



Forschungszentrum Karlsruhe
in der Helmholtz-Gemeinschaft

Wissenschaftliche Berichte
FZKA 7076

Optimierung eines Quenchdetektionssystems für supraleitende Magnetspulen

M. Borlein

**Institut für Technische Physik
Programm Kernfusion**

Dezember 2004

Forschungszentrum Karlsruhe

in der Helmholtz-Gemeinschaft

Wissenschaftliche Berichte

FZKA 7076

Optimierung eines Quenchdetektionssystems
für supraleitende Magnetspulen

Markus Borlein

Institut für Technische Physik

Programm Kernfusion

Diplomarbeit

im Fachbereich Elektrotechnik

der Fachhochschule Würzburg-Schweinfurt

Impressum der Print-Ausgabe:

**Als Manuskript gedruckt
Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor**

**Forschungszentrum Karlsruhe GmbH
Postfach 3640, 76021 Karlsruhe**

**Mitglied der Hermann von Helmholtz-Gemeinschaft
Deutscher Forschungszentren (HGF)**

ISSN 0947-8620

urn:nbn:de:0005-070767

Kurzfassung

Gegenstand dieses Berichts ist die Quenchdetektion bei supraleitenden Magnetspulen. Supraleitende Magnete bedürfen zum sicheren Betrieb aufgrund ihres hohen Stroms und der dadurch gespeicherten Energie einer Menge technischer Vorkehrungen. Eines der wichtigsten Schutzsysteme ist das Quenchdetektionssystem, das den Magneten auf den Erhalt der Supraleitung hin überwacht und bei Bedarf dessen Sicherheitsentladung auslöst. Kommt es zu einem Zusammenbruch der Supraleitung (Quench), muss der Magnet möglichst schnell entladen werden, damit keine Gefahr für den Magneten oder gar seine Umgebung auftritt.

Zunächst soll dem weniger fachkundigen Leser ein einleitender Überblick über die Thematik gegeben werden. Anschließend werden verschiedene Methoden zur Quenchdetektion, zum Teil anhand ausgeführter Beispiele aus der Praxis, vorgestellt, sowie deren Eignung in den unterschiedlichen Betriebsweisen supraleitender Magnete aufgezeigt. Die einzelnen Quench-Detektions-Varianten werden zusammenfassend miteinander verglichen, wobei für die Bewertung unter anderem die im Anhang beschriebenen Versuchsreihen herangezogen werden. Als Anwendungsbeispiel wird ein Vorschlag für das Quenchdetektionssystem der in Bau befindlichen Anlage Wendelstein 7-X erarbeitet.

Optimization of a quench detection system for superconducting magnets

Abstract

Subject of this report is the detection of a quench in a superconducting magnet. For the safe operation of superconducting magnets one of the most important issues is the quench detection system which controls the superconducting state of the magnet and triggers a safety discharge if necessary. If it comes to a breakdown of the superconductivity (quench), the magnet has to be discharged very quickly to avoid any damage or danger for the magnet or its environment.

First an introducing overview is given. Next different methods of quench detection will be presented, partially on the basis of existing quench detection systems and the applicability of these methods in different states of the magnet operation will be shown. The different quench detection methods are compared and evaluated partially by using test experiments described in the appendix. As an application example this report contains a proposal for the quench detection system for the Wendelstein 7-X facility, actually built by the Institute for Plasma Physics, Garching.

Inhaltsverzeichnis

KURZFASSUNG	3
ABSTRACT	4
INHALTSVERZEICHNIS.....	5
1. EINLEITUNG	7
1.1 Die Supraleitung und ihre Anwendungen.....	7
1.2 Der Betrieb supraleitender Magnetspulen.....	9
2. DIE QUENCHDETEKTION.....	12
2.1 Kompensation induktiver Spannungsanteile.....	14
2.1.1 Die Anwendung der Brückenschaltung	14
2.1.1.1 Das Projekt "Large Coil Task".....	14
2.1.1.1.1 Das Quenchdetektionssystem der EU-LCT-Spule.....	15
2.1.1.1.2 Das Quenchdetektionssystem von ORNL.....	17
2.1.1.2 Das Projekt „POLO“	20
2.1.2 Kompensation durch Erfassung der Stromänderung im Magnet.....	21
2.1.3 Quenchdetektion durch Filterung der Spannung am Magnet	22
2.2 Kompensation der Wirbelströme	23
2.3 Weitere Methoden zur Quenchdetektion	24
2.4 Wertung der vorgestellten Schaltungsprinzipien	25
2.5 Verwendung des Ausgangssignals der Quenchdetektoren	26
3. DIE OPTIMIERUNG EINES QUENCHDETEKTIONSSYSTEMS	28
Das Projekt Wendelstein 7-X.....	28
3.1 Das Spulensystem eines Stellarators.....	28
3.2 Der Aufbau der Spulen	30
3.3 Die Quenchdetektoren.....	30
3.3.1 Prinzipielle Überlegungen.....	30
3.3.2 Die Quenchdetektoren der Magnetspulen.....	31
3.3.3 Die Quenchdetektoren der Stromzuführungen	32
3.3.4 Parallele Messwerterfassung.....	32

ANHANG A	33
Tabelle der unterschiedlichen Schaltungsvarianten elektronischer Quenchdetektoren.....	33
ANHANG B	34
Tabelle der Restinduktivitäten ausgeführter Quenchdetektoren.....	34
ANHANG C	35
Wirbelströme im Strukturmaterial	35
ANHANG D	36
Messreihe zur Untersuchung von Brückenschaltungen für die Quenchdetektion.....	36
D.1 Aufbau einer Messbrücke	37
D.2 Betrachtung der Messbrücke bei supraleitenden Spulen	39
D.3 Messungen an einem supraleitenden Magneten.....	40
D.4 Zusammenfassung dieser Messreihe.....	40
ANHANG E	41
Messreihe zur Untersuchung von Kompensationsschaltungen für die Quenchdetektion.....	41
E.1 Kompensationsschaltung in Anlehnung an das LCT-Quenchdetektionssystem	42
E.2 Dimensionierung der Kompensationsschaltung	43
E.3 Abgleich der Schaltung	45
E.4 Untersuchung verschiedener Einflüsse auf die Kompensationsschaltung	47
E.4.1 Simulation eines Quench	47
E.4.2 Elektrisch leitendes Material in der Nähe des Magneten	48
E.4.3 Pulsen einer benachbarten Magnetspule.....	49
E.4.3.1 Verwendung der bekannten Kompensationsschaltung.....	49
E.4.3.2 Erweiterung der Kompensationsschaltung	51
E.4.3.3 Neue Anordnung der Magnete	58
E.5 Zusammenfassung dieser Messreihe	62
ANHANG F	63
Bilder von Supraleiter-Exponaten.....	63
F.1 Schnittbild der Kupfermatrix mit integriertem Supraleitermaterial	63
F.2 Leiter der EU-LCT-Spule	64
F.3 Leiter der POLO-Spule	64
LITERATURVERZEICHNIS	65

1. Einleitung

1.1 Die Supraleitung und ihre Anwendungen

Noch vor einhundert Jahren war das physikalische Verständnis der elektrischen Leitfähigkeit sehr lückenhaft. Man hatte zwar schon herausgefunden, dass der elektrische Widerstand bei den untersuchten Metallen mit sinkender Temperatur linear fällt, aber man konnte den Bereich sehr tiefer Temperaturen technisch noch nicht erzeugen und somit auch nicht erforschen. Erst als es Heike Kamerlingh Onnes (1853 – 1926) im Jahre 1908 gelang, Helium zu verflüssigen und so Temperaturen unterhalb 10 K zu erzeugen, wurde auch dieser Bereich der Forschung zugänglich. Bis dahin gab es unterschiedliche Theorien, wie sich der elektrische Widerstand bei sehr tiefen Temperaturen verhalten könnte. Zunächst waren den Wissenschaftlern zum Experimentieren aber keine Materialproben in ausreichender Reinheit zugänglich, sodass eine starke Abhängigkeit des Widerstandsverlaufes vom Reinheitsgrad festgestellt wurde. Onnes postulierte damals, dass der Widerstand von reinen Materialproben mit sinkender Temperatur gegen Null streben sollte. Diese Hypothese wurde durch eine zur etwa selben Zeit von Einstein entwickelten Theorie der Schwingungen von Festkörperatomen gestützt. Onnes war der Ansicht, dass der elektrische Widerstand von Schwingungen der Atomrümpfe im Material herrührt. Da diese Schwingungen, so Einstein, mit sehr tiefen Temperaturen exponentiell abnehmen, müsste das, laut Onnes, auch für den elektrischen Widerstand gelten. Bald schon fand er bei der Untersuchung einer sehr reinen Quecksilberprobe aber Abweichungen von dieser Theorie. Er stellte fest, dass sich die Abnahme des elektrischen Widerstandes nicht so stetig vollzieht, wie durch die Schwingungstheorie der Atome zu erwarten wäre. Sie verläuft viel mehr wie ein Sprung – der Widerstand fällt bei einer materialspezifischen Temperatur innerhalb eines Intervalls von einigen hundertstel Grad um sehr viele Größenordnungen. Onnes selbst sagte dazu [1]: "At this point (etwas unterhalb von 4,2 K) within some hundredths of a degree came a sudden fall not foreseen by the vibrator theory of resistance, that had framed, bringing the resistance at once less than a millionth of its original value at the melting point... Mercury has passed into a new state, which on account of its extraordinary electrical properties may be called the superconductive state." Somit war auch der Name für dieses physikalische Phänomen „Supraleitung“ geboren. Für seine Arbeiten auf diesem Gebiet erhielt Onnes 1913 den Nobelpreis für Physik.

Um eine Vorstellung von der Entwicklung des elektrischen Widerstandes im Bereich der Sprungtemperatur zu erhalten, muss man sich vergegenwärtigen, dass der Widerstand eines Materials im supraleitenden Zustand tatsächlich verschwindet. Diese Tatsache lässt sich experimentell natürlich nur im Rahmen der erreichten Messungenauigkeit nachweisen, aber es ist bewiesen, dass der Widerstand um mindestens 17 Zehnerpotenzen geringer ist als der von Kupfer, einem unserer gängigsten Leitermaterialien. Diese Widerstandsdifferenz ist weitaus größer, als die zwischen Kupfer und einem guten elektrischen Isolator.

Viele Jahre lang konnte die Supraleitung nicht physikalisch erklärt werden. Erst 1957 entwickelten Cooper, Bardeen und Schrieffer eine atomistische Theorie der Supraleitung, die zum Verständnis des Phänomens beitragen konnte [2] – dafür erhielten sie 1972 den Nobelpreis für Physik. Die Theorie besagt, dass sich jeweils zwei Elektronen mit entgegengesetztem Spin zusammenschließen und so ein gemeinsames Teilchen in einem neuen Quantenzustand, das so genannte Cooper-Paar, bilden. Ein Cooper-Paar besitzt, atomistisch gesehen, recht große Ausmaße – bis zum hundertfachen des Abstandes zweier Atome im Supraleiter – und kann sich ohne messbaren elektrischen Widerstand im Material bewegen. Ein einmal angeworfener elektrischer Kreisstrom im supraleitenden Material bleibt unendlich lange erhalten. Das endgültige Verständnis der Paarbildungs-Wechselwirkungen bleibt allerdings bis heute noch aus.

Man hat schon viele Materialien und Legierungen auf ihre Eigenschaft der Supraleitung hin untersucht. Die meisten besitzen Sprungtemperaturen (T_c) von wenigen Kelvin. Um die Supraleitung technisch

anzuwenden, ist daher ein großer kryogener Aufwand, verbunden mit hohen Leistungen der Kälteanlagen, nötig, damit die erforderlichen tiefen Temperaturen erzeugt werden können. Jedoch sind seit einiger Zeit auch Materialien bekannt, die Sprungtemperaturen von bis zu 135K aufweisen – so genannte Hochtemperatur-Supraleiter. Deren Verwendung ist aufgrund der noch nicht ausgereiften Verarbeitungstechnik noch ziemlich eingeschränkt, nimmt aber immer mehr zu, da sie in Bereichen möglich ist, in denen man mit flüssigem Stickstoff und somit wesentlich weniger Aufwand und besserem Wirkungsgrad kühlen kann. Die gängigsten, da heute am besten technisch zu verarbeitenden, Supraleitermaterialien sind die klassischen Supraleiter NbTi (T_c ca. 9K) und Nb₃Sn ($T_c = 18K$). Darstellungen zu ausgeführten Supraleitern, sowie eine kurze Erklärung zu ihrer Fertigung finden sich im Anhang F.

Um die Anwendung der Supraleitung in der Kernfusion aufzuzeigen, betrachten wir nun die grundlegenden Prinzipien dieser Technologie. Der Prozess der Kernfusion findet im Inneren der Sonne schon seit mehreren Milliarden Jahren statt. Damit zwei Atomkerne miteinander fusionieren, müssen sie sich extrem nahe kommen, um die so genannte Coulombbarriere, die auf der elektrischen Abstoßung der gleich polarisierten Atomkerne beruht, zu überwinden bzw. zu durchtunneln. Dies gelingt, da im Innern der Sonne sehr hohe Drücke und Temperaturen herrschen. Solche extremen Bedingungen sind hier auf der Erde jedoch technisch nicht beherrschbar. Um Temperaturen von einigen zehn Millionen Grad zu kontrollieren, muss man eine geeignete thermische Isolation erreichen. Dies ist nur unter einem sehr guten Vakuum möglich, da kein Material einem Kontakt mit dem heißen Plasma standhalten würde. Um die Kernfusion trotz eines im Vergleich zur Sonne sehr niedrigen Drucks in Gang zu bringen, müssen noch höhere Temperaturen – ca. 100 Millionen Grad Celsius – erzielt werden. In den meisten der geplanten Reaktortypen eines künftigen Fusionskraftwerks bedarf das bei diesen Temperaturen vorhandene Plasma eines magnetischen Einschlusses, der es weitgehend in der Mitte des Vakuumgefäßes hält. Um die benötigten magnetischen Feldstärken zum Einschluss des Plasmas zu erzeugen sind sehr große Magnetspulen erforderlich, die von Strömen im Bereich von 10kA – 80kA erregt werden. Damit die dadurch auftretenden Verluste in Grenzen bleiben und nicht einen großen Teil der Kraftwerksleistung aufzehren, ist man auf die Anwendung supraleitender Magnetspulen angewiesen.

Weitere Anwendungen der Supraleitung finden sich auch in anderen Gebieten der Technik, wo große Magnetspulen benötigt werden, die sich nur supraleitend wirtschaftlich ausführen lassen – Magnete in der Medizintechnik, zum Beispiel für Kernspintomographen, oder in der Energietechnik für magnetische Energiespeicher. Auch in der Hochenergiephysik setzt man z.B. bei Teilchenbeschleunigern supraleitende Magnete ein. Im Elektromaschinenbau wird seit der technischen Anwendung der Supraleiter auch deren Verwendung als Wicklung für elektrische Maschinen, erst mit Tieftemperatur- und jetzt mit Hochtemperatursupraleitern erforscht. Eine weitere Anwendung der Supraleitung ist z.B. die Verwendung in der Messtechnik in Form so genannter SQUIDs (Superconducting QUantum Interference Device) zur Messung extrem kleiner Magnetfelder.

1.2 Der Betrieb supraleitender Magnetspulen

Wie oben bereits erläutert, muss, um einen Leiter geeigneten Materials in den supraleitenden Zustand zu versetzen, eine gewisse Temperatur unterschritten werden. Ein solcher Leiter besitzt keinen elektrischen Widerstand, was es ermöglicht, ihn mit einem sehr großen Strom ohne ohmsche Verluste zu beaufschlagen. Dabei gilt es aber zu beachten, dass die Temperatur nicht das einzige Kriterium für den Erhalt der Supraleitung ist. Wird in dem Leiter eine materialspezifische, kritische Stromdichte überschritten, oder ist das Magnetfeld, in dem sich der Leiter befindet, zu groß, bricht die Supraleitung ebenfalls zusammen und der Leiter wird, zunächst an einer Stelle, resistiv. Dies führt dazu, dass sich diese Stelle, aufgrund der ohmschen Verlustleistung, erwärmt und rasch ausbreitet. Diesen Zusammenbruch der Supraleitung nennt man Quench.

Die Abhängigkeit des Zustandes der Supraleitung von den genannten Parametern gibt Bild 1 wieder. Unterhalb der im Bild rechts dargestellten Fläche ist das Material – hier NbTi – supraleitend.

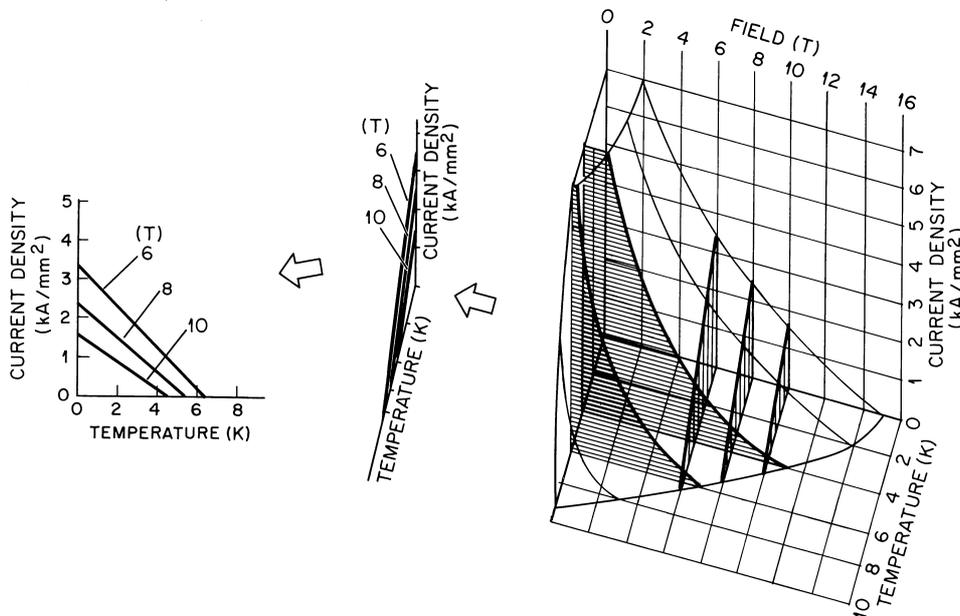


Bild 1: Abhängigkeit der Supraleitung als Funktion der Temperatur, des Magnetfelds und der Stromdichte am Beispiel NbTi [3]

Weiterhin können auch Wirbelströme im Leiter, sowie Leiterbewegungen und damit verbundene Reibungsverluste, verursacht durch Magnetfeldänderungen zu einer lokalen Erwärmung und somit zum Quench führen. Einen Quench gilt es möglichst rasch und sicher zu erkennen und eine Schnellentladung des Magneten einzuleiten, da sonst eine Zerstörung des Supraleiters oder sogar eine Gefahr für seine Umgebung besteht.

Der Betrieb supraleitender Magnetspulen benötigt daher zahlreiche technische Vorkehrungen, um die Spulen, trotz großer Betriebsströme und folglich beachtlicher gespeicherter Energiemengen, sicher zu betreiben. Bild 2 gibt den schematischen Aufbau wieder, wie er zum Betrieb eines supraleitenden Magneten häufig verwendet wird.

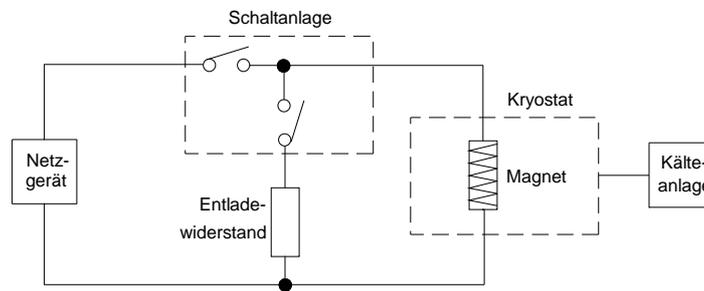


Bild 2: Schematischer Aufbau der Betriebsanlagen eines supraleitenden Magneten

Die in der Spule oder einem Spulenverbund gespeicherte Energie – teilweise einige 100MJ – wird bei Anforderung einer Schnellentladung über einen Entladewiderstand mit exponentiell fallendem Strom ausgekoppelt. Für die Dimensionierung des Entladekreises (Bild 2) sind Parameter, wie die maximal zulässige Temperatur im Supraleiter und die maximal erlaubte Spannung über dem Magneten bestimmend. Da der Strom einer Magnetspule eine Zustandsgröße darstellt und der spezifische Widerstand des Supraleiters bei einem Quench verhältnismäßig hohe Werte annimmt – z.B. beträgt für NbTi bei einer Temperatur von 10K der spezifische Widerstand $600\text{n}\Omega\text{m}$ – muss dafür gesorgt werden, dass der Strom aus dem Supraleiter kurzzeitig in ein dafür vorgesehenes, den Supraleiter umgebendes Matrixmaterial, meist Kupfer, kommutieren kann, sodass der Supraleiter nicht überlastet wird – ein Schnittbild eines solchen Leiters ist im Anhang F.1 dargestellt. Der spezifische Widerstand des Kupfers beträgt bei 10K $0,3\text{n}\Omega\text{m}$. Der Widerstand der Kupfermatrix wird allerdings durch entsprechende resistive Barrieren aus Legierungen, z.B. CuNi, gezielt unterteilt, um die Wirbelstromverluste bei Magnetfeldänderungen in Grenzen zu halten – siehe dazu auch Anhang C.

Ein Quench breitet sich mit Geschwindigkeiten bis zu einigen 10m/s im Supraleiter aus. Bei hinreichend großem Wärmeeintrag kann es auch zu einer Ausbreitung quer zur Wicklung kommen. Eine Gefahr für den Supraleiter besteht somit nicht nur durch Überhitzungen, sondern auch durch mechanische Spannungen, verursacht von Temperaturgradienten. Der Leiter ließe sich prinzipiell auch so auslegen, dass bei einem Quench die auftretende Verlustwärme komplett und ohne den Leiter zu gefährden in das umgebende Material und vor allem in das Kältemedium gelangt. Bei Großmagneten ist dies jedoch nicht wünschenswert, weil der Magnet dadurch noch größer und die Zeit, um den Magneten dann wieder herunterzukühlen unnötig verlängert werden würde. Man ist bei Großmagneten immer darauf aus, die gespeicherte Energie bei einer Schnellentladung aus dem kryogenen Bereich heraus zu bekommen, um unnötig lange Rückkühlzeiten zu vermeiden. Deshalb wählt man bei Großmagneten den Schaltungsaufbau nach Bild 2.

Die Detektion eines Quench muss relativ zur Entladezeitkonstante entsprechend schnell erfolgen, damit genügend Zeit für die Entladung bleibt, die aufgrund der großen Induktivitäten und der sich daraus ergebenden hohen Spannungen nicht beliebig schnell vorgenommen werden kann. Wird eine Abschaltung des Magneten wegen anderer Ursachen, z.B. Überschreitungen diverser Grenzwerte der Kälteanlage, vorgenommen, wird aufgrund geringerer Dringlichkeit auf die Schnellentladung verzichtet und die Energie, wenn möglich, über den Wechselrichter ins Netz zurückgespeist.

Eine sichere Abschaltung des Magneten im Störfall ist absolut erforderlich, weshalb die dazu nötigen Systeme an den entsprechenden Stellen redundant vorhanden sind. Jedoch ist man aus betriebstechnischen Gründen auch bemüht, keine unnötigen bzw. fälschlich ausgelösten Abschaltungen vorzunehmen. Bei jeder Schnellentladung gelangt nämlich nicht die ganze Energie der Spule in den Entladewiderstand. Ein Teil der gespeicherten Energie – ca. 10% (bei der W7-X Demo-Spule [14]) – geht über ohmsche Verluste, sowie Wirbelstromverluste beim Ändern des Stromes in das Gehäuse bzw. den Supraleiter und das ihn umgebende Matrixmaterial und wird dort in Wärme umgesetzt, die dann über eine Zeitdauer von einigen Stunden wieder durch die Kühlung abgeführt werden muss, was den Betrieb der Spule nach einer Schnellabschaltung für diese Zeit unterbricht. Deshalb müssen die Quenchedetektionssysteme absolut zuverlässig arbeiten. Diesem Gebiet, mit all seinen technischen Schwierigkeiten, widmet sich diese Arbeit.

2. Die Quenchdetektion

Dieses Kapitel soll zunächst anhand der Gleichung (2.1) aufzeigen, wie sich die Spannung an einem Magnet zusammensetzt und wie diese einzelnen Anteile gewichtet werden können. Anschließend soll in einzelnen Unterpunkten dargelegt werden, wie verschiedene Quenchdetektionssysteme die Kompensation störender Spannungsanteile bewältigen, sodass nur noch die bei einem Quench zusätzlich auftretende Spannung verbleibt, die dann für die Auslösung eines Alarms bzw. einer Sicherheitsentladung des Magneten herangezogen werden kann.

Allgemein setzt sich die Spannung $u(t)$ über einer Magnetspule wie folgt zusammen:

$$u(t) = (R_0 + R(t)) \cdot i(t) + L \cdot \frac{di}{dt} + \sum_{k=1}^n M_k \cdot \frac{di_k}{dt} + M_w \cdot \frac{di_w}{dt}, \quad (2.1)$$

wobei $i(t)$ der Strom des Magneten, R_0 sein konstanter, $R(t)$ ein durch einen Quench zusätzlich auftretender ohmscher Widerstand, L die Eigeninduktivität, M_k die Gegeninduktivitäten, mit denen der Magnet mit allen n anderen im System vorhandenen Magneten und M_w die Gegeninduktivität, mit der er an das ihn umgebende Strukturmaterial, mit den dort induzierten Wirbelströmen gekoppelt ist. Die Ausbildung der Wirbelströme ist in Anhang C vereinfacht dargestellt. Der bereits im normalen Betrieb auftretende Widerstand R der Spule kann heute ohne weiteres vernachlässigt werden.

Die ersten gebauten supraleitenden Spulen wiesen aber in der Tat einen kleinen ohmschen Widerstand auf. Der Supraleiter kann nämlich nicht beliebig lang gefertigt werden, sodass es nötig ist, ihn an entsprechenden Stellen durch Löttechniken zu verbinden. An diesen Stellen tritt dann ein ohmscher Widerstand auf. Heutige Verbindungstechniken lassen diesen Widerstand jedoch nahezu verschwinden und er braucht nicht mehr berücksichtigt werden.

Die einzelnen Spannungsanteile der Gesamtspannung verteilen sich dabei unter Berücksichtigung verschiedener Betriebszustände nach Tabelle 1, wobei die angegebenen Werte durch die tatsächlichen Gegebenheiten im Einzelfall schwanken können. Z.B. hängen die Auswirkungen des Streufeldes einer Nachbarspule stark von den vorliegenden magnetischen Kopplungsgraden und der Steilheit der gefahrenen Stromänderungen ab. Die Angaben der Tabelle sind daher Näherungen, die sich auf die im Anhang aufgeführten Versuchsreihen stützen. Die Tabelle soll jedoch ein Bild davon vermitteln, wie gering der Anteil eines ohmschen Widerstandes, den es zu erkennen gilt, im Vergleich zur Gesamtspannung ist. Die letzte Spalte der Tabelle gibt den prozentualen Anteil der durch einen Quench verursachten, ohmschen Spannung von der Gesamtspannung in der ersten Spalte wieder. Soll die geforderte Triggerschwelle von angenommenen 10mV auf 10% genau eingehalten werden, gilt es die Gesamtspannung am Magneten nochmals um den Faktor zehn genauer zu erfassen. Um die Gesamtspannung am Magnet zu unterteilen und so die relative Messgenauigkeit zu verbessern, ist es daher vorteilhaft, den Magnet in einzelne Teilspulen zu gliedern, die für die Quenchdetektion herangezogen werden – vergleiche Punkt 2.1.1.1.1.

Fall	Auftretende Gesamtspannung U [V]	Anteil der Eigeninduktivität L [%]	Anteil der Koppelinduktivitäten M _k [%]	Anteil der Wirbelströme M _w [%]	Anteil der ohmschen Komponente ¹⁾ R(t) [%]
A	0...1 ²⁾	0	0	0	100
B	1...10	0	>99	<1	0,1
C	1...30	95	0	5	0,03
D	100...20k	99	0	1	<<

¹⁾ Der Anteil einer ohmschen Komponente wurde anhand einer Triggerschwelle von 10mV bewertet

²⁾ Die auftretende Gesamtspannung am Magneten richtet sich in diesem Fall nach der eingestellten Triggerschwelle und der Zeit, bis der Entladekreis geschlossen ist und Fall D greift

Fall A: Konstanter Strom im Magnet, keine Streufelder

B: Konstanter Strom im Magnet, Streufeld durch Schnellentladung einer Nachbarspule

C: Langsame Stromänderung im Magnet, keine Streufelder

D: Schnellentladung des Magneten

Tabelle 1: An einem Magnet auftretende Gesamtspannung und ihre Aufteilung in einzelne Komponenten in Abhängigkeit verschiedener Betriebszustände

Es gibt auch weitere Fremdspannungen, die eine Quenchdetektion erschweren. Aufgrund des zur Erreichung eines hinreichend geglätteten Stromes von einigen 10kA notwendigen Einsatzes von zwölfpulsigen Gleichrichterschaltungen, weist die Ausgangsspannung einen Rippel mit der zwölffachen Netzfrequenz auf, der unter Umständen ebenfalls in den Quenchdetektoren erfasst wird. Bei großen Magneten für die Kernfusion tritt außerdem ein nicht unerhebliches Magnetfeld auf, wenn elektrische Ströme im Plasma induziert werden, um dieses aufzuheizen oder es in seine Bahn zu zwingen. In einigen Reaktortypen sind diese Ströme auch örtlich nicht exakt festgelegt, sondern können leicht variieren, was eine Kompensation der sie umgebenden Magnetfelder noch erheblich erschweren dürfte. Auch bei Plasmaabbrüchen sind sehr hohe Feldänderungsgeschwindigkeiten zu erwarten. Weitere Schwierigkeiten, die bei der Auslegung des Quenchdetektors berücksichtigt werden müssen, sind die am Detektor bei einer Schnellentladung auftretende Hochspannung – da die Detektoren an den Spulen angeschlossen sind, nehmen sie die dort auftretenden Potentiale an – sowie starke, elektronische Bauteile beeinflussende Magnetfelder, wenn die Detektoren in der Nähe der Spulen untergebracht werden.

Die Aufgabe der Quenchdetektion ist es, das Auftreten des Widerstandes R(t) – Gleichung (2.1) – bei einem Quench möglichst genau und sicher zu erkennen. Die induktiven Anteile der Spannung an der Spule müssen dazu weitgehend unterdrückt oder kompensiert werden. Damit ein Quench, wie es aus den oben aufgeführten Gründen erforderlich ist, rasch erkannt wird, müssen bereits sehr niedrige, an der Spule auftretende, ohmsche Spannungsfälle detektiert werden. Die geforderten Triggerschwellen liegen im Bereich von zehn bis einige hundert mV.

Im Folgenden sollen einige Ausführungen und mögliche Varianten von Quenchdetektoren dargestellt und erläutert werden, wie man dort die Kompensation der störenden Spannungsanteile bewältigt. Prinzipiell lassen sich die im Anhang A dargestellten Schaltungsvarianten unterscheiden, wobei der Kompensationserfolg der im Einzelnen aufgeführten Projekte sich auch an der Tabelle im Anhang B messen lässt.

2.1 Kompensation induktiver Spannungsanteile

Die folgenden Punkte sollen die Methoden zur Kompensation induktiver Spannungen der Quenchedetektion bei verschiedenen ausgeführten Experimenten, sowie deren Vor- und Nachteile aufzeigen. Hierbei werden auch die im Anhang A aufgeführten Schaltungen erläutert.

2.1.1 Die Anwendung der Brückenschaltung

Die Verwendung der Brückenschaltung ist die für den Abgleich induktiver Spannungen am Magnet gängigste Methode. Die Brückenschaltung wird dabei meist in eine Addierschaltung verwandelt – vergleiche Anhang D und E. So werden Teilspannungen am Magnet, bzw. die Spannung am Magnet und einer separaten Messwicklung (auch Pick-Up-Spule, Messspule oder Kompensationswicklung, bzw. -leiter genannt) voneinander subtrahiert, um die induktiven Komponenten der Gleichung (2.1) zu kompensieren und auf einen bei einem Quench zusätzlich auftretenden ohmschen Widerstand schließen zu können.

2.1.1.1 Das Projekt "Large Coil Task"

1977 wurde von der International Energy Agency (IEA) in Zusammenarbeit mit den USA, Europa (unter Beteiligung von FZK, Siemens, Vacuumschmelze Hanau u.a.), Japan und der Schweiz ein Projekt in die Wege geleitet, dessen Aufgabe es war, die Technologie supraleitender Magnetspulen, wie sie für die plasmaphysikalischen Experimente zur Realisierung der Kernfusion gebraucht werden, zu entwickeln und zu testen. Das Projekt "Large Coil Task" (LCT) sollte zeigen, dass man prinzipiell dazu in der Lage ist, große, supraleitende Magnetspulen zu fertigen und sicher zu betreiben. Außerdem wollte man experimentelle Daten zu deren Betrieb sammeln und die internationale Zusammenarbeit in Hinsicht auf künftige Großprojekte im Bereich der Kernfusion testen. Es wurden sechs Spulen gebaut – drei in den USA und jeweils eine in Japan, der Schweiz und der EU. Die einzelnen Gruppen waren an gewisse Randbedingungen gebunden, wobei die konkrete Ausführung den Partnern selbst überlassen war. Deshalb sind die einzelnen Varianten und auch die ausgeführte Quenchedetektion verschieden ausgefallen. Während die Spule der EU auch ihr eigenes Quenchedetektionssystem besaß, waren die anderen durch ein jeweils gleich aufgebautes System geschützt. Die sechs Spulen wurden dann ab 1985 im Oak Ridge National Laboratory (ORNL), Tennessee, USA, im Verbund getestet [4]. Dazu wurden sie zusammen torusförmig in einem Kryostaten installiert, jedoch alle getrennt bestromt und vermessen. Durch diese Anordnung wurde das Verhalten einer späteren Fusionsanlage nachempfunden. Dadurch waren aber die Spulen auch magnetisch miteinander gekoppelt, was eine Quenchedetektion aufgrund der gegenseitigen Spannungsinduktionen bedeutend schwieriger machte, als bei einer einzelnen Spule.

2.1.1.1.1 Das Quenchdetektionssystem der EU-LCT-Spule

Das Quenchdetektionssystem der europäischen LCT-Spule hat sich im Betrieb durch besondere Zuverlässigkeit und Sensibilität ausgezeichnet. Durch eine spezielle Wicklungstechnik dieser Spule in sieben getrennte, parallel gewickelte Doppelscheiben, so genannte Double-Pancakes, war es möglich, durch einen jeweils herausgeführten Mittenabgriff immer eine Doppelscheibe durch einen Quenchdetektor zu schützen. Die Besonderheit dieser Ausführung besteht darin, dass die beiden zu schützenden Scheibenhälften geometrisch sehr nahe beieinander liegen, weshalb auch ihre magnetische Kopplung sehr hoch ist. Sie sehen also beide nahezu dasselbe magnetische Feld und reagieren entsprechend auch durch ihre induzierten Spannungen identisch auf dessen Änderungen. Deshalb ist dieses Quenchdetektionssystem unempfindlich gegen Feldänderungen, verursacht durch das Pulsen einer dem Magneten benachbarten Spule, durch das Ändern des eigenen Stromes oder durch Wirbelströme. Der induktive Anteil der Spulenspannungen wird also sehr gut kompensiert und es lassen sich niedrige Ansprechschwellen des Detektors einstellen. Eine Darstellung des Leiters dieser Spule findet sich in Anhang F.2.

Die Funktionsweise des EU-Quenchdetektors lässt sich am vereinfachten Schaltbild in Bild 3 erklären.

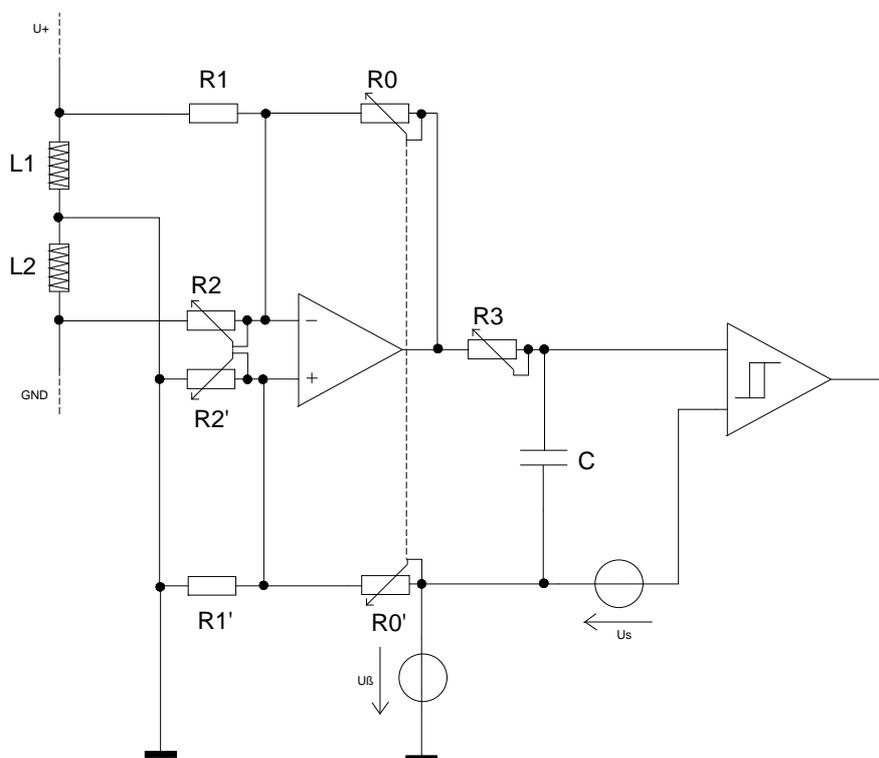


Bild 3: Schematische Darstellung des Quenchdetektionssystems der EU-LCT-Spule [5]

In Bild 3 ist links eine Doppelscheibe, bestehend aus den parallel gewickelten Leitern L₁ und L₂ der supraleitenden Spule dargestellt. Diese verfügt über Anschlüsse an den jeweiligen Enden, sowie einen Mittenabgriff. Über die beiden Enden schließt sich eine Widerstandsbrücke aus R₁ und R₂ in deren Mitte ein Verstärker mit seinem invertierenden Eingang angeschlossen ist. Der zweite Eingang ist über die Widerstände R₁' || R₂' mit dem Mittenabgriff der Doppelscheibe verbunden. Vom Grundsichtbild her entspricht diese Schaltung deshalb einer Brückenschaltung. Da jedoch der Ausgang des Verstärkers über den Widerstand R₀ auf seinen invertierenden Eingang zurückgeführt ist, arbeitet die Schaltung wie

ein Addierer, der die beiden Spannungen über den einzelnen Scheiben durch die gewählte Polung subtrahiert.

Der positive Eingang liegt über $R_1' \parallel R_2'$ auf Bezugspotential des Verstärkers. Da das Bezugspotential dieses Verstärkers auch in der Mitte des Pancakes anliegt, muss die Spannungsversorgung dieser Schaltung gegen die Versorgungsspannung des Magneten potentialfrei aufgebaut werden. Über das Potentiometer R_0 lässt sich die Verstärkung der Eingangsstufe und somit die Empfindlichkeit bzw. die Ansprechschwelle der Schaltung verstellen.

Die integrierte Gleichspannungsquelle U_B verleiht der Schaltung eine Sicherung gegen Drahtbruch und Ausfall elektronischer Bauteile, indem sie dem positiven Eingang über den Spannungsteiler R_0' und $R_1' \parallel R_2'$ ein Potential aufprägt. Über den Ausgang des Verstärkers wird durch den Spannungsteiler R_0 und $R_1 \parallel R_2$ dem negativen Eingang dasselbe Potential zugeführt, da der Verstärker seine Eingangsspannungsdifferenz über die Gegenkopplung zu Null regelt; [6], [7]. Es ist deshalb wichtig, dass die Potentiometer R_0 und R_0' , sowie R_2 und R_2' jeweils gemeinsam über eine Achse verstellt werden. Fällt nun eine Verbindungsleitung oder ein Bauteil dieser Gruppe aus, wird die Brücke ausgelenkt und der Detektor spricht an. Auch bei einem Quench wird die Eingangsschaltung verstimmt, da ein Teil der Doppelscheibe dann einen ohmschen Spannungsfall aufweist, der nicht durch eine gleich hohe Spannung an der zweiten Hälfte ausgeglichen werden kann.

Der Ausgang des Verstärkers wird über ein einstellbares R-C-Zeitglied aus R_3 und C, das kurzzeitige Ereignisse, z.B. unsymmetrische Wirbelstrom-Induktionen, ausblenden soll, weitergeführt. Da nicht bestimmt ist, in welche Richtung der Verstärker beim Auftreten eines Quench auslenkt, muss eine Schaltungsmaßnahme vorgesehen werden, die unabhängig darauf reagiert. Dies ist so gelöst, dass ein Schmitt-Trigger das zeitverzögerte Ausgangssignal des Verstärkers mit einer Referenzspannung vergleicht, die aus der Überlagerung von U_B mit einer Rechteckspannung U_s entsteht. Da im abgeglichenen und ungestörten Zustand der Verstärkerausgang gleich U_B ist, ist die Differenzspannung am Eingang des Schmitt-Triggers die reine Rechteckspannung. Der Ausgang des Schmitt-Triggers ist dann ebenfalls eine reine Wechselgröße. Weil beim Ausfall elektronischer Baugruppen nicht bestimmt ist, wohin deren Ausgangssignal läuft, liefert der Ausgang des Quenchdetektors bei ungestörtem Betrieb ein reines Wechselsignal, das nur vorhanden sein kann, wenn die Schaltung ordnungsgemäß funktioniert. Wird nun der Ausgang des Verstärkers von seinem normalen Potential um mehr als die vorgegebene Amplitude der Rechteckspannung ausgelenkt und gelangt dieses Signal über das Zeitglied hinweg, so wird das Potential am oberen Eingang des Schmitt-Triggers dauerhaft größer bzw. kleiner als das Signal am unteren Eingang. Da dieses Signal jedoch eingepreßt ist, hört der Schmitt-Trigger auf zu springen und bleibt am Ausgang in einer seiner Aussteuergrenzen stehen. Wie das Ausgangssignal des Quenchdetektors in nachfolgenden Schaltungen verwendet werden kann, ist in 2.5 beschrieben.

Die Vorteile dieser Schaltung bestehen in ihrer inhärenten Sicherheit gegen den Ausfall elektronischer Bauteile, sowie Messleitungen oder der Spannungsversorgung. Auch weist sie einen sehr einfachen Aufbau auf, der es zulässt, die Ansprechschwelle und die Zeitkonstante des Verzögerungsgliedes in einstellbaren Schritten zu verstellen.

Ein Nachteil fast aller Quenchdetektionssysteme, die auf eine Brücken- oder wie hier auf eine Addierschaltung basieren, besteht darin, dass der Detektor vor dem Betrieb abgeglichen werden muss. Dies geschieht, indem man in die zu schützende Spule, sowie in eventuelle Nachbarspulen einen Wechselstrom einprägt und den Detektor für den jeweiligen Fall abgleicht (hier am Potentiometer R_2). Beim Abgleichen des Detektors auf die Einflüsse der verschiedenen Spulen müssen jedoch Kompromisse getroffen werden in Bezug auf eine optimale Einstellung der Brücke – siehe auch E.4.3 im Anhang; [8].

2.1.1.1.2 Das Quenchdetektionssystem von ORNL

Wie bereits erläutert, gilt es beim Detektieren eines Quenches die induktiven Spannungen an einer supraleitenden Spule möglichst gut zu kompensieren, sodass nur ein ohmscher Anteil, wie er bei einem Quench auftritt, übrig bleibt, der dann erkannt werden kann. Da jedoch die übrigen LCT-Spulen nicht über die gleichen, für diese Aufgabe sehr günstigen Abgriffe, wie die Spule der EU, verfügten, wurde auf jeder LCT-Spule eine Messwicklung aufgebracht, die mit dem Feld des jeweiligen Magneten gekoppelt war (Pick-Up-Spule).

Die induzierte Spannung an dieser mit dem Magneten gekoppelten Messwicklung lässt sich bei geeigneter Verschaltung von der Spannung am Magnet selbst subtrahieren, sodass nur der bei einem Quench auftretende ohmsche Anteil des Magneten übrig bleibt. Dies könnte man durch die Schaltung in Bild 4 unter Verwendung einer dem Quenchdetektor der EU-LCT-Spule ähnlichen Schaltung (2.1.1.1.1), also eines Addierers in der Brückendiagonale, erreichen. Bei der Kompensationsschaltung mit einer Messbrücke muss der Abgriff der Diagonalspannung hochohmig erfolgen, z.B. durch ein angeschlossenes Oszilloskop (siehe Anhang D). Die Verschaltung nach Bild 4 kann dagegen nur funktionieren, wenn in der Brückendiagonale ein Operationsverstärker sitzt, der aufgrund einer entsprechenden Verschaltung seine Eingangsdifferenzspannung, also die Diagonalspannung, zu Null regelt, jedoch keinen Strom über die Brückendiagonale selbst fließen lässt. Eine Prinzipschaltung, die sich dann ergibt, zeigt Bild 5.

Der Widerstand R_1 wandelt die am Magneten L_1 auftretende Spannung in einen dazu proportionalen Strom. Bei einer Feldänderung wird sowohl im Magneten L_1 , als auch in der Messwicklung L_m eine Spannung induziert. Der abgleichbare Widerstand R_2 wandelt zusammen mit dem Leitungswiderstand R_m die Spannung der Messwicklung in einen dazu und somit der Stromänderung im Magneten proportionalen Strom. Beide Ströme werden dann bei geeigneter Polung durch den Addierer voneinander subtrahiert. Die Widerstände gilt es nach den unter E.2 im Anhang genannten Gesichtspunkten zu dimensionieren. Die Messwicklung braucht dabei nicht supraleitend ausgeführt zu sein, da erstens ein Widerstand zum Abgleichen seriell geschaltet wird, zweitens der von dieser Wicklung gelieferte Strom nicht zu hoch sein darf, damit diese als Spannungsquelle nicht belastet und dadurch das Signal verzerrt und außerdem der angeschlossene Operationsverstärker nicht übersteuert wird.

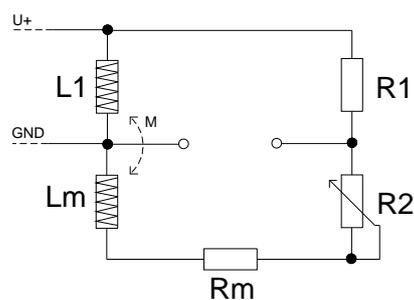


Bild 4: Schaltung zur Kompensation induktiver Spannungen einer Magnetspule durch eine Messwicklung

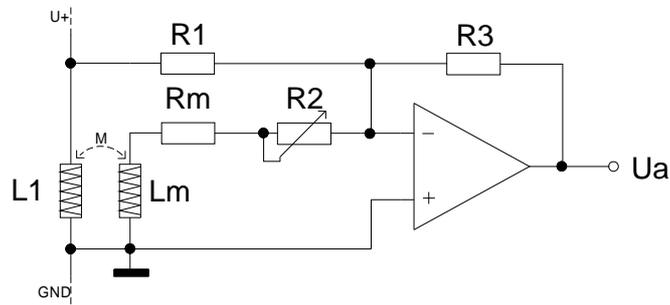


Bild 5: Schaltungsprinzip zur Kompensation induktiver Spannungen durch eine Messwicklung

Der als Addierer ausgeführte Operationsverstärker kann durch seine Gegenkopplung die Eingangsspannungsdifferenz zu Null regeln [6]. Deshalb liegt in der Mitte des Widerstandszweiges das gleiche Potential, wie auch zwischen den beiden Spulen. Im Normalfall ist zumindest die hier als L_1 bezeichnete Spule supraleitend und hat somit keinen ohmschen Widerstand und im stationären Betrieb auch keine anliegende Spannung. Tritt eine Feldänderung und somit eine Spannung über dem Magneten auf, wird auch in der Messwicklung eine dazu proportionale Spannung induziert und beide treiben einen Strom über die angeschlossenen Widerstände gegen das Massepotential am invertierenden Eingang des Operationsverstärkers. Wurde die Schaltung abgeglichen (siehe Anhang E.3), das heißt, die entsprechenden Widerstände den sich ergebenden Spannungen angepasst, heben sich die beiden Ströme gegenseitig auf und der Operationsverstärker sieht nach wie vor keine Eingangsspannungsdifferenz und die induktiven Anteile sind kompensiert. Nimmt nun aber die supraleitende Spule durch einen Quench einen ohmschen Widerstand an, führt dieser zu einer Spannung am Magneten, jedoch nicht an der Messspule, da dort keine Spannung induziert wird. Die Messwicklung kann die auftretende Spannung am Magneten nicht kompensieren und der Operationsverstärker lenkt aus.

Zur Untersuchung dieser Schaltungsart auf ihre Eignung zur Kompensation induktiver Spannungen, vor allem auch beim Pulsen von benachbarten Spulen, wurde eine im Anhang E genauer beschriebene Messreihe durchgeführt. Wie dort gezeigt, ist diese Schaltung für die Kompensation der induktiven Spannung eines Magneten sehr gut geeignet, wenn dieser alleine betrieben wird und nicht von Fremdfeldern umgeben ist. Beim Einsatz mehrerer Magnete jedoch kommt es zu gegenseitigen Kopplungen, die sich durch diese Schaltung aufgrund nicht vermeidbarer Unsymmetrien nicht zufrieden stellend kompensieren lassen. Man kann daher beim Betrieb mehrerer Magnete im Verbund versuchen, von jedem ein dessen Strom- oder Feldänderung proportionales Messsignal zu erhalten. Dieses Signal lässt sich dann mit der gemessenen Spannung am zu schützenden Magneten verrechnen. Schwierig wird ein Abgleich dieser Schaltung aber dadurch, dass bei der Rampenfahrt eines Magneten nicht nur in dessen Messwicklung und in den benachbarten Magneten, sondern auch in den Messwicklungen der benachbarten Magneten eine Spannung induziert wird. Auch werden bei Feldänderungen Wirbelströme in den die Magnete umgebenden Materialien angeworfen, die sich dann unter Umständen unsymmetrisch auf die Kompensationsschaltungen auswirken. Auch diese Punkte wurden im Anhang E untersucht.

Um die Verstärkungsfaktoren für die Bewertung der durch die Messwicklungen erhaltenen Signale bei den einzelnen Quenchdetektoren herauszufinden, hat man bei ORNL einen Magnet nach dem anderen mit einem dreieckförmigen Strom mit einer Amplitude von einigen hundert Ampere gespeist und die induzierten Spannungen an den benachbarten Spulen und Magneten gemessen. Ein Rechner hat dann die optimale Einstellung für die jeweiligen Kompensationsschaltungen errechnet und die entsprechenden Werte für die Verstärkung in die programmierbaren Verstärker geladen. Unter Umständen musste man dieses Verfahren für jeden Quenchdetektor iterativ einige Male wiederholen, um brauchbare Einstellungen zu erhalten.

Je nach Güte der magnetischen Kopplung zwischen den Messwicklungen und den jeweiligen Magneten funktioniert diese Schaltung recht gut. Bei den ORNL-Messwicklungen betragen die Koppelfaktoren allerdings nur ca. 80%. Das bedeutet, dass ein Teil des durch die Spule verursachten Feldes nicht von der jeweiligen Messwicklung erfasst wurde und somit ein Abgleich nur ungenau stattfinden konnte. Außerdem verursachte das zwischen dem Magneten und der Pick-Up-Spule liegende Material aufgrund der Ausbildung von Wirbelströmen bei Änderung des magnetischen Feldes nicht auskompensierbare Spannungsspitzen (siehe auch Anhang E.4.2). Deshalb arbeitete diese Schaltung bei weitem nicht so sensibel wie die der EU-LCT-Spule, wie auch in der in Anhang E ausgeführten Messreihe zu erkennen ist. Dieses Quenchdetektionssystem konnte z.B. nicht unterscheiden, ob die zu schützende Spule quenchte oder eine benachbarte Spule eine Schnellentladung durchführte, bei der erhebliche Magnetfeldänderungen in den Nachbarspulen Spannungen induzieren. Somit konnte auch nicht eine Spule alleine entladen werden, sondern es mussten bei Bedarf immer alle Spulen gemeinsam abgeschaltet werden. Dies war allerdings bei LCT auch aus mechanischen Gründen erforderlich, da bei einer Schnellentladung große magnetische Kräfte auftreten. Im Allgemeinen war jedoch der Betreiber, wie im Anhang dargelegt, mit dieser Schaltung unzufrieden.

2.1.1.2 Das Projekt „POLO“

Das Poloidalspulen-Testprojekt „POLO“ wurde von EURATOM und insbesondere vom FZK Mitte der 1980er Jahre durchgeführt, um die Ausführbarkeit von supraleitenden Poloidalfeldspulen für einen künftigen Tokamak-Reaktor zu testen. Diese Spulen werden mit sehr steilen Stromrampen gepulst, da sie die Primärwicklung eines Transformators darstellen, der im Plasma einen Strom induzieren soll. Aufgrund dieser hohen Feldänderungen muss auch die Quenchedetektion entsprechend resistent ausgeführt sein.

Wie die Messreihe zur Untersuchung der bei LCT verwendeten Kompensationsschaltung (Anhang E) zeigt, ist für die Kompensation der an den zu schützenden Magneten auftretenden induktiven Spannungen die Verwendung einer Messwicklung, die außen auf dem Magneten angebracht ist, nur bedingt brauchbar. Bei der im Projekt POLO verwendeten Quenchedetektion handelt es sich zwar um eine ähnliche Schaltung, aber um eine bedeutend bessere Ausführung der Messwicklung – als Kompensationsleiter, der im Innern des Supraleiters liegt. Das flüssige Helium zum Kühlen des Supraleiters der POLO-Spule wurde durch ein Rohr in dessen Inneren geführt. Dieses Rohr war elektrisch gegen den Supraleiter isoliert und konnte so direkt als Kompensationsleiter verwendet werden. Zwei weitere Kompensationsdrähte wurden zum Vergleich parallel dem Supraleiter beigewickelt. Da dadurch gegeben war, dass der jeweilige Kompensationsleiter nahezu exakt das gleiche magnetische Feld sah, wie auch der Supraleiter selbst, konnte die Kompensation induktiver Spannungen perfekt durchgeführt werden. Eine Tabelle zum Vergleich verschiedener Kompensationserfolge findet sich im Anhang B. Bilder dieses Leiters sind in Anhang F.3 dargestellt. Für den hier eingesetzten Quenchedetektor eignet sich prinzipiell die gleiche Schaltung wie bei LCT – Bild 5 – jedoch müssten die induzierten Spannungen dann entgegengesetzt gepolt werden, weshalb die zwischen Supraleiter und Kompensationsleiter liegende Spannung gleich der Spannung am Supraleiter ist. Dies ist aber nicht wünschenswert, weil die auftretende Spannung unter Umständen sehr hoch sein kann. Alternativ bietet sich eine Verschaltungsart an wie sie Bild 6 zeigt.

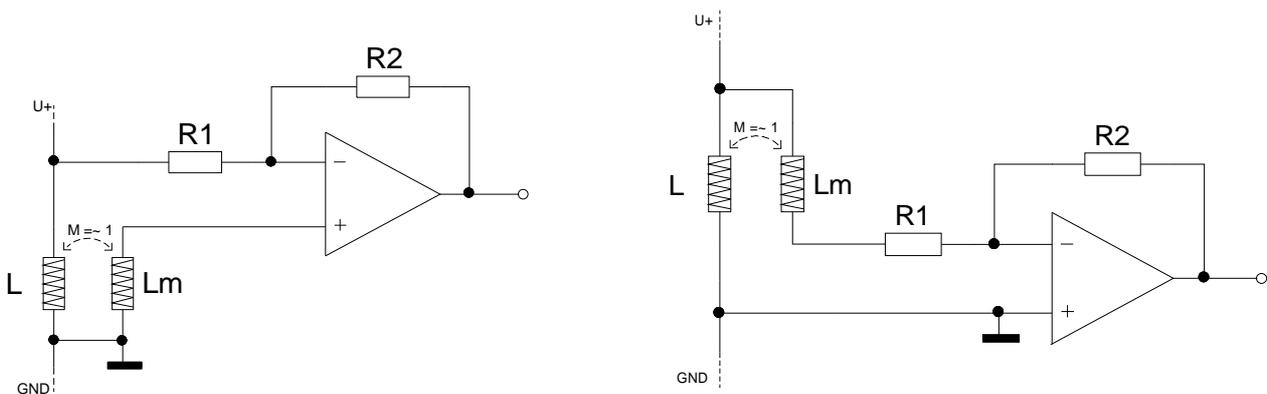


Bild 6: Prinzip der Kompensationsschaltung für einen magnetisch sehr gut gekoppelten Kompensationsleiter L_m . Links: Veranschaulichung des Funktionsprinzips, Rechts: günstigere Anordnung in Bezug auf Hochspannung

Zunächst soll das Funktionsprinzip dieser Schaltung anhand des linken Bildes erläutert werden. Da eine Ende der beiden Leiter war miteinander verbunden, wodurch die Spannung zwischen dem Kompensationsleiter L_m und der supraleitenden Spule L sehr gering blieb. Da beide exakt das gleiche Magnetfeld ($M \approx 1$) sehen, braucht diese Schaltung auch nicht abgleichbar zu sein und beide Spannungen können direkt dem Verstärker zugeführt werden. Kommt es aufgrund von Magnetfeldänderungen zu in den Leitern induzierten Spannungen, werden auch die Eingänge des Operationsverstärkers synchron angesteuert und die Eingangsspannungsdifferenz und somit der

Ausgang bleibt unverändert null. Erst wenn der Leiter einen ohmschen Spannungsfall aufweist, kommt es zu einer Verstimmung der Schaltung.

Die in Bild 6 rechts dargestellte Schaltung verhält sich in Hinsicht auf eine Hochspannungsbelastung im Entladefall günstiger, da die Eingangsstufe des Verstärkers auf niedrigem Potential bleibt, während die links dargestellte Schaltung Hochspannungspotential annimmt und zusätzlich diese Hochspannung zwischen dem nicht-invertierenden Eingang und der Bezugsmasse anliegen würde.

Der Magnet des POLO-Projekts war so ausgeführt, dass auch die halbe Spule separat entladen werden konnten, während die andere Hälfte weiter im Kurzschlussbetrieb bestromt wurde. Auch bei einer Schnellentladung einer Halbspule sprach das Quenchdetektionssystem der anderen Hälfte trotz niedrig eingestellter Schaltschwellen aufgrund der sehr guten Kompensation nicht an.

Diese Schaltungsvariante stellt also die perfekte Methode dar, induktive Spannungen am zu schützenden Supraleiter zu kompensieren. Die Ausführung des Kompensationsleiters muss hierbei jedoch von Anfang an zusammen mit der Spule bzw. dem Leiter geplant werden. Ein nachträglicher Einbau wird sich in den wenigsten Fällen durchführen lassen. Von großem Vorteil ist hier auch, dass diese Quenchdetektoren nicht abgeglichen werden müssen, was bei der Inbetriebnahme des Systems und beim Tausch defekter Baugruppen viel Aufwand erspart.

2.1.2 Kompensation durch Erfassung der Stromänderung im Magnet

Bei ORNL wurden zunächst auch andere Schaltungsvarianten zur Kompensation der induktiven Kopplungen untersucht. Ein Signal, das die Stromänderung der Magnete erfasst und so auf die auch in Nachbarmagneten induzierten Spannungen rückschließen lässt, kann man zum Beispiel durch den Einsatz einer Rogowski-Spule erhalten. Sie stellt einen eisenlosen Transformator dar, dessen Primärwicklung durch die Stromzuführung des Magneten gebildet wird und dessen Sekundärwicklung um diese Strombahn geführt ist. Ändert sich der betreffende Strom, wird in der Sekundärwicklung eine dazu proportionale Spannung induziert. Diese Schaltungsvariante jedoch wurde von ORNL verworfen, da die gefahrenen Stromänderungen zu gering waren, als dass sich ein brauchbares Messsignal hätte ergeben können. Zur Verbesserung wurde damals vorgeschlagen, die Primärwicklung zu vergrößern und die Stromschiene eine Schleife bilden zu lassen, in deren Inneren die Rogowski-Spule untergebracht würde. Diese Variante wurde jedoch aus Kosten- und Sicherheitsgründen nicht ausgeführt [4].

Handelt es sich bei der zu schützenden Spule jedoch um einen mit Wechselspannung betriebenen Magneten und somit höheren Stromänderungsraten, könnte diese Methode durchaus angewendet werden (siehe 2.4). Brückenschaltungen mit z.B. nur einem Mittenabgriff eignen sich dagegen nicht sehr bei Betrieb an Wechselspannung, wegen der unsymmetrisch induzierten Wirbelströme – siehe Anhang C und 2.2. Auch für die Anwendung der Rogowski-Spule gilt, dass sich ein Magnet allein gut schützen lässt, der Einsatz mehrerer Magnete aufgrund der gegenseitigen Kopplungen sich allerdings schwierig gestaltet.

Die Methode, ein der Stromänderung proportionales Signal zu erhalten, indem man die Spannung an einem Shunt in der Strombahn des Magneten differenziert, führt zu ähnlichen Problemen.

2.1.3 Quenchedetektion durch Filterung der Spannung am Magnet

Prinzipiell lässt sich die gemessene Spannung an der Spule auch direkt zur Quenchedetektion heranziehen, wenn die darin enthaltenen induktiven Anteile durch entsprechende Filter beseitigt werden. In [9] wird ein solches System, basierend auf einer digitalen Filterung durch einen DSP (Digitaler Signal Prozessor), vorgestellt. Die Vorteile dieser Schaltung liegen darin, dass sich durch digitale Filter gewünschte Filterkennlinien sehr genau nachbilden und bei Bedarf schnell ändern lassen. Es gelingt dadurch z.B. den störenden Einfluss des Spannungsrippels aufgrund der Netzgeräteausgangsspannung sehr gut zu unterdrücken. Ein Nachteil wiederum besteht darin, dass kein Spannungsvergleich zur Detektion herangezogen wird und man so auch beim definierten Erregen der Spule durch das Netzgerät eine Gleichspannung im Quenchedetektor erhält. Um die Quenchedetektion auch bei Rampenfahrten des Magneten aufrecht zu erhalten, sind also sicherlich noch Daten aus anderen Systemen, z.B. dem Netzgerät, im Quenchedetektor auszuwerten. Diese führen dann aber aufgrund der jeweiligen Messungenauigkeiten und diversen Unbestimmtheiten zu erheblichen Verschlechterungen im Detektionsverhalten.

Wie Tabelle 1 zeigt, müsste die am Magnet auftretende Gesamtspannung mit einer Genauigkeit von mehr als 0,05% erfasst werden, um auch im Fall einer definierten Erregung des Magnet mit der geforderten Sensibilität von 10mV auf einen Quench zu schließen. Daraus lässt sich gleich die zu verwendende Wortlänge des Digitalrechners ermitteln. Im angewandten Fall [9] waren dies 16 Bit. Dies ergibt eine Auflösung von 65.536 Einzelwerten und entspricht bei einer angenommenen zu erfassenden Maximalspannung an der Spule von 100V

$$\frac{100V}{65536 \text{ digits}} = 0,0015 \frac{V}{\text{digit}} \quad (2.2)$$

oder einer relativen Genauigkeit von

$$0,0015 \frac{V}{\text{digit}} \cdot \frac{100\%}{100V} = 0,0015\% . \quad (2.3)$$

Bei entsprechender Eingrenzung der Eingangsspannung am Quenchedetektor kann also auch mit einer solchen Lösung eine gute Genauigkeit erzielt werden.

Im erwähnten Fall war am Ausgang des Quenchedetektors ein Rauschen mit einer maximalen Spitze von 15mV zu messen. Die eingestellte Triggerschwelle betrug 300mV. Also jeweils um ein Vielfaches größer, als vergleichsweise die Werte der Quenchedetektion der EU-LCT-Spule (s. 2.1.1.1.1). In Betracht der Ausfallhäufigkeit digitaler Schaltungen ist der Einsatz eines solchen Systems jedoch nicht zu empfehlen. Beim Ausfall digitaler Schaltungen ist absolut unvorhersagbar, in welchen Zustand sie gelangen. Im unter 3.1 aufgeführten Fall der Auslegung eines Quenchedetektionssystems wird deshalb bewusst auf jegliche digitale Signalverarbeitung verzichtet.

Auch für diese Schaltung gilt, dass sie einen einzelnen Magnet gut, einen ganzen Spulenverbund jedoch aufgrund der gegenseitigen Beeinflussung nicht zuverlässig zu schützen vermag. Um ein digitales System sicher zu betreiben, wird es deshalb in der Praxis (z.B. bei Raketen-Steuerungen) immer mindestens dreifach-redundant ausgeführt und alle Signale am Ausgang durch eine zwei von drei Auswahl selektiert. Dadurch wird der Preis eines derartigen Systems den der erwähnten, analogen Quenchedetektoren um ein Vielfaches übersteigen. Von Vorteil ist hier allerdings, dass auch ein bereits gefertigter Magnet ohne nachträgliche bauliche Veränderungen geschützt werden könnte.

2.2 Kompensation der Wirbelströme

Wie sich Wirbelströme in Materialien auswirken, die den Magneten umgeben, zeigen die Messungen unter E.4.2 im Anhang. Eine Erfassung und Kompensation der Wirbelströme kann nur bei einfachen Systemen gelingen. In [10] ist ein diesbezüglicher Vorschlag aufgeführt, der zu einer Verbesserung der Quenchedetektion führte. Es handelte sich um einen Magneten für die Anwendung als SMES (Supraleitender Magnetischer EnergieSpeicher). Die Beschreibung und Kompensation der Rückwirkung der Wirbelströme, wie sie im Anhang C schematisch beschrieben ist, auf die dort gewählte Brückenschaltung zur Quenchedetektion wurde anhand eines Rechenmodells vorgenommen. Das Material der Wand wurde als Sekundärwicklung eines Transformators mit einer Windung betrachtet und die Größen der vorhandenen Induktivität L_w und des Widerstandes R_w (vergleiche Bild C1) anhand von Messwerten abgeschätzt. Durch Messung der Teilspannung einer Spulenhälfte und deren Änderung, konnte die zu erwartende rückgekoppelte Spannung ausgerechnet und vom gemessenen Spannungswert am Magneten subtrahiert werden. Die Korrektur der Wirbelströme diente dazu, die geforderte Schaltschwelle von einem Volt (!) einzuhalten.

Die Kompensation der verursachten Wirbelströme gestaltet sich bei Großmagneten dagegen äußerst schwierig. Dort werden oft Triggerschwellen im Bereich von 10mV gefordert und eine derartige Kompensation der Wirbelströme erscheint somit von vornherein undenkbar, da selbst die bei dieser einfachen Anordnung erreichte Verbesserung bei weitem nicht ausreichend wäre. Auch lassen sich bei geometrisch größeren Dimensionen, die sich ausbildenden Wirbelströme in Lage und Stärke nicht reproduzieren bzw. vorhersagen, sondern werden von Fall zu Fall variieren. Bei großen Magnetverbänden, wie sie später in Fusionsreaktoren eingesetzt werden kommt noch hinzu, dass auch benachbarte Spulen im Gehäuse des betrachteten Magneten Wirbelströme induzieren.

Die Einflüsse der verursachten Wirbelströme lassen sich folglich nur kompensieren, wenn die Magnetwicklung und ihre Mess- bzw. Vergleichswicklung oder die beiden miteinander verglichenen Spulenteile magnetisch sehr eng miteinander gekoppelt sind und sich daher die Wirbelströme auf beide nahezu gleich auswirken.

2.3 Weitere Methoden zur Quenchdetektion

Neben den hier erwähnten Schaltungsvarianten finden sich in der Literatur und auch in der Praxis noch weitere Möglichkeiten, den Quench eines Supraleiters zu detektieren. Oft werden auch verschiedene Methoden parallel angewandt, um eine sicherheitstechnische Redundanz zu erreichen. In der TORoidalSpulentestanlage KARlsruhe (TOSKA) des FZK wird neben der Spannung des Magneten, bzw. seiner untergliederten Teil-Spulen auch der Kühlmitteldruck und der Massenstrom der Kälteanlage überwacht. Kommt es zu einem Quench, führt dies aufgrund der Erwärmung an der resistiven Stelle zu einem Ansteigen des Kühlmitteldrucks und durch eine einsetzende Gegenströmung zu einer Umkehr der Flussrichtung am Kältemittleinlass. Bei Überschreitung eingestellter Grenzwerte wird dann eine Schnellentladung unabhängig von der elektronischen Quenchdetektion eingeleitet.

Es wurden auch Systeme vorgeschlagen, die einen Quench anhand von Änderungen der elektromagnetischen Eigenschaften des Kühlmediums detektieren sollen. Durch den Wärmeeintrag eines resistiven Abschnitts im Supraleiter wird die Permittivitätszahl des Kühlmediums geändert. Indem man das Kältemedium als Leiter für eine elektromagnetische Welle nutzt und deren Übertragungseigenschaften zwischen Ein- und Auslass beobachtet, könnte man auf die Entstehung eines Quench schließen [11]. Allerdings wären dann auch Maßnahmen erforderlich, die unterscheiden können, ob tatsächlich ein Quench vorliegt, oder sich anlagentechnische Parameter im Kühlmittelstrom ändern, z.B. Durchsatz, Temperatur, Ventilstellungen etc. Über die Anwendung solcher Verfahren und deren Erfolg und Brauchbarkeit ist allerdings nichts bekannt. Ein weiterer Vorschlag beruht auf die Verwendung eines im Supraleiter mitgeführten optischen Leiters (Fiber-Optik) zur Führung der elektromagnetischen Welle. Ein Vorteil dieses Systems wäre eine Immunität gegen starke Magnetfelder. Die in [12] vorgeschlagene Methode bedarf allerdings eines zweiten Leiters, durch den parallel dasselbe Licht als Referenz geleitet wird. Am Ausgang werden beide miteinander verglichen und Abweichungen detektiert. Da jedoch diese Lichtleiter ihre elektromagnetischen Eigenschaften auch bei mechanischen Beanspruchungen ändern, muss eine Beeinflussung durch mechanische Kräfte ebenfalls beherrscht werden. Auch muss der optische Leiter den gleichen Bedingungen standhalten, die der Supraleiter während Fertigung und Einsatz durchlaufen muss (z.B. hohe Temperaturen für eine längere Zeit und anschließend das Abkühlen auf Tiefsttemperaturen). Da aber auch bei dieser Ausführung dem Supraleiter bereits in der Fertigung ein entsprechender Leiter beigewickelt werden muss, könnte auch gleich eine sicherlich einfachere und weniger störanfällige Quenchdetektion wie bei POLO (2.2.1.2) realisiert werden.

Da ein Quench eine Änderung der elektrischen Eigenschaften des Supraleiters darstellt, ist es auch verständlich, dass ein auf die Messung dieser Eigenschaften beruhendes System entsprechend schneller und effektiver arbeiten kann, als anderweitige Systeme.

2.4 Wertung der vorgestellten Schaltungsprinzipien

Wurde ein Quenchdetektionssystem vorgesehen, das die Kompensation induktiver Spannungsanteile am Magnet nicht sehr zufrieden stellend bewältigt, gibt es oft die Forderung nach einer Begrenzung der Rampensteilheiten bei Stromänderungen. Manche Betreiber gehen sogar so weit, dass sie die Quenchdetektion der Magnete bei Rampenfahrten ausschalten, um nicht ungewollt eine Schnellabschaltung auszulösen. Bei Großmagneten wäre diese Vorgehensart jedoch fatal, wenn es durch einen Quench zu einer Zerstörung des Magneten käme. Gerade Magnete in Fusionsreaktoren und vergleichbaren Anlagen lassen sich bei einem Defekt nur unter erheblichem Aufwand und entsprechenden Kosten austauschen. Im Folgenden sollen die bisher dargestellten Methoden zur Quenchdetektion gegeneinander bewertet und die geeignetste Lösung hervorgehoben werden.

Allgemein gilt es anzumerken, dass bei einzelnen Magnetspulen, die separat und fern von störenden Fremdfeldern betrieben werden, eine Quenchdetektion sehr effektiv und auf vielerlei Weise realisiert werden kann. Hier lassen sich auch Methoden wie z.B. die Erfassung der Stromänderung im Magneten (2.1.2) oder die Filterung der Spannung am Magnet (2.1.3) für die Quenchdetektion zufrieden stellend anwenden. Auch die Verwendung einer außen auf den Magnet aufgebrauchten Messwicklung (Pick-Up-Spule) weist in diesem Betriebszustand, wie in Anhang E und 2.1.1.1.2 gezeigt, sehr gute Eigenschaften auf. Für den Betrieb vieler Magnetspulen im Verbund, wie er bei künftigen Großprojekten für die Kernfusion vorgesehen ist, eignen sich diese Methoden jedoch nicht. Die erwähnten Schaltungen, die einen Quench anhand elektromagnetischer Eigenschaften eines dem Supraleiter nahen Leitermediums detektieren (2.3), werden als nicht sehr zuverlässig und zu aufwendig eingestuft, als dass sie mit den konventionellen Systemen konkurrieren können.

Verfügt der zu schützende Magnet über einen oder mehrere Mittenabgriffe – diese brauchen keinen besonderen Strombelastungen standzuhalten – so lässt sich der Magnet auch durch den Anschluss einer gewöhnlichen Messbrücke (2.1.1 und Anhang D) oder einer Addierschaltung (2.1.1.1) schützen und das Verhalten der Quenchdetektion in Bezug auf störende Magnetfelder wird verbessert. Allgemein erlaubt eine Unterteilung des Magnets in mehrere zu schützende Teil-Spulen eine Verbesserung der Empfindlichkeit und bringt eine höhere Messgenauigkeit (2). Für die Anwendung der Brücken- oder Addierschaltung (2.1.1) ist es vorteilhaft, bereits bei der Auslegung des Magnets spezielle Wickeltechniken, wie in 2.1.1.1.1 erläutert, vorzusehen, damit die magnetische Kopplung zwischen den einzelnen Spulenabschnitten, die durch die Brückenschaltung miteinander verglichen werden sollen, vergrößert und somit die Auswirkung von unsymmetrisch streuenden Fremdfeldern minimiert wird.

Die beste Quenchdetektion ist aber, dem Supraleiter einen Kompensationsleiter beizuwickeln (2.1.1.2). Hierbei ist die magnetische Kopplung zwischen dem Supraleiter und dem Kompensationsleiter bedeutend besser als z.B. bei einer außen aufgebrauchten Messwicklung und die Quenchdetektion kann sehr empfindlich erfolgen. Auch ist bei dieser Anwendung kein Abgleich der Quenchdetektoren nötig, wie er z.B. bei Brückenschaltungen oder bei der Verwendung einer Pick-Up-Spule vorgenommen werden muss. Dies erspart bei Großprojekten sehr viel Zeit und macht überdies die Quenchdetektoren aufgrund ihres einfacheren Aufbaues sicherer gegen einen Ausfall.

Da es sehr schwer ist, einen bereits gefertigten Magnet, vor allem, wenn er im Verbund mit anderen Spulen betrieben werden soll und keine Vorkehrungen zum Anschluss geeigneter Quenchdetektoren getroffen wurden, wirkungsvoll zu schützen, ist jedem Betreiber supraleitender Magnete zu raten, eine effektive Quenchdetektion bereits bei der Konstruktion des Magnets, bzw. des Supraleiters zu berücksichtigen und entsprechende Vorrichtungen einzuplanen.

2.5 Verwendung des Ausgangssignals der Quenchdetektoren

Unabhängig von der Wahl des Quenchdetektors bzw. der Kompensationsvariante, sollte die weitere Signalverarbeitung folgenden Gesichtspunkten genügen. Es muss gewährleistet sein, dass ein defektes Gerät einerseits sicher erkannt wird und andererseits ohne Betriebsunterbrechung der Anlage und ohne Aufhebung der Schutzfunktion ausgetauscht werden kann. Außerdem ist auf der Ausgangsseite des Quenchdetektors die Trennung der Hochspannungsseite von der Niederspannungsebene vorzunehmen. Eine digitale Signalverarbeitung des Quenchdetektorausgangs ist, wie bereits unter 2.1.3 dargelegt, aus Gründen der Zuverlässigkeit nicht wünschenswert.

Das Zusammenspiel der Quenchdetektoren mit den anderen elektrischen Systemen einer Anlage zum Betrieb supraleitender Spulen verdeutlicht Bild 8. Hier wird beispielsweise der Ausgang des Quenchdetektors der EU-LCT-Spule (2.1.1.1.1) und dessen Logik-Verschaltung betrachtet.

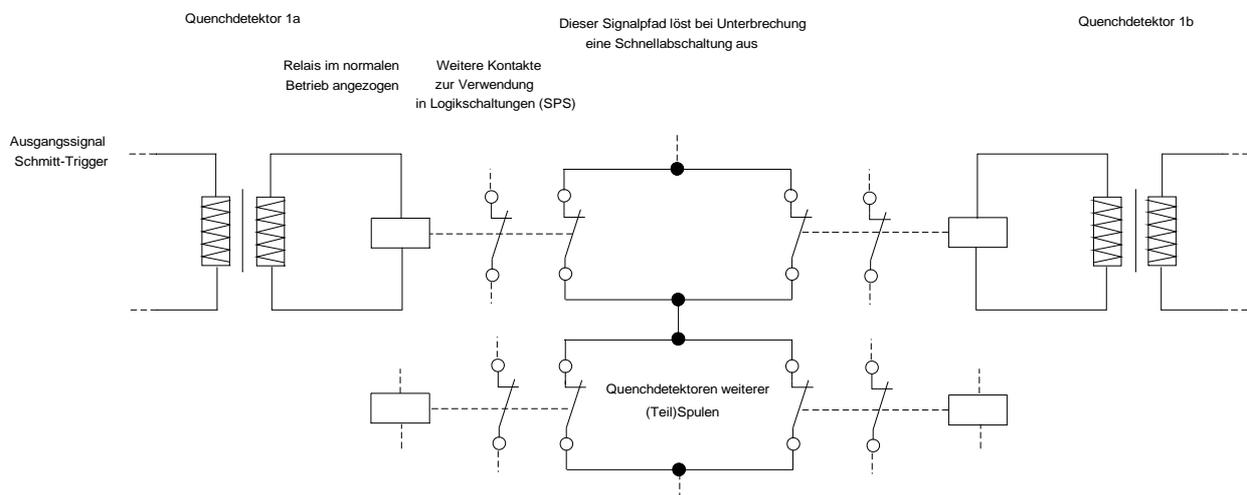


Bild 8: Schema der Signalverarbeitung am Ausgang des Quenchdetektors

Das Ausgangs-AC-Signal der Endstufe des Quenchdetektors 1a (Schmitt-Trigger, siehe Bild 3) wird über den im Bild links dargestellten Transformator auf die Niederspannungsseite übertragen. Über diesen Transformator wird einerseits die Hochspannung isoliert, andererseits auch die Leistung für das auf der Niederspannungsseite sitzende Relais übertragen. Das Relais befindet sich im normalen Betrieb im angezogenen Zustand. Wenn der Quenchdetektor anspricht, bzw. seine Spannungsversorgung, diverse Leitungen oder Bauteile ausfallen und somit kein Schutz mehr gewährleistet ist, bleibt der Schmitt-Trigger, wie in 2.1.1.1.1 dargestellt, in einer seiner Ausstiegsstufen hängen, über den Trafo gelangt keine Leistung mehr auf die Niederspannungsseite, das Relais fällt ab und gibt seine Kontakte frei. Das Unterbrechen des Signalpfades in der Bildmitte löst eine Schnellentladung aus. Dies kann also nur geschehen, wenn beide Quenchdetektoren einer Ebene (hier 1a und 1b) gemeinsam ansprechen.

Dadurch wird erreicht, dass bei Ausfall eines Quenchdetektors alleine noch keine Schnellentladung ausgelöst wird, sondern z.B. durch die weiteren im Relais vorhandenen Kontakte eine Meldung abgesetzt wird. Ein defekter Quenchdetektor kann somit auch ohne Betriebsunterbrechung ausgetauscht werden. Das Entfernen eines Gerätes lässt zwar das in der Logik angesteuerte Relais abfallen, unterbricht jedoch nicht die Schutzfunktion, da der zweite Detektor währenddessen weiterarbeitet. Die auf den jeweiligen Relais noch vorhandenen Kontakte können in weiteren Schaltkreisen verwendet werden – z.B. in einer Speicher-Programmierbaren Steuerung (SPS) zur Auswertung der Ansprechereihenfolge der verschiedenen Quenchdetektoren.

Neben den Quenchdetektoren können aber auch andere Systeme, z.B. die Kälteanlage oder diverse Grenzwert-Überwachungen, eine Schnellentladung des Magneten anfordern. Diese sind im gleichen

Signalpfad zusammen mit den anderen Quenchdetektoren integriert und lösen unabhängig von diesen durch die Unterbrechung des Signalpfads eine Schnellentladung aus.

Der bei dieser Schaltung unter Verwendung eines Quenchdetektors wie in Bild 3 einzig unerkannt bleibende Fehler wäre ein mechanisches Versagen des verwendeten Relais, unter Umständen ausgelöst durch ein zu starkes Magnetfeld. Um diesen Fehler einzugrenzen, ist es zunächst erforderlich, das Quenchdetektionssystem in ausreichend großer Entfernung zum Magneten aufzustellen. Damit sich ein defektes Relais nicht auswirkt, ist es prinzipiell auch möglich, zwei Relais in Serie zu schalten und somit das Ansprechen eines Quenchdetektors redundant zu gestalten. Einige Nachteile mechanischer Relais können auch durch die Verwendung elektronischer Relais umgangen werden.

3. Die Optimierung eines Quenchdetektionssystems

Wie die bisherigen Ergebnisse und Studien zu dieser Arbeit zeigen, gibt es im Bereich der Quenchdetektion für supraleitende Magnetspulen keine grundsätzlichen Änderungen vorzuschlagen. Die bestehenden Konzepte sind größtenteils ausgereift und in der Praxis haben die geeignetsten Lösungen Anwendung gefunden und sich bewährt. Allerdings wird schnell klar, dass ein gutes Quenchdetektionssystem auf die im konkreten Fall geforderte Anwendung hin optimiert werden muss. Deshalb soll im folgenden Punkt die Anlage Wendelstein 7-X vorgestellt und ein Konzept für das Quenchdetektionssystem vorgeschlagen werden.

Das Projekt Wendelstein 7-X

Das Institut für Plasmaphysik (IPP) der Max-Planck-Gesellschaft in Garching bei München beschäftigt sich seit geraumer Zeit mit der Forschung zur Plasmaphysik und insbesondere zur Kernfusion. Es ist weltweit die einzige Institution, die Versuchsanlagen zu beiden heutzutage favorisierten Reaktorkonzepten eines künftigen Fusionskraftwerkes, dem Stellerator (Anlage Wendelstein 7-AS) und dem Tokamak (Anlage ASDEX-Upgrade), betreibt. Zur Zeit befindet sich in Greifswald die Stellerator-Maschine W7-X als Nachfolger des W7-AS in Bau. Diese neue Anlage soll die Eignung eines Stellerators für einen künftigen Leistungsreaktor aufzeigen. Er wird in einer Art gebaut, von der aus sich bei positivem Abschluss der Versuchsreihen eine direkte Skalierung der Bauteile auf die für eine Leistungsanlage erforderliche Größe vornehmen lässt. Die Anlage wurde so geplant, dass zum ersten Mal ein stationärer Betrieb möglich ist. Bei laufenden Versuchsreaktoren, wie z.B. der Anlage JET (Joint European Torus) in Culham, England, ist ein dauerhafter Betrieb schon aufgrund der Verwendung von nicht supraleitenden Spulen ausgeschlossen, weil die Kupfer-Wicklungen der Magnete nach einem Einsatz eine gewisse Zeit rückgekühlt werden müssen. Bei W7-X sind deshalb alle felderzeugenden Magnete supraleitend ausgeführt.

3.1 Das Spulensystem eines Stellerators

Prinzipiell muss das Magnetfeld für den Plasmaeinschluss in einem Fusionsreaktor durch ringförmig in sich geschlossene Feldlinien aufgebaut werden. Die geladenen Teilchen folgen diesen magnetischen Feldlinien in spiralförmigen Bahnen – man sagt, sie gyrieren um die Feldlinie. Ein schlichtes toroidales (donut-förmiges) Magnetfeld ist aber nicht homogen, da es nach außen hin schwächer wird und erlaubt daher keinen Plasmaeinschluss. Die gyrierenden Plasmateilchen würden dann Bereiche unterschiedlicher Feldstärke durchlaufen und dadurch sofort hin zu den Wänden gedrängt. Aus diesem Grund muss durch geeignete Maßnahmen erreicht werden, dass das Magnetfeld ähnlich der Leiterführung eines Drillleiters (Roebelstab) verwunden ist, damit sich die Auswirkung des Feldgradienten im Mittel aufhebt.

Beim Reaktorprinzip des Tokamak werden dazu hauptsächlich zwei verschiedene Spulensysteme und ein im Plasma induzierter Strom verwendet, deren Magnetfelder sich überlagern und die gewünschte Form ergeben. Das Konzept des Stellerators kommt dagegen mit nur einem Spulensystem aus, verlangt aber eine ganz eigene Spulengeometrie. Die Bilder 9 und 10 sollen davon eine Vorstellung liefern.



Bild 9: Spulensystem des Stellarators Wendelstein 7-X in Drauf- und Seitenansicht [13]

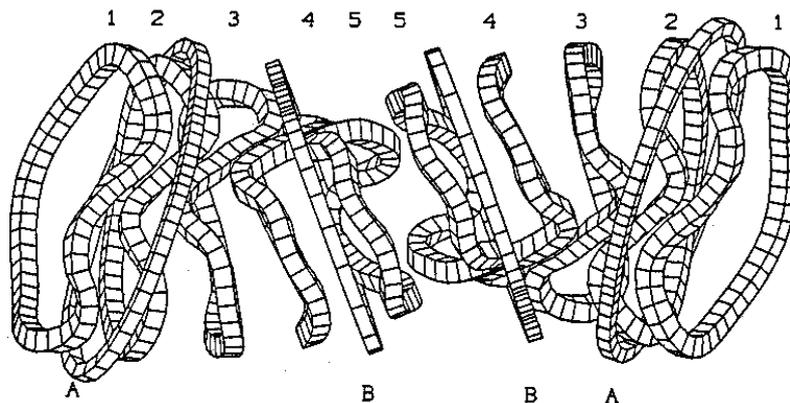


Bild 10: Spulensystem von W 7-X, Detailansicht eines Armes mit den sieben unterschiedlichen Spulentypen [13]

Alle in Bild 9 zu erkennenden fünf Segmente des Systems sind aus zwei mal fünf nicht-planaren (in Bild 10 die Nummern 1-5) und zwei mal zwei planaren Spulentypen (A und B) aufgebaut. Die planaren Spulen dienen zur definierten Feldbeeinflussung zu Versuchs- und Ausgleichszwecken. Zusätzlich sind im Plasmaraum des Reaktors noch einige normaleitende Spulen für Versuchs- und Messzwecke untergebracht. Die Spulen haben eine Höhe von ungefähr 3m, was auf die Gesamtgröße des Experiments schließen lässt.

Alle Spulen gleichen Typs werden jeweils gemeinsam von einem Netzgerät gespeist. Das bedeutet, dass die 70 im System vorhandenen Spulen in sieben Gruppen zu je zehn Spulen verschaltet werden. Jede Gruppe trägt dann einen Strom von bis zu 20kA.

3.2 Der Aufbau der Spulen

Die Spulen von W7-X sind mit ihrer Doppelscheiben-Wicklung ähnlich der LCT-Spule der EU aufgebaut (s. 2.1.1.1.1). Jedoch kann bei diesen die Verbindung innerhalb einer Doppelscheibe nicht kontaktiert werden und steht somit für eine Quenchdetektion nicht zur Verfügung. Da die nicht-planaren Spulen in sechs solcher Double-Pancakes unterteilt sind, heißt das, dass für die Quenchdetektion die Spannungen der Doppelscheiben 1 und 2, 3 und 4, 5 und 6 miteinander verglichen, also drei Quenchdetektoren pro Spule vorgesehen werden können. Bei den planaren Spulen wurde eine Unterteilung in drei Doppelscheiben vorgenommen und es sollten dementsprechend zwei Quenchdetektoren angeschlossen werden. Zusätzlich gilt es die im Kryostaten vorhanden supraleitenden Stromzuführungen auf einen Quench hin zu überwachen.

3.3 Die Quenchdetektoren

In solch komplexen Experimenten, wie sie in der Forschung zur Kernfusion betrieben werden, würde der Austausch defekter Spulen jeden Zeit- und Kostenrahmen sprengen. Schon alleine deshalb ist es unumgänglich ein ausgesprochen sicheres und zuverlässiges Quenchdetektionssystem zum Schutz der supraleitenden Magnete vorzusehen. Auch gilt es, keine fälschlich ausgelösten Abschaltungen vorzunehmen, da dies den teuren Experimentierbetrieb unnötig lange aufhalten würde.

Die hohe Stückzahl der eingesetzten Quenchdetektoren bedingt einen durchdachten Aufbau, der alle im späteren Betrieb geforderten Einstellmöglichkeiten abdeckt, sowie den unter allen Betriebszuständen entstehenden Beeinflussungen standhält.

Durch den eng verwundenen Aufbau des Spulensystems (Bild 9 und 10) und die damit verbundene magnetische Kopplung und Empfindlichkeit gegenüber Feldänderungen, sowie die Anordnung jeweils unterschiedlicher Spulen nebeneinander und die Möglichkeit, diese auch unterschiedlich zu bestromen, wird die Quenchdetektion erheblich erschwert. Die Demo-Spule von W7-X hat sich im Test [14] in Bezug auf die Quenchdetektion zwar ähnlich gut verhalten, wie die EU-LCT-Spule, d.h. die Kompensation induktiver Spannungsanteile konnte recht gut erfolgen (siehe Tabelle im Anhang B), jedoch gilt es zu bedenken, dass bei diesem Test die Einflüsse der Nachbarspule nicht den bei W7-X später auftretenden Anforderungen entsprach.

Zunächst sollen nun einige prinzipielle Punkte aufgezeigt werden, die für die Quenchdetektion zu beachten sind, bevor in den nächsten Punkten die Quenchdetektion genauer diskutiert wird.

3.3.1 Prinzipielle Überlegungen

Auch bei der Quenchdetektion von W 7-X sollten defekte Baugruppen erkannt und ohne Unterbrechung des Betriebes und Einschränkung der Sicherheitsfunktion ausgetauscht werden können. Daher ist für W7-X die Verwendung eines Quenchdetektors vorzusehen, der ähnlich dem der EU-LCT-Spule aufgebaut ist und nach dem „Fail-Safe“-Prinzip seine Funktion überwacht (siehe 2.1.1.1.1). Eine zweifache Auslegung der Quenchdetektoren, wie sie unter 2.6 vorgestellt ist, erlaubt es dann, defekte Geräte zu erkennen und während des Betriebs auszutauschen. Damit die Berührung eines Quenchdetektors jedoch auch im Falle einer Sicherheitsentladung keine Gefahr darstellt, ist sorgsam darauf zu achten, die dann unter Umständen auftretende Hochspannung gegen das Detektor-Gehäuse zu isolieren.

Bei der Verwendung einer dem LCT-Quenchdetektor ähnlichen Schaltung ist die Spannungsversorgung jeder einzelnen Baugruppe potentialfrei von denen der anderen aufzubauen. Zusätzlich ist sie entsprechend der geforderten Prüfspannung des Systems (ca. 10kV) auszulegen. Sollten keine

adäquaten Trennverstärker (DC/DC-Wandler) auf dem Markt erhältlich sein, würde sich aufgrund der geforderten Stückzahl sogar eine Spezialanfertigung, bzw. ein eigener Entwurf lohnen.

Die hohe Zahl der Quenchedektoren bedingt auch, dass sich über Software alle einstellbaren Parameter der Quenchedektoren (Triggerschwelle und Verzögerungszeitkonstante) abrufen und kontrollieren lassen sollten. Um Fehlern vorzubeugen, sollte eine Vorgabe dieser Parameter nur von Hand und nicht per Software möglich sein. Die Abfrage der Einstellungen lässt sich z.B. dadurch lösen, dass auf der Welle, die das entsprechende Potentiometer im Quenchedetektor verstellt (in Bild 3 die Potentiometer R_0 respektive R_0' bzw. R_3) noch ein weiterer Kontakt aufgebracht wird, der mit der entsprechenden Auswertungssoftware (z.B. einer SPS) verbunden ist.

Auch auf die Ausführung der hochspannungsfesten Zuführungen für die Quenchedektoren ist ein besonderes Augenmerk zu legen. Die Anschlüsse der jeweiligen Quenchedektoren an den Spulen bzw. Stromzuführungen lassen sich in einem einzigen Kabel mit zwei voneinander isolierten Innenleitern und zwei separaten Schirmungen (einer auf Hochspannungs- und einer auf Erdpotential) realisieren – anstatt in zwei bzw. drei getrennten Leitungen. Die Verwendung eines separaten Erdschirmes ist aus Gründen der Verkabelung sinnvoll, damit hier keine besonderen Vorkehrungen getroffen werden müssen. Bei der Wahl der Kabel ist auch auf die jeweilige Belastung zu achten. Es muss entschieden werden, ob derselbe Kabeltyp sowohl für die Verlegung bei Raumtemperatur, als auch bei Tieftemperatur verwendet werden kann. Ist ein entsprechendes Kabel nicht katalogmäßig erhältlich, würde sich bei der benötigten Gesamtlänge auch hier eine Spezialanfertigung lohnen.

Neben dem Einsatz der elektronischen Quenchedektoren ist zur Redundanz auch die Überwachung von Daten der Kälteanlage (Kühlmitteldurchsatz und Durchflussrichtung, sowie diverser Temperaturen und Drücke) vorzusehen und bei Überschreitung der eingestellten Grenzwerte unabhängig von der elektronischen Quenchedetektion eine Schnellentladung auszulösen.

3.3.2 Die Quenchedektoren der Magnetspulen

Insgesamt sollten bei W7-X für die nicht-planaren Spulen 150 und für die planaren Spulen 40 Quenchedektoren zum Einsatz kommen. Die Gesamtzahl der Quenchedektoren für den Schutz der Magnetspulen beläuft sich somit aufgrund der doppelten Ausführung auf 380. Da beim Design und Bau der Spulen keine Kompensationsleiter vorgesehen wurden, kann das Quenchedetektionssystem nur durch den Einsatz von Brückenschaltungen realisiert werden (2.1.1).

Bei den Quenchedektoren für die Magnetspulen muss somit ein Abgleich der jeweils zugehörigen Widerstandsbrücke vorgenommen werden. Da dies jedoch rein manuell nur sehr schwer möglich ist, gilt es, dafür ein spezielles Konzept zu entwickeln, das es ermöglicht, diesen Abgleich zumindest teilautomatisiert vorzunehmen und schnell eine optimale Einstellung zu finden. Prinzipielle Vorgehensweisen zum Abgleich ähnlicher Schaltungen finden sich in Anhang E.3. Für den Abgleich ist es nötig, die Spannung über jeder Doppelscheibe parallel zum Quenchedetektionssystem als Messwert zu erfassen und so mit dem Pulsen der verschiedenen Spulengruppen gleichzeitig die Messwerte für alle Doppelscheiben aufzunehmen. Aus diesen Daten lässt sich dann mit Hilfe eines Rechenmodells die optimale Einstellung der Widerstandsbrücke ermitteln und am jeweiligen Quenchedetektor per Hand einstellen. Dieser Abgleich ist zu Beginn des Betriebes einmalig nötig. Die ermittelten Werte für jeden Quenchedetektor können dann gespeichert und bei dessen Defekt an seinem Ersatzgerät eingesellt werden. Die besten Ergebnisse für den Abgleich lassen sich erzielen, wenn die Magnete bereits heruntergekühlt wurden und keinen ohmschen Widerstand mehr aufweisen. Deshalb ist der Abgleich der Quenchedektoren einer der letzten Schritte bei der Inbetriebnahme der Anlage.

3.3.3 Die Quenchdetektoren der Stromzuführungen

Die Anzahl der Quenchdetektoren der Stromschienen bzw. -zuführungen beläuft sich in zweifacher Ausführung mit 336 auf knapp die Hälfte der insgesamt eingesetzten Schaltungen. Die zur Quenchdetektion am besten geeignete Methode des mitgewickelten Kompensationsleiters (siehe 2.1.1.2) lässt sich bei den Stromschienen noch durchführen und sollte deshalb bei deren Planung vorgesehen werden. Für die Überwachung der Stromschienen kann ein ähnlicher Quenchdetektor verwendet werden wie für die Magnetspulen. Jedoch benötigt dieser keine abgleichbare Widerstandsbrücke am Eingang. Es ergibt sich somit ein Prinzipschaltbild, wie in Bild 6 dargestellt. Bei diesen Quenchdetektoren wird es dann nicht nötig sein, einen Abgleich vorzunehmen, wie es bei den Quenchdetektoren der Magnetspulen mit ihren Brückenschaltungen geschehen muss.

Es ist jedoch zu untersuchen, ob nicht aus fertigungs- und kostentechnischen Gründen für beide Quenchdetektortypen ein einziges Schaltungslayout ausreichend ist, das dann z.B. durch Stecken eines Jumpers, oder dem Weglassen einzelner Bauteile dem jeweiligen Einsatz angepasst werden kann.

3.3.4 Parallele Messwerterfassung

Der Betreiber möchte, dass die Spannungen der Magnetspulen, sowie auch jeder Doppelscheibe während des Betriebs als Messwert zugänglich sind und aufgezeichnet werden. Dieser Forderung muss auch bereits bei der Auslegung der Quenchdetektoren Rechnung getragen werden. Prinzipiell wäre es zwar denkbar, diese Messwerterfassung in den Quenchdetektoren selbst zu implementieren. Es ist jedoch ratsam, die eigentliche Quenchdetektion hardwaremäßig strikt von der Messwerterfassung zu trennen und auf separaten Platinen durchzuführen, da erfahrungsgemäß in Messkarten oft Erweiterungen bzw. Änderungen der Einstellungen oder gar der Schaltung selbst vorgenommen werden und das Quenchdetektionssystem von solchen Einwirkungen nicht betroffen sein darf, damit ein entsprechender Schutz der Magnete zu jeder Zeit gewährleistet bleibt. In Hinsicht auf eine einfache Verkabelung, sowie auch auf Hochspannungsaspekte, ist es sinnvoll, die Messkarten neben den jeweiligen Quenchdetektoren zu platzieren.

Wenn diese Messwerterfassung bereits bei der Inbetriebnahme zur Verfügung steht, kann sie auch für die Erfassung der Spannungen zum Abgleich der Quenchdetektoren (siehe 3.3.2) herangezogen werden.

Zur Zeit wird in Zusammenarbeit zwischen dem Institut für Technische Physik (ITP) am Forschungszentrum Karlsruhe (FZK) und IPP ein Pflichtenheft des Quenchdetektionssystems erstellt. Nach abschließenden Diskussionen kann dann entschieden werden, inwieweit FZK/ITP und insbesondere die Mitarbeiter des Elektroniklabors an Detailplanung, Entwicklung und Bau des Systems beratend teilnehmen.

Anhang A

Tabelle der unterschiedlichen Schaltungsvarianten elektronischer Quenchedektoren

Diese Tabelle gibt die grundsätzlich möglichen Ausführungen eines Quenchedektionssystems wider und zeigt deren Vor- und Nachteile auf [15].

Kompensationstyp	Schematische Darstellung	Vorteile	Nachteile	Ausgeführt im Projekt
$L \cdot \frac{di}{dt}$ Mess-Brücke		Gute Kompensation der Eigeninduktivität Sehr gut geeignet bei enger magnetischer Kopplung der Teilsolen	Bei loser Kopplung der Teilsolen empfindlich gegenüber unsymmetrischen Streufeldern Mittenabgriff erforderlich	Häufig angewandt, z.B. EU-LCT (siehe 2.1.1.1.1), W7X (siehe 3.3)
$\frac{d\Phi}{dt}$ Pick-Up-Spule		Einfacher Aufbau Keine Anschlüsse im Magnet nötig Sehr gute Komp. bei mitgewickeltem Kompensationsleiter – ohne erforderlichen Abgleich	Bei loser Kopplung der Spulen empfindlich gegenüber unsymmetrischen Streufeldern	ORNL-LCT (s. 2.1.1.1.2), POLO (siehe 2.1.1.2)
$L \cdot \frac{di}{dt}$ Rogowski-Spule		Keine Anschlüsse in der Spule	Empfindlich gegenüber Fremdfeldern Schlechtes Messsignal der Rogowski-Spule, besonders bei niedriger Induktionsspannung Schwieriger Aufbau	Angedacht bei LCT (siehe 2.1.1.1.2)
$L \cdot \frac{di}{dt}$ Shunt		Einfacher Aufbau Keine Anschlüsse in der Spule	Differenzierung nicht exakt durchführbar Sonst wie bei Rogowski-Spule	Nicht bekannt
Filter		Einfacher Aufbau, besonders bei digitaler Ausführung Keine Anschlüsse in der Spule Kein Abgleich notwendig	Ungenaue Methode, U.U. schlechte Unterscheidung, ob Quench oder andere Einflüsse z.B. Netzgerätespannung beim definierten Auferregen	(siehe 2.1.3)

Oft werden diese grundsätzlichen Methoden der Quenchedektion auch gemischt angewendet. Eine Filterung des Ausgangssignals der Kompensationsschaltung ist aufgrund einer doch nicht exakten Kompensation meist unumgänglich. Erklärungen zu den einzelnen Methoden finden sich unter Punkt 2.1.

Anhang B

Tabelle der Restinduktivitäten ausgeführter Quenchedektoren

Der Erfolg der Kompensation induktiver Spannungen einer Quenchedektion lässt sich durch die Angabe der verbleibenden Restinduktivität L_R beschreiben [14]. Sie kann ermittelt werden, indem man den betrachteten Magneten mit einem veränderlichen Strom speist und nach

$$L_R = U_i \cdot \frac{dt}{di} \quad (\text{B1})$$

die Spannungsdifferenz U_i zwischen Kompensationsleiter und Supraleiter auswertet. Dabei spiegelt eine kleinere Restinduktivität eine bessere Kompensation wieder.

Magnet	Restinduktivität	Kurzbeschreibung der Kompensation	Abschnitt
EU-LCT-Spule	0,34 - 1,35mH	Vergleich einer Doppelscheibe	2.1.1.1.1
ORNL-LCT-Spulen	64 - 120mH	Externe Kompensationswicklung	2.1.1.1.2
POLO	0,5 μ H	Leiter-Innenrohr	2.1.1.2
POLO	1 μ H	Mitgewickelter Kompensationsleiter	2.1.1.2
W7-X Demo-Spule	0,5mH	Ähnlich der EU-LCT-Spule	3.2

In diesen Restinduktivitäten finden sich die in 2.5 gemachten Aussagen bezüglich der Güte der Kompensation der einzelnen Methoden bestätigt. Je enger die Messwicklung mit dem Supraleiter bzw. die betrachteten Teilspulen magnetisch miteinander gekoppelt sind, desto besser ist die Kompensation und somit auch die Quenchedektion durchführbar. Allerdings ist die Angabe der Restinduktivität sehr subjektiv, da sie unter Umständen von der Steilheit der gefahrenen Stromrampe und den geometrischen Gegebenheiten abhängt.

Anhang C

Wirbelströme im Strukturmaterial

Die Ausbildung von Wirbelströmen im Magnet umgebenden Material lässt sich an folgendem Ersatzschaltbild vereinfacht darstellen.

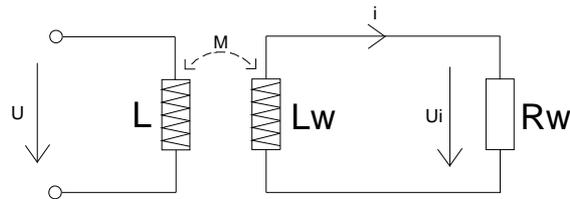


Bild C1: Vereinfachtes Ersatzschaltbild zur Beschreibung von Wirbelströmen im Gehäuse eines Magnets

Hier sind L_w , R_w = Induktivität respektive Widerstand der Strukturmaterialien.

Ist die Spannung U der supraleitenden Spule L konstant eingepreßt, so ist auch deren zeitliche Stromänderung konstant, da es sich um eine nahezu ideale Induktivität handelt. Aus dieser zeitlich konstanten Stromänderung folgt eine ebenso konstante Änderung des magnetischen Flusses. Die in den umgebenden leitfähigen Materialien induzierte Spannung U_i ist nach dem Induktionsgesetz proportional dieser Änderung des magnetischen Flusses und somit ebenfalls konstant und es stellt sich ein im Umgebungsmaterial fließender Strom nach folgender Gleichung ein:

$$i(t) = \frac{U_i}{R_w} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right), \quad (C1)$$

mit $\tau = L_w/R_w$.

Der Strom $i(t)$ im Gehäuse nähert sich also von Null beginnend exponentiell seinem Endwert U_i/R_w . Solange sich aber dieser Strom zeitlich noch ändert, wird durch die damit verbundene Änderung des ihm proportionalen Magnetfeldes in der Spule über die Koppelinduktivität M ebenso eine Spannung induziert. Dies ist auch dann der Fall, wenn der Strom in der Spule z.B. bereits wieder konstant ist und der Strom im Strukturmaterial exponentiell abklingt. Das angegebene Modell ist jedoch stark vereinfacht. Es betrachtet die umgebenden Materialien als eine Induktivität mit einer einzigen Windung. Genauer wäre eine Betrachtung unendlich vieler Induktivitäten mit sich überlagernden Wirbelströmen, deren Beschreibung im Rahmen dieser Arbeit allerdings zu weit führen würde.

Anhang D

Messreihe zur Untersuchung von Brückenschaltungen für die Quenchedetektion

Diese Messreihe wurde durchgeführt, um Erfahrungen im Abgleichen induktiver Brücken zu sammeln. Es stand eine Anordnung aus zwei großen, allerdings nicht supraleitenden Magnetspulen zur Verfügung, die getrennt voneinander bestromt werden konnten. Die Induktivität eines Magnets betrug 2H, der Widerstand 20Ω und sein Durchmesser ca. 30cm – Bild E1 zeigt beide Magnete im Aufbau der Versuchreihe des Anhangs E. Als Versorgungsspannung diente das Signal eines Funktionsgenerators, welches über einen Leistungsverstärker, der in allen vier Quadranten betrieben werden konnte, den jeweiligen Schaltungen zugeführt wurde. Die maximale Ausgangsspannung des Verstärkers betrug +/- 20V.

Um zunächst mit beiden Magneten und der vorhandenen Messtechnik vertraut zu werden, wurden beide Magnete in Reihe geschaltet und gemeinsam bestromt. Der Strom konnte als Spannungsfall über einen mit in den Kreis geschalteten Shunt gemessen werden. Bild D1 gibt den Verlauf von Strom und Spannung wieder. Da die Widerstände der Spulen sehr hoch sind und nur die relativ niedrige Versorgungsspannung zur Verfügung stand, bedeutet dies, dass der maximale Strom von

$$I = \frac{20V}{20\Omega} = 1A \quad (D1)$$

bereits nach

$$\Delta t = \frac{1A}{20V} \cdot 4H = 0,2s \quad (D2)$$

erreicht ist. Würde man also länger pulsen, könnte der Strom dennoch nicht weiter ansteigen. Um noch einen relativ linearen Verlauf des Stromes zu erhalten, wurde die Frequenz zu 5Hz gewählt. Der maximale Strom betrug somit rund:

$$\frac{\Delta i}{2} = \frac{0,1s}{4H} \cdot \frac{20V}{2} = 0,25A \quad (D3)$$

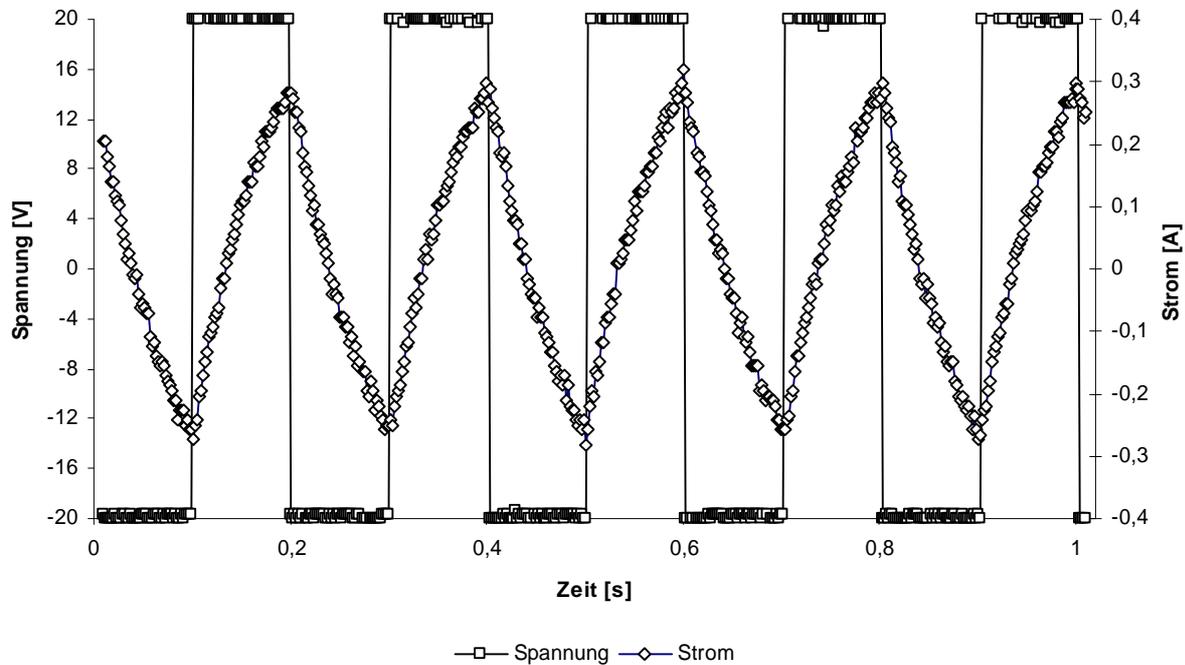


Bild D1: Spannung und Strom bei seriell geschalteten Magneten

D.1 Aufbau einer Messbrücke

Nun wurde den beiden seriell geschalteten Magneten als zweiter Brückenweig ein einstellbarer Spannungsteiler – ein Potentiometer, dessen Schleifkontakt den Mittenabgriff bildete – parallel gelegt. Zwischen den Mittenabgriffen der Magnete und des Potentiometers konnte die Diagonalspannung durch den hochohmigen Abgriff eines Oszilloskops gemessen werden. Eine schematische Darstellung dieser Schaltung findet sich in Bild D4. Da beide Spulen vom gleichen Strom durchflossen werden und somit deren magnetisches Feld gleich ist, war es möglich, die Brücke relativ genau abzugleichen. Die Frequenz wurde hier und in den folgenden Versuchen zu 0,25Hz gewählt, damit jeweils ein eingeschwungener Zustand erreicht wird und ohmsche Anteile der Spannungen sichtbar werden. Bild D2 zeigt die Diagonalspannung und die angelegte, aus messtechnischen Gründen jedoch nur halbe Eingangsspannung während eines Abgleichens. Man sieht, wie die Diagonalspannung durch den Abgleichpunkt hindurch läuft und bei anderer Auslenkung des Potentiometers ihr Vorzeichen in Bezug auf die Versorgungsspannung umkehrt. Es ist zu erkennen, dass nach dem anfänglichen Einschwingen ein ohmscher Restwert der Diagonalspannung verbleibt, der erst bei einer vollständig abgeglichenen Brücke verschwindet - Bild D3.

Die Spannungsspitze zu Beginn jeder Halbwelle (Bild D3), die auch bei der abgeglichenen Brücke noch vorhanden ist, lässt sich auf Unsymmetrien in der Brücke zurückführen. Die Spannungsaufteilung über den Zweig der Magnete bestimmt sich bei deren Stromänderung durch die Induktivitäten. Unterscheiden sich beide Magnete in ihrem Verhältnis der Induktivität zu ohmschem Widerstand, so fällt die Spannungsaufteilung bei einer Stromänderung anders aus als bei konstantem Strom und die Brücke erfährt während dieser Zeit (laut Gleichung (D2) 0,2s) einen Ausschlag, der mit dem angeschlossenen Widerstandsteiler nicht kompensiert werden kann. Bei diesen Magneten kann also nur ein Abgleich der ohmschen Komponente erfolgen. Es sei jedoch darauf hingewiesen, dass bei vergleichenden Messungen an einem echten supraleitenden Magneten (D.3) mit derselben Widerstandsbrücke ähnliche Ausschläge festgestellt wurden. Diese beruhen dann aber auf Wirbelstromeffekte (siehe Anhang C), weil kein ohmscher Widerstand im Magnet vorhanden ist. Bei

supraleitenden Magneten können durch den Anschluss eines solchen Widerstandsteilers die Induktivitäten abgeglichen werden.

In Anhang E wird eine Schaltung vorgestellt und untersucht, die basierend auf einer Brückenschaltung die induktive und die ohmsche Komponente eines gepulsten Magneten separat abgleichen kann.

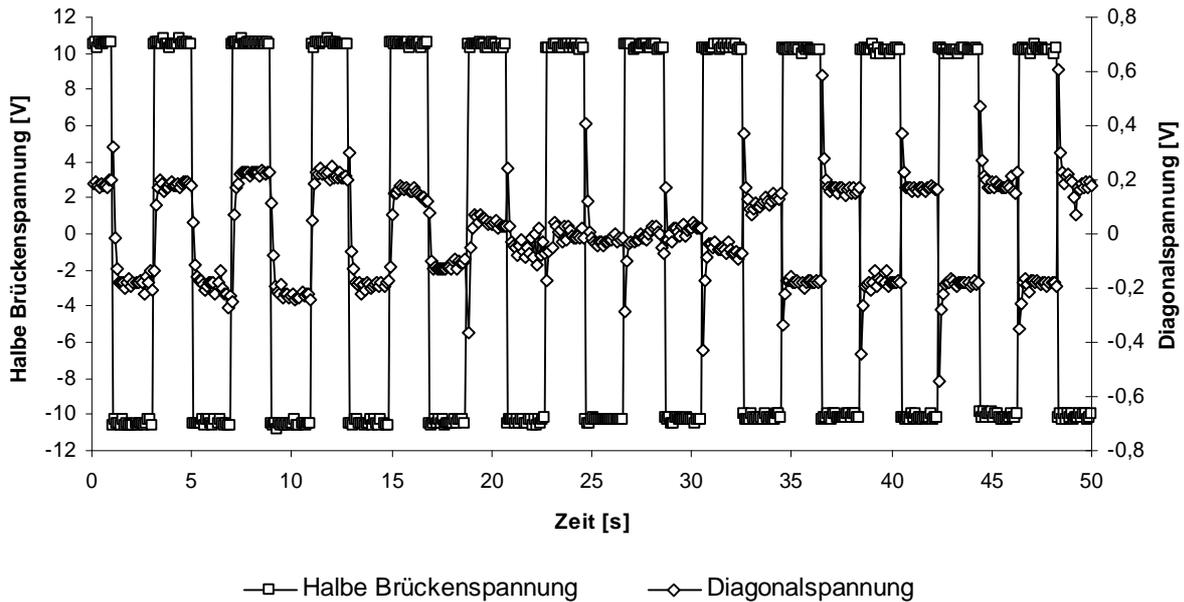


Bild D2: Diagonalen-Spannung und halbe angelegte Brückenspannung beim Abgleichversuch mit Durchlaufen des Abgleichpunktes

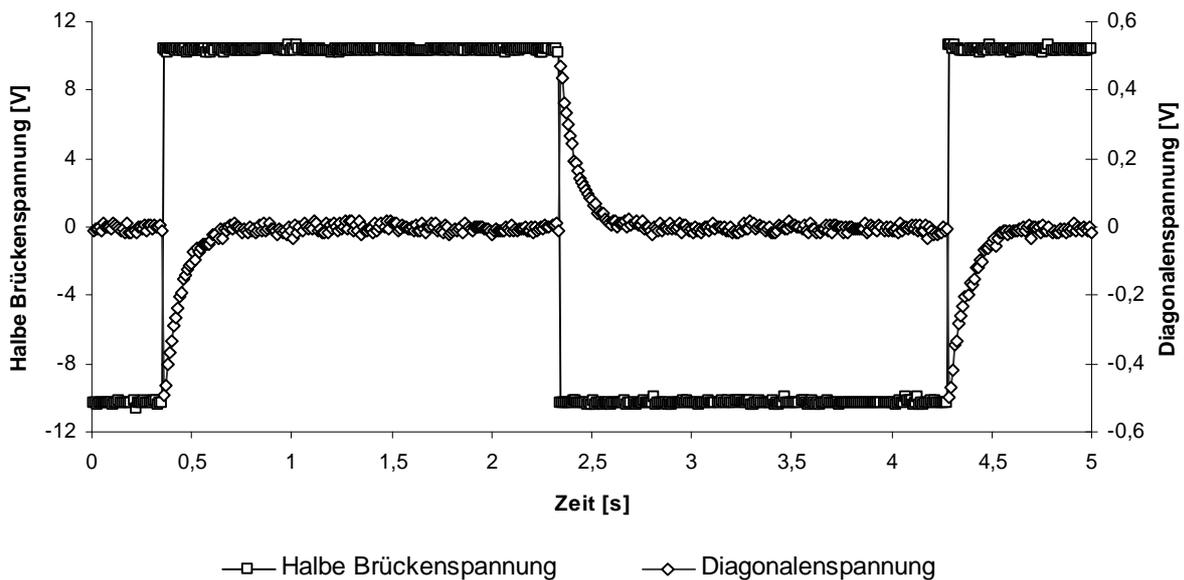


Bild D3: Diagonalen-Spannung und halbe angelegte Brückenspannung im abgeglichenen Zustand

D.2 Betrachtung der Messbrücke bei supraleitenden Spulen

Bei supraleitenden Spulen ergibt eine Schaltung der Messbrücke unter Vernachlässigung der Leitungswiderstände folgendes Bild:

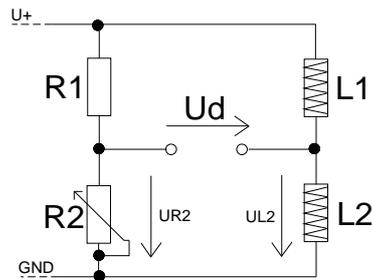


Bild D4: Messbrücke über supraleitende Magnetspulen

Da es sich hier um supraleitende Magnetspulen handelt, ist die anliegende Spannung bei konstantem Magnetfeld gleich null. Auch die hier als U_+ dargestellte Versorgungsspannung ist dann nicht vorhanden. Tritt jedoch nun in einer der beiden Spulen, z.B. in L_2 , ein ohmscher Spannungsfall auf, ergibt sich U_d zu:

$$U_d = U_{R_2} - U_{L_2}. \quad (D4)$$

Da L_1 nach wie vor supraleitend ist und keinen Spannungsfall aufweist, lässt sich U_{R_2} durch U_{L_2} ausdrücken und U_d ergibt sich unter Berücksichtigung von $R_1 \approx R_2$ zu:

$$U_d = U_{L_2} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} - U_{L_2} = -0,5 \cdot U_{L_2}. \quad (D5)$$

Das Vorzeichen spielt hierbei keine Rolle, aber beachtenswert ist, dass die zu detektierende Quenchspannung an einer Halbspule durch die Brückenschaltung auf die Hälfte vermindert wird. Dies gilt es bei der Berechnung der Auslöseschwellen des Quenchdetektors solcher Schaltungen zu berücksichtigen, damit der Supraleiter nicht unzulässig stark belastet wird.

D.3 Messungen an einem supraleitenden Magneten

Gegen Ende dieser Arbeit ergab sich auch die Möglichkeit, Messungen an einem supraleitenden Magneten vorzunehmen. Der erste Magnet, der zur Verfügung stand, erwies sich jedoch schnell als dafür ungeeignet, weil er fest eingebaute, sehr niederohmige, parallele Schutzwiderstände hatte. Für den vorgesehenen Normalbetrieb dieses Magneten mit Gleichstrom, wirken sich diese nicht aus, bei einem Pulsbetrieb jedoch fließt auch über diese Widerstände ein nicht unerheblicher Strom und verfälscht daher die Messergebnisse. Bei dem zweiten Magnetsystem, an dem gemessen werden konnte, wurden dagegen sehr schöne und wichtige Erfahrungen gemacht. Abgesehen von den Widerständen der Zuleitungen im $m\Omega$ -Bereich verhält sich ein supraleitender Magnet wie eine ideale Induktivität. Bei dieser Last und bestimmten Betriebsweisen stellte sich heraus, dass der eingesetzte Leistungsverstärker – ein Vier-Quadranten-Steller, der strom- oder spannungsgeregelt betrieben werden kann – Schwingungen aufweist, weil es ihm nicht gelingt, den Strom geregelt einzuspeisen. Diese verursachten, hochfrequenten Schwingungen führten dann wiederum dazu, die Eingangsstufe des angeschlossenen, aktiven Präzisionspotentiometers zu übersteuern und machten dieses daher nur bedingt brauchbar. Vom Ergebnis her wurden beim Anschluss der Messbrücke ähnliche, wenn auch viel genauere Abgleiche erzielt wie unter D.1. Wenn sich wieder die Gelegenheit ergibt, an diesem Magnet Messungen vorzunehmen, soll auch die in Anhang E dargestellte Kompensationsschaltung auf ihre Funktionsweise bei supraleitenden Magneten getestet werden.

D.4 Zusammenfassung dieser Messreihe

Eine Brückenschaltung lässt sich zur Quenchdetektion gut verwenden, wenn ein Magnet alleine betrieben wird, keine Spannungsinduzierenden Fremdfelder vorhanden sind und die eventuell auch nach dem Abgleich noch vorhandenen Spannungsspitzen aufgrund der dargestellten Unsymmetrien oder Wirbelströmen bei steilen Stromänderungen sich nicht störend auswirken. Diese Brückenschaltung kann allerdings nicht abgeglichen werden, wenn eine dritte, dem Magnet benachbarte Spule eine Stromänderung erfährt. Dann wird nämlich in beiden Magnethälften der Brückenschaltung eine Spannung induziert, die jedoch aufgrund der nicht zu vermeidenden Unsymmetrien der magnetischen Kopplungen unterschiedlich ausfallen und die Brücke auslenken wird. Bei Brückenschaltungen ist es daher sehr wichtig, dass beide Spulen nahezu das gleiche Magnetfeld sehen. Auch bei der Quenchdetektion der EU-LCT-Spule (2.1.1.1.1) handelt es sich prinzipiell um eine Brückenschaltung, die jedoch wegen der Verschaltung als Addierer etwas anders arbeitet (siehe auch Anhang E).

Ein weiterer Nachteil der Brückenschaltung besteht darin, dass ein symmetrisch verlaufender Quench, der in der Mitte des Magnetes, also zwischen den beiden Spulenhälften beginnt, unter Umständen nicht bzw. erst spät erkannt wird, wenn er schon eine gewisse Unsymmetrie erreicht hat. Dies ließe sich z.B. durch die Verwendung von zwei Brückenschaltungen mit leicht versetzten Mittenabgriffen umgehen. Allgemein lässt sich die Brückenschaltung verbessern, wenn man mehr als einen Abgriff zwischen beide Magnetenden legt und so die Unterteilung und auch die magnetische Kopplung feiner gestaltet. Dies würde auch, wie unter Punkt 2 anhand der Tabelle 1 dargelegt, eine Verbesserung der relativen Messgenauigkeit bringen. Dann nähert man sich mit der Ausführung bereits der Variante der Quenchdetektion der EU-LCT-Spule – siehe 2.1.1.1.1. Es ist bei der Einstellung des Quenchdetektors, wie unter D.3 gezeigt, darauf zu achten, dass die Schaltschwelle, bei der dieser ansprechen soll, der Hälfte der zulässigen Quenchspannung betragen muss.

Anhang E

Messreihe zur Untersuchung von Kompensationsschaltungen für die Quenchdetektion

Besitzt der durch ein Quenchdetektionssystem zu schützende Magnet keinen Mittenabgriff, so stellt die hier vorgestellte und untersuchte Schaltungsvariante in Anlehnung an die Schaltung in Bild 9 eine Möglichkeit zur Realisierung der Quenchdetektion dar. Solch eine Schaltung lässt sich prinzipiell auch bei einem bereits gefertigten Magnet anwenden. Bei LCT wurden nachträglich an den Gehäusen der einzelnen Spulen Messwicklungen (auch Pick-Up-Spulen oder Messspulen genannt) zur Aufnahme der Magnetfelder angebracht. Diese Messreihe soll die Funktionsweise einer derartigen Kompensationsschaltung und ihre Tauglichkeit für die Quenchdetektion untersuchen.

Für diese Messreihe standen wieder die aus Anhang D bekannten beiden großen Magnete zur Verfügung – im Folgenden als Magnete bezeichnet. Zusätzlich kam noch ein Paar Helmholtz-Spulen hinzu, die ebenfalls in die Schaltung integriert werden konnten – nachfolgend als Spulen bezeichnet. Die Helmholtzspulen waren mit ihrer Induktivität von $0,2\text{H}$ und einem Widerstand von 16Ω in ihren elektrischen Eigenschaften etwas kleiner als die beiden Magnete (siehe Anhang D).

Aus Symmetriegründen ist es sinnvoll, sowohl die Magnete, als auch die dafür vorgesehenen Messspulen jeweils ähnlich auszuführen. Es ergab sich, dass die Magnete in die Helmholtz-Spulen hineinpassten, sodass die beiden Magnete als solche und die Helmholtz-Spulen als Messwicklungen verwendet werden konnten. Bild E1 zeigt den so entstandenen Aufbau.

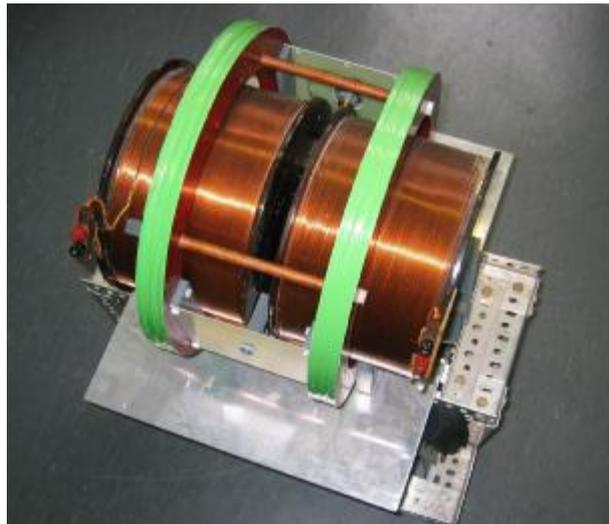


Bild E1: Aufbau der Magnete mit den Helmholtzspulen als Messwicklungen

E.1 Kompensationsschaltung in Anlehnung an das LCT-Quenchdetektionssystem

Hat man im Gegensatz zu supraleitenden Spulen einen Magnet mit ohmschem Widerstand, muss auch dieser, bereits im normalen Betrieb auftretende Widerstand kompensiert werden, um anschließend noch auf einen zusätzlich durch einen Quench verursachten Widerstand schließen zu können. Dies kann z.B. durch eine komponentenweise Kompensation erfolgen. Dazu muss die Schaltung aus Bild 5 zur folgenden Topologie erweitert werden, deren Funktionsweise und Dimensionierung kurz erklärt und das Betriebsverhalten bei verschiedenen Einflüssen geprüft werden soll.

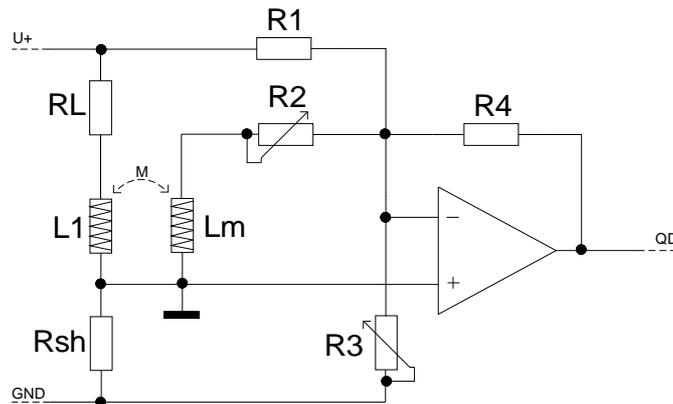


Bild E2: Schaltung für die komponentenweise Kompensation ohmscher und induktiver Spannungsanteile über dem Magnet

Der durch den Magnet L_1 fließende Strom verursacht sowohl an dessen Widerstand R_L , als auch an R_{sh} einen ohmschen Spannungsfall. Da der nicht invertierende Eingang des Operationsverstärkers an R_{sh} angeschlossen ist, nimmt er das durch den Spannungsfall dort aufgeprägte Potential an. Es muss dann durch die Schaltung gewährleistet werden, dass auch am invertierenden Eingang für ohmsche Komponenten das gleiche Potential aufgeprägt wird. Dies wird durch den Spannungsteiler über R_1 und das Potentiometer R_3 erreicht, über das somit der Abgleich der ohmschen Komponente des Magneten vorgenommen wird.

Der Abgleich der induktiven Komponente der Spannung über dem Magnet erfolgt bei dieser Schaltung durch die verwendete Messwicklung L_m , die mit L_1 magnetisch gekoppelt ist. Dazu kann am Potentiometer R_2 der durch L_m in die Schaltung eingeprägte Strom so eingestellt werden, dass dieser vom Betrag genau dem Strom, verursacht durch induktive Spannungen an L_1 und deren Abfall an den Widerständen R_L und R_1 , aber mit entgegengesetztem Vorzeichen entspricht. Liegen die beiden Spulen L_1 und L_m im gleichen Magnetfeld, bekommen sie bei dessen Änderung auch zueinander proportionale Spannungen induziert. Diese heben sich dann in der abgeglichenen Kompensationsschaltung gegenseitig auf und es verbleibt als Eingangsspannung des Verstärkers lediglich eine z.B. durch einen Quench verursachte, zusätzliche ohmsche Spannung des Magneten.

E.2 Dimensionierung der Kompensationsschaltung

Die Schaltung in Bild E.2 gilt es so zu dimensionieren, dass die durch die auftretenden Spannungen am Magneten L_1 und an der Messwicklung L_m getriebenen Ströme erstens gleich groß sind, sich zweitens im normalen Betrieb jeweils gegenseitig aufheben, damit der Operationsverstärker abgeglichen bleibt und drittens zusammen den maximal möglichen Ausgangsstrom des Operationsverstärkers nicht übersteigen. Zur Dimensionierung der Bauteile sind daher einige Messgrößen, wie das Verhältnis der induzierten Spannungen am Magnet und an der Messwicklung, zu erfassen.

Hierzu wurde eine Rechteckspannung der Amplitude 20V an den Magnet gelegt und die induzierte Spannung in dessen Messwicklung – der darüberliegenden Hälfte der Helmholtz-Spule – aufgezeichnet. Bild E3 zeigt die Verläufe von Strom und Spannung des gepulsten Magneten, sowie die induzierte Spannung in der Messwicklung. Erwartungsgemäß wird bei einer Stromänderung des gepulsten Magneten in dessen Pick-Up-Spule eine dazu proportionale Spannung induziert. Unter E.4.3.2 wird eine Möglichkeit vorgestellt, die Schaltung auch durch Pulsen mit sinusförmigen Spannungen zu dimensionieren.

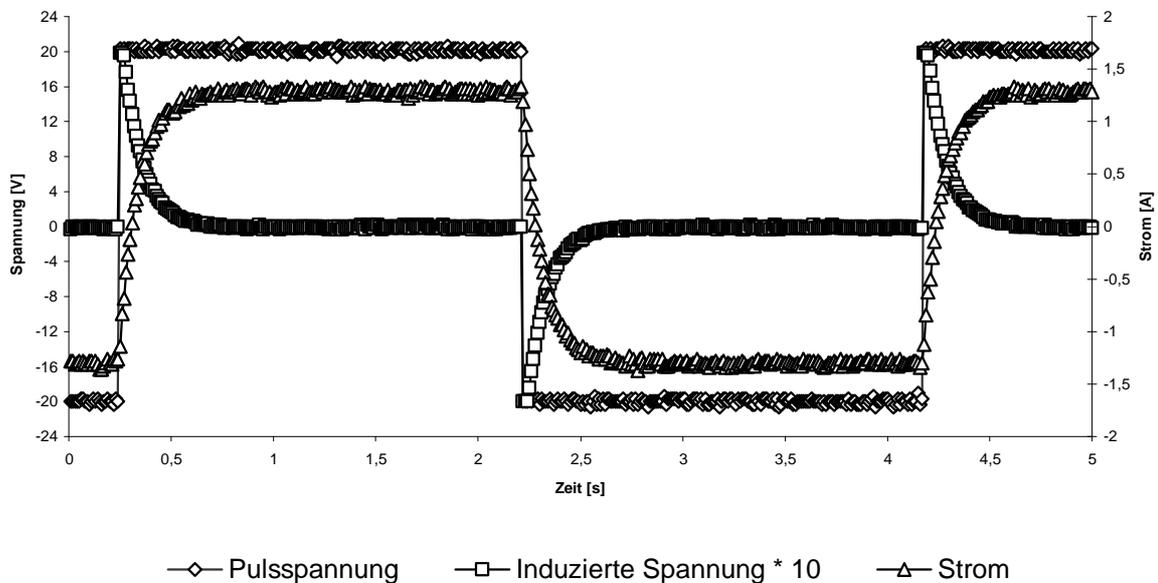


Bild E3: Pulsen eines Magneten und induzierte Spannung an dessen Messwicklung

In Bezug auf die Schaltung in Bild E2 gilt:

$$\frac{R_{sh}}{R_L} = \frac{R_3}{R_1}$$

$$\Leftrightarrow R_3 = \frac{R_{sh}}{R_L} \cdot R_1. \quad (E1)$$

R_{sh} und R_L sind hierbei bekannt. Aus der Forderung nach dem maximalen Strom des Operationsverstärkers (ca. 5mA) erhält man für

$$i_{strang,max} = 1mA. \quad (E2)$$

Beim Sprung der Eingangsspannung beträgt die an der Induktivität des Magneten auftretende Spannung die doppelte Amplitude der Rechteckspannung, also hier 40V. Daraus ergibt sich unter Vernachlässigung des Widerstandes des Magneten

$$R_1 = \frac{40V}{1mA} = 40k\Omega . \quad (E3)$$

Hiermit und mit dem gewählten Widerstand

$$R_{sh} = 1\Omega \quad (E4)$$

lässt sich R_3 zu

$$R_3 = \frac{1\Omega}{22\Omega} \cdot 40k\Omega = 1,8k\Omega \quad (E5)$$

bestimmen. R_4 muss so gewählt werden, dass bei maximalem Strom der Operationsverstärker noch nicht übersteuert wird:

$$R_4 \leq \frac{U_{a,max}}{i_{ges}} = \frac{15V}{2mA} = 7,5k\Omega . \quad (E6)$$

Zur Dimensionierung von R_2 ist es wichtig zu wissen, wie hoch die Spannung der Messwicklung ist, wenn der Magnet gepulst wird. In Bild E3 ist zu erkennen, dass in diesem Moment die induzierte Spannung an der Messwicklung gerade 2V beträgt. Daraus ergibt sich R_2 zu:

$$R_2 = \frac{2V}{1mA} = 2k\Omega . \quad (E7)$$

E.3 Abgleich der Schaltung

Den Verlauf der Ausgangsspannung des Operationsverstärkers, wie sie also auch zur Quenchdetektion einer zu schützenden supraleitenden Magnetspule (hier mit ohmschem Widerstand) verwendet werden könnte, geben die folgenden Bilder für verschiedene Abgleicherfolge wieder.

Bild E4 zeigt die Ausgangsspannung für einen unabgeglichenen Zustand, wenn der Magnet mit der aus E.2 bekannten Rechteckspannung gepulst wird. Man erkennt deren induktiven Anteil an den Spannungsspitzen beim jeweiligen Sprung der hier nicht dargestellten Eingangsspannung, sowie den verbleibenden ohmschen Anteil, zu sehen am Restwert der Spannung nach Ende des Einschwingvorganges. Bei dieser Schaltung lassen sich, wie bereits erläutert, der ohmsche und der induktive Anteil getrennt abgleichen. Bild E5 zeigt daher die Ausgangsspannung, wenn lediglich der ohmsche Anteil abgeglichen ist, Bild E6 dagegen, wenn nur induktiv abgeglichen wurde. Auf eine Darstellung des gänzlich abgeglichenen Zustandes wird an dieser Stelle verzichtet. In den Darstellungen ist zu erkennen, dass bereits mit dieser, nur grob dimensionierten Schaltung eine erhebliche Empfindlichkeit für den Abgleich erreicht werden konnte. Für die Praxis ließen sich hier Ansprechwerte (Schalt- oder Triggerschwellen) des der Kompensationsschaltung nachgeschalteten Quenchdetektors, unterhalb von 50mV problemlos realisieren.

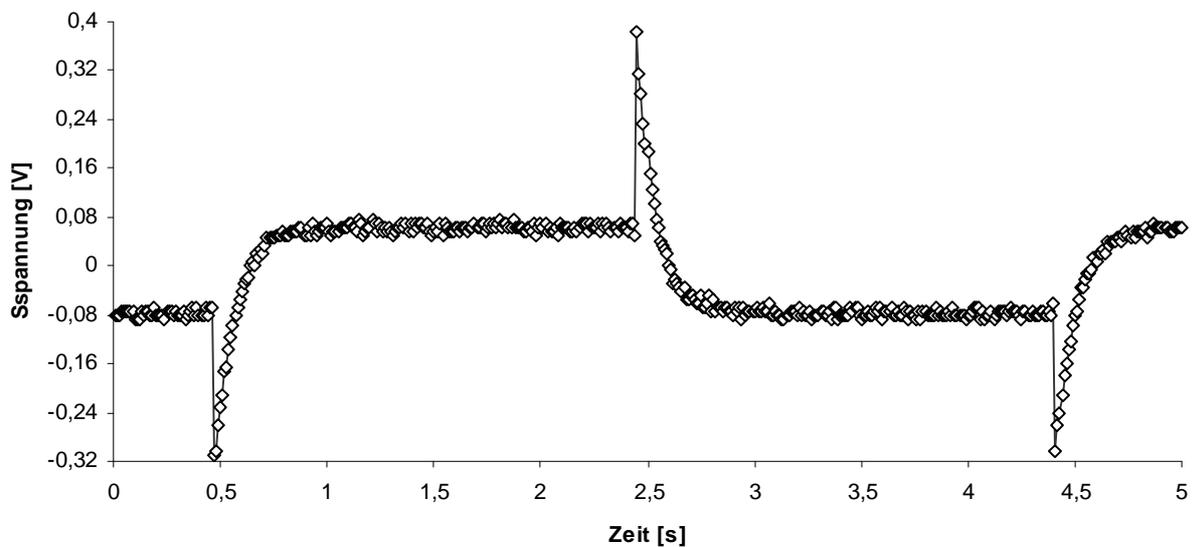


Bild E4: Ausgangsspannung der nicht abgeglichenen Kompensationsschaltung

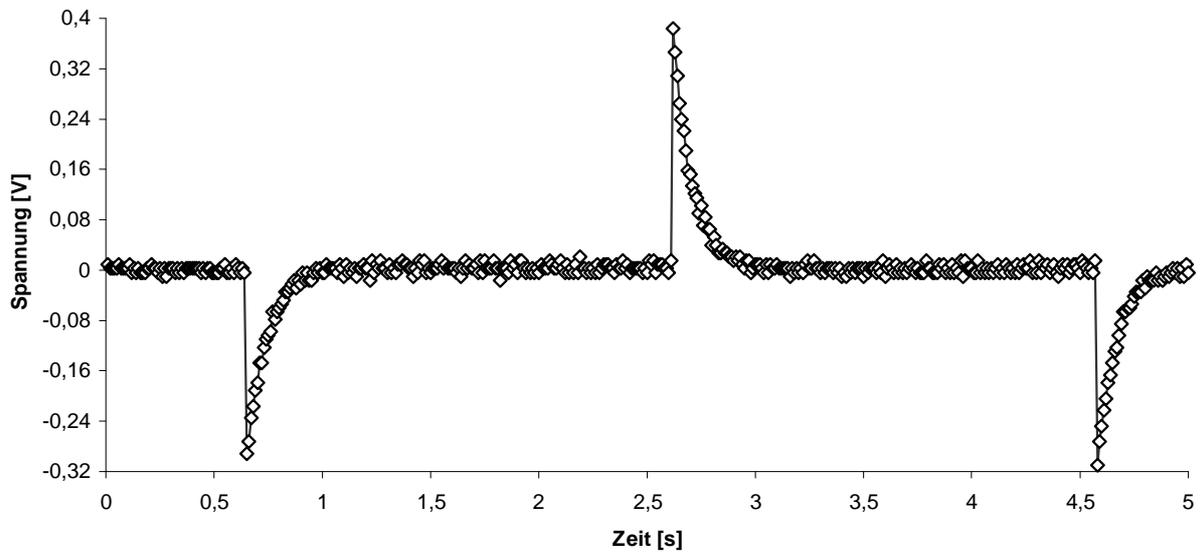


Bild E5: Ausgangsspannung der nur ohmsch abgeglichenen Kompensationsschaltung

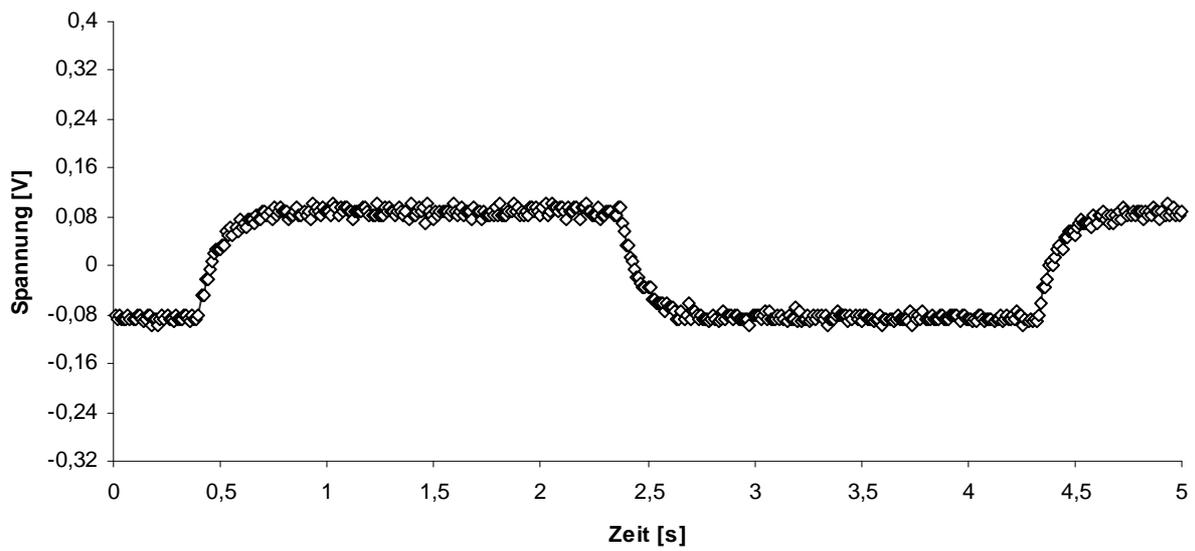


Bild E6: Ausgangsspannung der nur induktiv abgeglichenen Kompensationsschaltung

E.4 Untersuchung verschiedener Einflüsse auf die Kompensationsschaltung

E.4.1 Simulation eines Quench

In diesem Versuch wurde ein Quench des zu schützenden Magneten nachgebildet. Dazu wurde an den Magnet und die abgegliche Kompensationsschaltung eine Gleichspannung von 20V angelegt. In Reihe zum Magneten war ein Widerstand von $R = 220\text{m}\Omega$ geschaltet, der über einen Schalter kurzgeschlossen werden konnte. Im Bild E7 wurde dieser Schalter zum Zeitpunkt $t = 2,4\text{s}$ geöffnet und der Widerstand somit in den Stromkreis gelegt. Der sich dadurch am Widerstand ergebende Spannungsfall von

$$U_R = R \cdot i \approx R \cdot \frac{U}{R_L} = 220\text{m}\Omega \cdot \frac{20\text{V}}{20\Omega} = 220\text{mV} \quad (\text{E8})$$

wurde durch die Schaltung zu

$$U_a = U_R \cdot \frac{R_N}{R_1} = 220\text{mV} \cdot \frac{7,5\text{k}\Omega}{40\text{k}\Omega} \approx 40\text{mV} \quad (\text{E9})$$

erwartungsgemäß verstärkt.

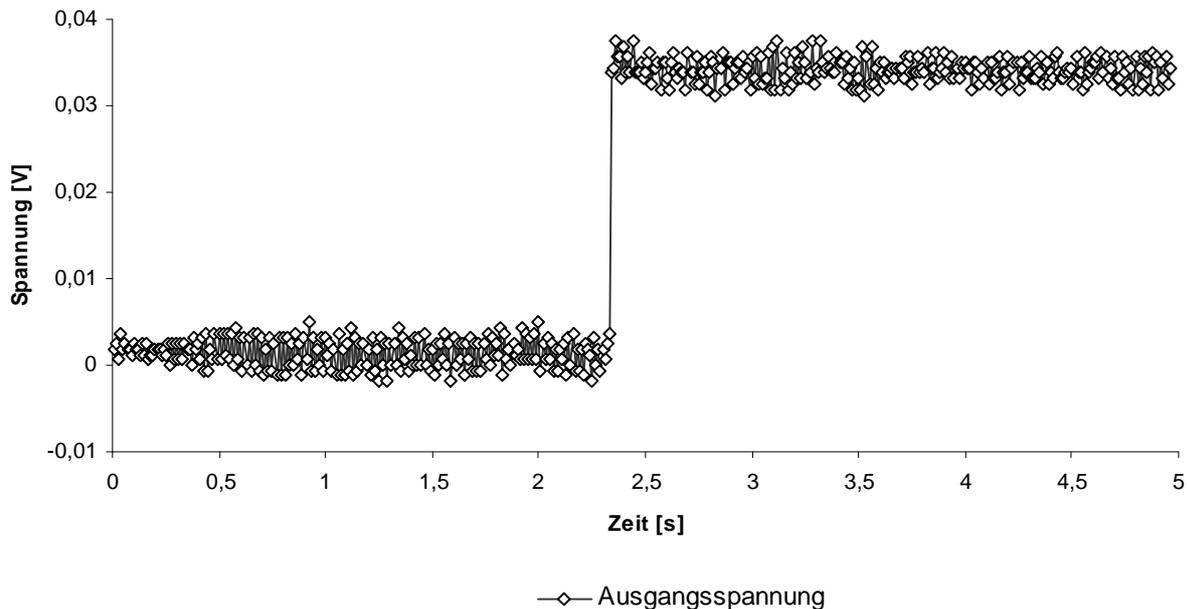


Bild E7: Ausgangsspannung der Kompensationsspannung bei Simulation eines Quench

Bei einem am Ausgang der Kompensationsschaltung angeschlossenen Quenchdetektor mit einer Schaltschwelle von 10mV ließe sich also bei diesem Aufbau ein durch einen Quench verursachter zusätzlicher Widerstand von ca. 50mΩ detektieren.

E.4.2 Elektrisch leitendes Material in der Nähe des Magneten

In den folgenden Messungen wurde der Einfluss von elektrisch leitenden Materialien in der Umgebung des Magneten untersucht. Supraleitende Magnete sind meist in massiven, nichtmagnetischen Stahl eingebettet, um die auftretenden mechanischen Kräfte aufzufangen oder den Kryostaten für die thermische Isolation zu bilden. Bei den Versuchen wurde dieses Strukturmaterial durch eine Aluminiumplatte, die zwischen die beiden Magnete (Aufbau nach Bild E1) gebracht wurde, nachgebildet. Bild E8 zeigt den Verlauf der Ausgangsspannung, wenn man nach erfolgtem Abgleich der Kompensationsschaltung und Pulsbetrieb des betrachteten Magneten mit der bekannten Rechteckspannung die Aluminiumplatte zwischen die Magnete bringt. Deutlich sind die Auslenkungen beim Sprung der hier nicht dargestellten Eingangsspannung zu erkennen, die auch bei erneutem Abgleich nicht ganz verschwinden, wie Bild E9 zeigt.

Da Aluminium ein paramagnetischer Stoff und außerdem ein guter elektrischer Leiter ist, sind die verursachten Spannungsspitzen in Bild E8 nicht auf magnetische Einflüsse dieses Materials, sondern auf dessen elektrische Eigenschaften zurückzuführen. Es lässt darauf schließen, dass es sich bei den beobachteten Effekten um in der Platte induzierte Wirbelströme handelt, die durch die Stromänderungen des Magnets (hier für ca. 0,1s, da – im Gegensatz zu Gleichung (D2) – nur ein Magnet gepulst wurde) angeworfen werden. Diese bringen die Schaltung in Unsymmetrie, da sie sich unterschiedlich auf den Magnet und die Messwicklung auswirken.

Oft müssen aufgrund dieser Effekte die Schaltschwellen der Quenchedektoren und der als Filter dienenden Zeitglieder entsprechend hoch eingestellt werden, damit diese kurzzeitigen Ereignisse ausgeblendet werden.

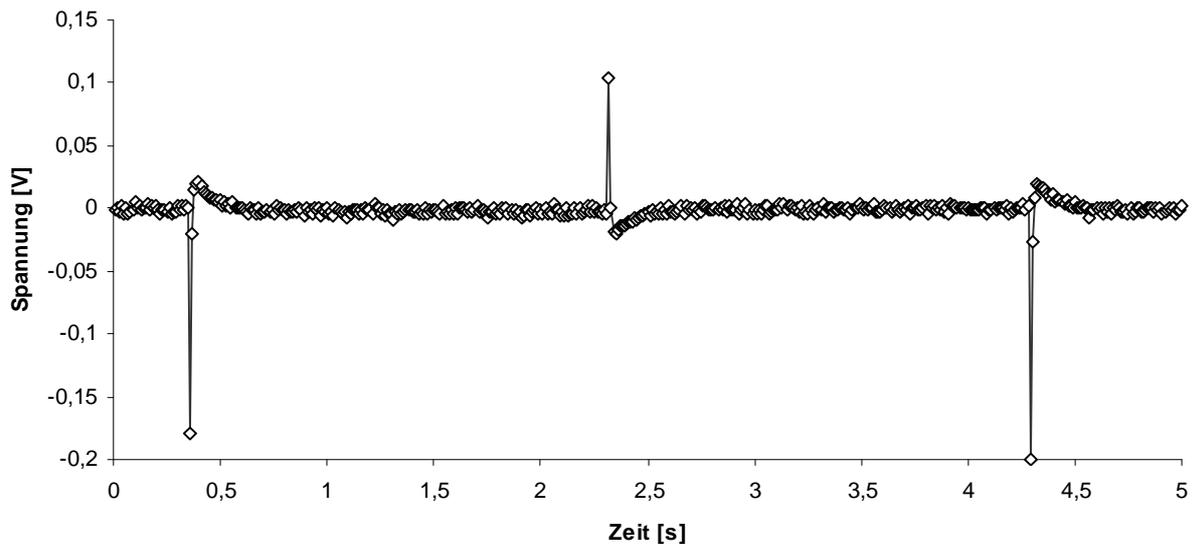


Bild E8: Ausgangsspannung der abgeglichenen Kompensationsschaltung nach Einbringen einer Aluminiumplatte zwischen die Magnete

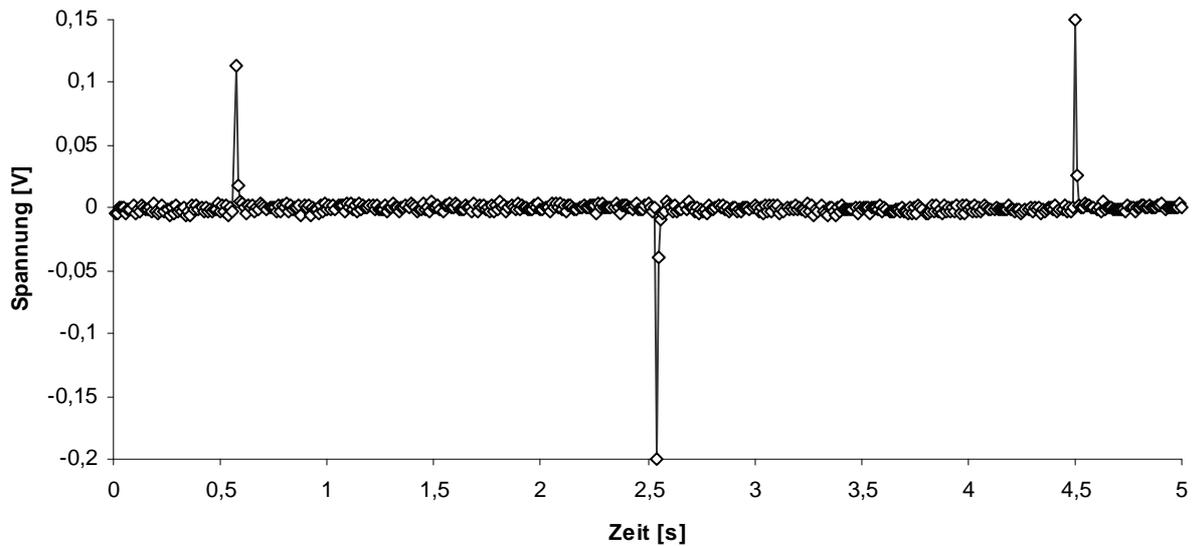


Bild E9: Ausgangsspannung der Kompensationsschaltung mit eingebrachter Aluminiumplatte zwischen den Magneten und erneutem Abgleich

E.4.3 Pulsen einer benachbarten Magnetspule

Wenn ein Magnet, wie es bei einzelnen Tests oft der Fall ist, alleine betrieben wird und von störenden Magnetfeldern fern ist, lässt sich die angegebene Kompensationsschaltung, wie die meisten der bisher vorgestellten Quenchdetektoren, sehr erfolgreich anwenden, wie die vorherigen Punkte zeigen.

Bei Großanlagen, insbesondere in der Kernfusion oder bei Teilchenbeschleunigern in der Physik, werden allerdings mehrere Magnete gleichzeitig betrieben und jeder für sich gespeist. Es kann also vorkommen, dass ein Magnet eine Stromänderung erfährt und so in benachbarten Magnetspulen Spannungen induziert. Um das Verhalten der Kompensationsschaltung beim Pulsen eines Nachbarmagneten genauer untersuchen zu können, wurden die folgenden Versuche durchgeführt.

E.4.3.1 Verwendung der bekannten Kompensationsschaltung

Wie sich die Stromänderung eines Nachbarmagneten auf die aus E.1 bekannte und bereits abgegliche Kompensationsschaltung auswirkt, zeigt Bild E10. Der an der Kompensationsschaltung angeschlossene Magnet wurde mit einer konstanten Spannung versorgt, um in der Schaltung eine definierte Spannungsaufteilung zu erhalten. Als Nachbarmagnet fungierte der zweite Magnet, der mit der Rechteckspannung gepulst wurde. Der hohe Ausschlag der Ausgangsspannung der Schaltung ist darauf zurückzuführen, dass die magnetische Kopplung zwischen Nachbarmagnet und betrachtetem Magnet nicht die gleiche ist, wie zwischen Nachbarmagnet und Messwicklung des betrachteten Magneten. Deshalb passen die jeweils induzierten Spannungen nicht zueinander und die Schaltung kann die induktiven Anteile der Spannung des Magneten nicht mehr kompensieren. Auch ein erneuter Abgleichversuch der Schaltung brachte keine zufrieden stellenden Ergebnisse.

In Bild E10 lässt sich erkennen, dass, wenn der Strom im Nachbarmagnet konstant ist, die Schaltung wieder abgeglichen und die Ausgangsspannung nahezu null ist. Strom- und Spannungsverlauf des Nachbarmagneten lassen sich mit den in Bild E3 dargestellten Verläufen vergleichen.

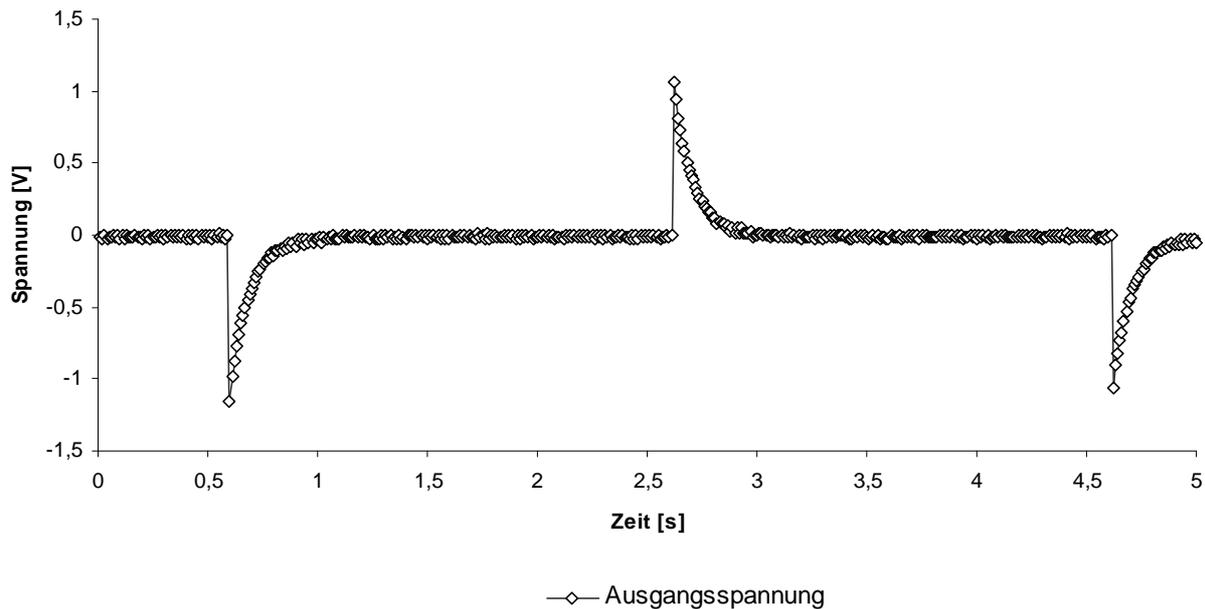


Bild E10: Ausgangsspannung der Kompensationsschaltung beim Pulsen eines benachbarten Magneten

Wenn man den Nachbarmagnet mit einer Spannung pulst, die nicht so steil verläuft wie im betrachteten Fall, sind die Einflüsse auf die Kompensationsschaltung dagegen nicht so groß. Im Versuch wurde deshalb an den Nachbarmagnet zur Probe auch eine dreieckförmige Spannung mit der Amplitude von 20V und einer Frequenz von 250mHz angelegt. Der Stromverlauf stellte sich ebenfalls dreieckförmig mit einer Amplitude von 1A ein. Die Auslenkung der Ausgangsspannung an der Kompensationsschaltung hatte einen ähnlichen Verlauf, wie in Bild E6 nach einem induktiven, nicht aber ohmschen Abgleich mit einer Amplitude von rund 50mV – bei konstanter Stromänderung ist, wie in Anhang C dargelegt, die induzierte Spannung und somit auch die Auswirkung auf die Kompensationsschaltung konstant. Auf eine graphische Darstellung der Ausgangsspannung soll hier verzichtet werden.

Bei LCT traten ähnliche Probleme beim Pulsen von Nachbarmagneten auf, weshalb damals die verwendete Schaltung erweitert und Messsignale von allen benachbarten Messwicklungen verarbeitet wurden. Diese Schaltung wird im folgenden Versuch untersucht.

E.4.3.2 Erweiterung der Kompensationsschaltung

Damit auch das Pulsen einer benachbarten Magnetspule die Kompensationsschaltung nicht zum Ausschlag bringt, muss analog zur Vorgehensweise bei LCT auch das Feld dieser gepulsten Spule erfasst und das erhaltene Signal der Kompensationsschaltung des zu schützenden Magneten zugeführt werden. Damit können theoretisch Unsymmetrien der magnetischen Kopplung zwischen dem Nachbarmagnet und dem Magneten bzw. dessen Messwicklung kompensiert werden. Im Folgenden soll die Berechnung der Verstärkungsfaktoren, mit denen die Signale der Messwicklung des Magneten bzw. der Messwicklung des Nachbarmagneten bewertet werden, aufgezeigt werden. Diese Berechnung wurde, wie unter 2.1.1.1.2 erwähnt, bei LCT iterativ und computergestützt ausgeführt. Das betrachtete Beispiel bezieht sich auf die Anordnung mit zwei Magneten und den dazugehörigen Messwicklungen [16].

In Anlehnung an Gleichung (2.1) beträgt die Spannung am zu schützenden Magneten

$$V_1 = L_1 \cdot \dot{i}_1 + M_{L_1, L_2} \cdot \dot{i}_2, \quad (\text{E10})$$

mit L_1 = Eigeninduktivität des Magneten, M_{L_1, L_2} = Gegeninduktivität der beiden benachbarten Magnete L_1 und L_2 , i_1 = Strom durch den Magneten, i_2 = Strom durch den Nachbarmagneten. Die Messwicklungen befinden sich ebenfalls im Feld der Magnete, können jedoch nicht zu einer Feldänderung und entsprechenden Induktionsspannungen beitragen, weil sie einen zu vernachlässigenden Strom tragen. Da die gemeinsame Gegeninduktivität zweier Luftspulen immer symmetrisch ist, lässt sich für den Nachbarmagneten angeben:

$$V_2 = M_{L_1, L_2} \cdot \dot{i}_1 + L_2 \cdot \dot{i}_2. \quad (\text{E11})$$

Für die beiden Messwicklungen lassen sich folgende Gleichungen aufstellen:

$$U_1 = M_{L_1, L_{m1}} \cdot \dot{i}_1 + M_{L_2, L_{m1}} \cdot \dot{i}_2 \quad (\text{E12})$$

$$U_2 = M_{L_1, L_{m2}} \cdot \dot{i}_1 + M_{L_2, L_{m2}} \cdot \dot{i}_2, \quad (\text{E13})$$

mit L_{m1} = Messwicklung des Magneten und L_{m2} = Messwicklung des Nachbarmagneten.

Die Gleichungen (E10) und (E11), sowie (E12) und (E13) lassen sich nun als Gleichungssysteme auffassen, durch Matrizen beschreiben und mit Hilfe der Matrizenrechnung [17] auswerten.

$$(V) = (L) \cdot (\dot{i}) \quad (\text{E14})$$

$$(U) = (M) \cdot (\dot{i}), \quad (\text{E15})$$

mit

$$(V) = \begin{pmatrix} V_1 \\ V_2 \end{pmatrix}, (L) = \begin{pmatrix} L_1 & M_{L_1, L_2} \\ M_{L_1, L_2} & L_2 \end{pmatrix}, (\dot{i}) = \begin{pmatrix} \dot{i}_1 \\ \dot{i}_2 \end{pmatrix}$$

$$(U) = \begin{pmatrix} U_1 \\ U_2 \end{pmatrix}, (M) = \begin{pmatrix} M_{L_1, L_{m1}} & M_{L_2, L_{m1}} \\ M_{L_1, L_{m2}} & M_{L_2, L_{m2}} \end{pmatrix}.$$

Wird Gleichung (E15) umgeformt und in Gleichung (E14) eingesetzt, ergibt das

$$(V) = (L) \cdot (M)^{-1} \cdot (U). \quad (\text{E16})$$

Hier erkennt man, dass im Produkt der Matrizen $(L) \cdot (M)^{-1}$ die gesuchten Verstärkungsfaktoren für die Bewertung der an den Messwicklungen induzierten Spannungen (U) zu finden sind.

Ist

$$(M)^{-1} = \begin{pmatrix} M^{-1}_{1,1} & M^{-1}_{1,2} \\ M^{-1}_{2,1} & M^{-1}_{2,2} \end{pmatrix} \quad (\text{E17})$$

die inverse Matrix zu (M) , so gilt für das Matrix-Produkt aus $(L) \cdot (M)^{-1}$

$$(L) \cdot (M)^{-1} = \begin{pmatrix} L_1 \cdot M^{-1}_{1,1} + M_{L1,L2} \cdot M^{-1}_{2,1} & L_1 \cdot M^{-1}_{1,2} + M_{L1,L2} \cdot M^{-1}_{2,2} \\ M_{L1,L2} \cdot M^{-1}_{1,1} + L_2 \cdot M^{-1}_{2,1} & M_{L1,L2} \cdot M^{-1}_{1,2} + L_2 \cdot M^{-1}_{2,2} \end{pmatrix} \quad (\text{E18})$$

Qualitativ ergibt sich dann anhand Gleichung (E16) für den betrachteten Magnet:

$$\begin{aligned} V_1 &= a \cdot U_1 + b \cdot U_2, \\ \Leftrightarrow V_1 - a \cdot U_1 - b \cdot U_2 &= 0 \end{aligned} \quad (\text{E19})$$

mit

$$\begin{aligned} a &= L_1 \cdot M^{-1}_{1,1} + M_{L1,L2} \cdot M^{-1}_{2,1}, \\ b &= L_1 \cdot M^{-1}_{1,2} + M_{L1,L2} \cdot M^{-1}_{2,2}. \end{aligned}$$

Fallen die ermittelten Verstärkungsfaktoren a respektive b negativ aus, so ist die Spannung der jeweiligen Messwicklung der Kompensationsschaltung positiv, d.h. entsprechend der gemessenen Richtung, zuzuführen, für positive Verstärkungsfaktoren umgekehrt, damit sich alle Spannungen am Addierer der Kompensationsschaltung gegenseitig aufheben und Gleichung (E19) erfüllt wird. Nach der Belegung der Matrizen kann also anhand dieser Gleichung direkt auf die an der Kompensationsschaltung einzustellende Verstärkung geschlossen werden.

Als Kompensationsschaltung wird die aus Bild E2 bekannte, jedoch um einen Summationszweig erweiterte Schaltung verwendet, sodass auch das Signal der Messwicklung des zweiten Magneten additiv verarbeitet werden kann. Bei einer Addierschaltung beträgt die vorhandene Verstärkung für die Eingangsspannung U_n

$$F_N = \frac{R_G}{R_n} \quad (\text{E20})$$

mit R_G = Widerstand im Gegenkopplungszweig des Operationsverstärkers, R_n = Eingangswiderstand für die Spannung U_n . Nachdem R_G entsprechend der Vorgehensweise in E.2 dimensioniert wurde, lässt sich R_n anhand der in Gleichung (E19) ermittelten Verstärkung bestimmen.

Die Elemente der Matrizen (L) und (M) lassen sich messtechnisch wie folgt bestimmen. An einer Spule gilt, in Anlehnung an Gleichung (2.1), vereinfacht:

$$U = L \cdot \frac{di}{dt} + M \frac{di_2}{dt} . \quad (\text{E21})$$

Lässt man aber in der zu betrachtenden Spule mit der Induktivität L keinen Strom fließen, so verbleibt in der dort anliegenden Spannung U lediglich der durch die Stromänderung benachbarter Spulen mit der Gegeninduktivität M induzierte Anteil. Um die Gegeninduktivität zwischen zwei Spulen zu bestimmen, genügt es, eine davon zu pulsen und die an der anderen Spule auftretende Spannung zu erfassen. Zweckmäßig ist die Wahl von sinusförmigen Größen, da sich dann die komplexe Rechnung anwenden lässt und sich die Amplitudenwerte für die Berechnung sehr genau ablesen lassen:

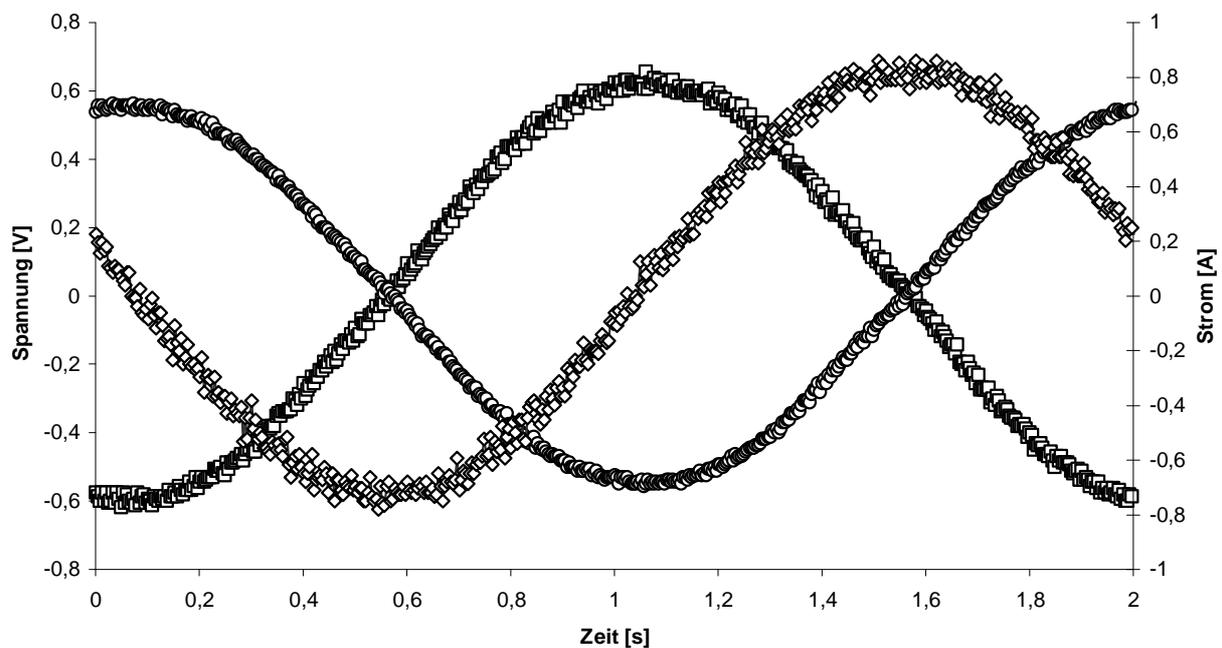
$$U = M \cdot \frac{di_2}{dt} \rightarrow \underline{U} = j \cdot \omega \cdot M \cdot \underline{i}_2 . \quad (\text{E22})$$

Da auch die Phasendrehung, die sich in Gleichung (E22) durch die Multiplikation mit der komplexen Einheit j ergibt, für diese Betrachtung keine Rolle spielt, lässt sich die gesuchte Gegeninduktivität wie folgt angeben:

$$M = \frac{\hat{U}}{\omega \cdot \hat{i}_2} = \frac{U_{eff}}{\omega \cdot I_{2,eff}} . \quad (\text{E23})$$

Zur Ermittlung der Gegeninduktivitäten im betrachteten Versuchsaufbau wurde an die Magnete jeweils eine sinusförmige Spannung der Amplitude 20V mit der Frequenz von 100Hz und 0,5Hz und vergleichsweise auch eine Rechteckspannung der Amplitude 20V und der Frequenz 100Hz angelegt. Es konnten dabei, wie erwartet, die gleichen Ergebnisse erzielt werden. Für die weitere Auswertung ist jedoch die sinusförmige Spannung besser geeignet.

Nun muss aber noch auf die Polung der Spannungen U_1 respektive U_2 geachtet werden. Es könnte sich nämlich ergeben, dass aufgrund der geometrischen Anordnung, bzw. des Wickelsinnes der Messspulen, bereits eine in Bezug auf die Spannung an der Induktivität des Magneten negative Spannungsinduktion stattfindet und die Spannungen der Messwicklungen entsprechend ihrer positiven Zählrichtung zugeführt werden können, um trotzdem eine Subtraktion zu bewirken. Durch die Verwendung von sinusförmigen Spannungen zur Ermittlung der Gegeninduktivitäten kann auch auf das Vorzeichen der induzierten Spannungen geschlossen werden. Entscheidend für die Bestimmung der Vorzeichen der an den einzelnen Wicklungen induzierten Spannung ist die Spannung an der Induktivität des gepulsten Magneten. Diese ist, ungeachtet der Spannung an diesem Widerstand, positiv, solange die Stromänderung positiv ist und umgekehrt. Durch eine sinusförmige Speisung des Magneten lassen sich also die Bezugsrichtungen der Spannungen festlegen. Bild E11 zeigt den hier gemessenen Verlauf. Dargestellt ist zum einen der Strom im gepulsten Magneten, zum anderen die Spannungsverläufe an den Messwicklungen der Magneten. Es sei jedoch erwähnt, dass diese Signale bereits nach der geometrisch neuen Anordnung der Magnete (siehe E.4.3.3, Bild E15) aufgenommen wurden – deshalb ist auch das erhaltene Signal der Messwicklung des Magneten um den Faktor 20 größer, als das der Messwicklung des Nachbarmagneten. Für die prinzipielle Darstellung in dieser Abhandlung ergibt sich jedoch kein Unterschied.



- Spannung an Messwicklung des Nachbarmagneten * 20
- Spannung an Messwicklung des gepulsten Magneten
- ◇— Strom des gepulsten Magneten

Bild E11: Ermittlung des Vorzeichens der induzierten Spannungen für die Kompensationsschaltung

Die induktive Spannung V am zu schützenden Magnet lässt sich also theoretisch durch die beiden Spannungen U_1 und U_2 an den Messwicklungen komplett kompensieren. Dass dies jedoch praktisch nur eingeschränkt gilt, werden die folgenden Untersuchungen zeigen.

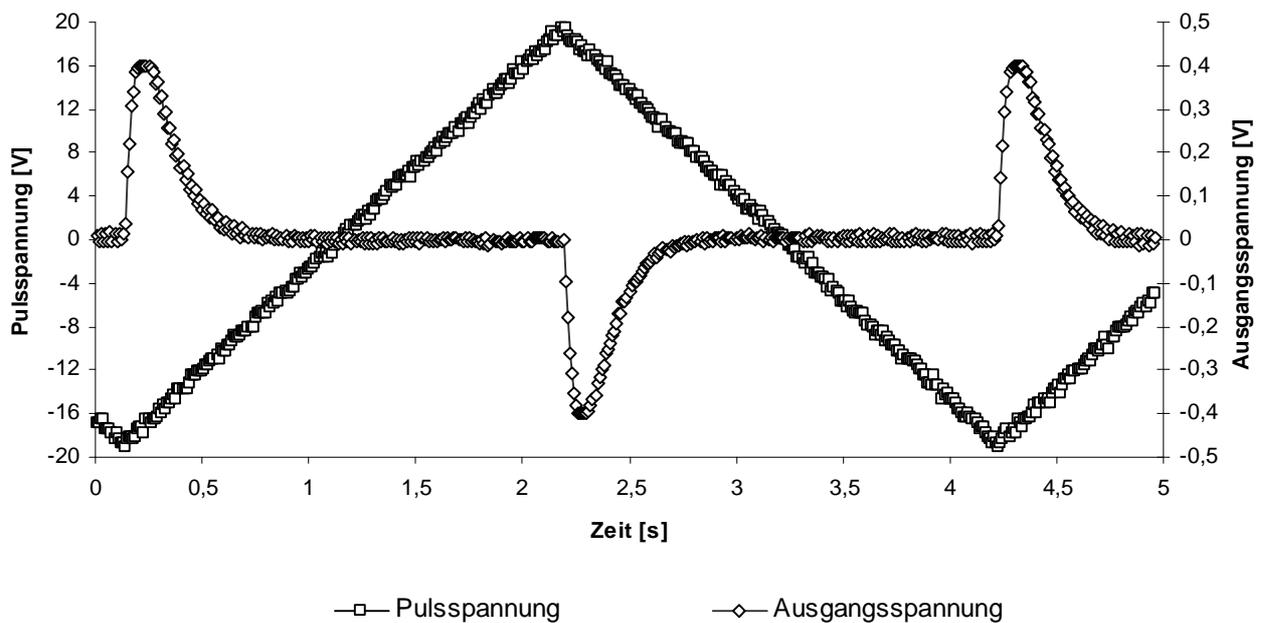


Bild E12: Ausgangsspannung der abgeglichenen Kompensationsschaltung und dreieckförmigem Pulsen des Nachbarmagneten

Bild E12 zeigt die Ausgangsspannung der Kompensationsschaltung bei Betrieb des Nachbarmagneten in der Anordnung nach Bild E1 mit der dargestellten Dreiecksspannung und bestmöglicher Kompensation. Der kompensierte Magnet wurde dabei wieder an einer Gleichspannung betrieben, um die Kompensationsschaltung definiert vorzuprägen. Man sieht an diesem Ergebnis und im Vergleich mit Bild E10, dass die erweiterte Schaltung für diese Anordnung keine nennenswerte Verbesserung darstellt. Der Verlauf der Ausgangsspannung in Bild E12 lässt auf die Ausbildung von Wirbelströmen bei einer Änderung des Stromverlaufes im Nachbarmagneten schließen. Dass diese Wirbelströme sich hier besonders bemerkbar machen, ist darauf zurückzuführen, dass sie sich unterschiedlich in die einzelnen Spulen einkoppeln und in der Kompensationsschaltung entsprechend unsymmetrisch verstärkt werden. Deutlich erkennt man dies an der im Vergleich zu Bild E8 flach verlaufenden Spitze.

Für die weiteren Messungen wurde daher eine sinusförmige Pulsspannung der Amplitude 20V mit der Frequenz 0,5Hz gewählt, um die Ausbildung von Wirbelströmen zu mindern. Den Verlauf der Ausgangsspannung der Kompensationsschaltung, wenn der Magnet selbst gepulst und die Schaltung bestmöglich abgeglichen wurde, zeigt Bild E13.

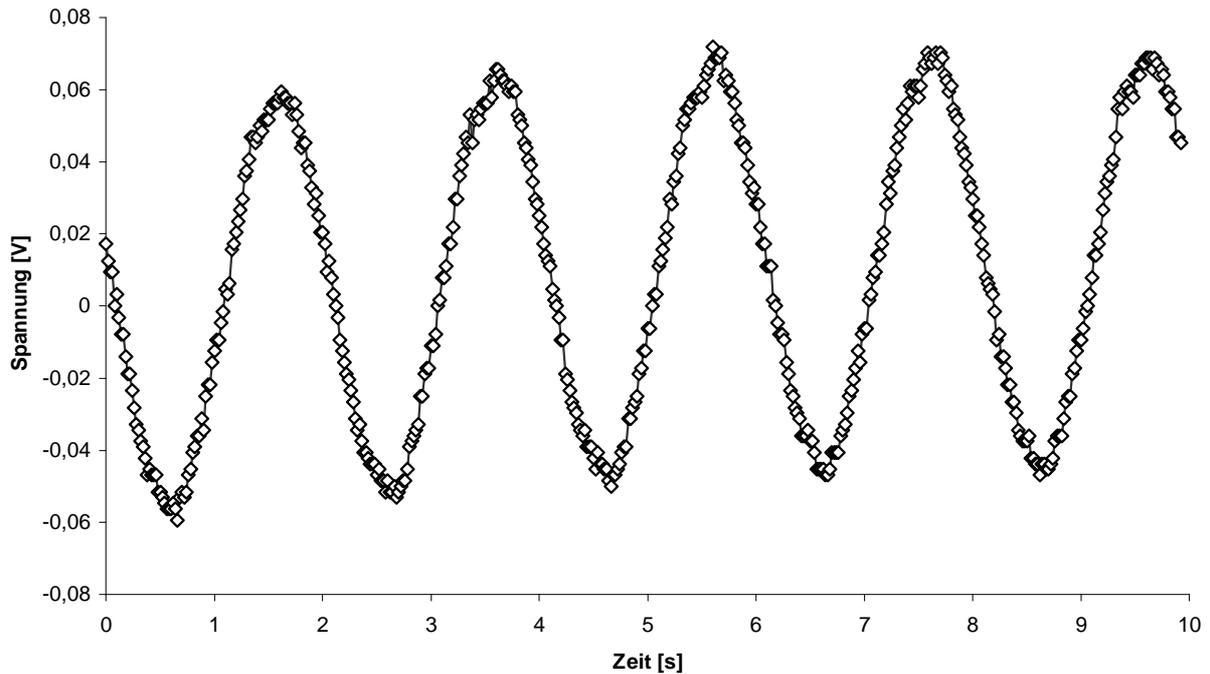


Bild E13: Ausgangsspannung der Kompensationsschaltung nach Abgleich unter Pulsen des Magneten

Wird mit der so gefundenen Einstellung der Kompensationsschaltung der Nachbarmagnet mit der sinusförmigen Spannung gespeist, ist zu erkennen, dass die Schaltung nicht mehr abgeglichen ist – Bild E14.

Wurde die Einstellung der Kompensationsschaltung anhand des Pulsens des Nachbarmagneten vorgenommen – hierbei lies sich ein ebenso guter Abgleicherfolg erzielen – und anschließend der Magnet selbst gepulst, war das Ergebnis noch etwas schlechter als in Bild E14. Auch spätere Versuche zeigten, dass der Abgleich der Kompensationsschaltung, wenn er durch das Pulsen des angeschlossenen Magneten erfolgt, bessere Ergebnisse erzielt.

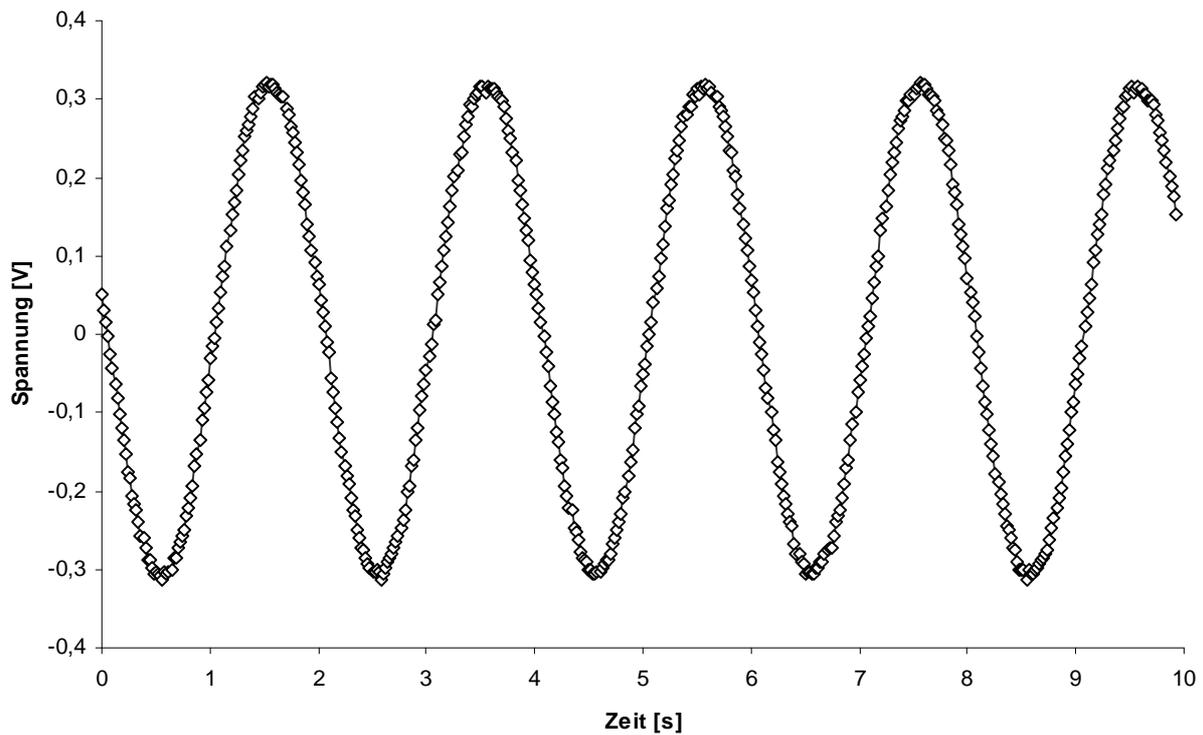


Bild E14: Ausgangsspannung der unter Puls des Magneten abgeglichenen Kompensationsschaltung beim Pulsen des Nachbarmagneten

Neben den erwähnten Wirbelströmen, die sich unsymmetrisch in die einzelnen Wicklungen koppeln, wirken sich bei dieser Anordnung jedoch auch andere Effekte schlecht auf einen Abgleich der Kompensationsschaltung aus. Es ist zu berücksichtigen, dass die Prüflinge hier aufgrund der geometrisch engen Anordnung – siehe Bild E1 – selbst recht stark miteinander, mit ihren Messwicklungen dagegen relativ lose magnetisch gekoppelt sind. Dadurch wirkt sich ein Puls des einen Magneten viel stärker auf den anderen und evtl. unproportional dazu auf die Messwicklungen aus, als es z.B. in einer torusförmigen Anlage in künftigen Reaktoren der Fall wäre. Außerdem handelte es sich nicht um supraleitende Spulen, sondern um Magnete, die einen erheblichen ohmschen Anteil besitzen, was zur Folge hat, dass beim Anlegen einer rechteckförmigen Spannung der Strom rasch einem Grenzwert entgegenstrebt, während er bei supraleitenden Magneten nur durch die Leistungsfähigkeit des speisenden Netztes und des Supraleiters begrenzt wird. Auch lassen sich supraleitende Magnete mit wesentlich höherem Strom betreiben, weshalb auch etwaige Messergebnisse und deshalb auch entsprechende Abgleiche besser ausfallen.

Daher wurde für den letzten Versuch die Anordnung umgebaut und die Funktion der Kompensationsschaltung in einem torusförmigen Aufbau der Magnete untersucht.

E.4.3.3 Neue Anordnung der Magnete

Im vorigen Punkt stellte sich heraus, dass die verwendete Kompensationsschaltung im Aufbau nach Bild E1 aufgrund der unterschiedlichen magnetischen Kopplungen nicht zufrieden stellend arbeitet. Deshalb werden die Magnete nun räumlich mehr voneinander getrennt, außerdem leicht versetzt (ansatzweise torusförmig) angeordnet – siehe Bild E15 – und die Messungen aus E.4.3.2 wiederholt.

Auch hier wurde die Kompensationsschaltung nach der Vorgehensweise in E.4.3.2 ausgelegt. Der Abgleicherfolg – zu sehen an Bild E16, wo der kompensierte Magnet mit einer sinusförmigen Spannung gespeist wurde – war deutlich besser, als bei der alten Anordnung (vergleiche Bild E16 mit Bild E13).



Bild E15: Geometrisch neue Anordnung der Magnete

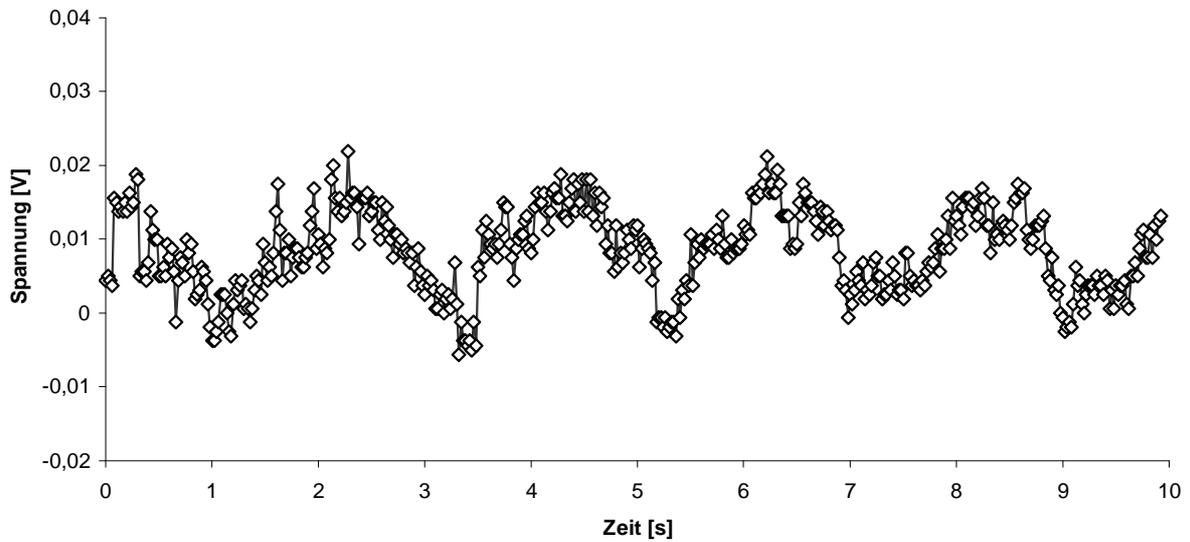


Bild E16: Ausgangsspannung der Kompensationsschaltung nach Abgleich bei Puls des Magneten mit Sinusspannung

Wird der Magnet statt mit einer sinusförmigen Spannung mit einer gleichfrequenten Rechteckspannung der Amplitude 20V gespeist, ergibt sich folgendes Ausgangssignal:

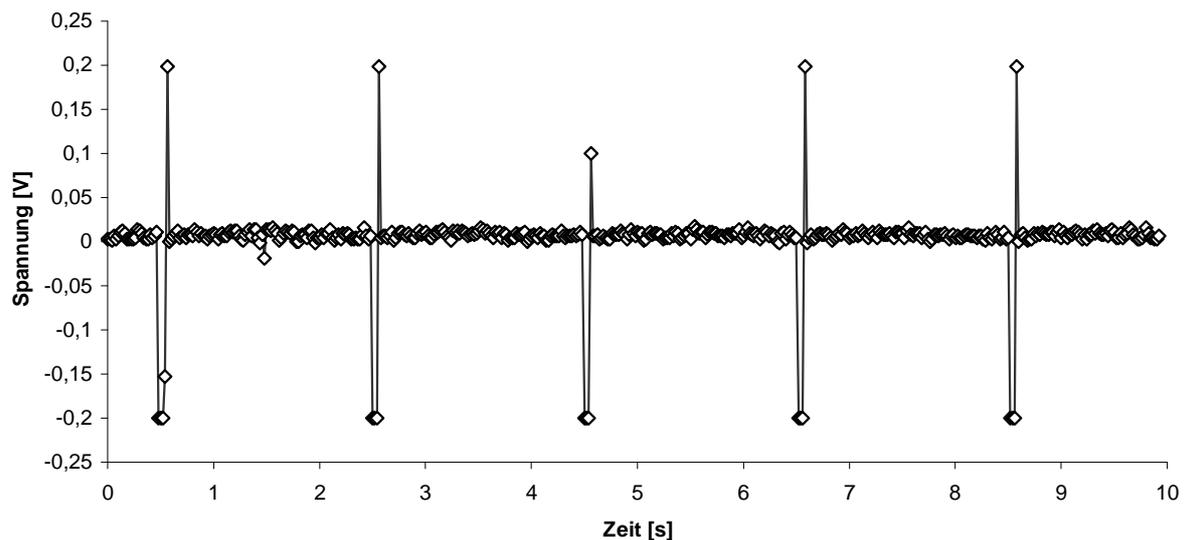


Bild E17: Ausgangssignal der Kompensationsschaltung bei Puls des Magneten mit Rechteckspannung

In Bild E17 ist in der dargestellten Ausgangsspannung der Kompensationsschaltung jedoch nur jeder zweite Sprung der rechteckförmigen Pulsspannung zu erkennen. Der andere wird jeweils durch die Schaltung unterdrückt bzw. kompensiert. Auch hier handelt es sich um eine Ausbildung von Wirbelströmen, die sich richtungsabhängig mehr oder weniger stark auswirken.

Schon die Bilder E16 und E17 zeigen, dass sich mit der Kompensationsschaltung ein sehr guter Abgleicherfolg bei dieser Anordnung der Magnete erzielen lässt. Noch deutlicher wird dies jedoch, wenn man die Ausgangsspannung der Schaltung in den Bildern E18 und E19 betrachtet. Hier wurde nach erfolgtem Abgleich der Schaltung, basierend auf ein Pulsen des Magneten, der Nachbarmagnet gepulst – in Bild E18 mit einer sinusförmigen, in Bild E19 mit einer rechteckförmigen Pulsspannung – und der betrachtete Magnet mit konstanter Spannung vorgeprägt.

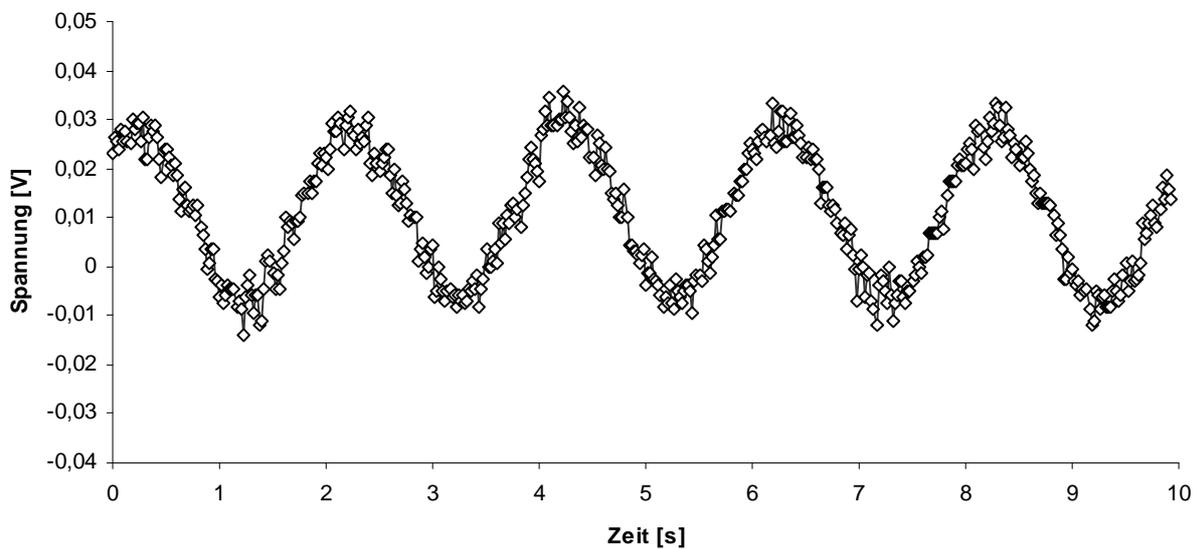


Bild E18: Ausgangsspannung der Kompensationsschaltung bei Pulsen des Nachbarmagneten mit sinusförmiger Spannung

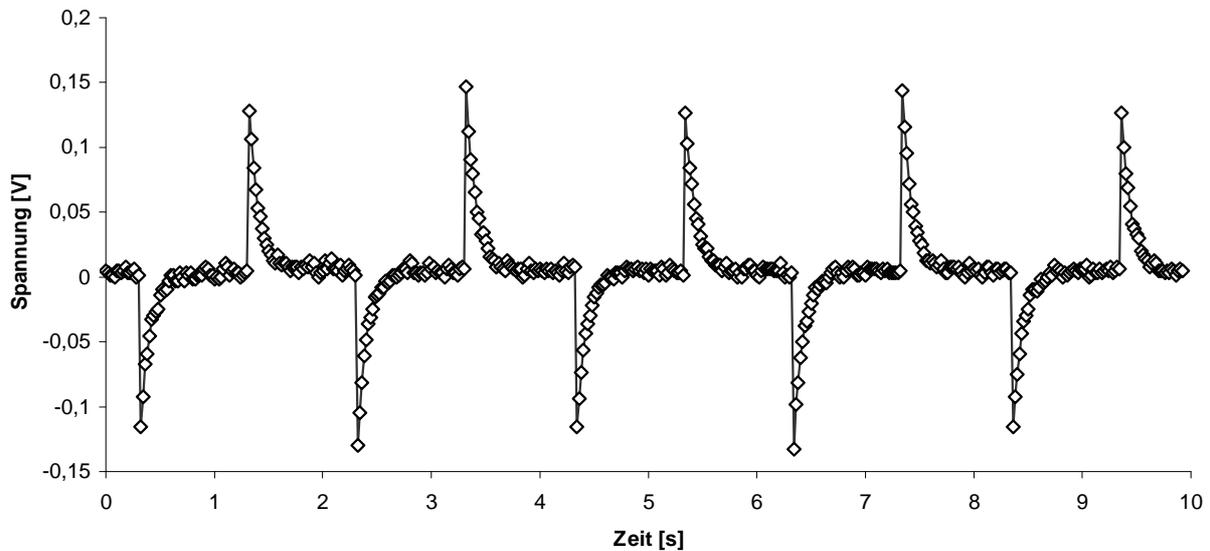


Bild E19: Ausgangsspannung der Kompensationsschaltung bei Pulsen des Nachbarmagneten mit rechteckförmiger Spannung

Die in Bild E19 zu erkennenden Spitzen in der Ausgangsspannung bei einem Pulsen des Nachbarmagneten mit einer rechteckförmigen Spannung könnten in einem der Kompensationsschaltung nachgeschalteten Filter zwar unterdrückt werden, würden aber so in der Praxis entweder eine Anhebung der Ansprechschwelle des Quenchedetektors von angenommenen 50mV auf ca. 100mV, oder eine Einstellung der Zeitkonstante des Zeitgliedes auf ca. 50ms bedingen, da nach 0,2s die Ausgangsspannung wieder auf unter 50mV gesunken ist.

Eine Verbesserung des Abgleichs könnte hier erfolgen, indem man iterativ sowohl auf das Pulsen des Magneten, als auch auf das Pulsen des Nachbarmagneten hin abgleicht und versucht, die Einstellungen zu optimieren. Die Erfahrungen bei LCT haben jedoch gezeigt, dass es in der Praxis nicht so einfach ist, diesen iterativen Abgleich vorzunehmen. Es führte sogar soweit, dass man letztenendes die Messwicklungen der benachbarten Magnete nicht mehr in der Kompensationsschaltung des zu schützenden Magneten verwendet hat, sondern nur noch die des jeweiligen Magnets selbst. Bei derart großen Spulen, wie sie dort verwendet wurden, wirken sich die in den massiven Gehäusen induzierten Wirbelströme, sowie etwaige Unsymmetrien in den Kopplungsgraden wesentlich stärker auf den Abgleicherfolg aus. Nicht zuletzt war es auch der geringe Kopplungsfaktor der Messwicklungen mit den jeweiligen Magneten ($\approx 0,8$), der den Abgleich verschlechterte und den Betreiber mit diesem System unzufrieden sein lies.

E.5 Zusammenfassung dieser Messreihe

Die in Bild E2 dargestellte Kompensationsschaltung zum ohmschen und induktiven Abgleich eines zu schützenden Magneten lässt sich, analog zu den meisten vorgestellten Quenchdetektionssystemen, sehr gut zum Schutz eines einzelnen Magneten verwenden, der fernab von störenden Streufeldern sitzt. Die Induktivität des Magneten selbst kann dabei so gut kompensiert werden, dass sogar solch ungewöhnliche Betriebszustände, wie beispielsweise die angelegte Rechteckspannung mit ihren sehr steilen Stromänderungen, gefahren werden können. Lediglich eventuell verursachte Wirbelströme lassen sich nicht auskompensieren und deren Auswirkungen müssten durch Filterung des Ausgangssignals unterdrückt werden. Wird nach erfolgtem Abgleich bei einer angelegten Rechteckspannung die Spannung z.B. dreieckförmig, also mit wesentlich flacheren Flanken, gewählt, erscheint der Abgleich noch um ein vielfaches besser.

Eine erweiterte Kompensationsschaltung, die auch die Auswirkungen durch das Pulsen eines Nachbarmagneten unterdrückt, wurde ebenfalls untersucht. Es zeigte sich, dass sich mit der Anordnung nach Bild E1 jedoch keine zufrieden stellenden Ergebnisse erzielen lassen. Deshalb wurde in E.4.3.3 die Anordnung umgebaut und eine torusförmige Anordnung der Magnetspulen nachempfunden – Bild E15. Hier waren die Abgleicherfolge bedeutend besser, lassen sich jedoch nur bedingt auf Großmagnete übertragen, wie ein Vergleich mit den Ergebnissen des LCT-Projekts zeigt. Hier traten ähnliche Schwierigkeiten beim Abgleich der Schaltung auf. Dort wurde der Abgleich allerdings, wie oben erwähnt, iterativ und rechnergestützt vorgenommen, indem der zu schützende Magnet und die jeweiligen Nachbarmagnete abwechselnd gepulst wurden und die Schaltung mit den dann gefundenen Einstellungen erneut abgeglichen wurde, bis es zu einem brauchbaren Optimum kam. Allgemein war der Betreiber aber mit diesem System unzufrieden [18].

Anhang F

Bilder von Supraleiter-Exponaten

Hier sollen zum Abschluss und ergänzend zur Arbeit noch einige Bilder von Supraleitern gezeigt werden. Die fotografierten Exponate stammen aus der Dauerausstellung in der Versuchsanlage TOSKA des FZK. Es werden anhand ausgewählter Beispiele der Aufbau und die Fertigung der Supraleiter erklärt und verschiedene Leiterausführungen dargestellt.

F.1 Schnittbild der Kupfermatrix mit integriertem Supraleitermaterial

Bild F1 zeigt den Schnitt eines Supraleiters, wie er sich vor dem Ziehen zum Draht ergibt. Das Supraleitermaterial – hier NbTi (in grau) – ist von massivem Kupfer umgeben, das zum einen die Form des Leiters prägt und zum andern im Falle eines Quench den Strom des Supraleiters aufnimmt, bis die Energie in den externen Entladewiderstand gelangt ist (siehe 1.2). Der dargestellte Rohling wird durch Hämmern und Ziehen mit jeweiligem Zwischenglühen auf eine Dicke von ein bis zwei Millimetern gebracht und bildet dann einen von vielen so genannten „Strands“ des Gesamtleiters, wie sie in den nachfolgenden Bildern dargestellt sind.

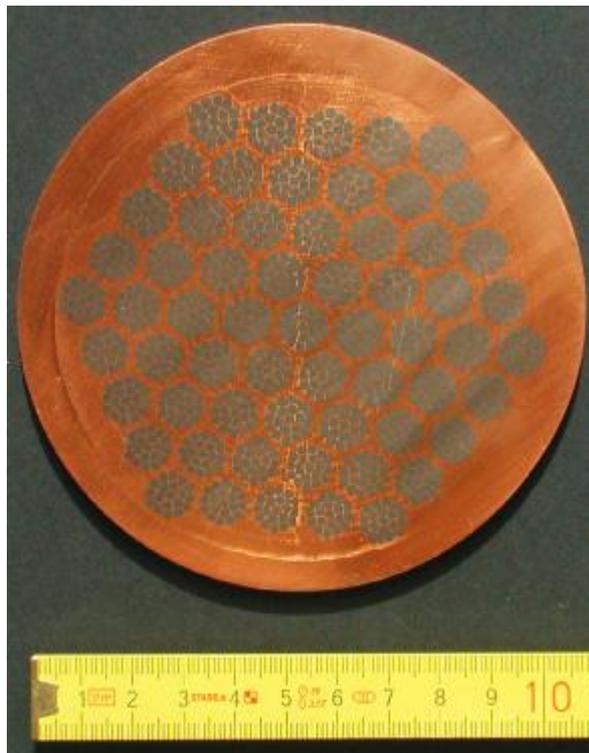


Bild F1: Schnittbild der Kupfermatrix mit integriertem Supraleiter

F.2 Leiter der EU-LCT-Spule

In diesem Bild ist der Leiteraufbau der europäischen LCT-Spule zu erkennen. Schön ist die Führung der hier rechteckigen Strands in Form eines Röhelstabes zu sehen. Das flüssige Helium zur Kühlung wurde durch die Hohlräume zwischen den Strands geleitet.

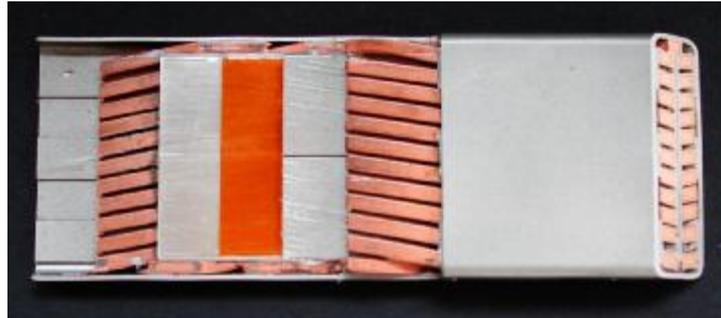


Bild F2: Darstellung der einzelnen Lagen des Leiters der EU-LCT-Spule

F.3 Leiter der POLO-Spule

In dieser Abbildung ist der Leiter der POLO-Spule dargestellt. Links ist im Bild des gesamten Leiters das zur Führung des flüssigen Heliums dienende Leiter-Innenrohr, sowie auch einer der beiden mitgewickelten Kompensationsleiter zu erkennen (siehe auch 2.1.1.2). Sowohl das Leiter-Innenrohr, als auch die beigewickelten Kompensationsdrähte dienen zur Kompensation induktiver Spannungsanteile für die Quenchdetektion. Auch in der Schlifffläche am Rechten Ende ist bei genauerem Hinsehen einer der beiden Kompensationsleiter zu erkennen. Noch deutlicher sieht man ihn allerdings im rechten Bild, wo er neben sechs parallelen Strands des Supraleiters liegt. Diese Strands weisen im Vergleich zu Bild F1 eine sternförmige Form der Kupfermatrix mit dem integrierten Supraleiter auf. Sechs solcher einzelner Strands sind verdreht und spiralförmig umhüllt mit dünnem Stahlblech. Dreizehn dieser Einzelleiter wiederum laufen abermals verdreht um das Innenrohr. Im linken Bild ist auch die rötliche Kapton-Folie zur elektrischen Isolation zu erkennen.



Bild F3: Leiter der POLO-Spule. Links in schichtweiser Darstellung, Rechts die Detailansicht der Schnittfläche mit einzelnen Strands

Literaturverzeichnis

- [1] W. Buckel **Supraleitung**
VCH-Verlag, 1990
- [2] J. Bardeen u.a. **Theory of Superconductivity**
Physical Review, Vol. 108, S.1175, 1957
- [3] M. Wilson **Superconducting Magnets**
Clarendon Press Oxford, 1983
- [4] D.S. Beard u.a. **The IEA large coil task**
Fusion Engineering and Design, Volume 7, September 1988
- [5] G. Nöther u.a. **Quench detection system of the EURATOM coil for the Large Coil Task**
Cryogenics, Volume 29, Issue 12, pages 1148 – 1153, 1989
- [6] U. Tietze u.a. **Halbleiterschaltungstechnik**
Springer-Verlag, 12. Auflage, 2002
- [7] J. Federau **Operationsverstärker**
Vieweg-Verlag, 2. Auflage, 2001
- [8] G. Nöther **Unveröffentlichter Bericht**
im Forschungszentrum Karlsruhe, 1986
- [9] D.F. Orris u.a. **A digital quench detection system for superconducting magnets**
IEEE – Proceedings of the 1999 Particle Accelerator Conference, New York, 1999, pages 3191 – 3193
- [10] O. Simon **Einsatz eines Supraleitenden Magnetischen Energiespeichers zur Kompensation von Netzurückwirkungen**
Dissertation, Universität Karlsruhe, 1998
- [11] N. Shatil u.a. **An investigation of inner heat input in CICC with central channel by the Super High Frequency Method**
Applied Superconductivity Conference, Palm Desert, USA, September 1998
- [12] S. Pourrahimi u.a. **US Contribution to the Development and Calibration of Quench Detectors for the ITER QUELL**
IEEE – Transactions on applied superconductivity, Vol. 5, No. 2, pages 491 – 492, June 1995
- [13] Wendelstein 7-X **Application for Preferential Support**
Wendelstein 7-X Project Group, IPP Euratom Association, 1994
- [14] R. Heller u.a. **Abschlussbericht zum Test der Wendelstein 7-X Demonstrationsspule in TOSKA**
Forschungszentrum Karlsruhe Wissenschaftliche Berichte FZKA 6486; Juli 2000

- [15] D. Lieurance u.a. **EBT-P Quench Detection Technique in a magnetically noisy Environment**
Veröffentlichung von McDonnell Douglas Astronautics Company, 1983
- [16] P.L. Walstrom **Compensation amplifier gains in the LCP Two-Coil Test**
Veröffentlichung im Oak Ridge National Laboratory, 1983
- [17] L. Papula **Mathematik für Ingenieure und Naturwissenschaftler**
Vieweg-Verlag, Band 2, 9.Auflage, 2000
- [18] P.L. Walstrom **Subscale test of the LCTF Quench Detection System**
Veröffentlichung im Oak Ridge National Laboratory, 1983