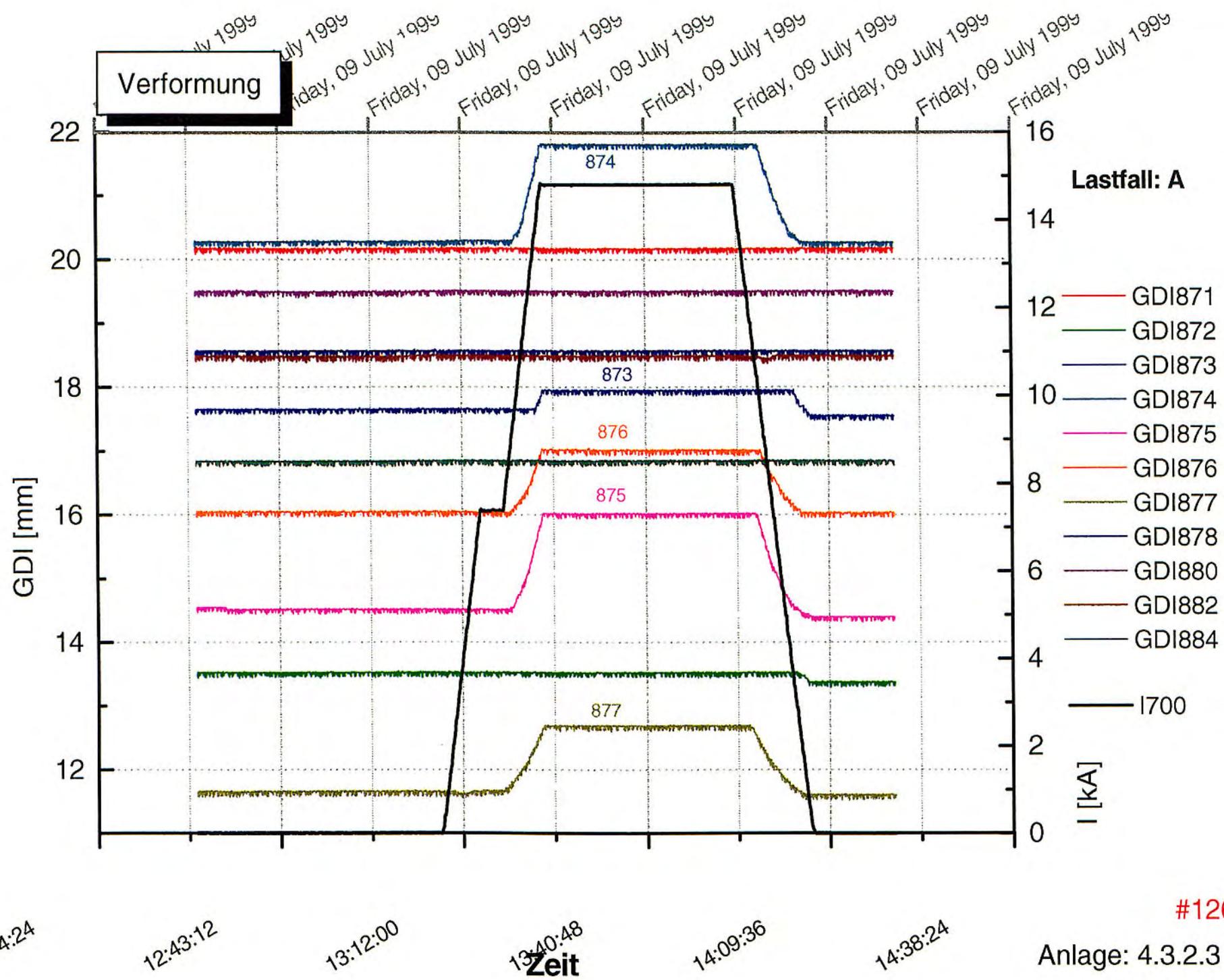
#97

Anlage: 4.3.2.3 c

Zeit
13:26:24 13:55:12 14:24:00 14:52:48 15:21:36 15:50:24

266

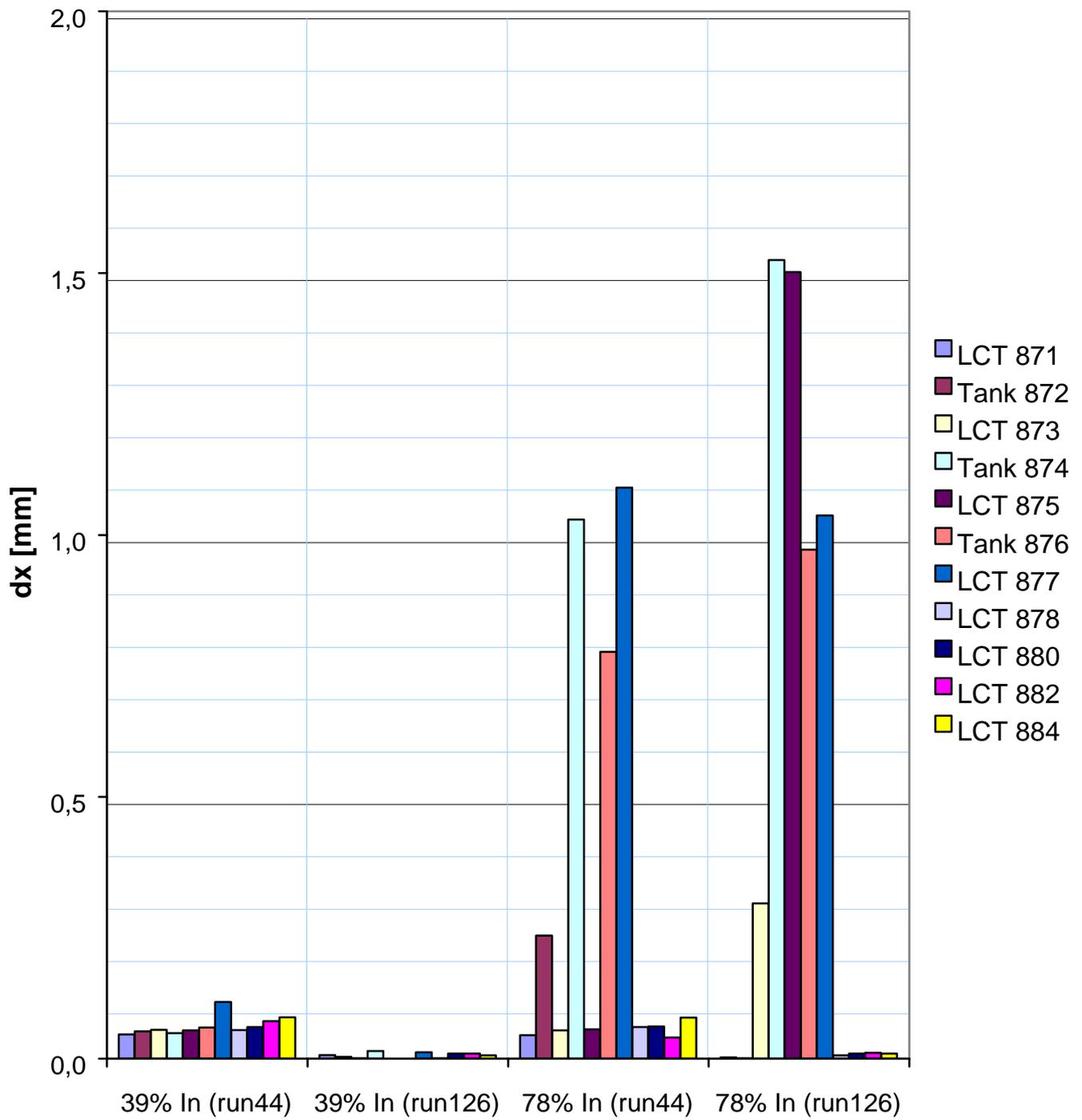
Verformung



#126

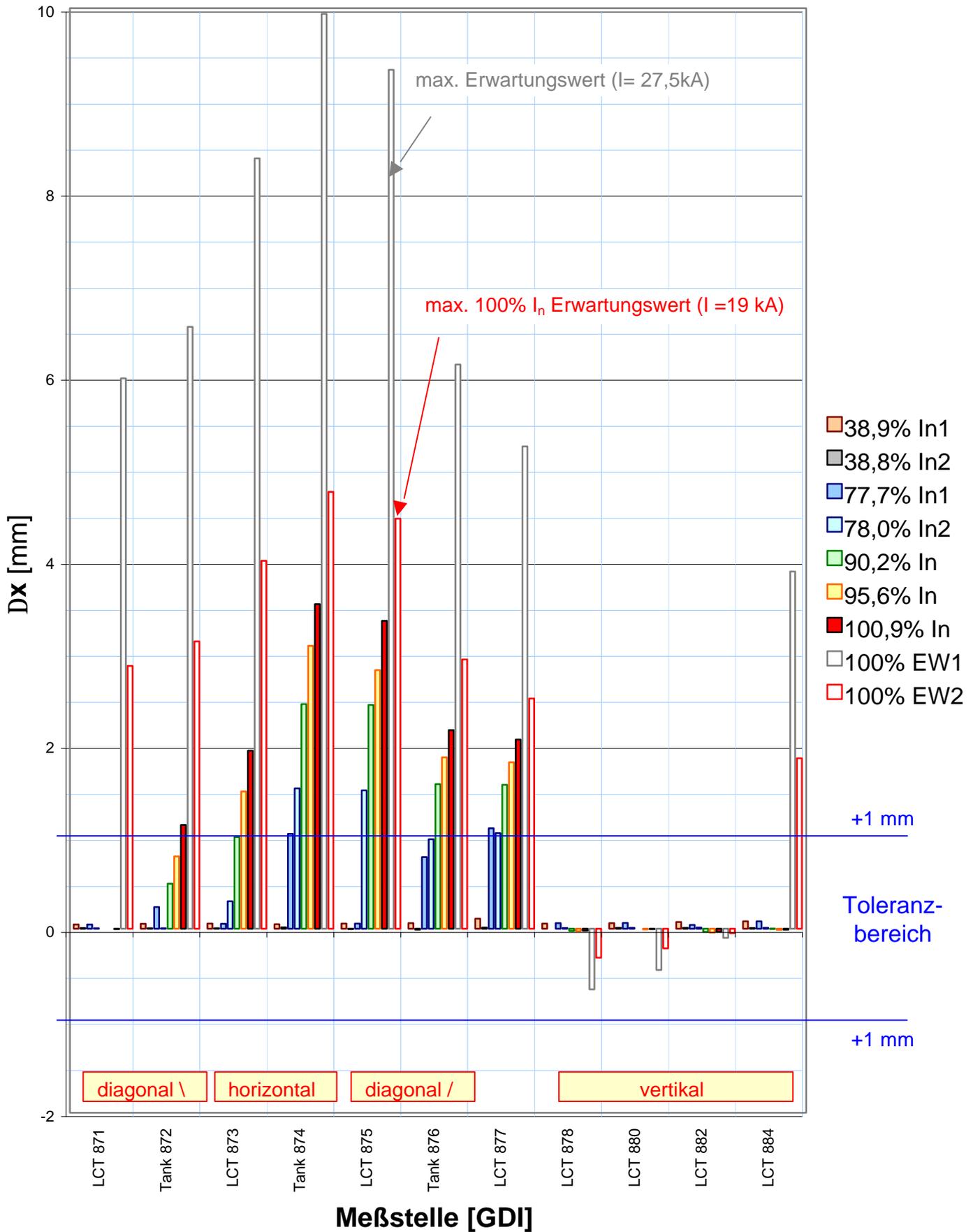
Anlage: 4.3.2.3 d

Vergleich Verformungen run #44 zu #126



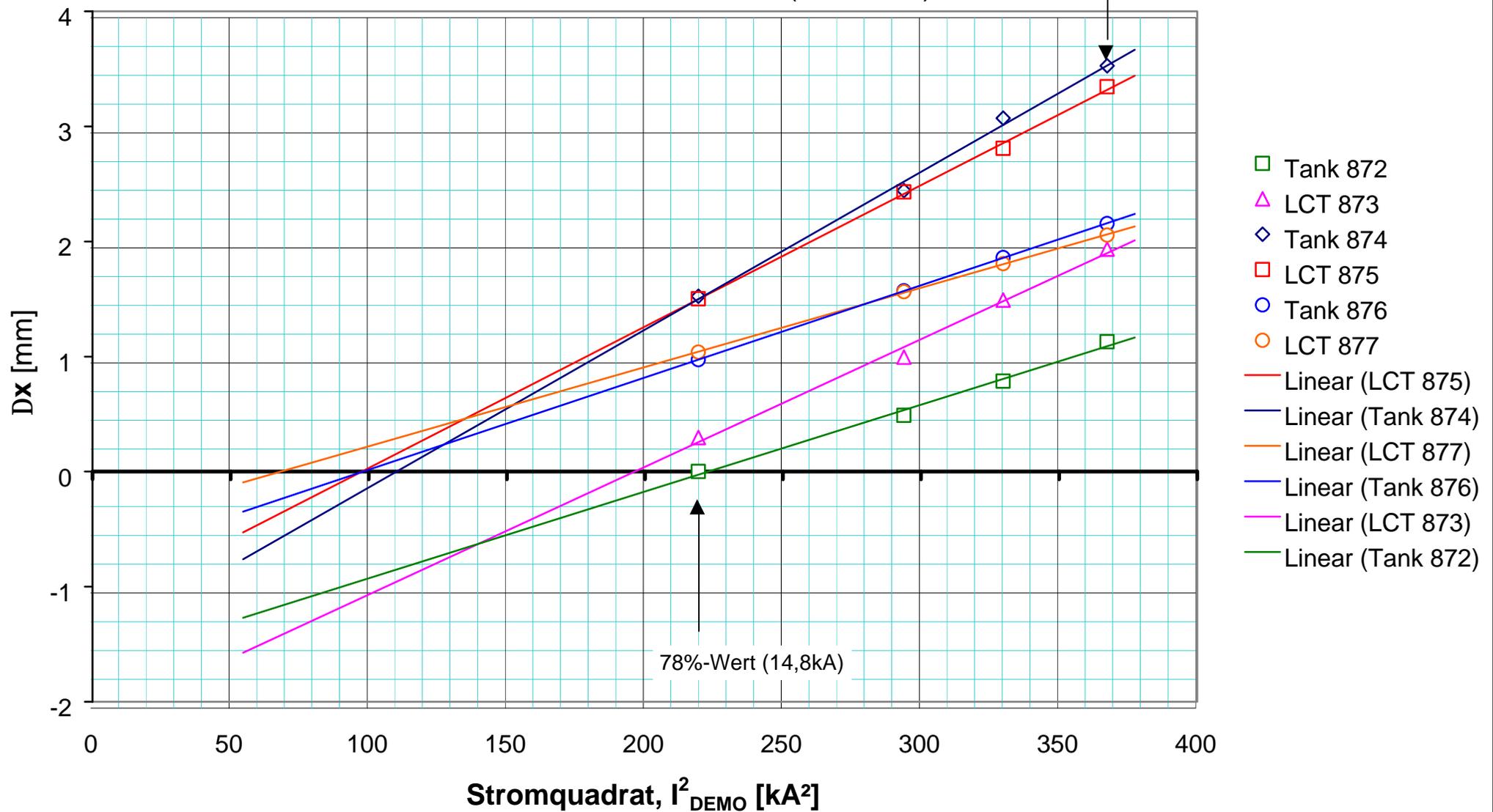
Verformung W7-X Demospule

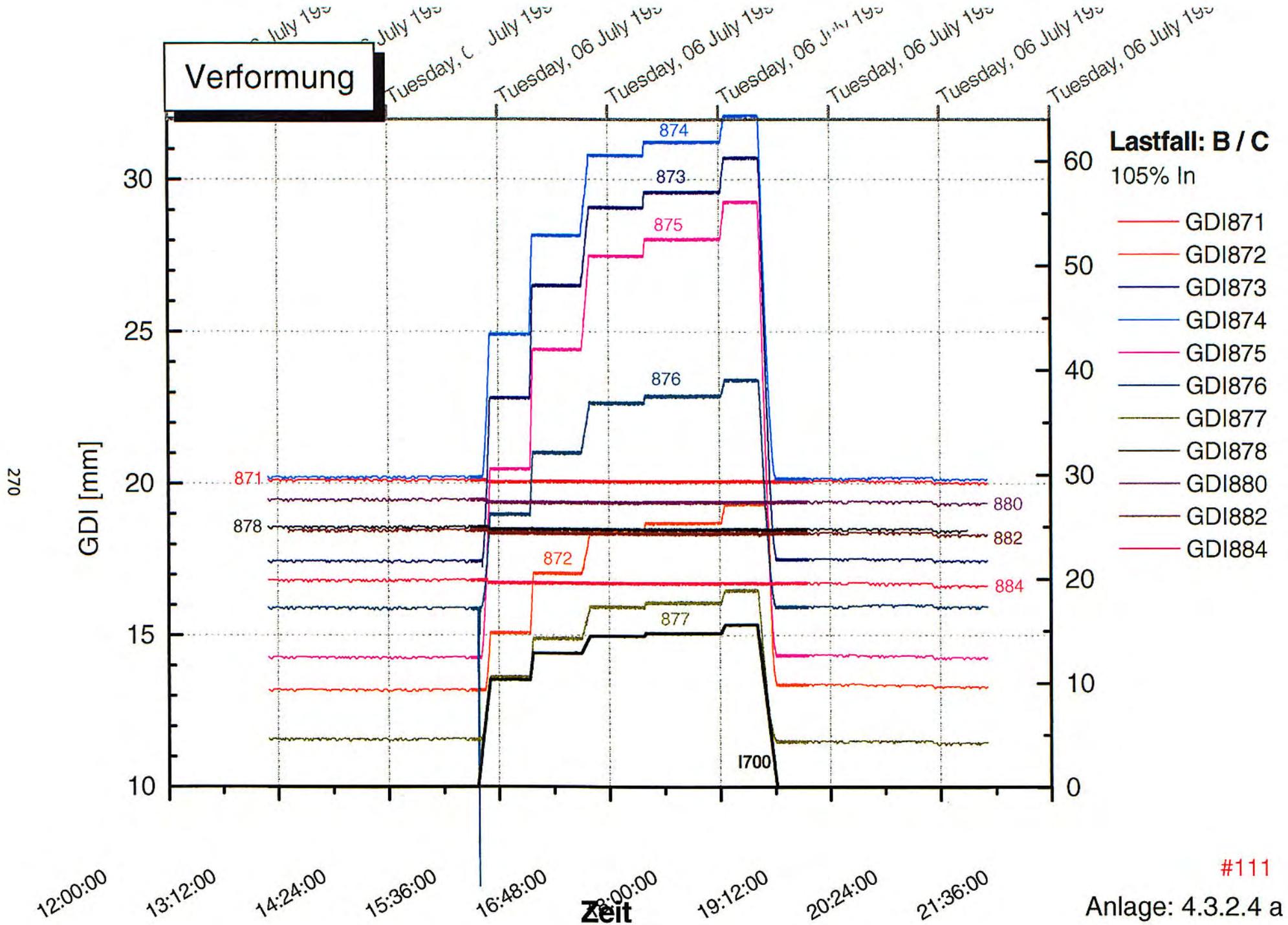
Auswertung Puls: 44 und 97 (Lastfall: A)



Verformung W7-X Demospule

Auswahl Puls: 44 und 97 (Lastfall: A)



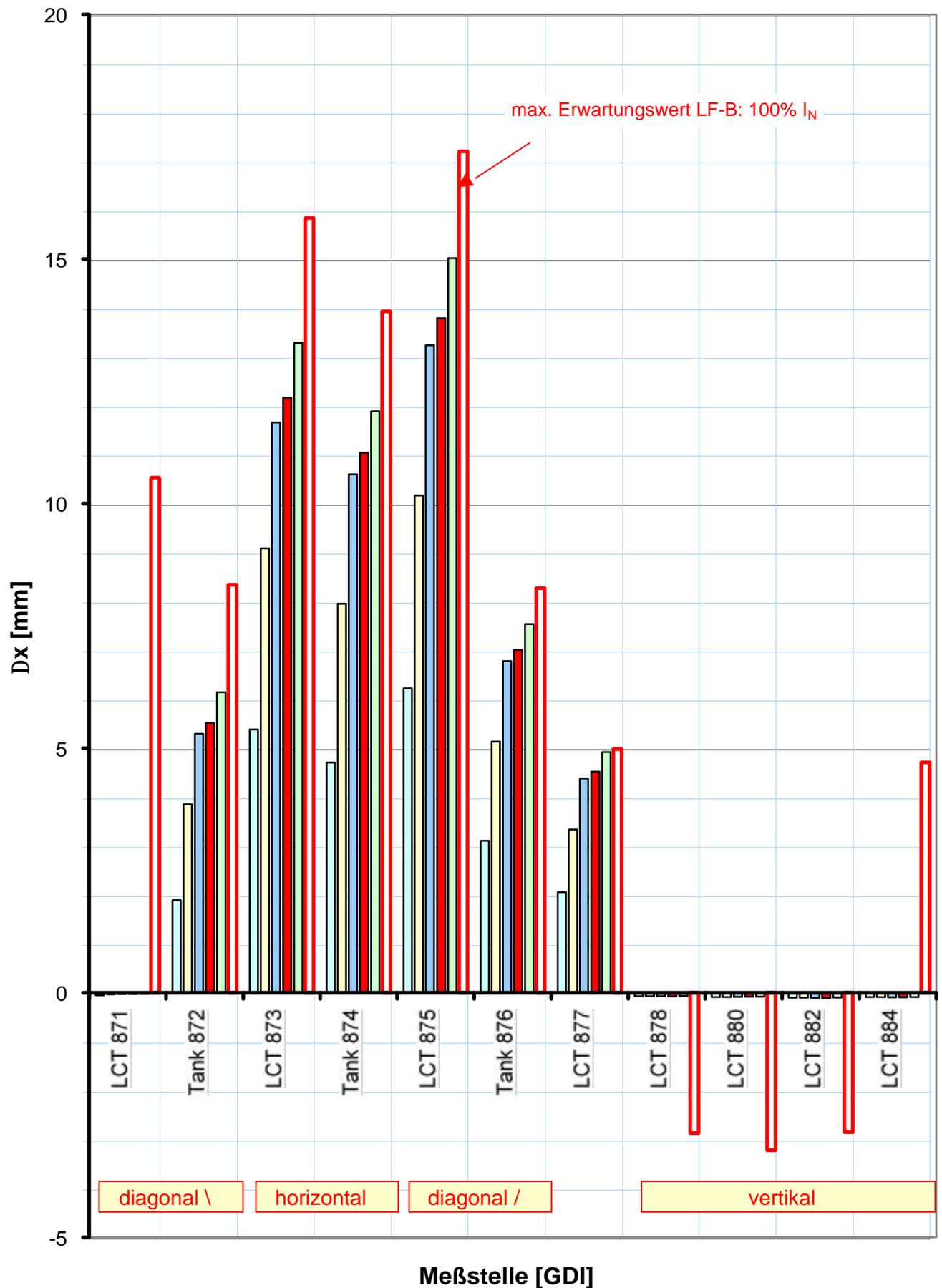


#111

Anlage: 4.3.2.4 a

Verformung W7-X Demospule

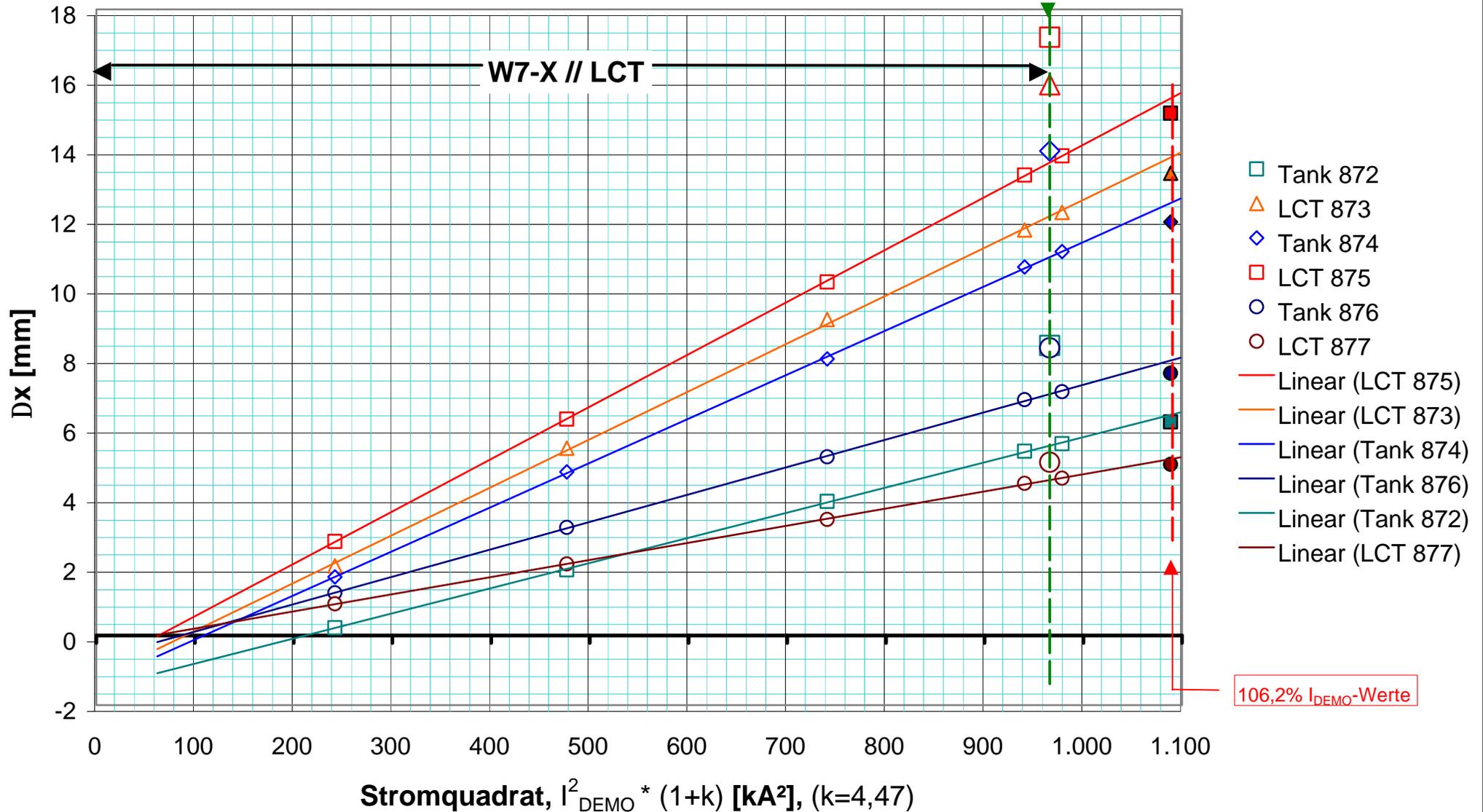
Auswertung Puls: 111 (Lastfall: B / C)



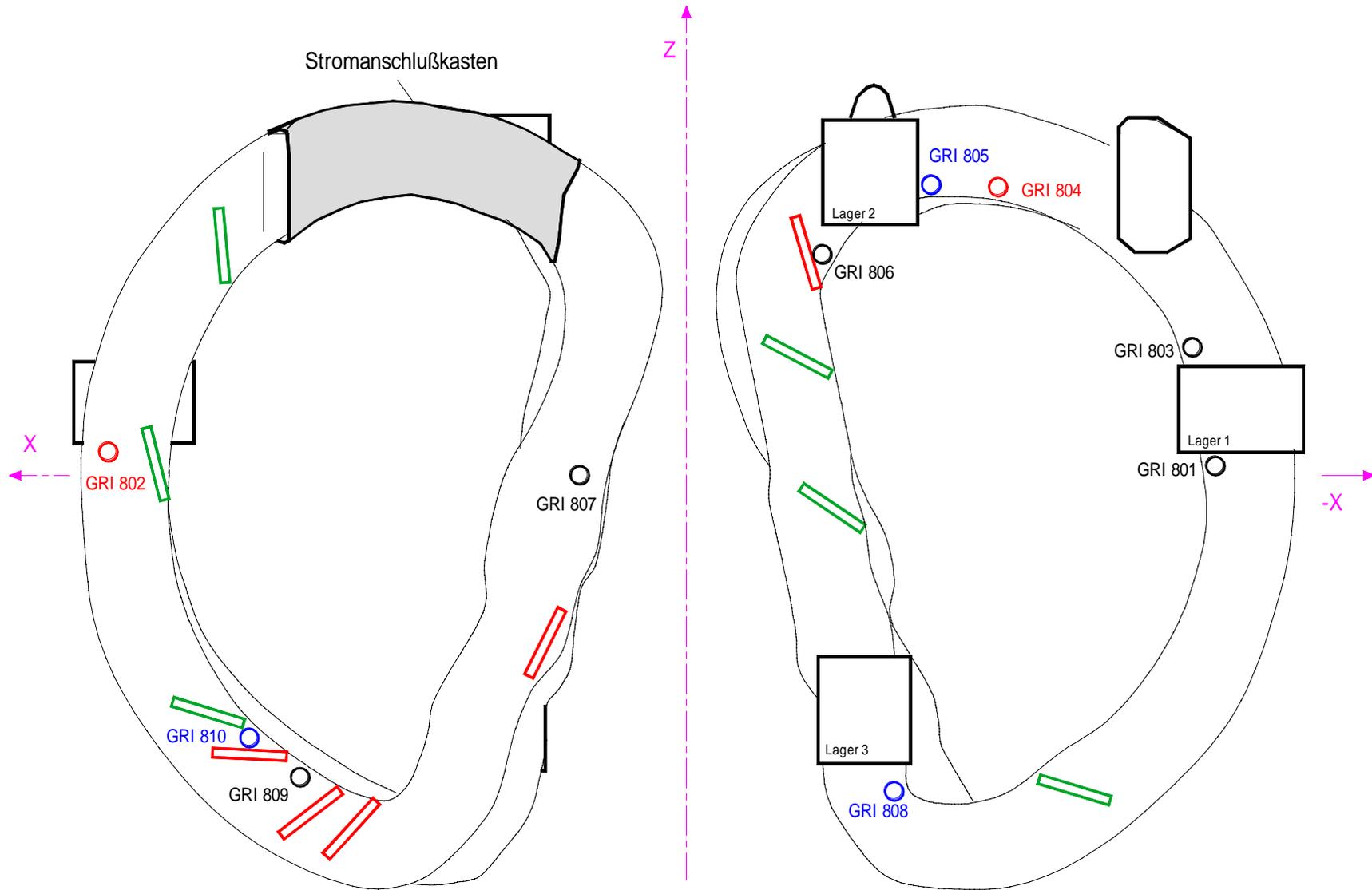
70,2% In 87,6% In 98,7% In 100,7% In 106,2% In 100,0% Erw.

Verformung W7-X Demospule

Auswertung Puls: 111 (Lastfall: B / C)



Darstellung der DMS - Meßpunkte an der W7-X Demospule

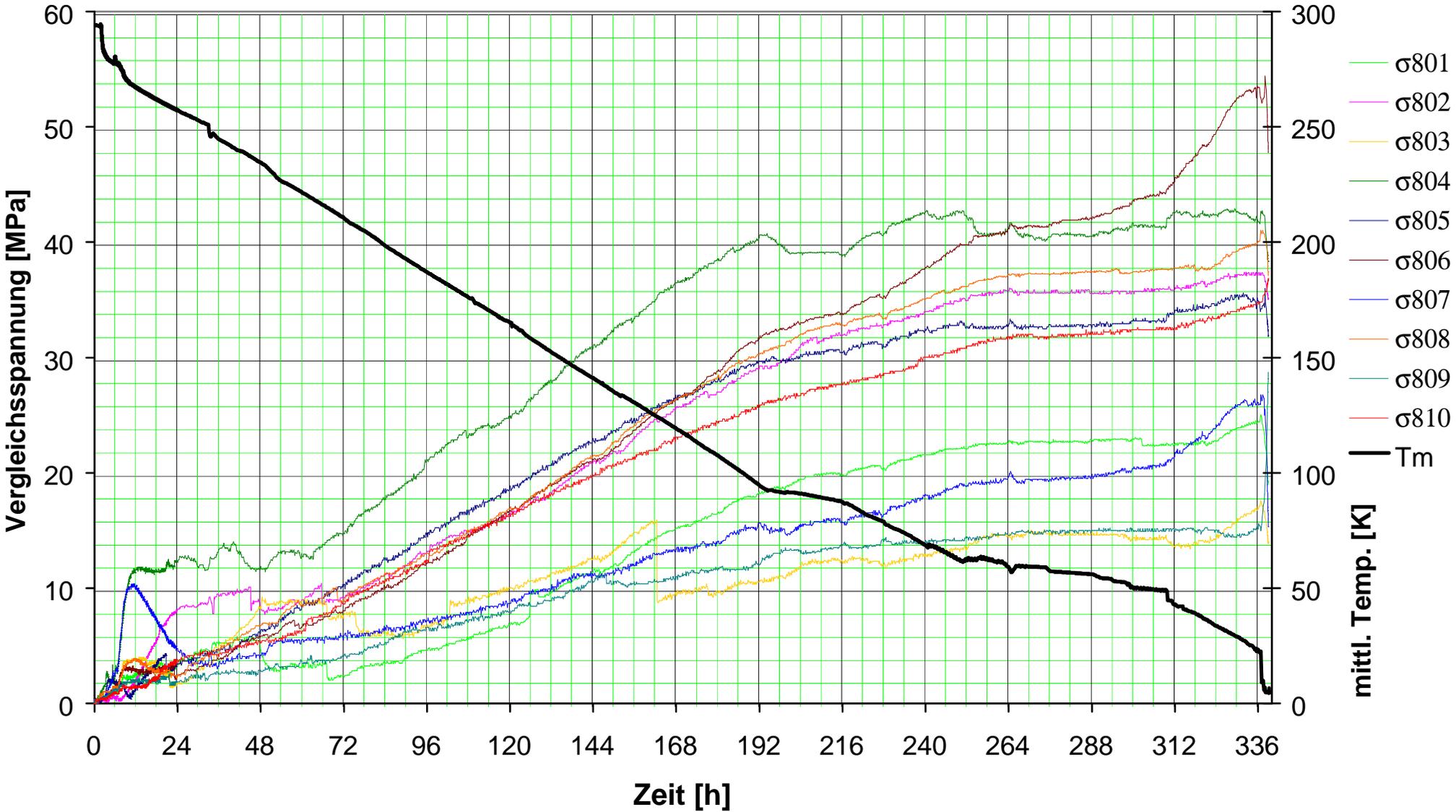


Tank-Seite

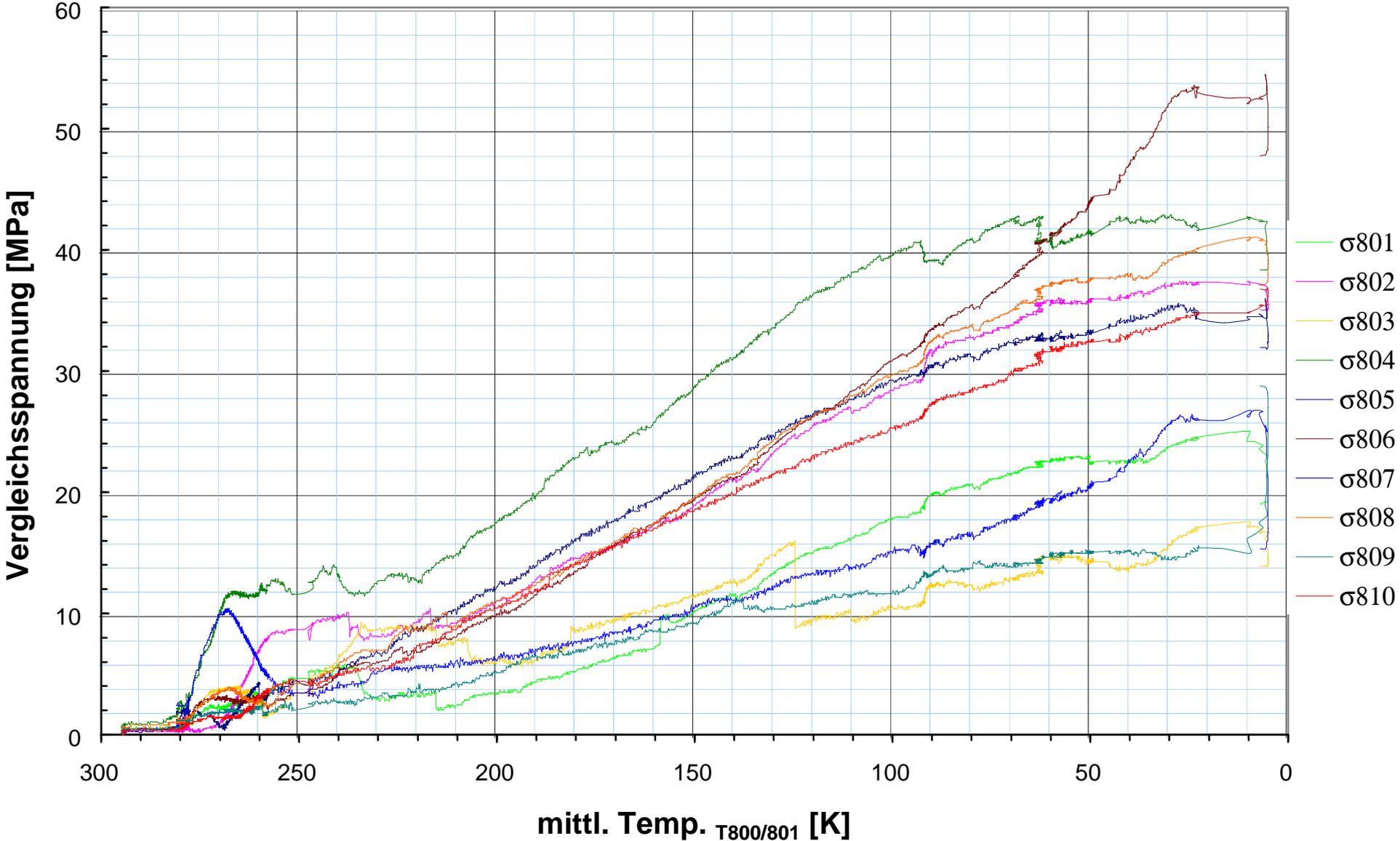
LCT-Seite

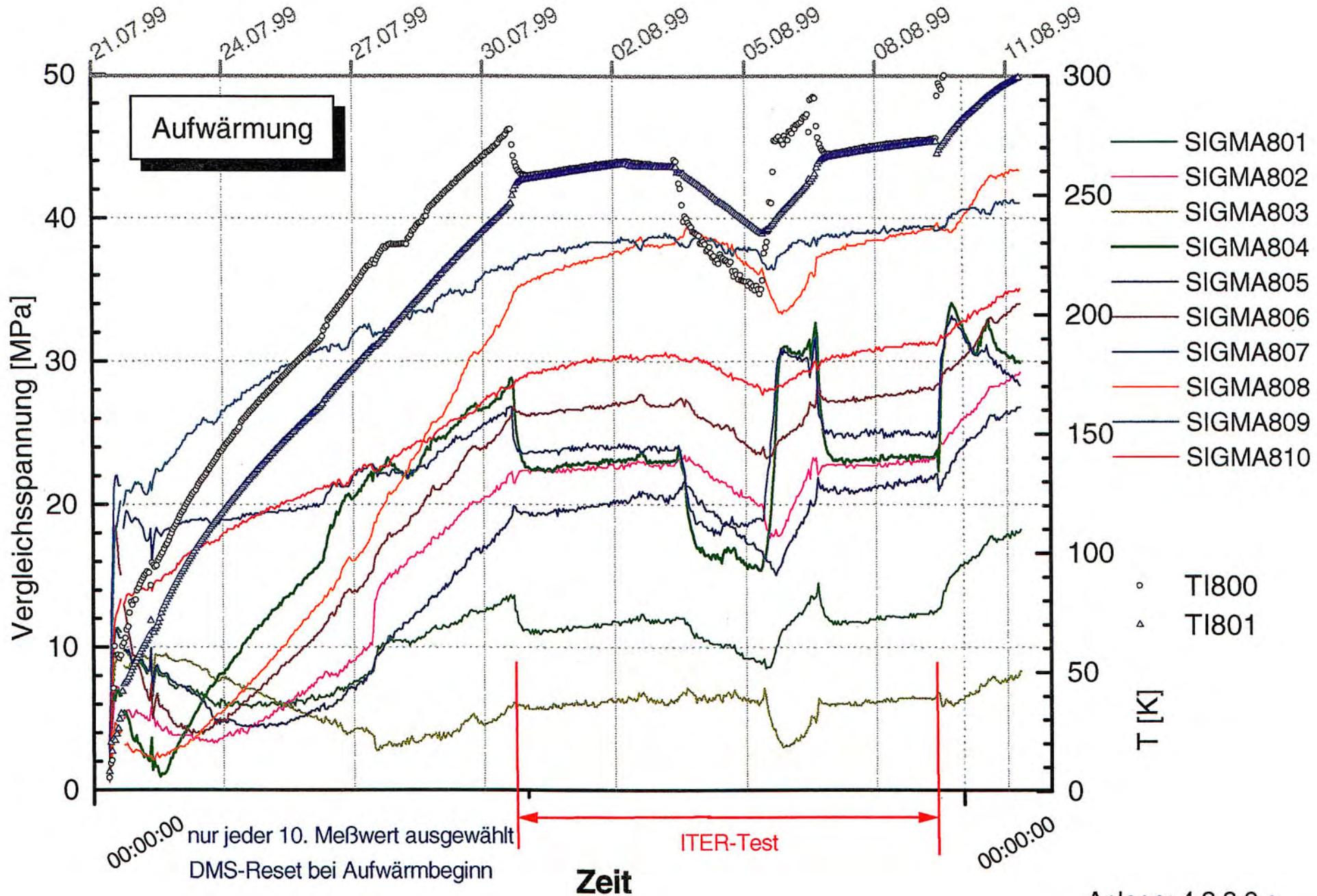
blau: Meßwert < Rechenwert (Abweichung >30%)
 rot: Meßwert > Rechenwert (Abweichung > 30%)
 schwarz: Meß- und Rechenwert innerhalb 30%- Marge

Abkühlung

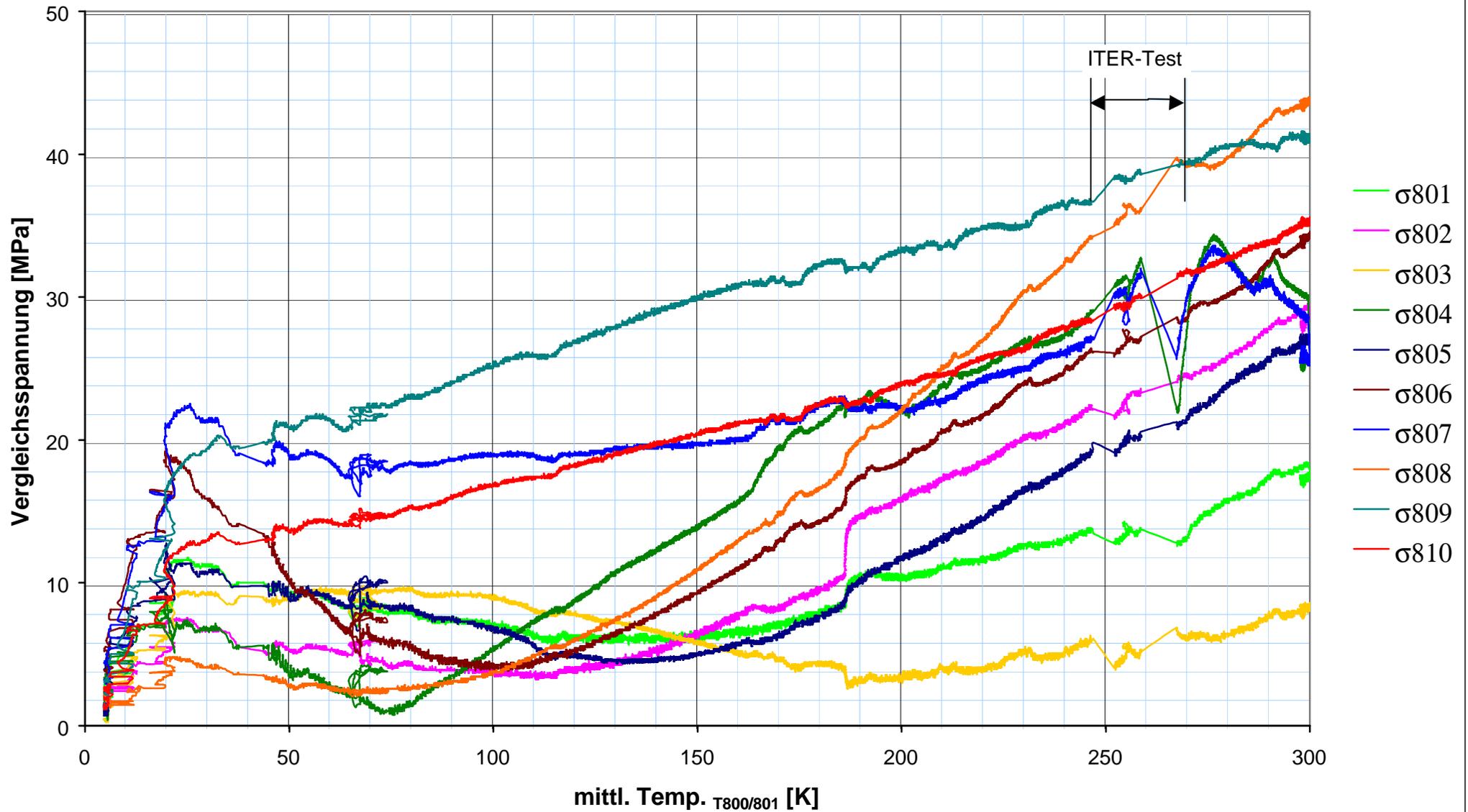


Abkühlung



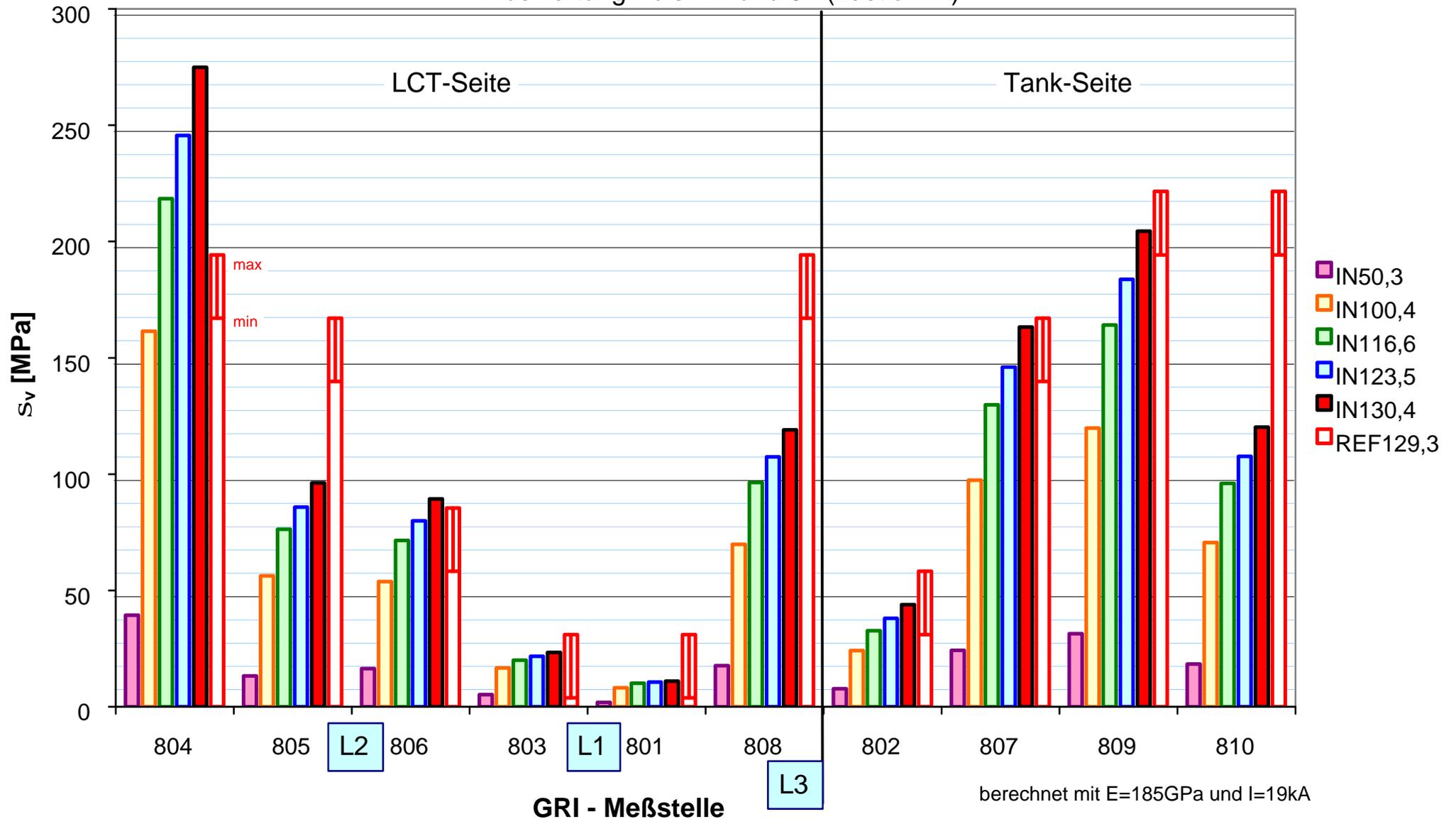


Aufwärmung



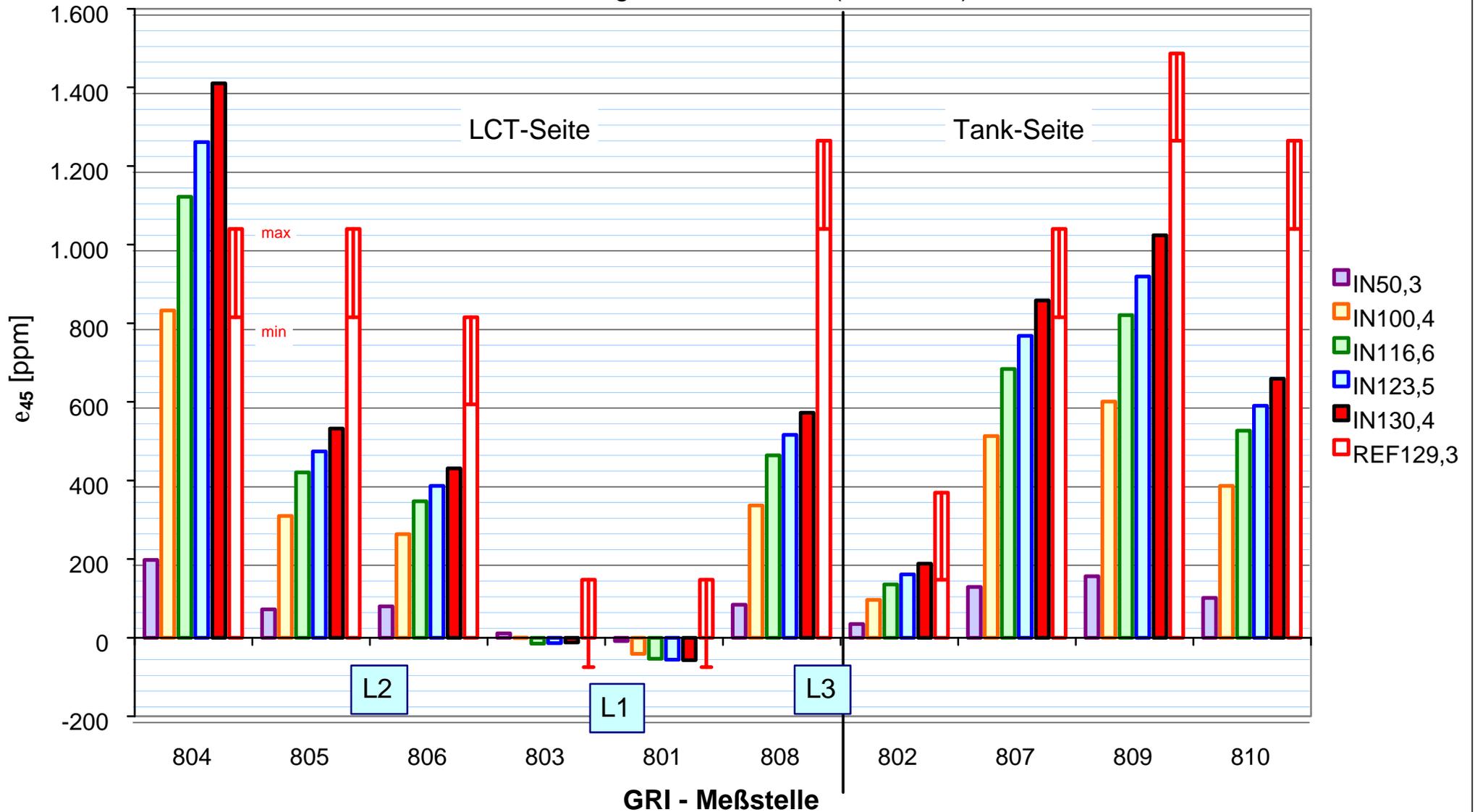
v. Mises Vergleichsspannung

Auswertung Puls: 44 und 97 (Lastfall: A)



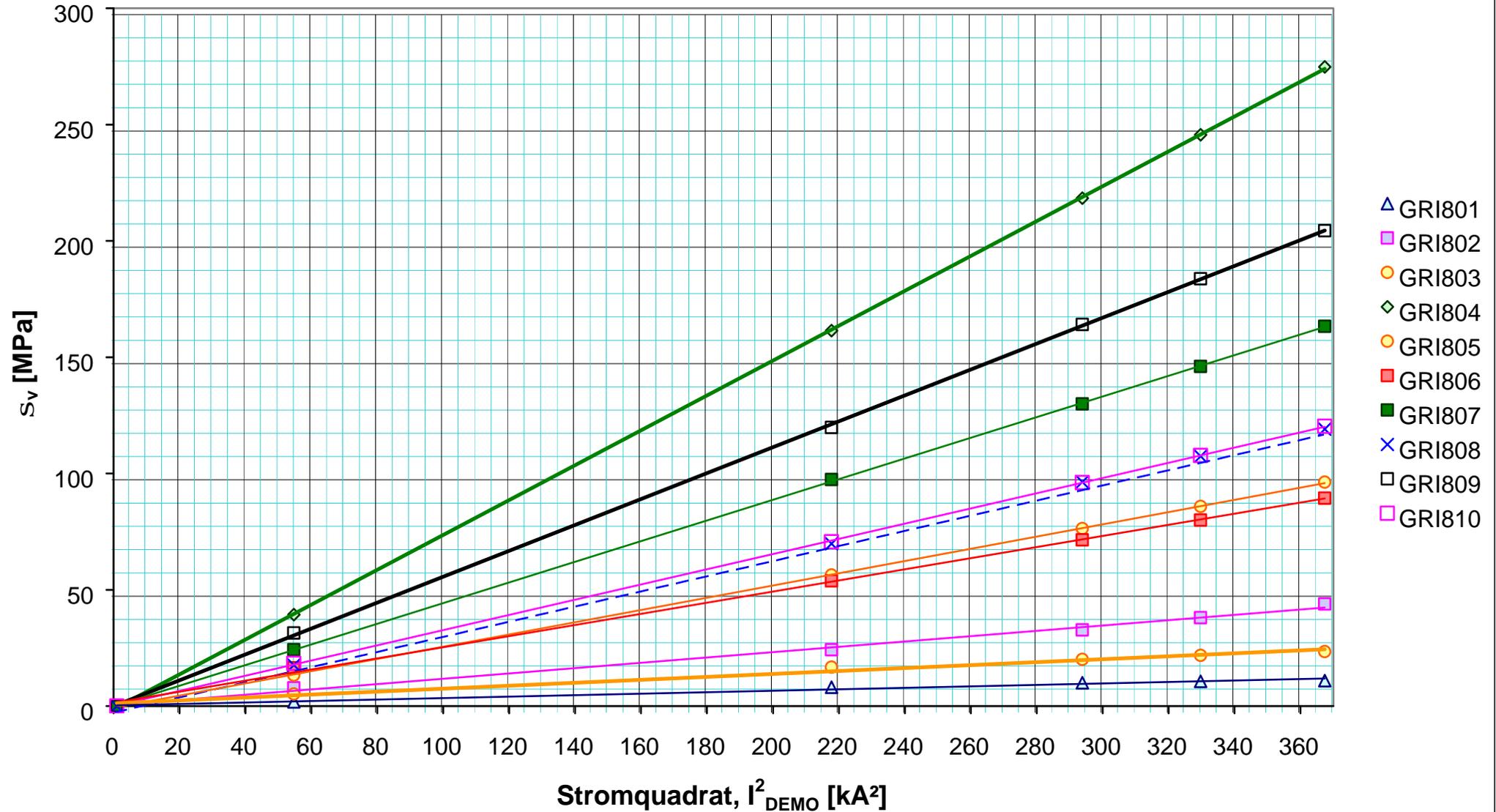
gemessene Dehnungen in Umfangsrichtung

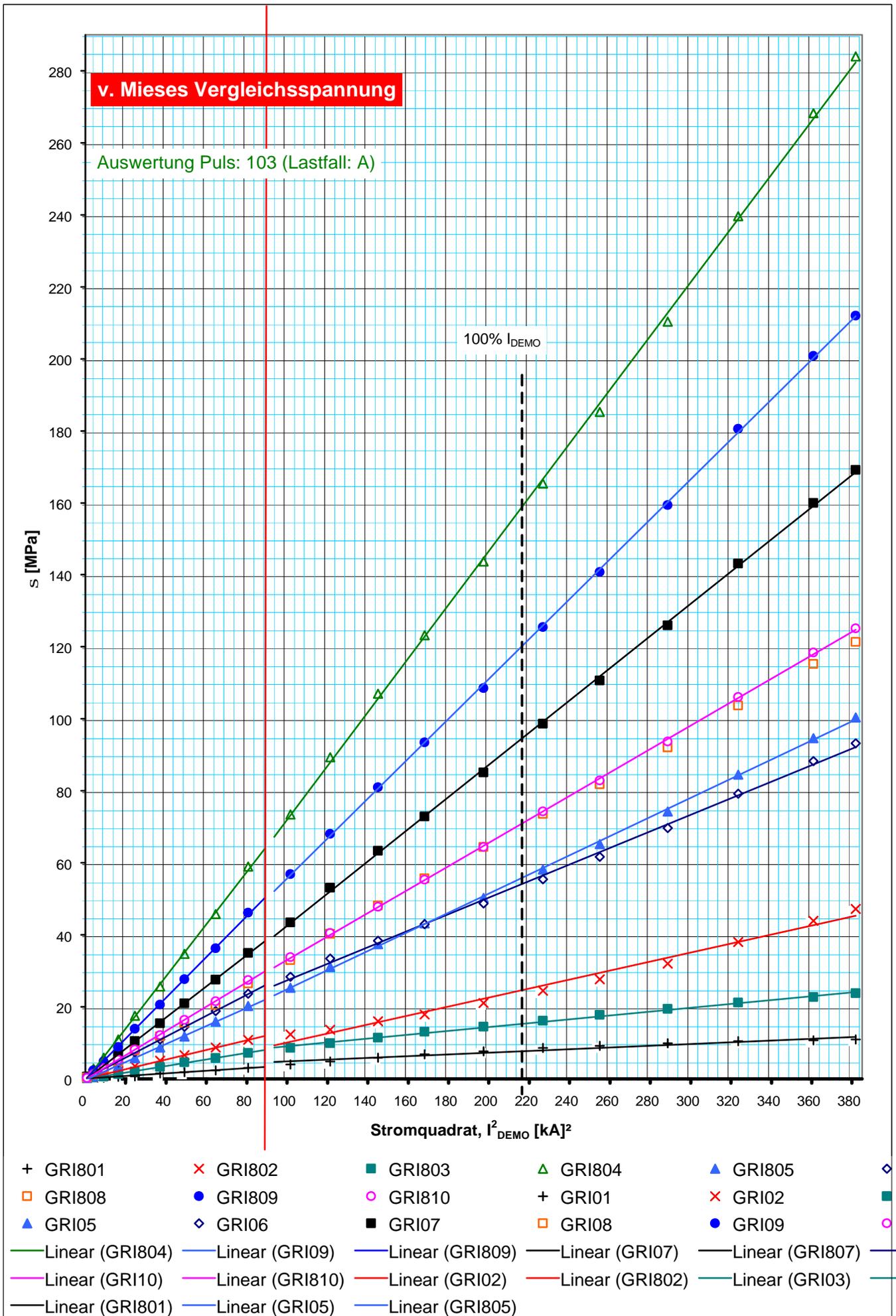
Auswertung Puls: 44 und 97 (Lastfall: A)

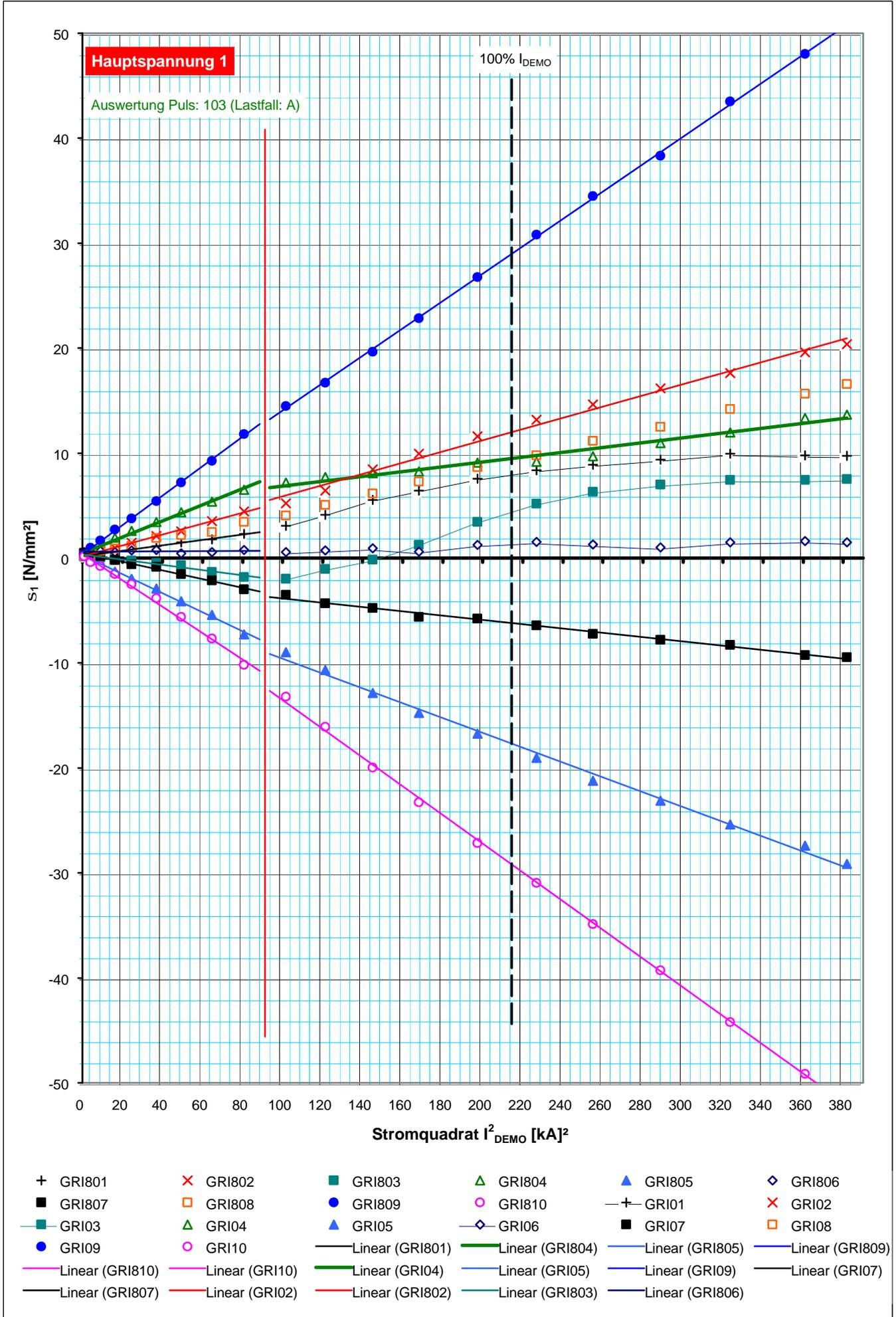


v. Mises Vergleichsspannung

Auswertung Puls: 44 und 97 (Lastfall: A)

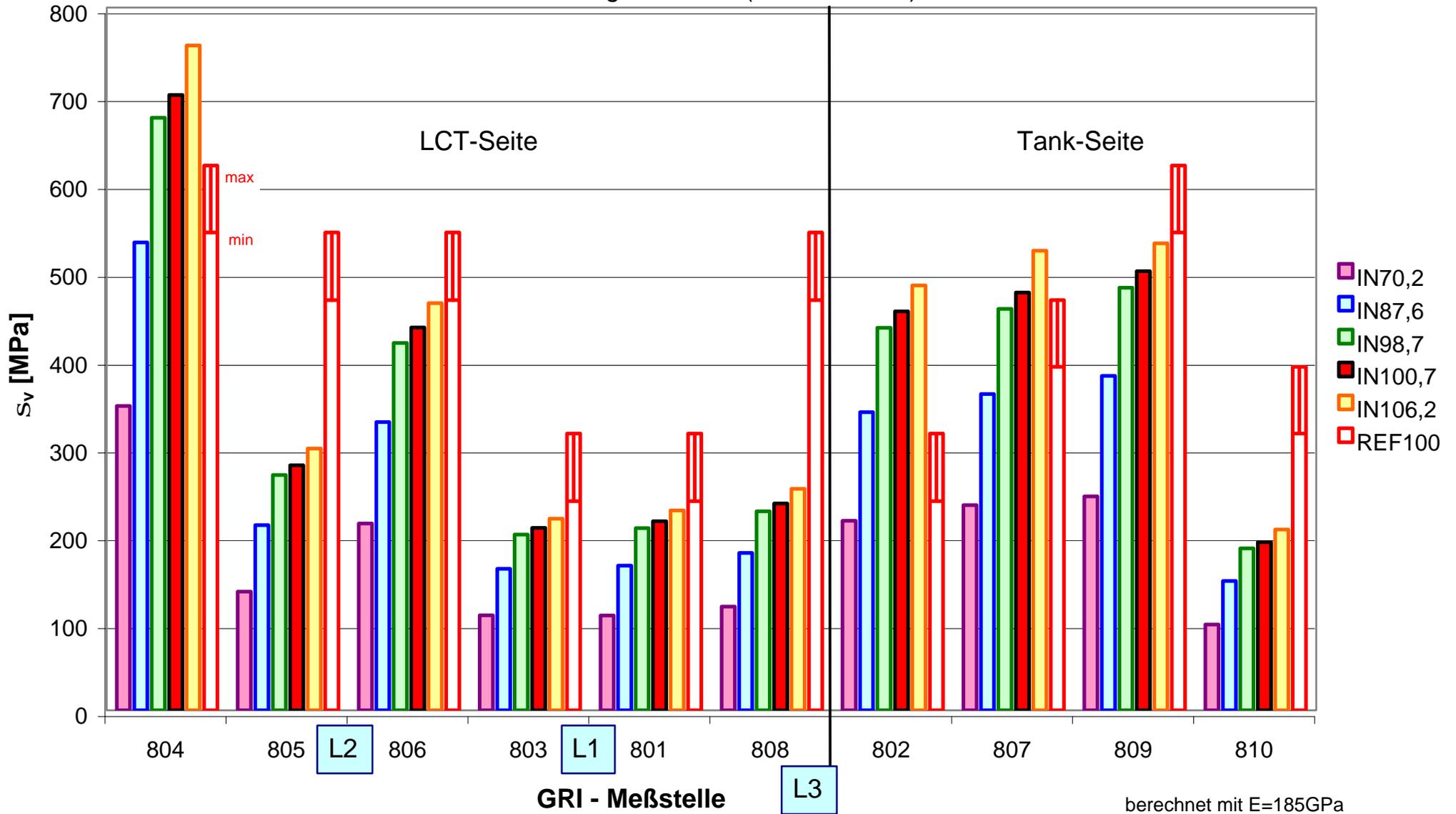






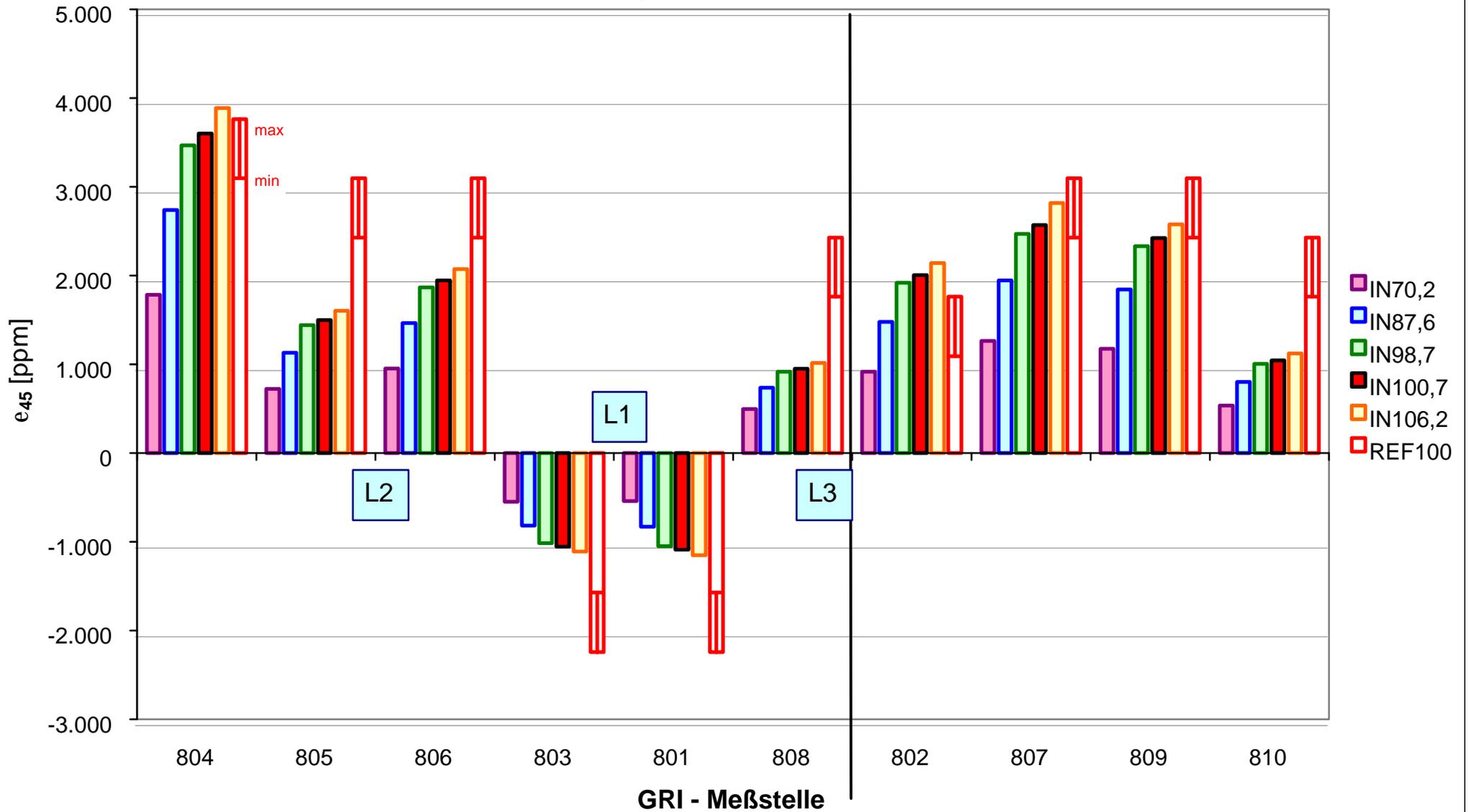
v. Mises Vergleichsspannung

Auswertung Puls: 111 (Lastfall: B / C)



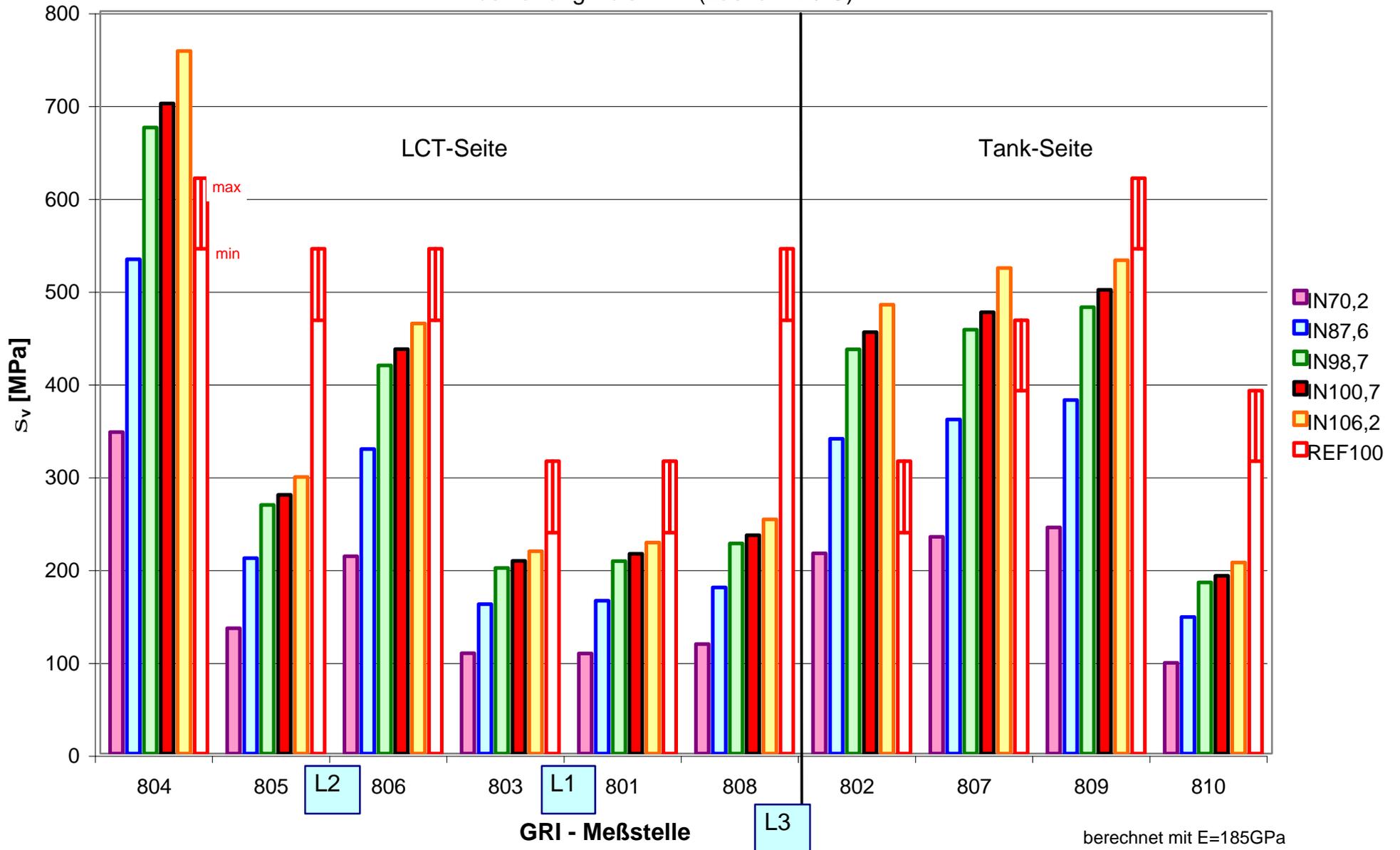
gemessene Dehnungen in Umfangsrichtung

Auswertung Puls: 111 (Lastfall: B / C)



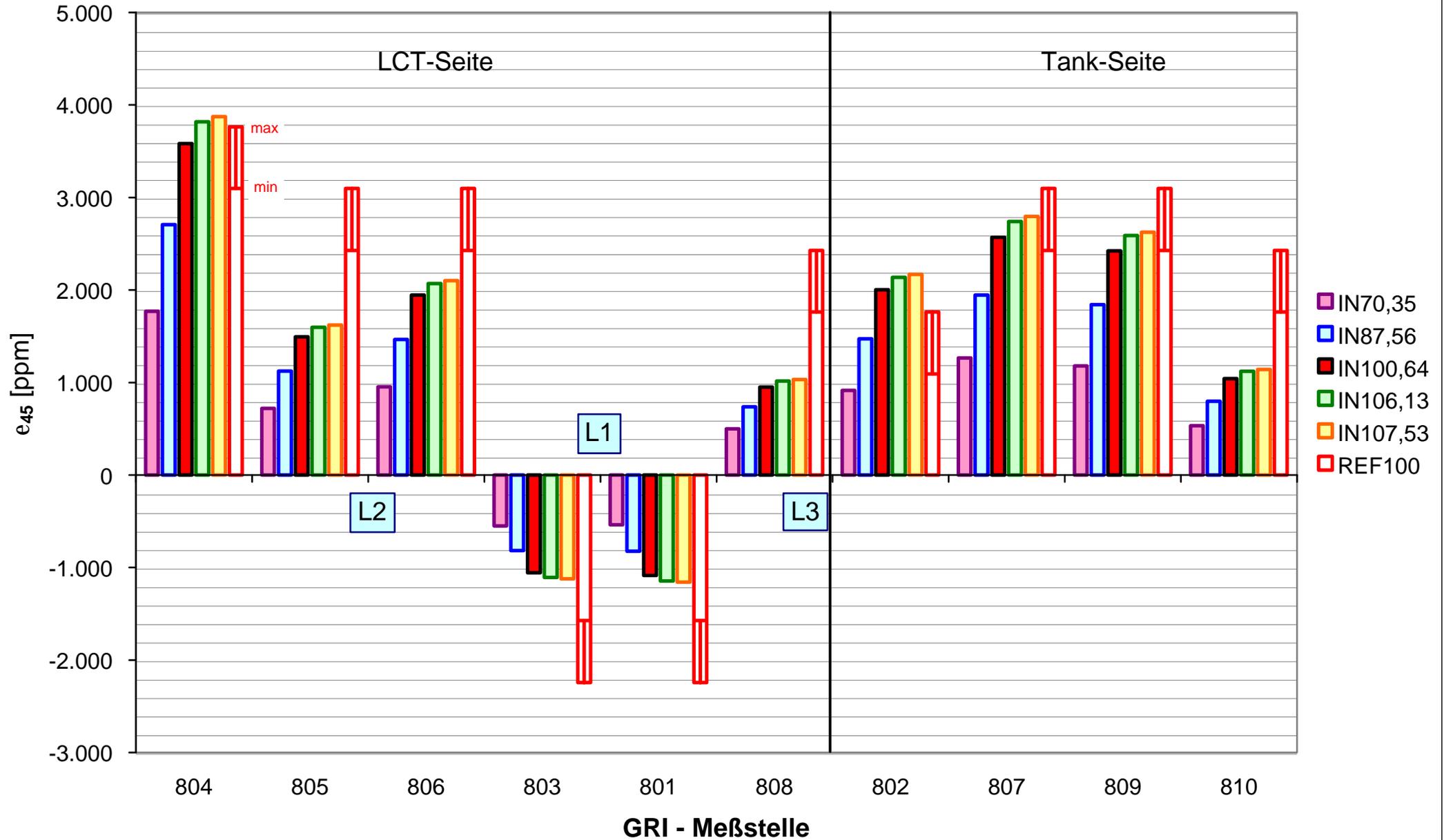
v. Mises Vergleichsspannung

Auswertung Puls: 111 (Lastfall: B / C)



gemessene Dehnungen in Umfangsrichtung

Auswertung Puls: 116 (Lastfall: B / C)

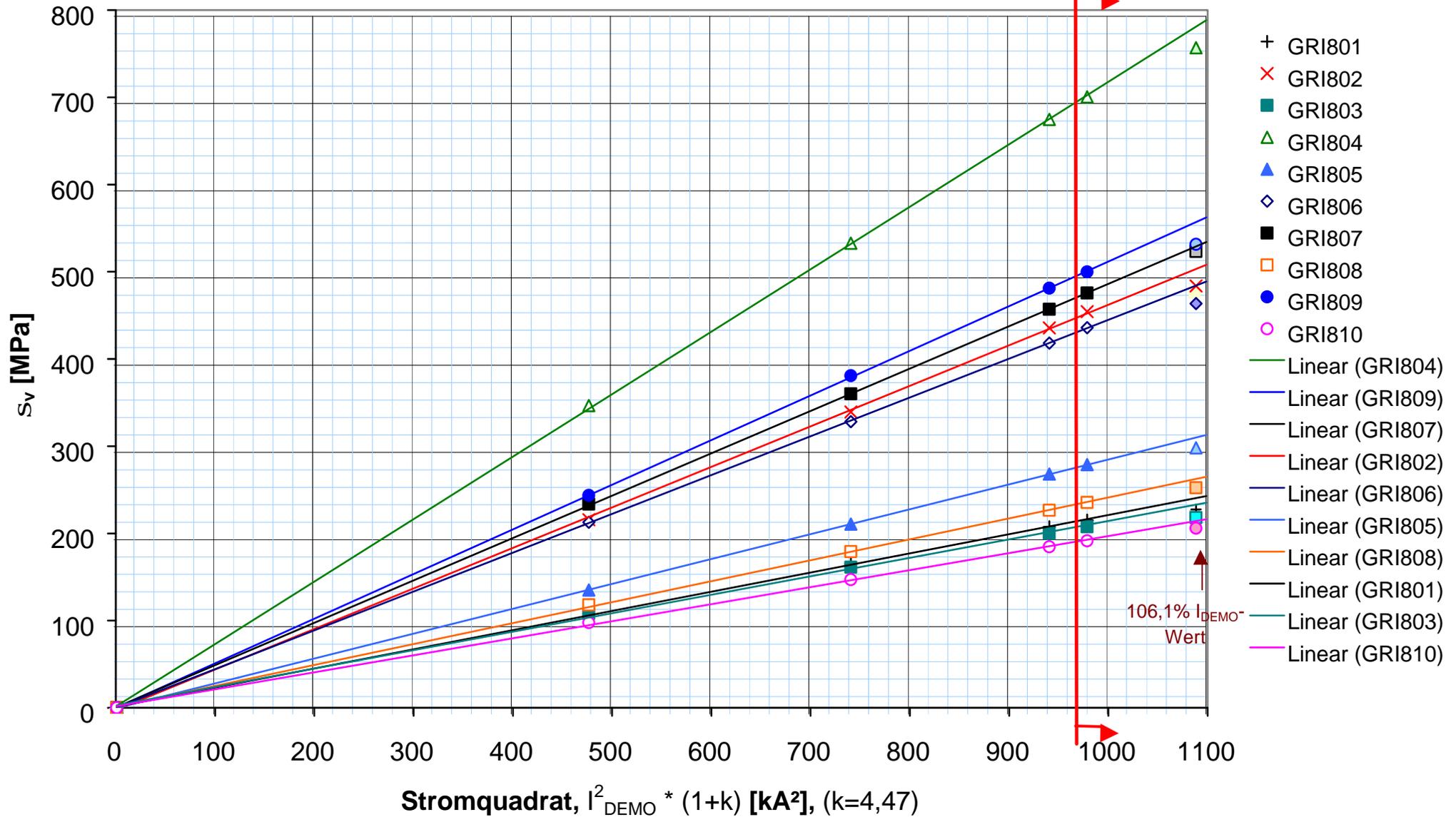


v. Mises Vergleichsspannung

Auswertung Puls: 111 (Lastfall: B / C)

Lastfall: B

Lastfall: C



v. Mises Vergleichsspannung

Auswertung Puls: 116 (Lastfall: B / C)

Lastfall: B

Lastfall: C

