

Technische Universität München
Physik-Department E10

Untersuchung des HF – induzierten Schaltvorgangs bei Hochtemperatursupraleitern

Alois Hiebl

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Physik der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Naturwissenschaften
genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr. M. Kleber

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr. H. Kinder
2. Univ.-Prof. Dr. R. Gross

Die Dissertation wurde am 24.06.04 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Physik am 06.09.04 angenommen.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	4
2	Grundlagen der Supraleitung und Anwendung	6
2.1	Grundlagen des Supraleiters $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$	6
2.2	Grundlagen SMES	8
3	Grundlagen des Schaltens von $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ – Filmen	11
3.1	Passiver Schaltvorgang.....	11
3.2	Aktiver Schaltvorgang.....	12
4	Proben- und Spulenpräparation	13
4.1	Herstellung der supraleitenden Schaltelemente.....	13
4.2	Herstellung der Hochfrequenzspulen.....	18
5	Messungen	20
5.1	Gestrecktes Schaltelement.....	20
5.1.1	Messaufbau	21
5.1.2	Typische Messung / Schaltvorgang.....	24
5.1.3	Elektrische Einflussgrößen	27
5.1.3.1	Frequenz.....	27
5.1.3.2	Spannungssprung.....	29
5.1.3.3	HF-Strom	30
5.1.3.4	Vorstrom	31
5.1.3.5	HF-Leistung.....	33
5.1.3.6	Kritischer Strom.....	34
5.1.3.7	Magnetfeldrichtung.....	35
5.1.4	Geometrische Einflussgrößen.....	37
5.1.4.1	Wafergröße	37
5.1.4.2	Schaltelement- und Spulengröße	40
5.1.4.3	Spulenart	43
5.1.4.4	Spulenposition	44
5.1.5	Optische Untersuchungen.....	49
5.1.6	Magnetooptische Untersuchungen.....	52
5.2	Neue Geometrie	55

1	Einleitung	3
5.2.1	Einleitung	55
5.2.2	Messaufbau	56
5.2.3	Typische Messung / Schaltvorgang	57
5.2.4	Frequenzabhängigkeit	58
5.2.5	Vorstromabhängigkeit	59
5.2.6	HF-Stromabhängigkeit	61
5.2.7	Optische Untersuchungen	63
6	Deutung der Messergebnisse	65
6.1	Theorie für den Schaltvorgang	65
6.2	Berechnung des HF-Stromes im Supraleiter	69
6.3	Simulation	72
7	Zusammenfassung und Ausblick	76
	Literaturverzeichnis	79
	Danksagung	81

1 Einleitung

1,05 Milliarden Dollar (etwa 900 Millionen Euro) kostete der bis dahin größte Stromausfall in der nordamerikanischen Geschichte am 14. und 15. August 2003 allein der Stadt New York. 800 Millionen Dollar entfielen auf entgangene Geschäfte und weitere 250 Millionen Dollar auf Lebensmittel und andere Güter, die ohne Kühlung verderben. Der Blackout kostete somit New York City etwa 36 Millionen Dollar pro Stunde. Insgesamt waren in Gebieten der Ostküste der USA und Kanada 50 Millionen Menschen ohne Strom. Weitere Stromausfälle folgten in Europa, in Skandinavien und England mit fünf Millionen Betroffenen. 57 Millionen Menschen hatten keinen Strom als am 30. September 2003 der Strom in ganz Italien ausfiel, dabei kamen fünf Menschen ums Leben. Eine größere Katastrophe verhinderte nur die Tatsache, dass es Sonntag war. Die Experten in Amerika und Europa warnen vor weiteren Stromausfällen, da in vielen Fällen die Stromnetze veraltet und oft schon an ihren Auslastungsgrenzen angelangt sind. Eine Modernisierung, Sicherung und Ausbau der alten Netze wäre nicht nur in den Strom-Metropolen Asiens, sondern, wie die Stromausfälle zeigen, auch in Europa und den USA unbedingt erforderlich.

Supraleiter sind zu solchen Verbesserungen der Tragfähigkeit, der Sicherheit und Qualität eines Stromnetzes hervorragend geeignet. Supraleitende Stromleitungen, Kurzschluss-Strombegrenzer, Generatoren und Motoren sind nur einige Anwendungen die in Zukunft energiesparend und wirtschaftlich arbeiten werden.

Betrachtet man die Stromausfälle eines Jahres, so sind statistisch gesehen die kleinen Netzschwankungen viel häufiger als die oben erwähnten spektakulären Ausfälle. Problematisch erweisen sich diese kleinen oft auch nur auf kleine Ortsnetze bezogenen Schwankungen für viele hochtechnologische Produktionslinien wie z.B. die Halbleiterindustrie. Nicht nur die Produktion an sich, sondern auch die angewandten Computersysteme, Analyse- und Messgeräte werden immer empfindlicher und damit um so mehr abhängig von einer qualitativ hochwertigen und stabilen Netzversorgung. Oftmals wird diese kostenintensiv durch eine eigene zweite Netzanbindung, Diesel-Generatoren, Schwungradspeicher oder batteriebetriebene USV (Unterbrechungsfreie Stromversorgung) sichergestellt.

Die Supraleitung bietet auch hier mit dem SMES (Supraleitender Magnetischer Energie-Speicher) eine langlebige verlustarme Lösung, um kurzzeitig Netzschwankungen auszugleichen oder Hochleistungspulse bereitzustellen. Der Erregerstrom einer Spule baut ein Magnetfeld auf, in dem ohne Umwandlung in andere Energieformen elektrische Energie gespeichert werden kann. Nach dem Aufladen wird die Spule kurzgeschlossen und kann dann nach Bedarf wieder entladen werden. Durch

die Verwendung einer supraleitenden Spule, werden die resistiven Verluste im Leiter eliminiert.

Wichtig ist dabei ein sehr schneller Entladeschalter der innerhalb kürzester Zeit die Entladung des SMES über den Verbraucher ermöglicht. Am geeignetsten ist hier ein supraleitender Schalter der Verluste während der Standzeit minimiert und sehr schnelle Schaltvorgänge ermöglicht. Dabei macht man sich zunutze, dass ein Supraleiter durch einen externen Triggerpuls (z.B. Heizpuls) innerhalb kürzester Zeit von der supraleitenden in seine normalleitende Phase „geschaltet“ werden kann und dort einen hohen Widerstand aufweist.

Die Untersuchung eines neuartigen HF-induzierten Schaltvorgangs bei Hochtemperatursupraleitern ist das Thema dieser Arbeit.

Zunächst gibt Kapitel 2 einen kurzen Überblick über die Grundlagen des Hochtemperatursupraleiters $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ (YBCO) der für den aktiven Schalter verwendet wurde, sowie über die grundlegende Funktionsweise eines SMES. Der passive und aktive Schaltvorgang von YBCO-Dünnschichten wird in Kapitel 3 behandelt. Die Präparation der supraleitenden Schaltelemente und der Hochfrequenzspulen in Kapitel 4 führt zum Hauptteil dieser Arbeit, der in Kapitel 5 die Messungen zu zwei verschiedenen Schaltergeometrien vorstellt und in Kapitel 6 mit deren Deutung die Funktionsweise erklärt. Eine Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse und ein Ausblick in Kapitel 7 beenden diese Arbeit.

2 Grundlagen der Supraleitung und Anwendung

Die Supraleitung ermöglicht unterhalb einer kritischen Temperatur, eines kritischen Magnetfeldes und einer kritischen Stromstärke den widerstandsfreien Stromtransport (DC). Befindet sich der Supraleiter unterhalb dieser Parameter können sich die Elektronen zu Cooperpaaren verbinden. Diese können nun als Bosonen in einen gemeinsamen Zustand kondensieren in dem keine Streuung der Elektronenpaare mehr möglich ist. So wird ein verlustfreier Stromtransport möglich. Als Kammerlingh Onnes diesen supraleitenden Zustand 1913 bei reinem Quecksilber entdeckte, konnte niemand absehen was für ein großes und erfolgreiches Forschungsgebiet er damit für die Physik auftrat. Vor allem seit 1986 [Bed86] die Hochtemperatursupraleiter (HTSL) entdeckt wurden, die Supraleitung oberhalb der Siedetemperatur von flüssigem Stickstoff (77 K) ermöglichen, wurden verschiedenste supraleitende Materialien erforscht und für wirtschaftliche Anwendungen entwickelt.

Eine gute Einführung in die Supraleitung ist in [Buc97], [Kin99] veröffentlicht. In dieser Arbeit soll nur kurz auf die Grundlagen des verwendeten Hochtemperatursupraleiters $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ und des supraleitenden, magnetischen Energiespeichers eingegangen werden.

2.1 Grundlagen des Supraleiters $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$

In dieser Arbeit wurden dünne Filme des Supraleiters YBCO verwendet. Der Aufbau der Kristallstruktur von YBCO aus drei kubischen Einheitszellen (Perovskitstruktur) ist in Bild 2.1 [Buc97] dargestellt. Ein Y-Atom ist von zwei Ba-Atomen umgeben. Das Y-Atom trennt zwei CuO_2 -Ebenen, deren benachbarte Ebenen durch das Ba-Atom abgetrennte CuO-Ketten sind. Die orthorombische Einheitszelle von YBCO hat die Gitterparameter $a = 0,382 \text{ nm}$, $b = 0,389 \text{ nm}$ und $c = 1,168 \text{ nm}$ [Crc97].

Die CuO-Ketten entziehen den CuO_2 -Ebenen Elektronen, die dadurch entstehenden Löcher bilden unterhalb der kritischen Temperatur Cooper Paare. Die Supraleitung entsteht also in den CuO_2 -Ebenen. Ein große Rolle spielt hierbei der Oxidationsgrad des $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ wobei x (0..1) die Abweichung von der vollständig oxidierten Phase $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ bezeichnet. Ein geringerer Sauerstoffanteil in den CuO-Ketten bewirkt z.B. eine geringere Dotierung der CuO_2 -Ebenen mit Löchern und damit eine geringere Anzahl an Cooperpaaren. So hängen nicht nur die kritischen Parameter von YBCO allgemein stark von diesen Ebenen ab, sondern es entsteht auch eine starke Anisotropie innerhalb des Materials. Typische physikalische Parameter sind in Tabelle 2.1 aufgeführt. Der Normalleitungswiderstand bei 100 K ist demnach in der ab-Ebene um ein bis zwei Größenordnungen kleiner als in der c-Richtung.

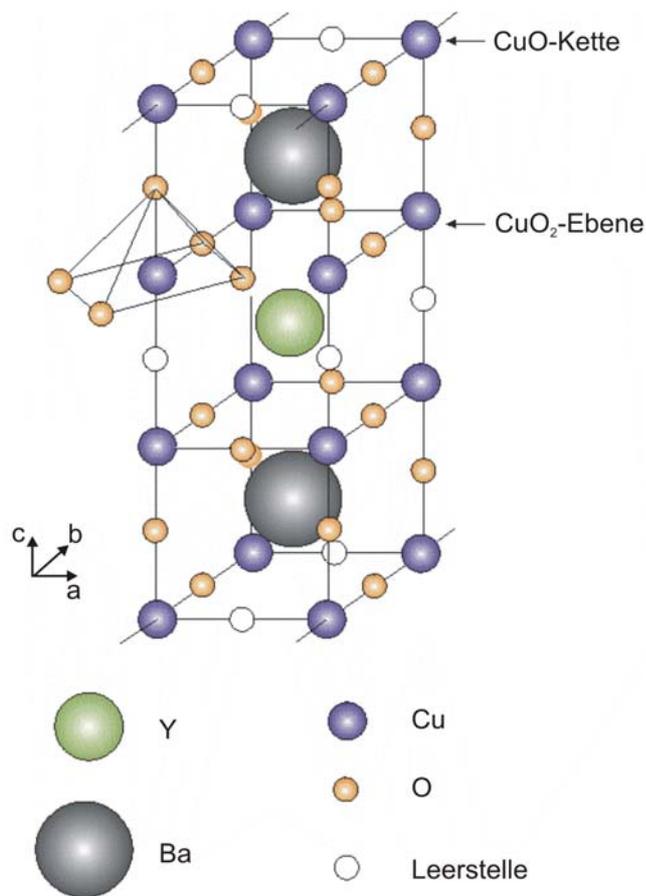


Bild 2.1: Kristallstruktur von YBCO

Tabelle 2.1: Materialparameter von YBCO

Materialparameter	in der ab-Ebene	in c-Richtung
Normalleitungswiderstand ρ (100K) [Sor97]	60-100 $\mu\Omega\text{cm}$	0,9-18 $\text{m}\Omega\text{cm}$
Magnetische Eindringtiefe λ [Pal88]	130 nm	500-700 nm
Kohärenzlänge ξ [Wel89]	1,6 nm	0,3 nm
Kritisches Magnetfeld B_{c1} (11 K) [Buc97] $B\parallel c$	12 mT	69 mT
Kritisches Magnetfeld B_{c2} [Dzu98] $B\parallel c$	674 T	122 T

Die Eindringtiefe in der ab-Ebene ist nur ein $\frac{1}{4}$ der in c-Richtung. Auch die Kohärenzlänge hat in der ab-Ebene den fünffachen Wert der Länge in c-Richtung. Bei YBCO ist daher der Ginzburg Landau Parameter

$$\kappa = \frac{\lambda}{\xi} \gg \frac{1}{\sqrt{2}} \quad (2.1)$$

Es handelt es sich somit um einen extremen Supraleiter 2. Art [Kin99]. Daraus folgt auch der große Unterschied der kritischen Felder B_{c1} und B_{c2} , um vier Größenordnungen. Dabei ist der Supraleiter 2. Art bis zum unteren kritischen Feld B_{c1} in der Meissner Phase und feldfrei. Bei höheren Feldern bis zum oberen kritischen Feld B_{c2} dringt das Magnetfeld in sogenannten Flussfäden ein, um so Feldverdrängungsenergie einzusparen. Die Flussfäden können sich an Pinningzentren festhalten (pinnen). Pinningzentren sind normaleitende Ausscheidungen, raue Oberflächen oder Fehlstellen. Da ein Flussfaden einen normaleitenden Bereich darstellt müssen zu seiner Entstehung Cooper Paare aufgebrochen und die Kondensationsenergie aufgebracht werden. An den Pinningzentren kann Kondensationsenergie gespart werden. Die Flussfäden sind deshalb durch die sogenannte Pinningkraft dort verankert. Erst wenn die Lorentzkraft eines Transportstromes größer wird als diese Pinningkraft können sich die Flussfäden bewegen und es tritt ein Widerstand auf. Diese kritische Stromdichte ist so definiert, dass j_c bei einem Spannungsabfall von einem $\mu\text{V}/\text{cm}$ erreicht ist.

In dünnen Schichten, die aufgrund der Anisotropie immer mit der c-Achse senkrecht zum Substrat aufgewachsen werden (wegen Stromtransport in der Ebene), liegen diese kritischen Stromdichten im MA/cm^2 Bereich. Sie sind daher für technische Anwendungen von großer Bedeutung. Eine solche technische Anwendung soll im folgenden Abschnitt vorgestellt werden.

2.2 Grundlagen SMES

Die grundsätzliche Funktionsweise eines SMES ist in Bild 2.2 gezeigt. Zunächst muss die supraleitende Spule geladen werden. Dazu ist der supraleitende Schalter im normaleitenden Zustand, also geöffnet und der Stromunterbrecher geschlossen. Über einen AC/DC Wandler wird elektrische Energie in das System eingekoppelt. Am Ende des Aufladevorgangs fällt, wegen der geringen zeitlichen Änderung des durch die Spule fließenden Stromes, nur noch eine geringe Spannung am supraleitenden Schalter ab.

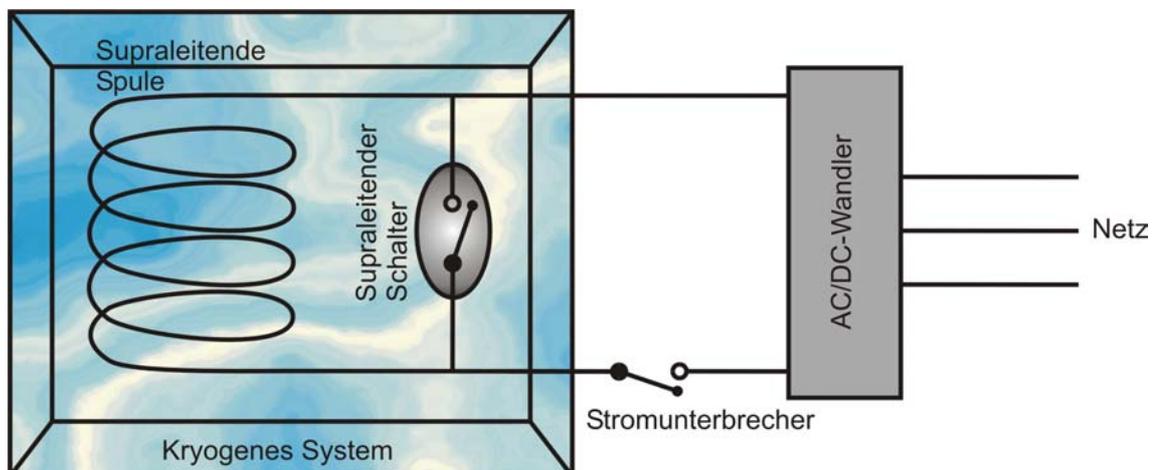


Bild 2.2: Skizze eines SMES

Dadurch wird er selbstständig wieder supraleitend und schließt die Spule kurz. Nun ist die Energie durch den supraleitenden Kurzschluss in der Spule gespeichert und der SMES befindet sich im stand-by Betrieb. Zum Entladen wird der SL-Schalter wieder geöffnet und ein AC/DC Wandler ermöglicht die Einspeisung in das elektrische Netz. Soll nur ein Teil der gespeicherten Energie entladen werden, wird der SMES durch einen Stromunterbrecher wieder vom Netz getrennt. Die Gleich- und Wechselrichtung des Stromes kann man mit Wirkungsgraden um 97% erreichen, so dass die wesentlichen Verluste eines solchen Systems die Wärmeverluste des Kryostaten sind, welche hauptsächlich durch die Stromzuführungen und unzureichende Wärmeisolation verursacht werden. Ein zusätzliches Quench-Überwachungssystem ermöglicht bei einem ungewollten Übergang der SMES-Spule in die Normalleitung deren sofortige Entladung über einen zuschaltbaren Widerstand.

Momentan werden die Spulen überwiegend aus den metallischen Supraleitern NbTi und Nb₃Sn hergestellt. Auch mit dem Hochtemperatursupraleiter BiSrCaCuO wurden erste SMES realisiert. Diese werden jedoch, um genügend hohe Magnetfelder zu erreichen, nur unterhalb 40 K betrieben.

Vorteile eines SMES, vor allem im Vergleich zu anderen Energiespeichern (z.B. Batterien, Schwungradspeicher), sind u. a. :

- Lange Lebensdauer
- Beliebige Lade- und Entladezyklen wobei auch Tiefenladungen problemlos sind
- Selbst bei kleiner gespeicherter Energie können hohe Leistungen mit einem SMES erreicht werden
- Eine schnelle Verfügbarkeit von elektrischer Leistung, die im Bereich von Millisekunden bereitgestellt werden kann

Nachteile sind:

- Hohe Anschaffungskosten
- Kleinere Energiedichte
- Laufende Kosten für die Kühlung

Zunächst wurden vor allem SMES-Großanlagen mit Speicherkapazitäten von 1000 bis 5000 MWh (100 m Spulendurchmesser), die zum Tages/Nachlastausgleich dienen sollten, diskutiert. Diese sind jedoch nach heutigen Kostenanalysen nicht wirtschaftlich. Die heute gebauten „kleineren“ SMES Anlagen, die zur Sicherung der Qualität und Stabilität der Stromversorgung benutzt werden, haben Speicherkapazitäten im Bereich von 0.3 – 3 kWh bei einer Leistung von bis zu 10 MW.

Es gibt für diese Art SMES folgende Einsatzmöglichkeiten:

- Unterbrechungsfreie Stromversorgung mit hoher Leistung
- Reduktion von Netzschwankungen
- Stabilisierung von elektrischen Versorgernetzen
- Pufferung von Stoßlasten
- Generierung von Hochleistungspulsen
- Ganglinienglättung von Photovoltaik- und Windkraftanlagen

Eine Zusammenfassung über SMES in Forschung und Industrie findet sich in [Geh03].

Bei all' diesen Anwendungen ist es sehr wichtig, dass der SMES innerhalb kurzer Zeit (wenige 100 μ s bis Sekunden) seine Energie zur Verfügung stellen kann. Dazu ist ein sehr schneller Leistungsschalter notwendig, der, um die Verluste zu minimieren, auch supraleitend sein sollte. In naher Zukunft wird es wohl möglich sein aus längeren Bandleitern, die mit Hochtemperatursupraleitern beschichtet sind [Han04], Spulen zu wickeln und damit höhere Magnetfelder auch bei höheren Temperaturen zu erreichen. Um einen SMES mit diesen HTSL-Spulen zu entwickeln sind aber auch aktive Leistungsschalter auf der Basis solcher HTSL-Materialien notwendig.

In dieser Arbeit werden solche Schalter aus YBCO-Filmen untersucht. Dazu wird im nächsten Kapitel das Schaltverhalten dieser supraleitenden Schichten näher betrachtet.

3 Grundlagen des Schaltens von $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ – Filmen

Das Schalten eines Supraleiters meint seinen Übergang von der Supraleitung in die Normalleitung und damit im Fall von YBCO-Dünnschichten in einen Widerstandsbereich von $\rho=10\text{-}100\ \mu\Omega\text{cm}$. Dadurch wird ein anliegender Strom stark begrenzt.

Zunächst soll nun der passive Schaltvorgang betrachtet werden, der als Grundlage des aktiven Schaltvorgangs anzusehen ist.

3.1 Passiver Schaltvorgang

Der Begriff des passiven Schaltvorgangs beschreibt den strominduzierten Übergang eines Supraleiters in die Normalleitung. Ein Beispiel hierfür ist der resistive supraleitende Strombegrenzer. Bis zum Erreichen eines Schaltstromes I_s (= ca. 3 x kritischer Strom I_c) kann er den Strom nahezu verlustfrei tragen. Wird dieser durch einen Kurzschluss überschritten geht der Supraleiter in die Normalleitung über und der Strom wird durch den hohen Widerstand begrenzt. Erst in den letzten Jahren wurde der eigentliche Mechanismus des passiven Schaltvorganges in YBCO-Dünnschichten geklärt. Messungen von [Leh01] zusammen mit einer Simulation von H. Kinder an unserem Lehrstuhl zeigten, dass es sich um einen thermisch induzierten Übergang handelt [Leh02].

Wird ein Supraleiter von einem Transportstrom durchflossen der kleiner ist als der kritische Strom I_c reicht der Strom nicht aus die Flussfäden von ihren Pinningzentren loszureißen. Nur bei hohen Temperaturen ist es thermisch möglich Flussfäden zu bewegen. Man spricht von thermisch aktivierten Flux Flow (TAFF). Dadurch entsteht ein spezifischer Widerstand, der aber sehr gering ist. Übersteigt der Transportstrom I_c , reicht die Lorentzkraft aus die Pinningkraft zu überwinden. Man erreicht den Bereich des Free Flux Flow (FFF), in dem sich ein erhöhter spezifischer Widerstand einstellt. Die dem TAFF und FFF zugrunde liegenden Dissipationsmechanismen durch die Bewegung der Flussfäden sind ohmschen Verluste im Wirbelkern und die Paarbrechung und Rekombination von Cooperpaaren [Kin99]. Zusammen mit dem Transportstrom wird nun der Supraleiter durch den FFF-Widerstand geheizt. Übersteigt bei genügend hohem Strom die Wärmezufuhr die Wärmeabgabe an das Substrat und das umgebende N_2 -Bad, erwärmt sich der Supraleiter, bleibt aber zunächst noch supraleitend. Da jedoch auch der Schaltstrom eines Supraleiters temperaturabhängig ist und mit steigender Temperatur sinkt, schaltet der Supraleiter, wenn der sinkende Schaltstrom dem Transportstrom entspricht.

3.2 Aktiver Schaltvorgang

Ein aktiver Schaltvorgang bezeichnet den Übergang in die Normalleitung, ausgelöst durch verschiedene aktive Vorgänge und ist damit gezielt steuerbar. Dabei wird zunächst ein Supraleiter mit einem Vorstrom belastet der weit genug unter dem minimalen Strom für passives Schalten liegt. Die Kühlung des Supraleiters reicht also noch aus, um den durch den Transportstrom erzeugten Wärmeeintrag zu kompensieren. Nun kann der Supraleiter, z.B. ein supraleitender Film, durch einen Heizer auf der Rückseite des Substrates (Bild 3.1 YBCO-Schaltelement mit Konstantan-Heizfilm) durch kurze Strompulse erwärmt werden [Hei01].

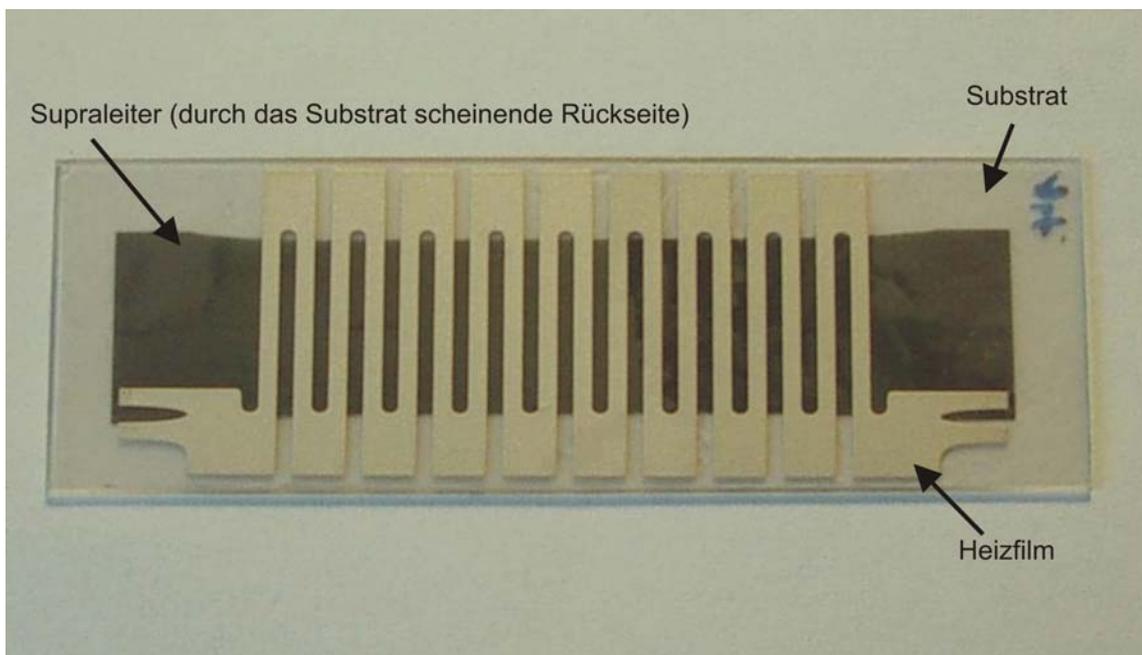


Bild 3.1: Supraleitendes Schaltelement mit Konstantan-Heizfilm

Der Schaltvorgang tritt wie beim passiven Schaltvorgang ein, wenn der Transportstrom dem temperaturabhängigen Schaltstrom entspricht. Die benötigte Heizleistung liegt bei mehreren hundert Watt, da das Substrat mitgeheizt werden muss. Es werden dabei Schaltzeiten, die Zeit vom Anlegen des Heizpulses bis zum eigentlichen Übergang in die Normalleitung des Supraleiters, im ms-Bereich erreicht.

Ein neues Verfahren, das den Schaltvorgang durch Anlegen eines Hochfrequenzfeldes (HF-Feldes) bewirkt und dabei mit geringerer Leistung auskommt, wird in dieser Arbeit untersucht. Dazu beschäftigt sich das nächste Kapitel mit der Präparation der supraleitenden Proben und der dazu notwendigen Hochfrequenzspulen.

4 Proben- und Spulenpräparation

Für das hochfrequenzgetriggerte Schaltelement mussten sowohl die supraleitenden Schaltelemente als auch Hochfrequenzspulen entwickelt werden, deren Herstellung soll nun im Einzelnen erläutert werden.

4.1 Herstellung der supraleitenden Schaltelemente

Als Material für die Schaltelemente wurden epitaktisch gewachsene YBCO-Dünnschichten verwendet. Diese wurden mit dem Verfahren des thermisch reaktiven Co-Verdampfens hergestellt [Ber94]. Bild 4.1 zeigt schematisch den Herstellungsprozess.

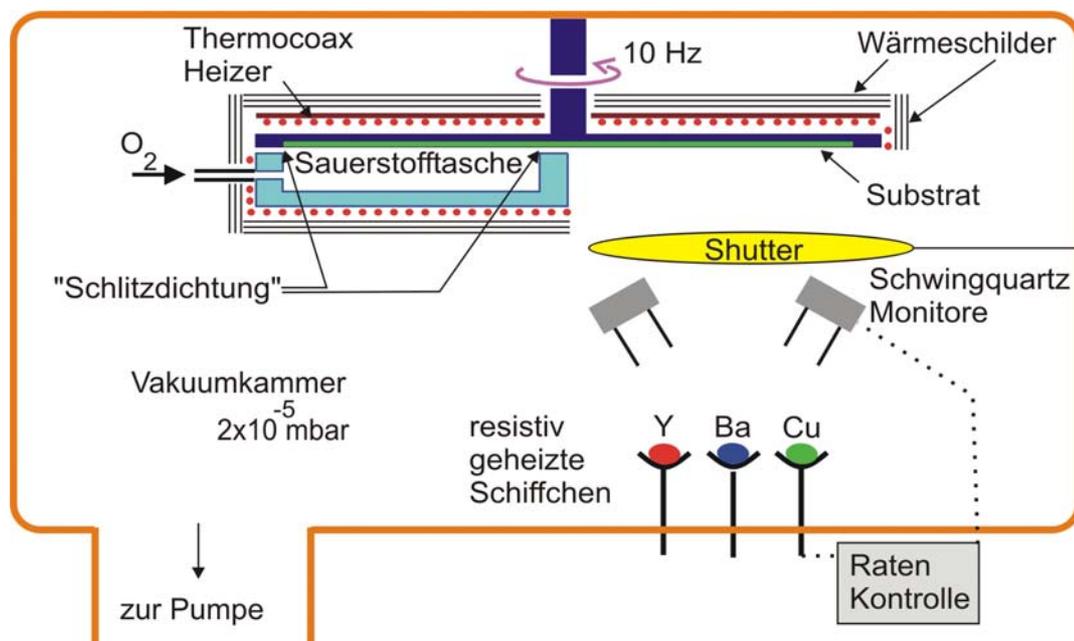


Bild 4.1: Skizze: thermisch reaktives Co-Verdampfen

Bei einem Druck von 10^{-5} mbar werden in einer Hochvakuumkammer die drei metallischen Bestandteile Y, Ba und Cu in resistiv geheizten Schiffchen verdampft. So können sich die Metallatome ungehindert zum Substrat bewegen, das in einem beheizten Drehteller über den Schiffchen angebracht ist. An einer Stelle des Drehtellers ist eine zum Substrat geöffnete Sauerstoffdose angebracht, in der durch drehen des Drehtellers mit einer Frequenz von ca. 10 Hz, die soeben aufgebraute YBaCu Atomlage bei einem Sauerstoffdruck von 2×10^{-2} mbar oxidiert wird. Durch eine so genannte Schlitzdichtung (der Spalt zwischen Sauerstoffdose und Drehteller beträgt nur

einige zehntel Millimeter) wird der Druckunterschied zur Vakuumkammer aufrechterhalten. Durch Schwingquarze im Aufdampfbereich kann sowohl die Aufdampftrate ermittelt, als auch die Ratenregelung durchgeführt werden.

Für die in dieser Arbeit verwendeten Filme wurde YBCO auf Saphirsubstraten (2 Zoll, 4 Zoll oder 20mm x 60mm) mit einer Schichtdicke von 300 nm abgeschieden. Zur Anpassung der Gitterkonstante von Saphir zum YBCO und als Diffusionsbarriere für Al-Atome [Wan93] wurde ein Pufferschicht aus CeO_2 mit einer Dicke von 5 nm aufgedampft. Eine durch ein zusätzliches Schiffchen insitu aufgebrachte 100 nm dicke Goldschicht ermöglicht die spätere Kontaktierung. Diese besitzt im Vergleich zu früher [Hie01] oft benutzten 50 nm dicken Schichten eine verbesserte Haftkraft und beeinflusst den sonstigen Herstellungsprozess kaum. Bild 4.2 zeigt eine Skizze eines 20 mm x 60 mm Elementes mit der gesamten Schichtreihenfolge: Substrat, CeO_2 , YBCO und Gold.

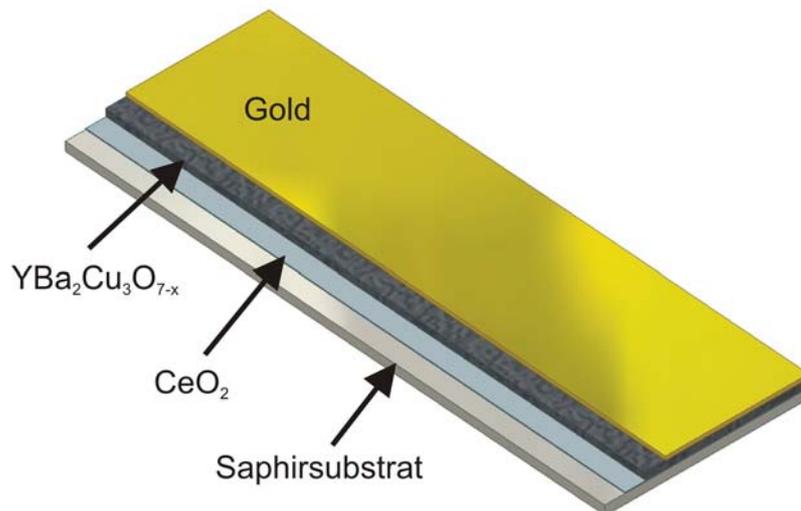


Bild 4.2: Skizze eines mit allen Schichten bedampften Elementes

Durch die Substrattemperatur beim Aufdampfen kann die kritische Stromdichte der Filme beeinflusst werden [Hei01]. Dies ist wichtig um bei YBCO Filmen ohne Shunt-Schicht hot spots zu vermeiden. Hot spots sind Bereiche im Film, die sich beim Schaltvorgang so stark erwärmen, dass der Film dort zerstört wird. Durch Verringerung der kritischen Stromdichte kann die maximale Stromtragfähigkeit und damit die Heizleistung im Moment des Schaltens verkleinert werden. Trotz der geringeren Stromtragfähigkeit wird dadurch eine höhere Schaltleistung erzielt [Hei99], als bei Filmen mit Shunt-Schicht bei denen der hohe Normalleitungswiderstand des YBCO durch die Parallelschaltung der Schunt-Schicht nicht ausgenutzt werden kann. Bild 4.3 und Bild 4.4 zeigen zwei REM Aufnahmen von YBCO-Filmen die bei verschiedener Substrattemperatur hergestellt wurden.

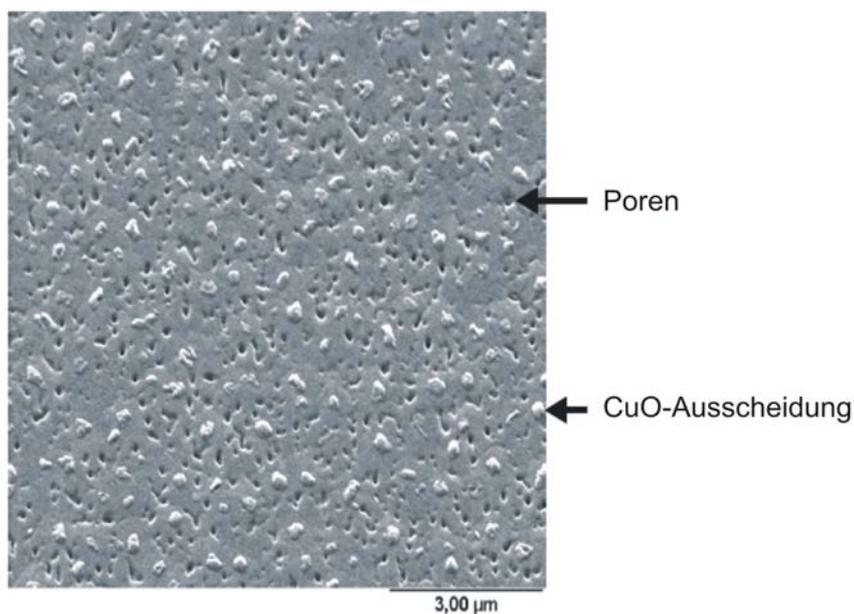


Bild 4.3: REM Aufnahme eines YBCO-Films mit einer kritischen Stromdichte von 3 MA/cm^2 , Substrattemperatur 670°C

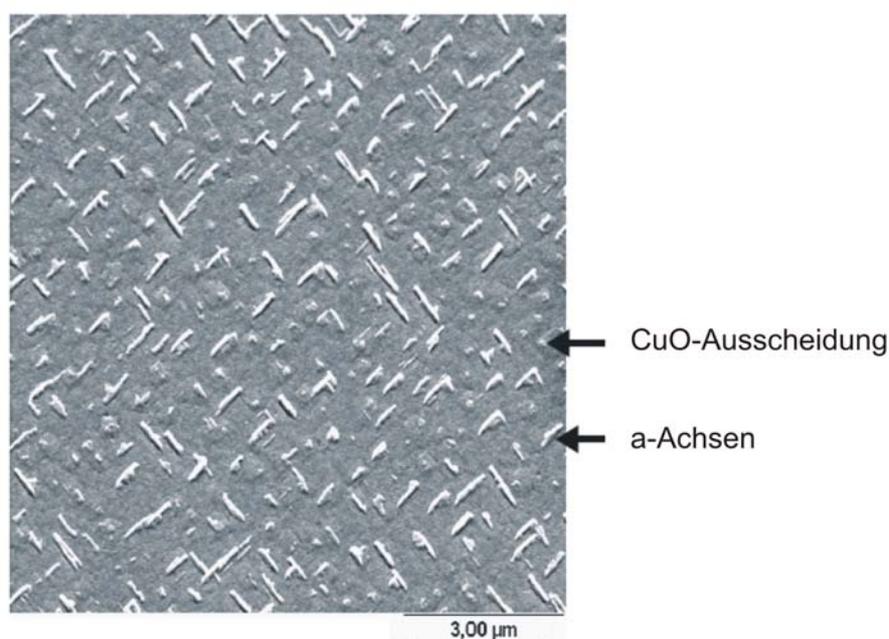


Bild 4.4: REM Aufnahme eines YBCO-Films mit einer kritischen Stromdichte von $0,8 \text{ MA/cm}^2$, Substrattemperatur 625°C

Bild 4.3 ist ein REM-Bild von einem Film mit einer kritischen Stromdichte $j_c = 3 \text{ MA/cm}^2$. Dieser wurde bei einer Substrattemperatur von 670°C aufgedampft. In der Aufnahme sind viele Poren und CuO Ausscheidungen zu erkennen. Die Poren helfen Gitterspannungen abzubauen. Im Vergleich dazu ist in Bild 4.4 ein Film zu sehen, der bei einer Substrattemperatur von 625°C hergestellt wurde. Er besitzt eine kritische Stromdichte $j_c = 0,8 \text{ MA/cm}^2$. Durch die geringere Temperatur ist die Diffusionslänge

der Atome verringert. Es sind weniger CuO-Ausscheidungen zu erkennen, dafür aber a-Achsen orientierte Kristallite. Durch die geringere kinetische Energie der Teilchen wachsen diese Kristallite um 90° verkippt in der Substratebene liegend auf. Die sich dort bildenden Korngrenzen führen zu einer Absenkung der kritischen Stromdichte.

In dieser Arbeit wurden YBCO Filme mit verschiedenen kritischen Strömen von $j_c = 0,6-2,2 \text{ MA/cm}^2$ untersucht. Dazu mussten jedoch die beschichteten Substrate photolithographisch strukturiert werden.

Da bei der Herstellung der YBCO Filme die Substrate immer vollständig beschichtet werden, ist es notwendig einzelne stromtragende Streifen zu strukturieren, um sie als geometrisch definierte Schaltelemente zu testen. Dazu wird mit Hilfe einer Lackschleuder positiv Fotolack (Clariant AZ 5214E) auf die Probe aufgebracht. Einen gleichmäßigen Lackfilm erhält man bei 3000 U/min und einer Dauer von 20 Sekunden. Zum Erreichen einer homogenen Schicht wird dieser Vorgang zur Sicherheit ein zweites Mal wiederholt. Anschließend wird beim sogenannten „Prebacke“ auf einer „Hotplate“ das im Fotolack enthaltenen Lösungsmittel bei einer Temperatur von 90°C für 60 Sekunden ausgeheizt. Nach dem Abkühlen befestigt man eine mit der gewünschten Struktur schwarz bedruckte Folie (UV-undurchlässig) auf der Probe. Eine Bestrahlung (5 s) mit UV-Licht zerstört nun den Lack an den lichtdurchlässigen Stellen der Maske und kann in einem Entwicklerbad (Clariant AZ 726) abgespült werden. Es befindet sich nun eine schützende säurebeständige Lackschicht auf der Probe die dem Aufdruck der Maskenfolie entspricht. Nun erfolgt die erste Goldstrukturierung mit einer Kaliumiodid/Iod-Lösung. Es werden dabei KI und I im Verhältnis 10:1 vermengt und in Wasser gelöst, so dass sich eine dunkelrote Lösung bildet. Dabei bildet sich aus AuI und KI ein Komplexsalz das in Lösung geht [Hei01]. Nach der Goldstrukturierung (Bild 4.5) folgt nun direkt nach einer Wasserspülung das Ätzen der YBCO Schicht in 2%iger Phosphorsäure.

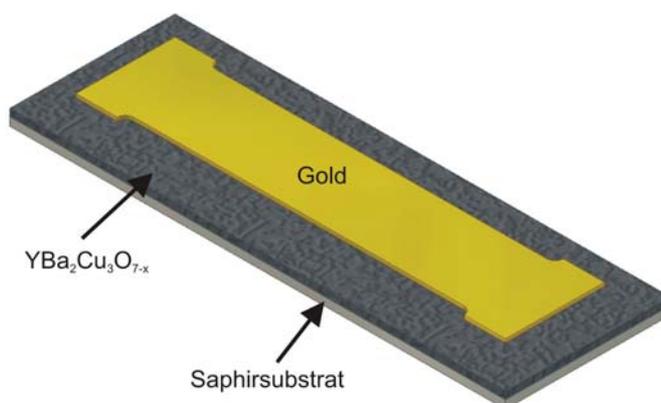


Bild 4.5: Element nach dem Goldätzen

Nun erhält man die in Bild 4.6 gezeigte Struktur.

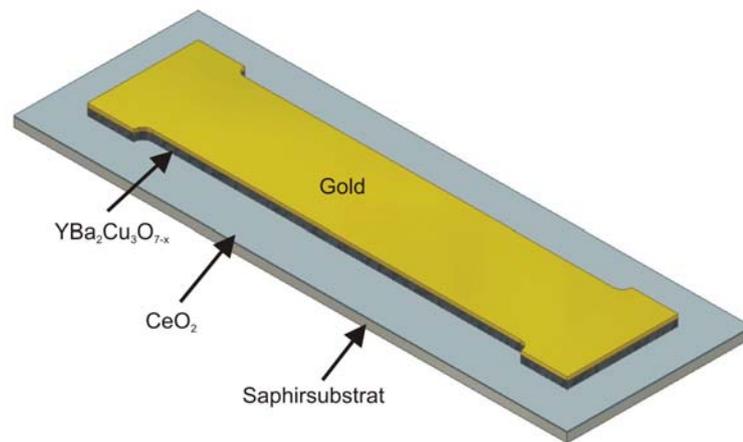


Bild 4.6: Element nach dem YBCO ätzen

Um abschließend das Gold auf dem strukturierten YBCO Streifen bis auf den Bereich der Kontakte zu entfernen, muss ein neuer Lackfilm mit der Kontaktform aufgebracht und eine zweite Goldätzung durchgeführt werden, wie oben beschrieben. Bild 4.7 zeigt nun das fertige Schaltelement mit Kontakten.

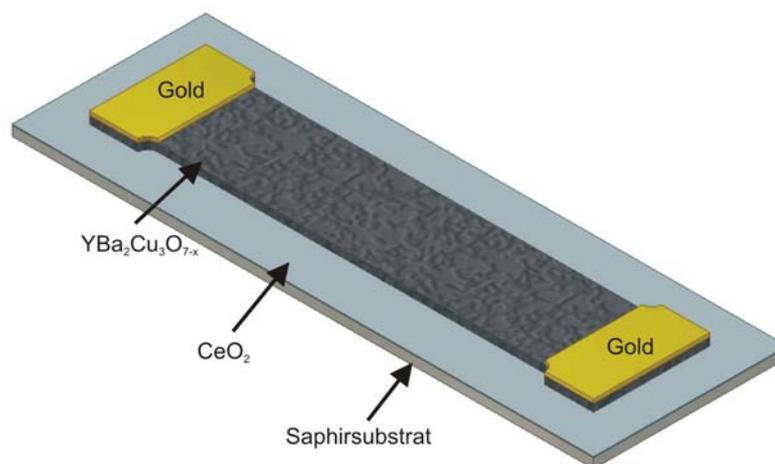


Bild 4.7: Schaltelement nach dem Ätzen der Kontakte

Zur Kontaktierung der Schaltelemente wird ein niedrigschmelzendes In-Lot verwendet, das mit 5% Silber versetzt ist. Es enthält keine säurehaltigen Flussmittel, die den Supraleiter beim Lötvorgang beschädigen könnten.

4.2 Herstellung der Hochfrequenzspulen

Zwei verschiedene Arten von Hochfrequenzspulen, mit denen der Schaltvorgang in einem YBCO-Streifen aktiv ausgelöst werden sollte, wurden entwickelt. Zum einen wurden zur Verringerung von Verlusten supraleitende Spulen aus YBCO-Dünnschichten hergestellt. Bild 4.8 zeigt eine solche photolithographisch strukturierte Spule, wie im vorigen Kapitel beschrieben.

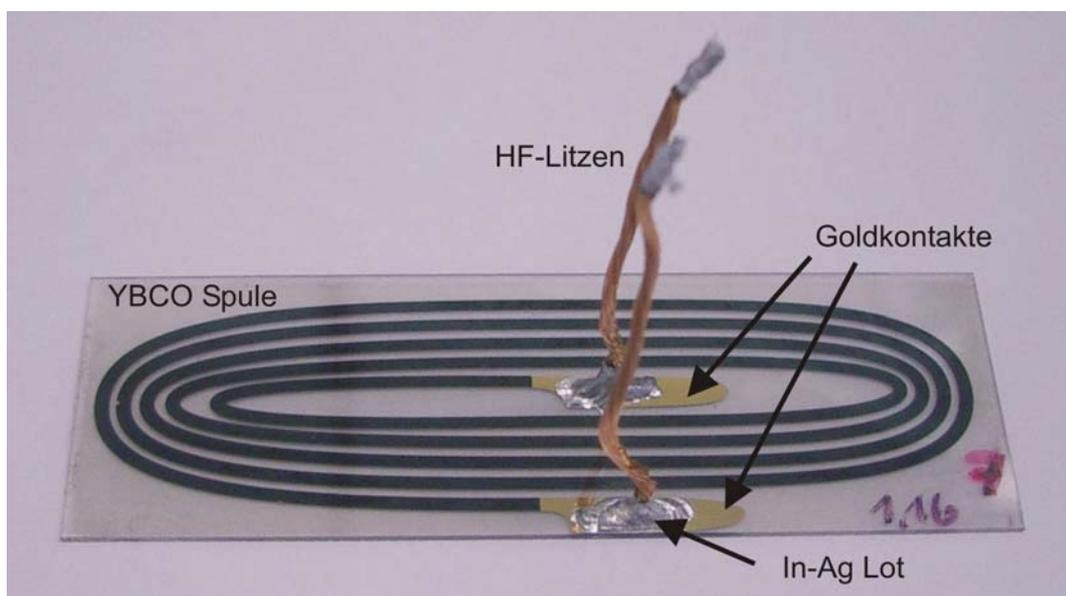


Bild 4.8: Supraleitende Spule mit Hochfrequenzlitzen zur Kontaktierung

Dabei kamen 300 nm dicke YBCO Filme mit kritischen Stromdichten $j_c = 2-3 \text{ MA/cm}^2$ zum Einsatz. Bei einer strukturierten Leiterbreite von einem Millimeter ergab sich daraus für die Belastbarkeit der Spule eine kritische Stromstärke von 6 - 9 A. An diese Spulen wurden mit InAg-Lot, mit einer Hochfrequenzlitze Kontaktbeinchen angelötet.

Zum anderen wurden Spulen aus versilbertem Kupferdraht gewickelt. Bild 4.9 zeigt eine solche Spule. Der Draht ist zur Isolierung mit einem dünnen Schrumpfschlauch umhüllt, der durch Erwärmen und Zusammenpressen gleichzeitig eine Fixierung der Windungen durch leichtes Verschmelzen ermöglicht. Der versilberte Draht hat eine Dicke von 1 mm und der Schrumpfschlauch erhöht den Durchmesser auf 1,4 mm. Für die im nächsten Kapitel vorgestellten Messungen wurden verschiedene Formen und Größen von Spulen nach den zwei gezeigten Verfahren hergestellt.

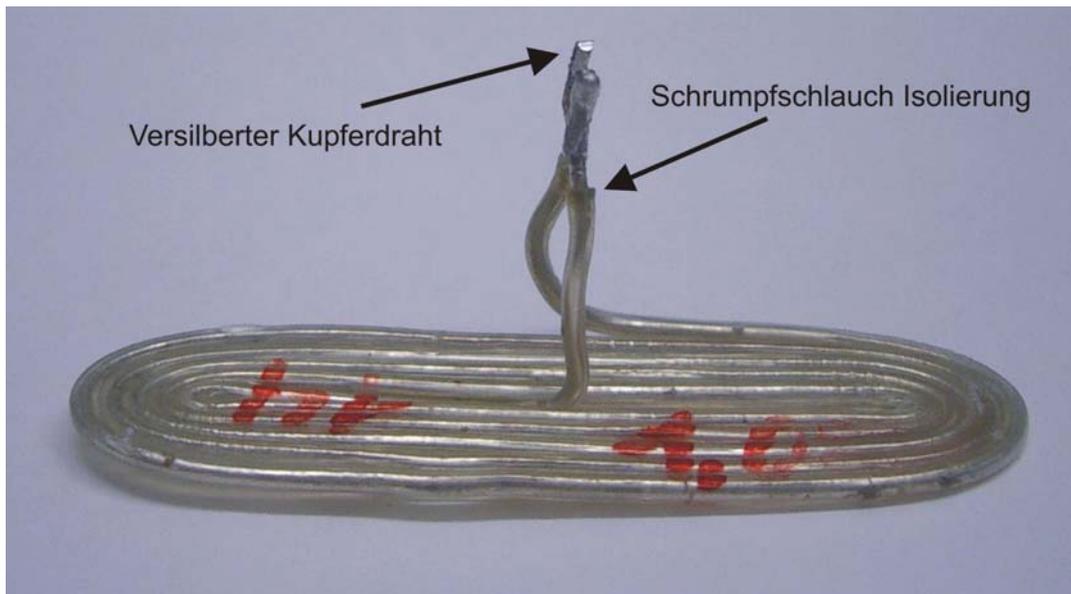


Bild 4.9: Spule aus versilbertem Kupferdraht (1mm) gewickelt; mit Schrumpfschlauch zur Isolierung

5 Messungen

Kapitel 5 stellt die Experimente mit hochfrequenzgetriggerten Schaltelementen vor. Im Abschnitt 5.1 werden Untersuchungen an einem gestreckten Schaltelement behandelt. In Abschnitt 5.2 wird die Entwicklung einer neuen Geometrie des Schaltelements und deren Ergebnisse präsentiert.

5.1 Gestrecktes Schaltelement

Das gestreckte „Standard“ Schaltelement hat eine Länge von 52 mm und besitzt in Längsrichtung zwei Kontaktflächen von jeweils 5 mm x 12 mm. Es hat damit eine supraleitende Länge zwischen den Kontakten von 42 mm. Die Breite des Elements beträgt an den Kontaktbereichen 12 mm und ist nach innen auf 10 mm Breite tailliert. Die Taillierung soll verhindern die Kontaktbereiche des Supraleiters bevorzugt zum Schalten zu bringen, da diese zusätzlich durch den Kontaktwiderstand und den Transportstrom geheizt werden. Bild 5.1 zeigt ein solches Schaltelement auf einem 20 mm x 60 mm Saphirsubstrat, das wie in 4.1 beschrieben hergestellt wurde.

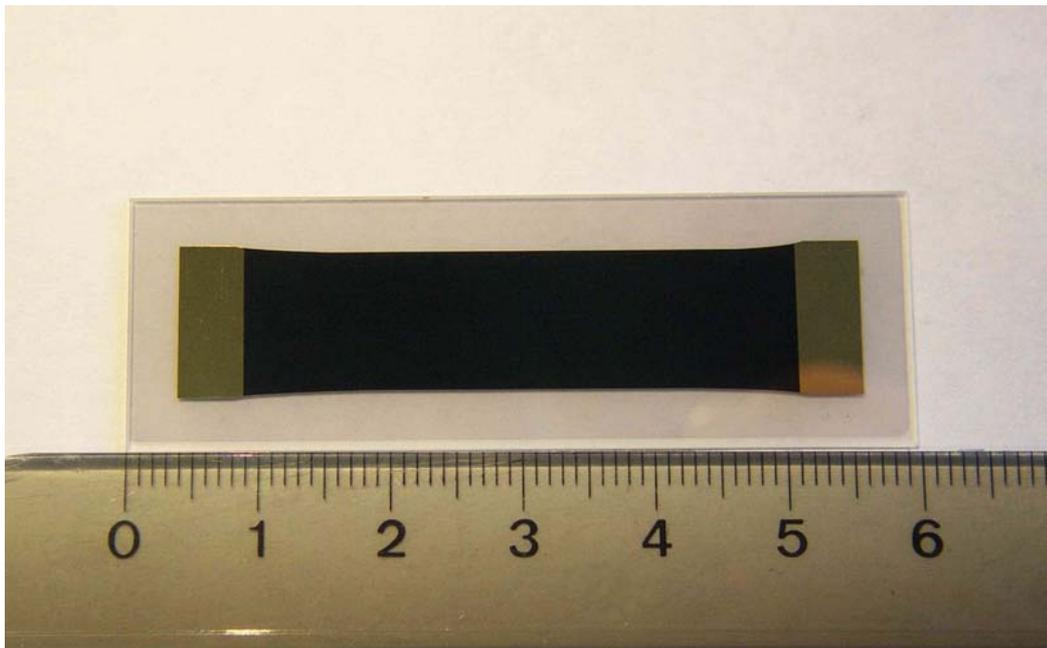


Bild 5.1: Gestrecktes Schaltelement auf 20 mm x 60 mm Saphirsubstrat

Für die verschiedenen Messungen wurden auch 4 Zoll Substrate mit sieben nebeneinander strukturierten gestreckten Schaltelementen verwendet (Bild 5.2). Diese eignen sich auch um Versuche mit mehreren Schaltelementen gleichzeitig durchzuführen.

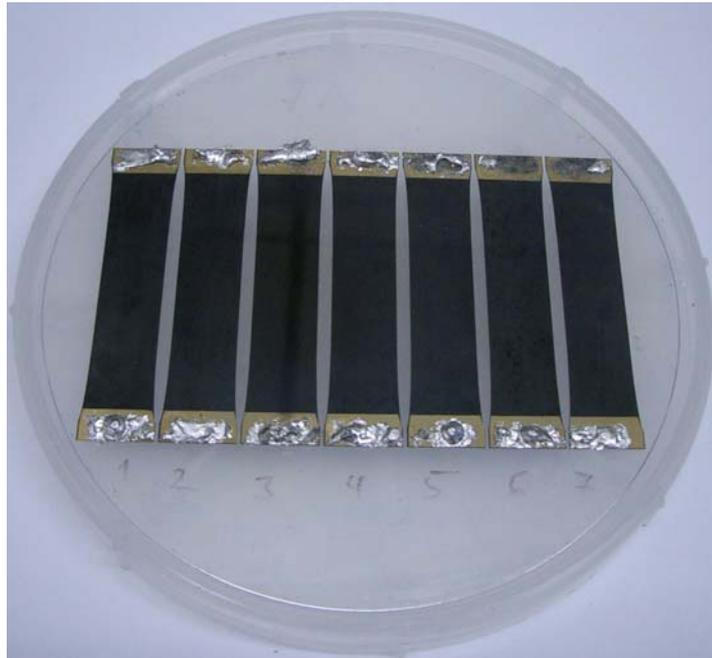


Bild 5.2: 4-Zoll Wafer mit sieben strukturierten Schaltelementen

5.1.1 Messaufbau

Der in dieser Arbeit verwendete Messaufbau wurde in einer Diplomarbeit [Hie01] entwickelt und soll deshalb hier nur in den Grundzügen und Neuerungen beschrieben werden. Der Messaufbau soll dazu dienen einen supraleitenden Film in flüssigem Stickstoff mit einem konstanten Vorstrom (= Transportstrom) zu belasten und ihn zusätzlich Hochfrequenzpulsen auszusetzen. Die Einkopplung der Hochfrequenzpulse wurde durch einen Schwingkreis ermöglicht der direkt am Supraleiter im flüssigen Stickstoff arbeitet. Dabei soll sowohl Strom und Spannung am Supraleiter, als auch die Hochfrequenzleistung und Pulslänge gemessen werden.

Bild 5.3 zeigt schematisch den gesamten Aufbau im Überblick. Der Vorstrom für den supraleitenden Film kommt durch HF-Durchgangsfiler von einer 12 V Batterie mit einstellbaren Vorwiderständen und wird über einen Shunt-Widerstand von 5 m Ω mit einem Oszilloskop aufgezeichnet. Zum schnelleren Einstellen und Überprüfen des Stromwertes wurde auch eine Stromzange benutzt, die unterbrechungsfrei den Stromfluss messen kann. Die Spannung am Supraleiter wird direkt nach einem HF-Filter ebenfalls mit dem Oszilloskop gemessen. Für den Hochfrequenzpuls wird durch einen Pulsgenerator ein Signalgenerator angesteuert, der dadurch ein Sinussignal (10 kHz – 220 MHz) gewünschter Länge auf den Ausgang gibt. Dieses wird über einen Verstärker (erreichbare Ausgangsleistung mindestens 100 W im oben genannten Frequenzbereich) durch einen Richtkoppler zu einem Schwingkreis geführt. Über den Richtkoppler wird ein kleiner Teil (-40dB) der vor- und rücklaufenden Leistung ausgekoppelt und mit einem Leistungsmessgerät gemessen.

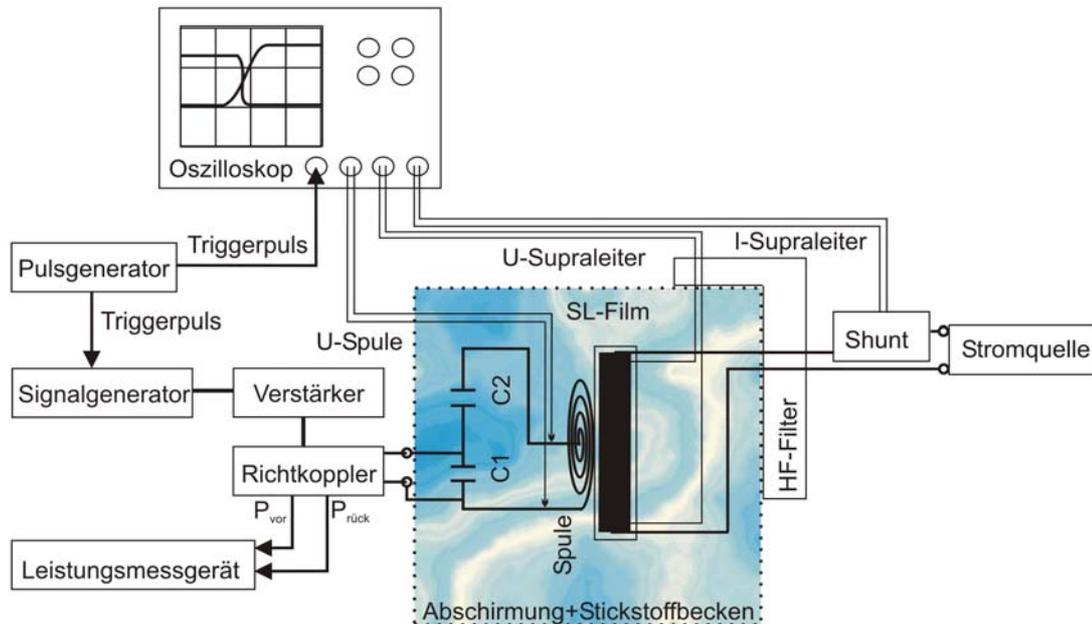


Bild 5.3: Schematischer Messaufbau

Aus der Differenz der beiden Leistungen wird dann die Leistung des HF-Pulses bestimmt. Der Hauptteil der Leistung wird nach dem Richtkoppler über ein Semirigidkabel in den Schwingkreis eingekoppelt. Er besteht aus zwei Koppelkondensatoren (Glimmer-Kondensatoren) im Verhältnis 3:1 (3:C1, 1:C2), die den Wellenwiderstand von 50Ω des Verstärkers an den Schwingkreis anpassen und einer HF-Spule (Kapitel 4.2). Die einzelnen Komponenten wurden an eine wechselbare Eckkupplung gelötet die an das Semirigidkabel geschraubt wird. Die Spannung an der Spule wird über einen Tastkopf am Oszilloskop gemessen. Die Daten des Oszilloskops werden über einen PC ausgelesen und weiterverarbeitet. Außerdem ist es möglich, über eine Ansteuerung des Signalgenerators und Auslesen des Leistungsmessgeräts mit dem Computer, ein Frequenzspektrum des Schwingkreises aufzuzeichnen. Damit wurden niedrige Güten im Bereich von 30 bis 100 ermittelt. Dies resultiert aus der gewünschten, starken Beeinflussung des Schwingkreises durch den Supraleiter. Der gesamte Schwingkreis, dessen Spule direkt auf die Rückseite des supraleitenden Schaltelementes positioniert wird (das Substrat dient dabei als zusätzliche Isolierung), befindet sich in einem Abschirmkasten aus Messing, in dem sich ein Stickstoffbecken aus Polypropylen befindet (Bild 5.4). An diesem Becken ist eine lineare Verschiebungseinheit montiert, über die der Schwingkreis bzw. die Spule mit dem starren Semirigidkabel in 3-D-Richtungen justiert werden kann. Zu sehen ist in Bild 5.4 auch ein Wafer-Halter aus Teflon für 4 Zoll Wafer und der Strom- bzw. Spannungsanschluss für den Supraleiter. Während in Bild 5.4 der Aufbau mit einer Drahtspule zu sehen ist, zeigt Bild 5.5 den Aufbau mit einer supraleitenden Spule.

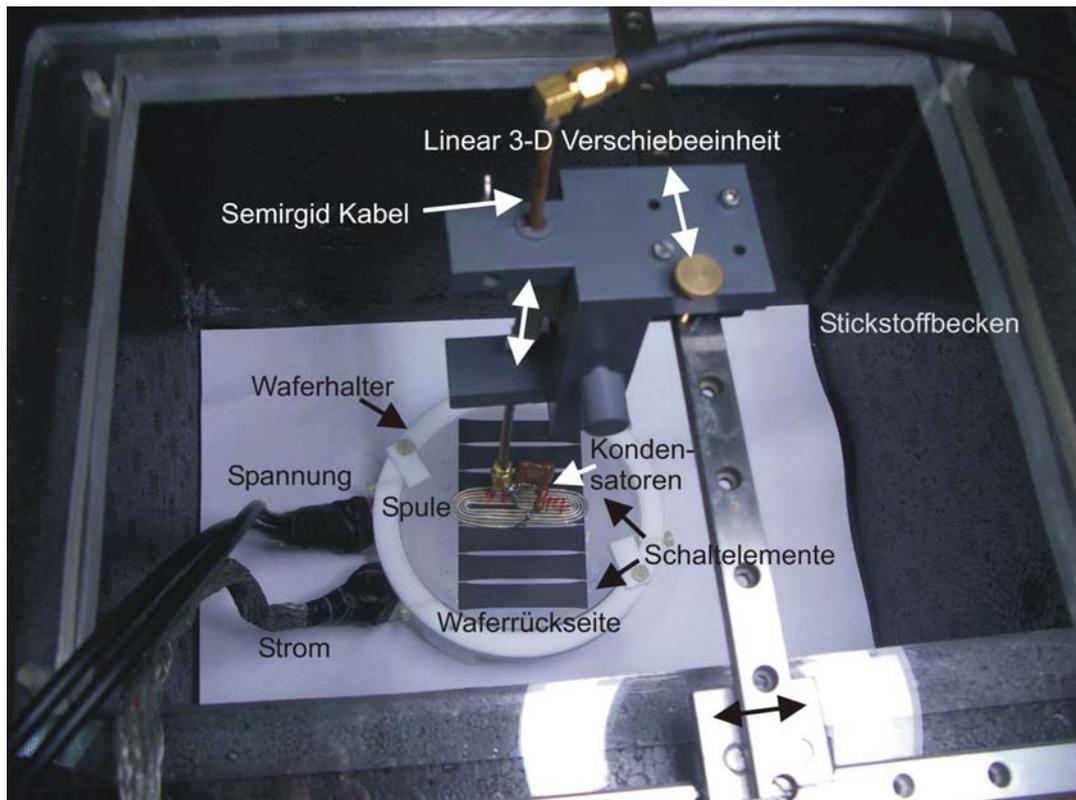


Bild 5.4: Foto des Messaufbaus mit Drahtspule

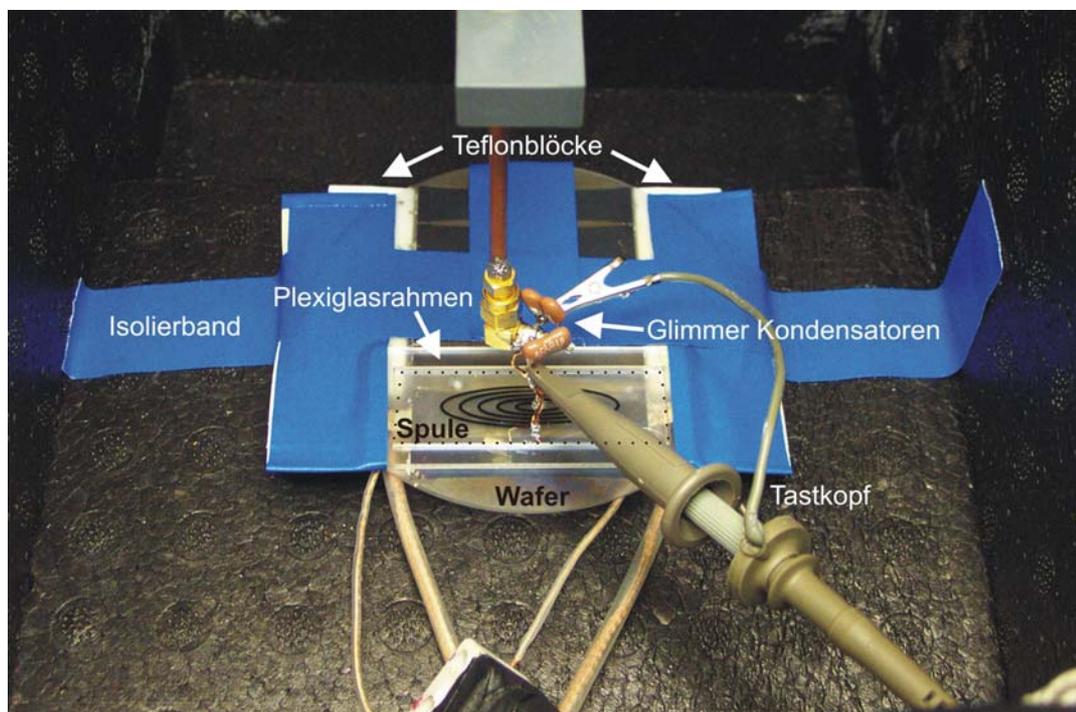


Bild 5.5: Foto des Messaufbaus mit supraleitender Spule

In Bild 5.5 ist auch der Tastkopf an der Spule zu sehen, der die Spannung an der Spule ebenfalls über das Oszilloskop misst. Die Hochfrequenzlitzten, mit denen die supraleitende Spule an dem Semirigidkabel angelötet ist sind flexibel, um die Lötungen am Supraleiter beim Aufsetzen nicht zu stark zu belasten. Deshalb wird ein Plexiglasrahmen mit Isolierband auf den Wafer geklebt der die Spule gegen ein seitliches Verschieben fixiert. Der Wafer wurde in diesem Fall ebenfalls auf zwei Teflonblöcke mit Isolierband geklebt und nur ein Streifen gemessen, diese Anordnung wurde auch für die 20 mm x 60 mm Einzel-Schaltelemente benutzt. Der Abstand von Spule zu Schaltelement beträgt damit im Fall der Silberdrahtspule die Substratdicke von 0,53 mm plus die Schrumpfschlauchdicke von 0,2 mm also 0,73 mm und im Fall der supraleitenden Spule zweimal die Substratdicke also 1,06 mm. Wenn nicht extra erwähnt, wurden alle Messungen mit „Pfannkuchenspulen“, wie in Bild 5.4 und Bild 5.5 zu sehen, durchgeführt.

Die Vorstellung der mit diesem Messaufbau gewonnenen Daten soll nun mit einer typischen Messung begonnen werden.

5.1.2 Typische Messung / Schaltvorgang

In Bild 5.6 ist eine Typische Messung eines Schaltvorganges zu sehen. Diese Messung wurde mit einem einzelnen Schaltelement (20 mm x 60 mm) durchgeführt. Es wies eine kritischen Stromdichte von $0,8 \text{ MA/cm}^2$ und einen passiven Schaltstrom I_s von 34,8 A auf. Der Vorstrom betrug 33,8 A. Der Schwingkreis bestand aus einer Silberdrahtspule mit einer Induktivität von $0,66 \mu\text{H}$ (5 Windungen) und zwei Koppelkondensatoren mit 820 pF und 270 pF und wurde bei seiner Resonanzfrequenz von 16 MHz eingesetzt. Aufgetragen ist der Strom und die Spannung am Supraleiter, die Spannung an der Spule und der Triggerpuls gegen die Zeit.

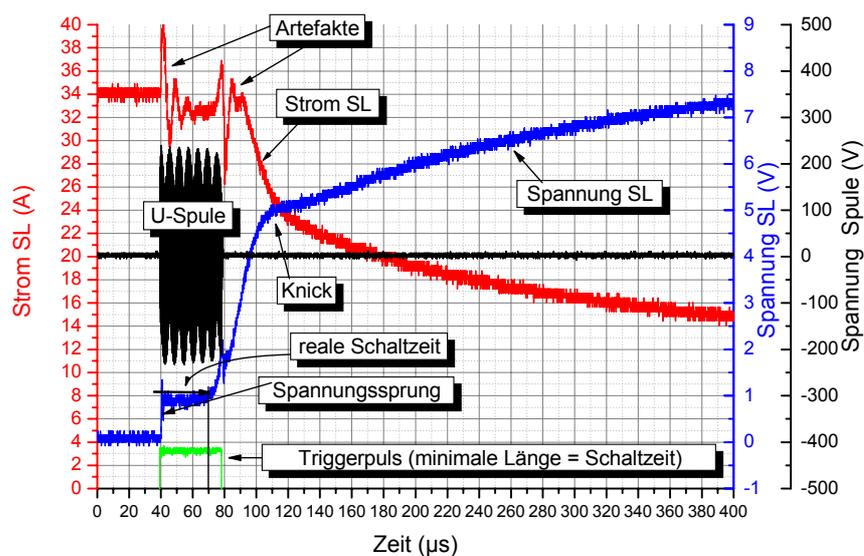


Bild 5.6: Typische Messung

Beim Zeitpunkt $t=40\mu\text{s}$ wurde ein Hochfrequenzpuls (HF-Puls) mit einer Leistung von 30 W, 39 μs lang angelegt. Bei Beginn des HF-Pulses ist sofort ein Spannungssprung von 800 mV am Supraleiter zu erkennen, der auf einen durch die HF erzeugten Widerstand im SL hindeutet. Aufgrund dieses Widerstandes heizt nun der fließende Strom den Supraleiter auf. Nach einer Dauer von ca. 30 μs (Definiton: „der realen Schaltzeit“) schaltet der Supraleiter, wie in Kapitel 3.2 beschrieben, durch einen thermischen Schaltvorgang. Die Spannung steigt stark an und der Vorstrom wird innerhalb von 70 μs auf 24 A begrenzt. Beim Zeitpunkt von 110 μs ist ein Knick im Spannungs- und Stromverlauf zu erkennen. Dies deutet darauf hin, dass der normalleitende Bereich (Quench) sich nun entsprechend der anliegenden Spannung auf seine maximale Länge ausgedehnt hat [Hei01]. Die nach dem Knick flachere Zunahme der Spannung ist durch die weitere Erwärmung des Schaltelementes bedingt. Nach weiteren 2 ms (in Bild 5.6 nicht mehr zu sehen) wird der Strom auf einen minimalen Wert von 6 A reduziert. Das bedeutet eine Begrenzung auf 18% des Ausgangswertes. Das Schaltelement befindet sich nun im thermischen Gleichgewicht zwischen Heizung, durch den reduzierten Strom, und Kühlung zunächst über Wärmeabgabe an das Substrat und später an das Stickstoffbad.

Die minimale Dauer des Triggerpulses die zu einem sicheren Schalten führt (fünf Schaltversuche: immer geschaltet) wird als Schaltzeit definiert, da diese Zeit angibt, welche HF-Pulsdauer minimal notwendig ist, um den Schaltvorgang auszulösen. Es sei noch darauf verwiesen, dass diese Messung den bisher schnellsten Schaltvorgang mit HF-Trigger zeigt.

Die beiden Peaks im Stromverlauf stellen Artefakte dar die vom Ein- und Ausschalten der HF herrühren. Die Spannung an der Spule ist ebenfalls gezeigt, wird aber bei dieser Zeitskala des Oszilloskops nicht richtig aufgelöst und dient deshalb nur zur Verdeutlichung der HF-Pulslänge.

Eine hochaufgelöste Messung der Dauer vom Anstieg des Triggerpuls bis zum Erreichen der maximalen Spulenspannung ergab eine Zeitverzögerung von ca. 1 μs und ist daher für die meisten Messungen vernachlässigbar. Aus einer genaueren Auflösung der Spulenspannung zu Beginn des Pulses lässt sich die maximale Spulenspannung bestimmen, sie betrug hier 238 V (Scheitelspannung). Daraus lässt sich der HF-Strom in der Spule über den Wechselstromwiderstand ($R = \omega L$) abschätzen zu $I_{\text{HF}} = 3,6$ A. Aus diesem Wert wurde der durch die Spule im Supraleiter induzierte HF-Strom $I_{\text{HF-SL}} = 14,1$ A zu Beginn des HF-Pulses berechnet (siehe Kapitel 6). Zur genaueren Erläuterung der Messung der Spannung an der Spule ist in Bild 5.7 eine Beispielmessung gezeigt. Die Messgrößen sind dabei einzeln dargestellt. Aufgetragen ist der Strom und die Spannung am Supraleiter, die Spannung an der Spule und der Triggerpuls gegen die Zeit. Aufgrund der starken induktiven Kopplung des Supraleiters an den Schwingkreis verändert sich die Spannung an der Spule während des Schaltvorganges. Zur Berechnung von $I_{\text{HF-SL}}$ wird deshalb der Anfangswert der Spannung (siehe Pfeil) an der Spule (Mittelung über einige Schwingungen) verwendet.

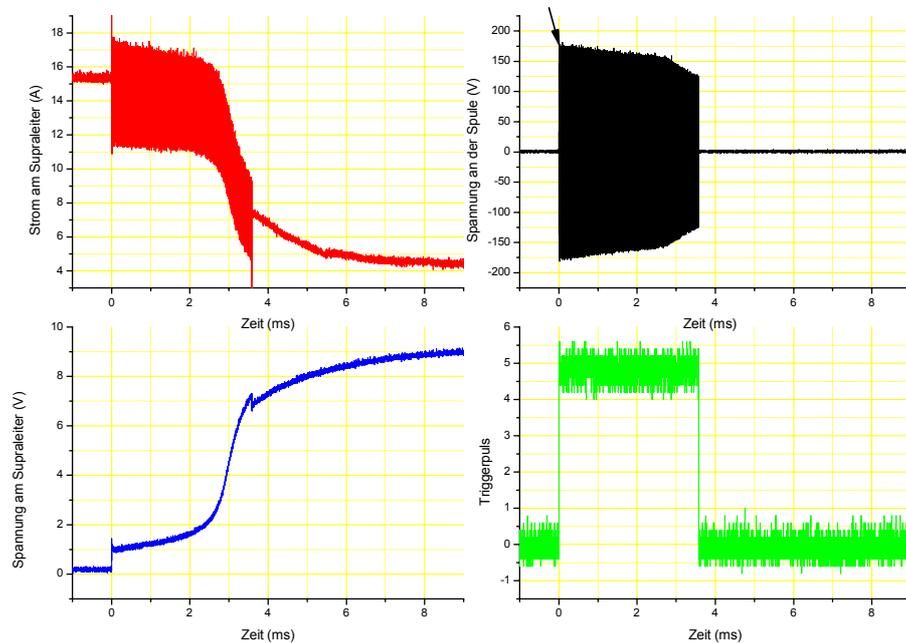


Bild 5.7: Beispielmessung zur Verdeutlichung der Messung der Spannung an der Spule. Verwendet wird der mit einem Pfeil markierte Anfangswert

In diesem Zusammenhang sollen noch die in diesem Kapitel eingeführten Begriffe der Schaltzeit bzw. realen Schaltzeit näher betrachtet werden. In Bild 5.8 ist beispielhaft eine Messung der realen Schaltzeit aufgetragen gegen die HF-Pulsdauer gezeigt.

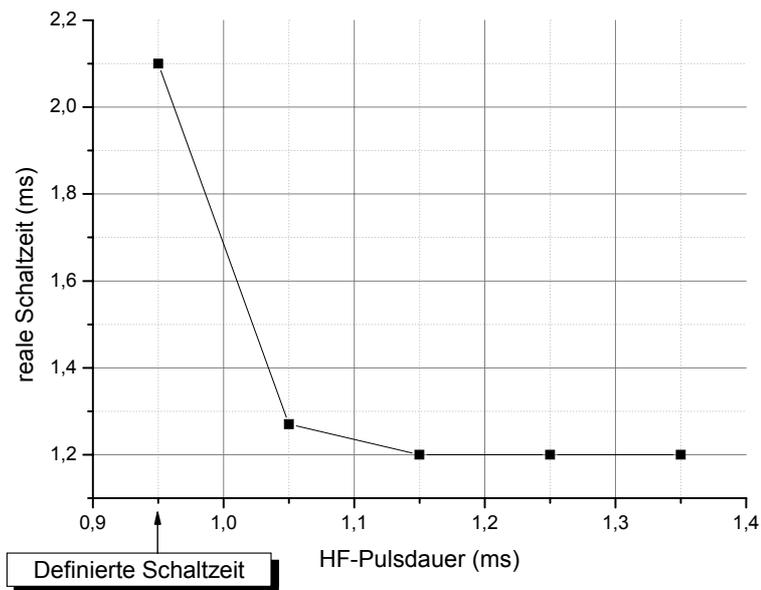


Bild 5.8: Reale Schaltzeit gegen Pulsdauer

Bei kurzen HF-Pulsen schaltet der Supraleiter erst nach dem Puls und hat eine längere reale Schaltzeit als die Pulsdauer. Mit steigender Pulsdauer nimmt die reale Schaltzeit ab, bis sie einen gleich bleibenden Wert erreicht (Abweichungen liegen im Bereich von 10% der realen Schaltzeit). Bei einem längeren HF-Puls schaltet der Supraleiter nun auch vor Ende des HF-Pulses. Die kürzeste HF-Pulsdauer, bei der der Supraleiter sicher schaltet, wurde als Schaltzeit definiert, sie entspricht meist nicht der kürzesten realen Schaltzeit (Die Abweichung liegt im Bereich von 20% - 30% der Schaltzeit).

Anmerkung: Es wurde in allen Messungen maximal bis zu einer Schaltzeit von einer Sekunde gemessen. In den in dieser Arbeit vorgestellten Graphen sind deshalb keine Messwerte über einer Sekunde Schaltzeit eingetragen. Bei der Entwicklung eines schnellen Schalters ist dieser Zeitbereich nicht mehr von Bedeutung.

5.1.3 Elektrische Einflussgrößen

Der Schaltvorgang mit HF-Trigger am gestreckten Schaltelement wurde durch Variation der verschiedensten Parameter genauer untersucht. Hier sollen zunächst die elektrischen Einflussgrößen gezeigt werden.

Anmerkung: In den folgenden Messungen wird immer die reziproke Schaltzeit aufgetragen, dadurch werden die leistungsabhängigen kurzen Schaltzeiten hervorgehoben.

5.1.3.1 Frequenz

Die Frequenzabhängigkeit der reziproken Schaltzeit ist in Bild 5.9 gezeigt. Aufgetragen sind Messungen an einem Schaltelement mit einem Schaltstrom $I_s=30\text{ A}$ bei verschiedenen Vorströmen. Die HF-Leistung betrug dabei konstant 5 W .

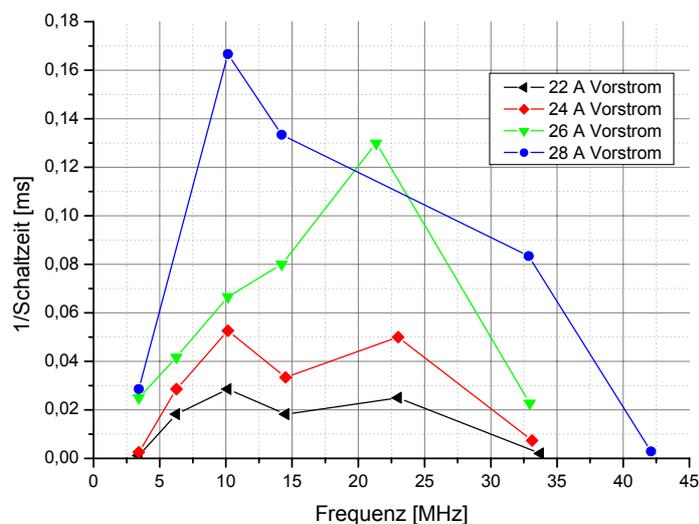


Bild 5.9: $1/\text{Schaltzeit}$ gegen Frequenz bei konstanter HF-Leistung von 5 W

Die kürzesten Schaltzeiten wurden im Frequenzbereich von 3 MHz bis zu 40 MHz je nach Vorstrom erreicht. Aus technischer Sicht ist dies also der ideale Frequenzbereich für den Schalter mit gestrecktem Schaltelement. Kleine Schwankungen in der Schaltzeit im Bereich von 10 MHz bis 25 MHz sind auf andere Parameter zurückzuführen, die später erläutert werden.

Betrachtet man den HF-Strom in der Spule bei konstanter HF-Leistung in Abhängigkeit von der Frequenz (Bild 5.10), so wird deutlich, dass in diesem Frequenzbereich der größte HF-Strom in der Spule floss.

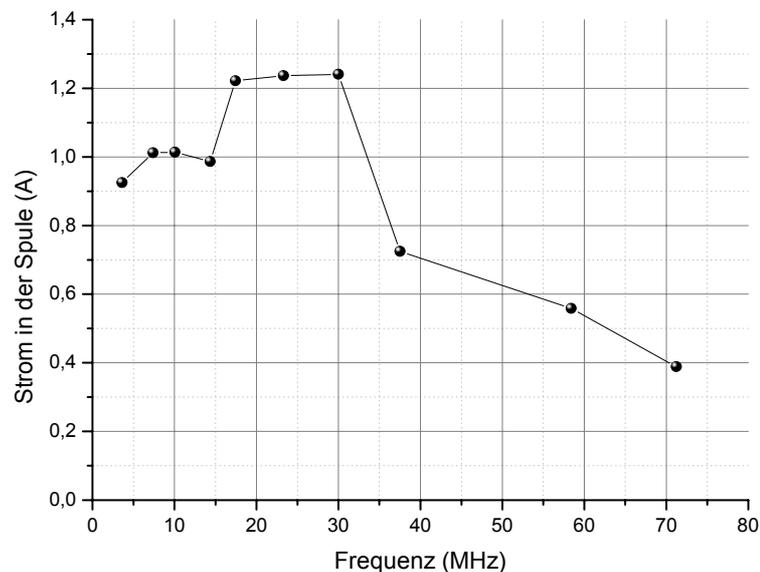


Bild 5.10: Strom in der Spule bei konstanter HF-Leistung von 5 W

Mit steigender Frequenz nimmt der Wechselstromwiderstand der Spule zu, daraus folgt die deutliche Abnahme des HF-Stromes für höhere Frequenzen. Außerdem wird bei einem Schwingkreis mit sinkender Frequenz das L/C Verhältnis (dieses wurde variiert, um verschiedene Frequenzen zu erreichen) kleiner und damit auch die Güte. Dies wirkt sich hier aber nicht stark aus, da der HF-Strom unterhalb von 15 MHz nur schwach abnimmt. Die stark zunehmende Schaltzeit bei kleinen Frequenzen lässt sich damit also nicht erklären.

Die Größe des HF-Stromes in der Spule ist stark abhängig vom gerade verwendeten Schwingkreis. Deshalb ist es physikalisch sinnvoll Messungen bei konstantem HF-Strom zu betrachten. Eine Messung bei konstantem HF-Strom im Supraleiter $I_{\text{HF-SL}}$ zeigt Bild 5.11. Aufgetragen ist die reziproke Schaltzeit gegen die Frequenz bei einem HF-Strom von $I_{\text{HF-SL}} = 3,5$ A. Das verwendete Schaltelement hatte einen Schaltstrom von $I_s = 18,6$ A bei einem Vorstrom $I_v = 17,6$ A.

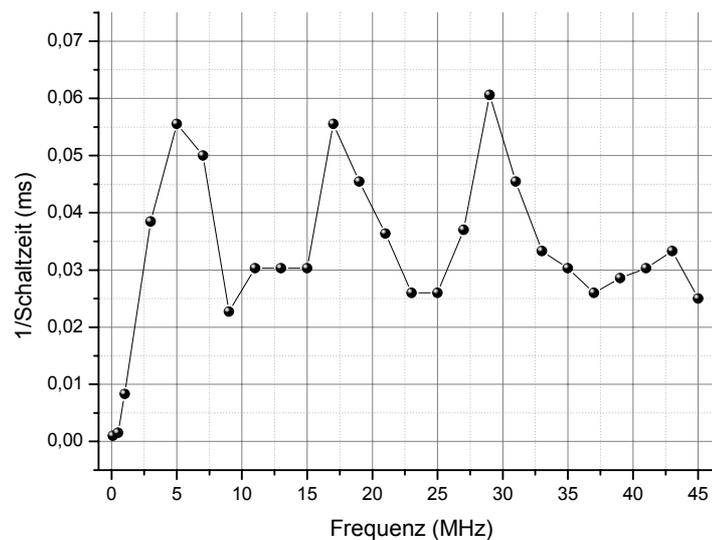


Bild 5.11: $1/\text{Schaltzeit}$ gegen Frequenz mit konstantem HF-Strom im Supraleiter von 3,5 A

Bis zu ca. 3 MHz ist eine deutliche Erhöhung der reziproken Schaltzeit zu sehen, danach bleibt die Schaltzeit im Mittel auf einem gleichen Niveau. Es ist aber eine Schwingung überlagert, deren Ursprung bisher nicht geklärt ist.

5.1.3.2 Spannungssprung

Der Spannungssprung am Schaltelement resultiert aus einem durch die Hochfrequenz im Supraleiter erzeugten Widerstand und tritt sofort bei Beginn des Hochfrequenzpulses auf. Er ist gut an der aufgetragenen Spannung in Bild 5.6 und Bild 5.7 (Kapitel 5.1.2) zu sehen. Der Zusammenhang von Spannungssprung und Schaltzeit ist - wie gezeigt wird - unabhängig von der Einkopplung der Hochfrequenz in den Supraleiter und soll deshalb genauer betrachtet werden. Er ist beispielhaft an einer Messung in Bild 5.12 gezeigt. Dargestellt ist der Spannungssprung gegen die reziproke Schaltzeit für zwei Schaltelemente. Eingezeichnet sind hier zusätzlich (und auch in der weiteren Arbeit) die Ergebnisse eines von H. Kinder entwickelten Simulationsprogramms, das in Kapitel 6 beschrieben wird. Die Höhe des Spannungssprungs wurde durch Veränderung des Vorstromes oder des HF-Stromes (HF-Amplitude) variiert (Element 1 beides, Element 2 nur HF-Strom, Simulation beides). Bei Spannungssprüngen bis etwa 250 mV liegen alle Messpunkte im Rahmen der Streuung auf einer Geraden. Sie sind damit unabhängig vom Element und nur vom gesamten im Supraleiter fließenden Strom, zusammengesetzt aus Vorstrom und induziertem HF-Strom, abhängig. Bei höheren Spannungssprüngen verlaufen alle simulierten Parameter auf der gleichen Kurve annähernd linear weiter mit einer schwachen Sättigung am Ende. Bei den gemessenen Schaltelementen erwärmt sich das Element 1 ($I_s=35,5$ A, $I_{\text{vor}}=34,5$ A bei HF-Stromabhängiger Messung) je nach Messvariante schneller und die Messwerte biegen nach oben zu kleineren Schaltzeiten hin ab. Das Element 2 ($I_s=36$ A, $I_{\text{vor}}=35$ A) hingegen passt gut zu den simulierten Werten. Bei dem Element 1 handelt es sich um das bisher schnellste Schaltelement.

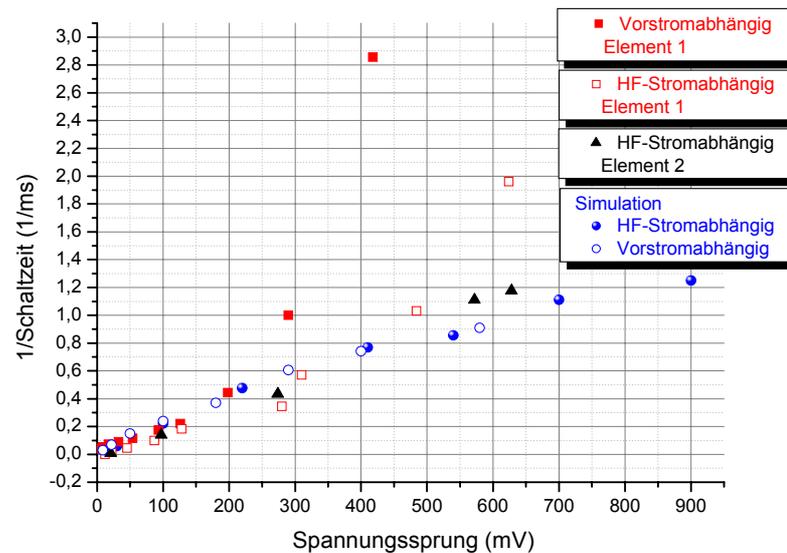


Bild 5.12: Zusammenhang von Spannungssprung und reziproker Schaltzeit: Messungen verschiedener Schaltelemente und Simulation

Warum sich dieses Element bei gleich hohem Spannungssprung schneller erwärmt ist bisher unklar.

Alle Messwerte von verschieden für diese Arbeit gemessenen Schaltelementen auch mit verschiedenen Schaltströmen liegen zwischen oder bei den gezeigten Beispielen mit vergleichbarem Kurvenverlauf.

5.1.3.3 HF-Strom

Im Folgenden soll der Einfluss des durch die Spule im Supraleiter erzeugten HF-Stroms untersucht werden. Bild 5.13 zeigt ein Beispiel für eine HF-Strom abhängige Messung. Aufgetragen ist der Spannungssprung gegen den HF-Strom im Supraleiter. Die Probe wies einen Schaltstrom von 33 A ($j_c=0,8\text{MA}/\text{cm}^2$, Einzelelement 20 mm x 60 mm) auf. Durchgeführt wurde der Versuch bei einem Vorstrom von 32 A mit einem HF-Puls bei 16 MHz. Die dazu eingetragenen simulierten Ergebnisse passen von der Kurvenform gut zu den Messergebnissen. Sie zeigen aber bei gleichem HF-Strom kleinere Spannungssprünge und dadurch längere Schaltzeiten als die Messung. Zusätzlich wurden deshalb die HF-Stromwerte der Messung mit dem Faktor 1,35 multipliziert und die so verschobene Kurve ebenfalls eingetragen. Diese angepasste Messung und die Simulation liegen auf derselben Kurve. Alle drei Kurven sind auch in Bild 5.14 gezeigt. Hier ist nun die zugehörige Abhängigkeit der jeweiligen reziproken Schaltzeiten vom HF-Strom zu sehen. Bis zu einem HF-Strom im Supraleiter von ca. 15 A passt auch hier die verschobene Messkurve gut mit der Simulation zusammen. Wie jedoch im vorigen Kapitel präsentiert, weichen auch hier die Schaltzeiten bei hohen Strömen (damit hohen Spannungssprüngen) von den Ergebnissen der Simulation ab.

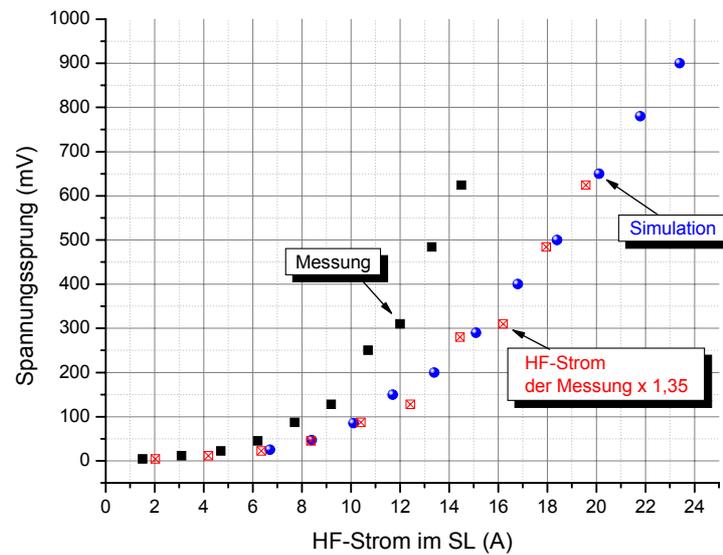


Bild 5.13: Beispielmessung: Spannungssprung gegen HF-Strom im Supraleiter und Simulationsergebnisse

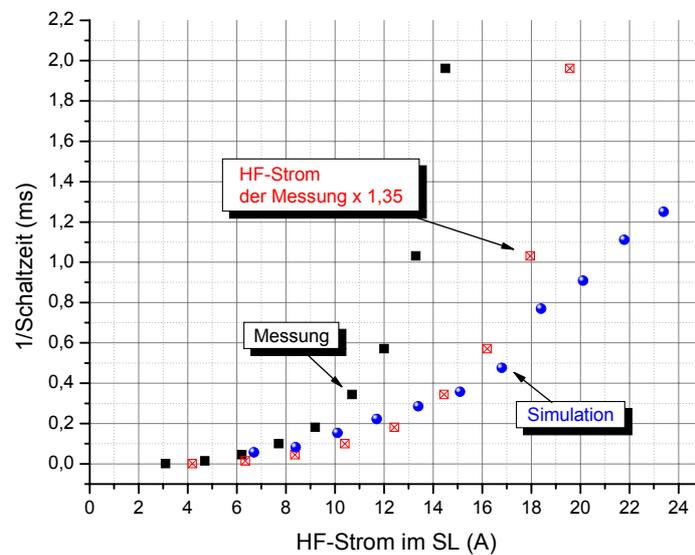


Bild 5.14: $1/\text{Schaltzeit}$ gegen HF-Strom im SL

5.1.3.4 Vorstrom

Der Vorstrom am supraleitenden Schaltelement ist direkt für die Heizung des Schalters zuständig und somit ein sehr wichtiger Parameter für den Schaltvorgang. Bild 5.15 und Bild 5.16 zeigen den Spannungssprung und die reziproke Schaltzeit aufgetragen gegen den Vorstrom einer Beispielmessung. Der Schaltstrom des Schaltelementes betrug

33,8 A ($j_c=0,8\text{MA}/\text{cm}^2$, Einzelelement 20 mm x 60 mm). Es wurde ein HF-Puls bei 16 MHz mit einem HF-Strom $I_{\text{HF-SL}}=12,6\text{ A}$ verwendet. Eingezeichnet sind auch wieder Simulationenwerte. Es zeigt sich ein ähnlicher Verlauf wie schon bei der HF-Stromabhängigkeit. Mit zunehmendem Vorstrom steigen Spannungssprung und reziproke Schaltzeit. Die Simulation erreicht dabei zu geringe Werte.

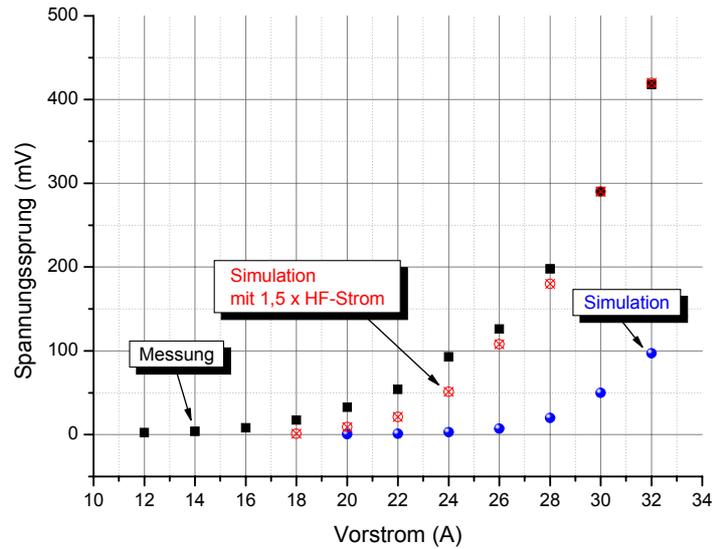


Bild 5.15: Spannungssprung gegen Vorstrom: Messung und Simulation

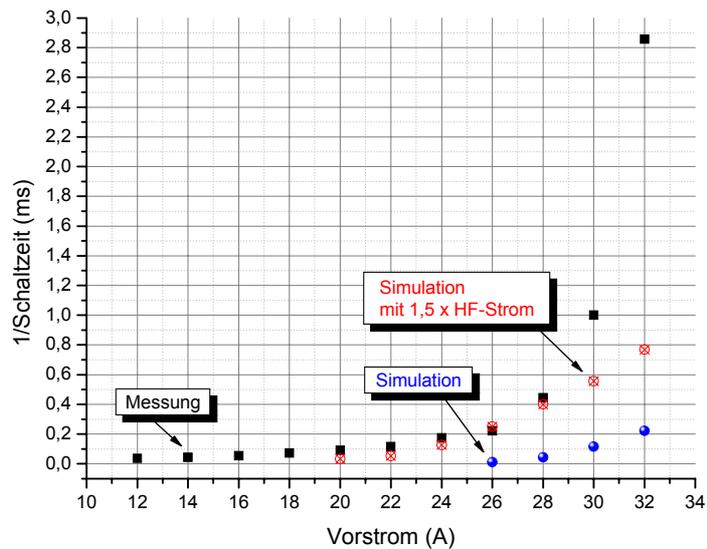


Bild 5.16: 1/Schaltzeit gegen Vorstrom: Messung und Simulation

Deshalb wurde wie im vorigen Kapitel eine Anpassung über eine Verschiebung des HF-Stromes vorgenommen. Es sind deshalb auch Simulationswerte bei einem 1,5 fachen HF-Strom eingezeichnet. Die Spannungssprünge dieser Kurve passen nun besser zur Messung und liegen bei höheren Vorströmen sogar zusammen. Bei den reziproken Schaltzeiten ist die angepasste Kurve sehr nahe an den Werten der Messung, nur bei höheren Vorströmen (damit auch Spannungssprüngen) zeigt sich wieder die Abweichung zu kleineren, reziproken Schaltzeiten (siehe Kapitel 5.1.3.2).

Eine zusätzliche Eigenschaft des Schaltelements zeigt sich bei Proben mit sehr kleinem Schaltstrom. Ist bei Ihnen der HF-Strom im Supraleiter größer als der Vorstrom an der Probe kann man einen so genannten Push-Button-Mode beobachten. Dabei reicht die Heizleistung des Vorstromes, wenn der HF-Puls abgeschaltet wird, nicht aus den Schalter im normalleitenden Zustand zu halten. Dieser wird nach einer gewissen Zeit wieder supraleitend. Ein Beispiel für eine solches Element mit einem Schaltstrom von 9,5 A ist in Bild 5.17 gezeigt. Aufgetragen ist der Strom und die Spannung am Supraleiter gegen die Zeit.

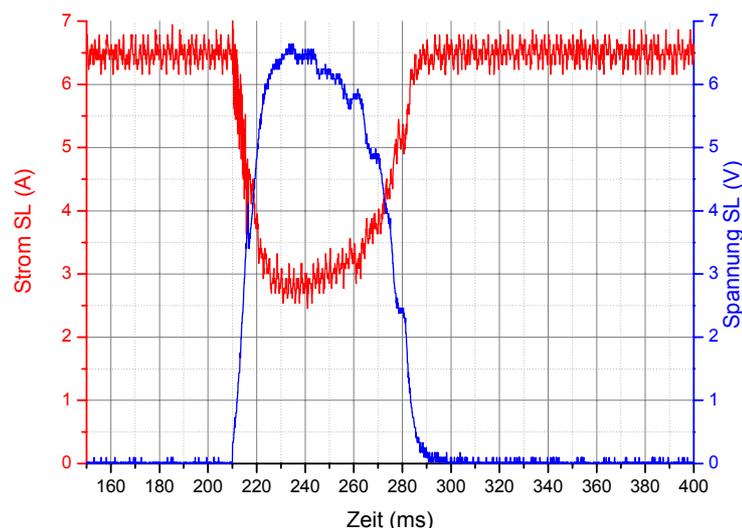


Bild 5.17: Push-Button-Mode an Schaltelement mit kleinem Schaltstrom

Bei Beginn des HF-Pulses $t = 210$ ms (HF-Strom $I_{\text{HF-SL}} = 9,3$ A; Dauer 11 ms) wird der Vorstrom auf 3 A begrenzt und die Spannung steigt stark an. Nach 80 ms geht die Spannung wieder auf null zurück, das Element wird wieder supraleitend. Dieser Push-Button-Mode wurde bei einem Vorstrom zwischen 5,5 A und 7,5 A beobachtet, ab 8 A Vorstrom trat ein vollständiger Schaltvorgang ein. Bei einem Vorstrom unter 5,5 A war kein Schalten mehr möglich.

5.1.3.5 HF-Leistung

Der Einfluss der HF-Leistung ist wohl hauptsächlich von technischer Bedeutung, soll aber der Vollständigkeit halber in einem Beispiel gezeigt werden. Zu sehen ist in Bild

5.18 eine Messung mit einem einzelnen Schaltelement (20 mm x 60 mm) mit einem Schaltstrom von 35 A und einem Vorstrom von 34 A ($j_c=0,8\text{MA}/\text{cm}^2$, Einzelelement 20 mm x 60 mm). Aufgetragen ist der Spannungssprung bzw. die reziproke Schaltzeit gegen die Leistung im Schwingkreis.

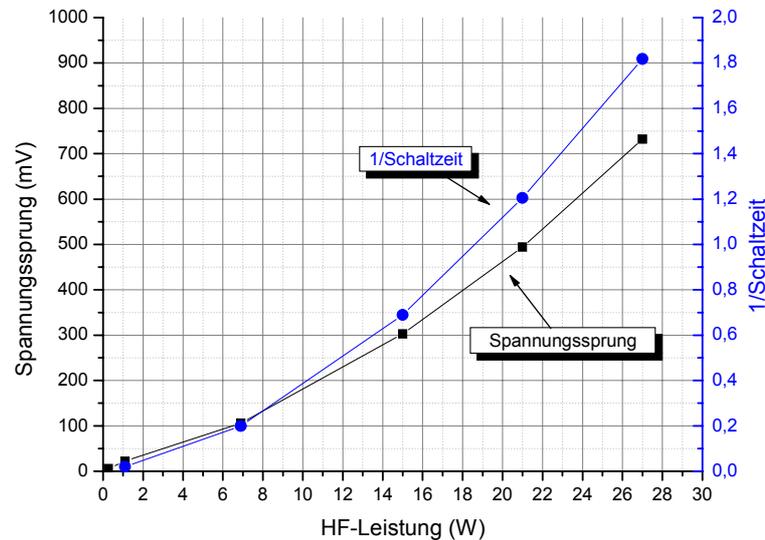


Bild 5.18: Spannungssprung und reziproke Schaltzeit gegen HF-Leistung

Das parabelförmige Zunehmen des Spannungssprungs und der reziproken Schaltzeit mit steigender Leistung ist in beiden Graphen gut zu erkennen. Die maximal im Schwingkreis erreichten Leistungen hängen bei maximaler Verstärker-Leistung (ca. 100 W) vom verwendeten Schwingkreis ab und lagen meist bei ca. 30 W. Damit wurden, wie auch bei der oben gezeigten Messung, kürzeste Schaltzeiten im Bereich von einigen 10 μs – 100 μs erreicht.

5.1.3.6 Kritischer Strom

Der kritische Strom I_c einer Probe und damit auch der Schaltstrom I_s den eine Probe tragen kann, ist ein direkter Parameter jeder einzelnen Probe. Somit ist diese Größe je nach Anwendung des Schalters von großer Bedeutung, da z.B. die kürzesten Schaltzeiten bei einem Vorstrom in der Nähe des Schaltstromes des jeweiligen Schaltelementes erreicht werden. Während früher [Hei01] nur Proben mit einem j_c von 0,8 – 1 MA/cm^2 verwendet wurden, (diese sind auch bei tieferen Temperaturen bis 30 K als Schalter tauglich) konnten für den HF-Schalter bei 77 K Proben mit Schaltströmen bis zu 56 A und j_c ca. 1,8 MA/cm^2 ohne Zerstörung passiv und aktiv geschaltet werden. Die Spannungssprünge und reziproken Schaltzeiten verschiedener Schaltelemente aufgetragen gegen ihre jeweiligen Schaltströme mit einem Vorstrom, jeweils ein Ampere darunter, zeigt Bild 5.19. Verwendet wurde ein HF-Strom $I_{\text{HF-SL}}$ von ca. 5 A bei einer Frequenz von 18 MHz.

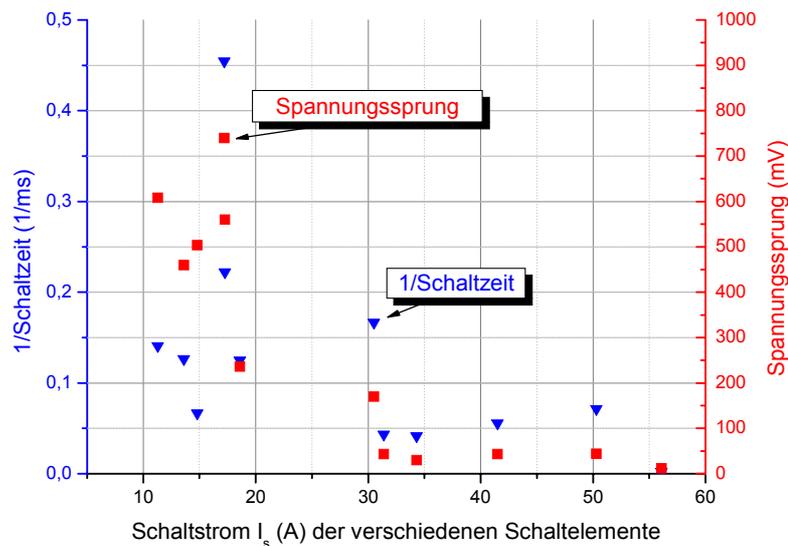


Bild 5.19: Reziproke Schaltzeit und Spannungssprung von Proben mit verschiedenen Schaltströmen

Diese Messungen wurden jeweils mit einem anderen Schaltelement auch auf verschiedenen Wafern durchgeführt, es ergibt sich daraus eine gewisse Streuung der Werte. Qualitativ lässt sich jedoch eine Erniedrigung des Spannungssprungs und der Reziproken Schaltzeit mit steigendem Schaltstrom der Proben erkennen. Da der HF-Strom für alle Messungen bei 5 A gehalten wurde wird das Verhältnis von Vorstrom zu HF-Strom mit steigendem Schaltstrom immer schlechter und führt zu dem gemessenen Ergebnis.

Es ist also möglich Standard Schaltelemente (Breite 1 cm) mit erhöhtem, kritischem Strom j_c bei höheren Strömen zu betreiben, um jedoch ebenso kurze Schaltzeiten zu erreichen muss dabei aber die HF-Leistung und damit das Verhältnis von HF-Strom zu Vorstrom erhöht werden. Die kürzesten Schaltzeiten bei voller Leistung des Verstärkers (ca. 30 W im Schwingkreis) lagen im Bereich von 1,5 ms – 5 ms für Schaltelemente mit über 35 A Schaltstrom.

5.1.3.7 Magnetfeldrichtung

Für die bisher gezeigten Messungen wurden Pfannkuchenspulen verwendet, die ein Magnetfeld senkrecht auf die Oberfläche des supraleitenden Schaltelementes erzeugen. Um die beiden anderen dazu senkrechten Magnetfeldrichtungen zu testen wurden zwei neuartige Spulen aus versilbertem Kupferdraht gewickelt, die ein Magnetfeld quer und in Längsrichtung des Schaltelementes ermöglichen (Bild 5.20). Die durch drei parallele Pfeile eingezeichneten Magnetfeldrichtungen sind zu einem Zeitpunkt des HF-Stromes in der Spule zu sehen. Die Pfannkuchenspule und die Spule für das Magnetfeld quer zum Schaltelement (Bildmitte) aus versilbertem Kupferdraht haben eine Induktivität von 0,5 μH . Die Spule links im Bild ist eine aus lackisoliertem Kupferdraht gewickelte Spule (zweilagig, Windungszahl $n=80$) mit einer höheren Induktivität von 11,5 μH .

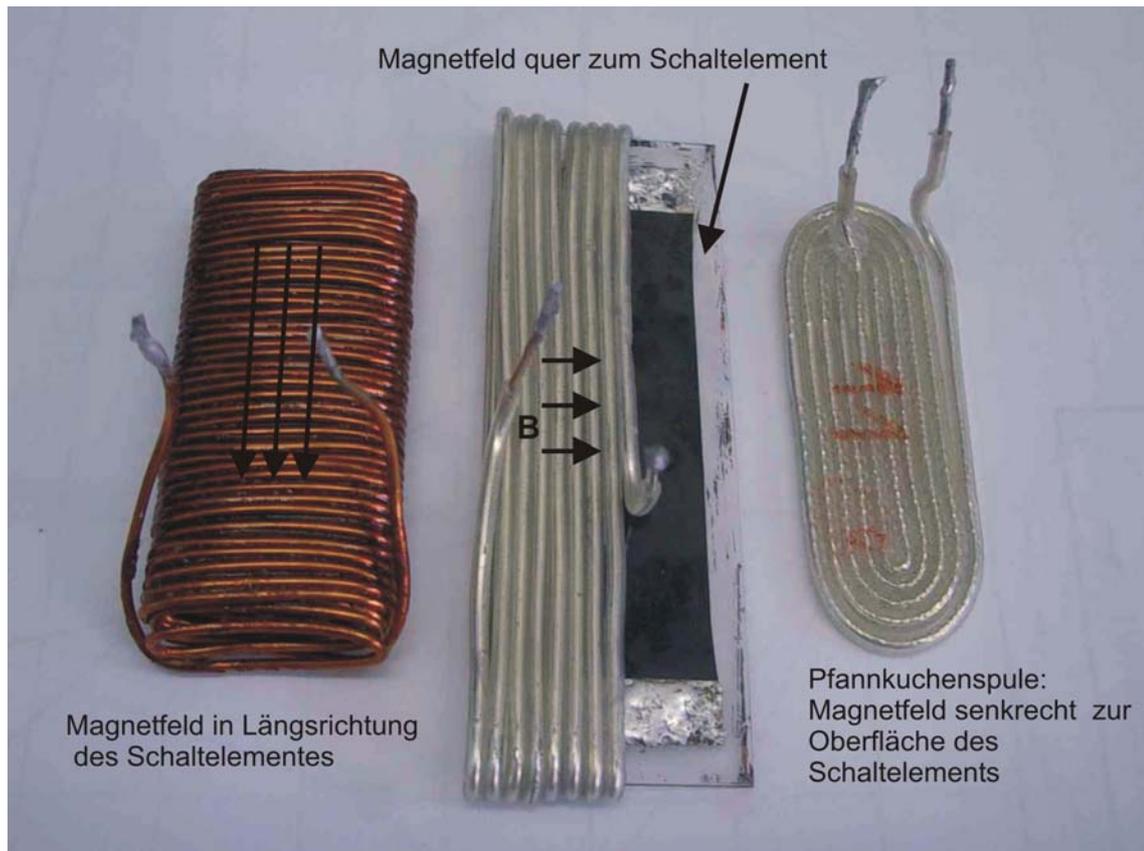


Bild 5.20: Spulen um verschiedene Magnetfeldrichtungen zu testen

Sie wurde verwendet, weil bei einer gleichartigen Spule mit weniger Windungen ($n=27$; $L=0,5 \mu\text{H}$) keine Reaktion des Schaltelementes zu messen war. In Bild 5.21 und Bild 5.22 sind Messungen des Spannungssprungs und der reziproken Schaltzeit, aufgetragen gegen die HF-Leistung im Schwingkreis, für alle drei Richtungen des Magnetfeldes dargestellt. Für jede Magnetfeldrichtung nimmt sowohl der Spannungssprung als auch die reziproke Schaltzeit mit steigender HF-Leistung zu, jedoch erreicht die Messung bei einem Magnetfeld senkrecht zum Schaltelement für alle Leistungen die höchsten Werte. Deutlich schlechter sind die beiden anderen Magnetfeldrichtungen.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Pfannkuchenspule, was die kürzesten Schaltzeiten bei möglichst kleinen HF-Leistungen betrifft, die besten Ergebnisse erzielt und deshalb auch hauptsächlich in dieser Arbeit verwendet wurde.

Nach der genaueren Untersuchung der elektrischen Einflussgrößen auf das gestreckte Schaltelement sollen nun im nächsten großen Kapitel geometrische Einflussgrößen betrachtet werden.

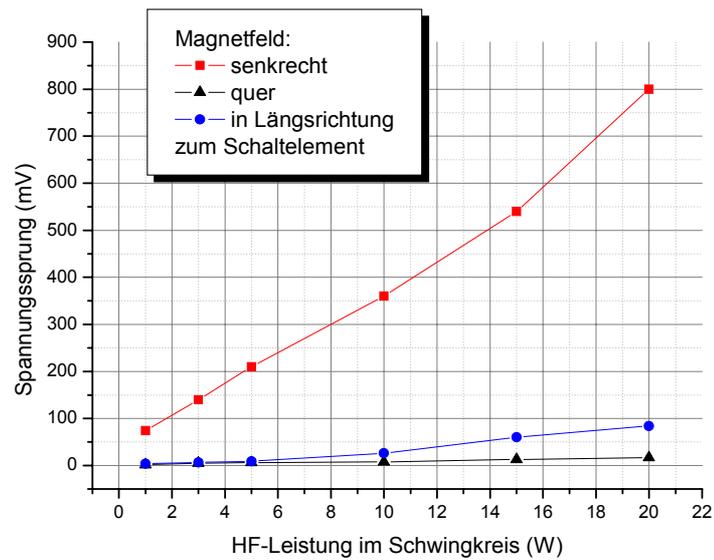


Bild 5.21: Spannungssprung gegen HF-Leistung für verschiedene Magnetfeldrichtungen

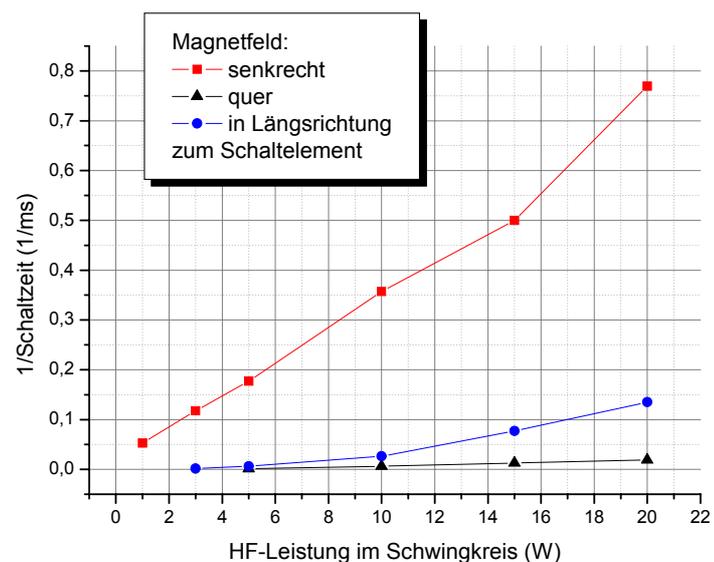


Bild 5.22: Reziproke Schaltzeit gegen HF-Leistung für verschiedene Magnetfeldrichtungen

5.1.4 Geometrische Einflussgrößen

Die geometrischen Einflussgrößen beziehen sich sowohl auf das Schaltelement selbst als auch auf die verwendeten Spulen und den Aufbau Spule und Probe.

5.1.4.1 Wafergröße

Aufgrund der guten Wärmeleitfähigkeit und der hohen Wärmekapazität des Saphirsubstrates ist es möglich hohe Schaltleistungen bei YBCO Filmen zu erreichen

[Hei01]. Die Wärme wird schnell abgeführt und verhindert die Bildung einer heißen Stelle (hot spot) wo der Supraleiter zerstört wird. Das Substrat liefert also einen wichtigen Beitrag zur Stabilität des Schalters. In Bild 5.23 ist eine HF-Strom abhängige Messung von einem Schaltelement auf einem 4-Zoll Wafer und dem gleichen Schaltelement auf einem Drittel des gleichen 4-Zoll Wafers gezeigt. (Der Wafer wurde nach der ersten Messung in zwei Teile gebrochen). Es ist eine deutliche Verringerung der Schaltzeiten durch die Verkleinerung des Substrates zu erkennen.

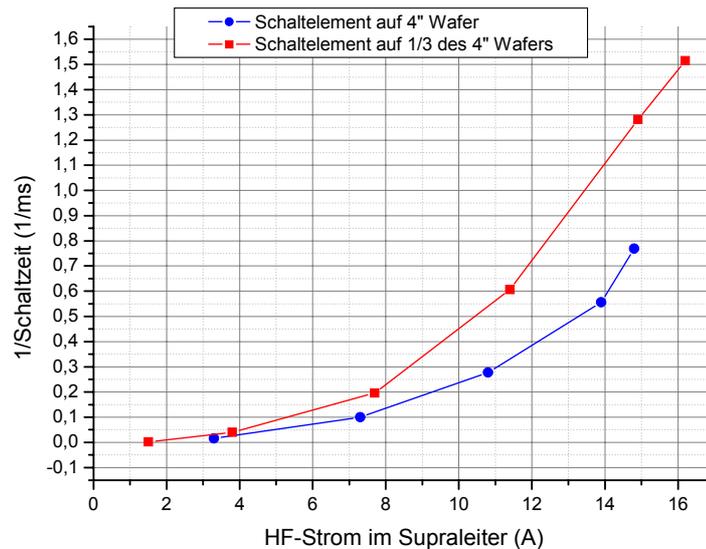


Bild 5.23: $1/\text{Schaltzeit}$ gegen HF-Strom im Supraleiter bei gleichem Schaltelement auf verschieden, großem Substrat

Bei einem kleineren Substrat ist die Wärmekapazität geringer, somit wärmt sich das Schaltelement schneller auf. Dies konnte eine Simulation (s. Kapitel 6) bestätigen. Bild 5.24 zeigt die simulierten Daten von zwei gleich großen Schaltelementen mit verschieden großem, rechteckigem Substrat. Aufgetragen ist der Temperaturverlauf an der wärmsten Stelle im Schaltelement und der Strom am Supraleiter. Das Schaltelement mit dem kleinen Substrat (in der Größe des Supraleiters: 10 mm x 44 mm) weist eine um ca. 500 μs kürzere Schaltzeit auf. Dies erkennt man an dem früheren Ansteigen der Temperatur und der früheren Begrenzung des Stromes im Vergleich mit dem Schaltelement mit großem Substrat (20 mm x 44 mm).

Durch die Simulation lässt sich die Wirkung der veränderten Wärmekapazität noch besser verdeutlichen, da dabei die Temperaturverteilung an der Oberfläche des Substrates berechnet wird. Bild 5.25 zeigt die Temperaturverteilung bei beiden Schaltelementen zum Zeitpunkt $t=2,5$ ms. Die Temperatur bei dem Element mit kleinem Substrat ist über die Breite des Streifens nahezu konstant, da hier die Wärmekapazität schon erschöpft ist. Die Wärme kann sich vom wärmsten Punkt hauptsächlich nur noch in Längsrichtung verteilen. Dadurch erwärmt sich dieses Element schneller als das Schaltelement mit dem größeren Substrat.

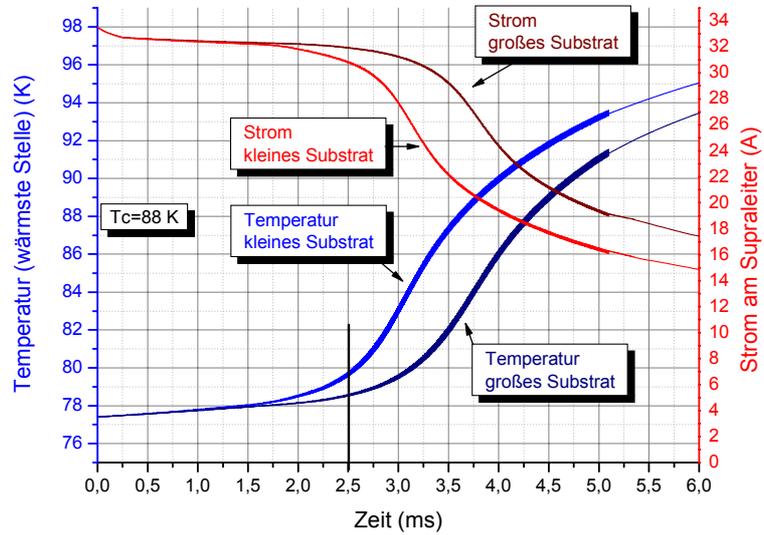


Bild 5.24: Simulation von zwei Schaltelementen mit verschieden großem Substrat

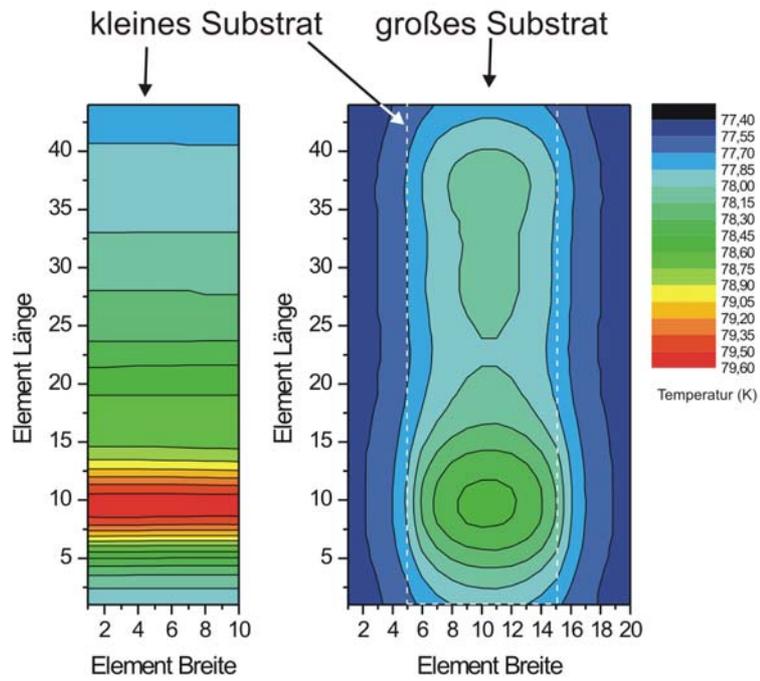


Bild 5.25: Simulation: Temperaturverteilung an der Oberfläche des Substrates bei Schaltelementen mit verschieden großem Substrat

Bei dem größeren Substrat kann sich die Wärme zu diesem Zeitpunkt von der wärmsten Stelle noch in alle Richtungen ausbreiten.

Eine Verkleinerung des Substrates ist demnach eine geeignete Maßnahme, um die Schaltzeiten eines Elementes zu verringern. Die kürzesten Schaltzeiten wurden demgemäß mit Einzelelementen auf einem 20 mm x 60 mm Substrat erreicht. Eine Zerstörung der Schaltelemente durch eine erhöhte hot spot Gefahr konnte dabei nicht festgestellt werden. Dies lässt den Schluss zu, dass die Substratgröße noch verkleinert werden kann, um die Schaltzeit noch weiter zu reduzieren. Ideal wäre also (wie die Simulation zeigt) ein Substrat in der gleichen Größe wie der supraleitende YBCO-Film.

5.1.4.2 Schaltelement- und Spulengröße

Nicht nur die Wafergröße, sondern auch die Breite des strukturierten Schaltelementes hat einen Einfluss auf die Schalteigenschaften. Bild 5.26 zeigt die reziproke Schaltzeit aufgetragen gegen den HF-Strom (bei 18 MHz) im Supraleiter für drei Schaltelemente, mit Breiten von 10 mm (Standard-Element), 12 mm und 15 mm.

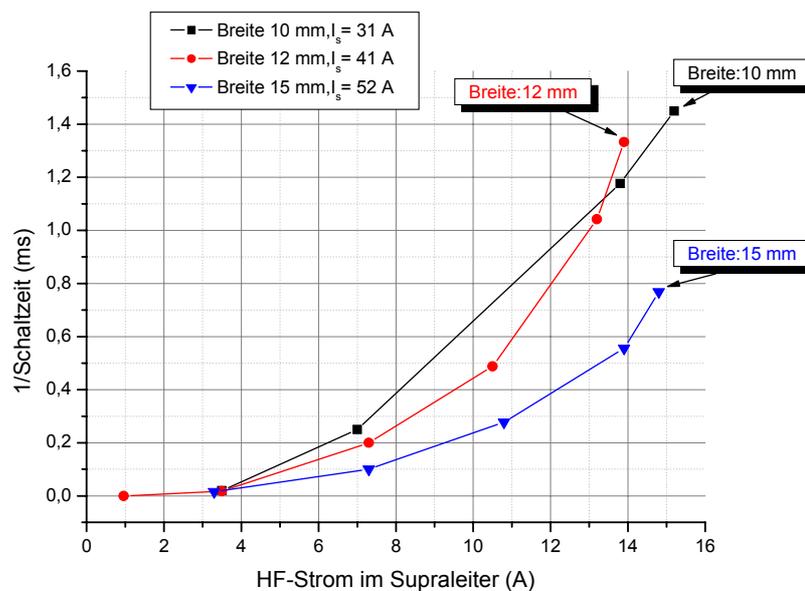


Bild 5.26: $1/Schaltzeit$ gegen HF-Strom im Supraleiter bei Schaltelementen mit verschiedenen Breiten

Für alle Breiten zeigt sich eine Zunahme der reziproken Schaltzeit mit steigendem HF-Strom. Die drei Elemente waren auf demselben 4 Zoll Wafer strukturiert und hatten deshalb die gleiche kritische Stromdichte von $j_c = 0,8$ MA/cm². Durch die erhöhte Breite nimmt jedoch der stromtragende Querschnitt und damit der erreichbare Schaltstrom I_s der einzelnen Proben zu. Der Vorstrom betrug für jedes Schaltelement 1 A unter seinem Schaltstrom. Da das Verhältnis von Vorstrom zu HF-Strom für den Schaltvorgang ausschlaggebend ist, erreicht das Element mit der größten Breite und damit dem höchsten Schaltstrom von 52 A die schlechtesten Schaltzeiten. Das Element mit mittlerer Breite (Schaltstrom von 41 A) liegt in den Schaltzeiten weitgehend zwischen

diesem und dem Element mit einer Breite von 10 mm (Schaltstrom von 31 A) mit den kürzesten Schaltzeiten. Bei hohen HF-Strömen erreicht das 12 mm breite Schaltelement die Schaltzeiten des 10 mm breiten Elementes. Die dabei verwendete supraleitende Spule (Kapitel 4.2) hat eine Größe von 49 mm x 13 mm (Bild 5.27b).

Um den Schaltvorgang zu beschleunigen ist es notwendig den HF-Strom in den breiteren Streifen zu vergrößern. Eine Erhöhung der Leistung war in unserem Fall nicht mehr möglich, da in allen Graphen die höchsten gezeigten HF-Ströme schon bei maximaler Leistung des Verstärkers (ca. 100 W) erreicht wurden. Dies entspricht einer Leistung von ca. 30 W im Schwingkreis.

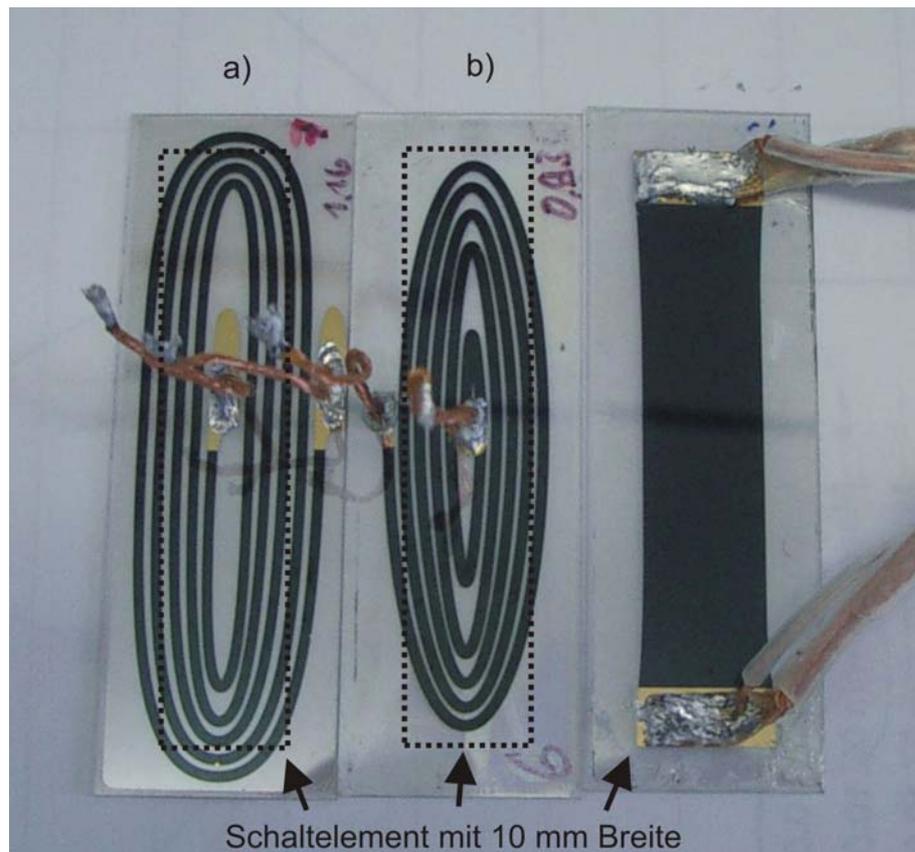


Bild 5.27: a) Spule mit 57 mm x 16 mm; b) Spule mit 49 mm x 13 mm; Größenvergleich zu Schaltelement mit 10 mm Breite

Aber es gibt die Möglichkeit die den HF-Strom induzierende Fläche der Spule zu vergrößern und möglichst gut an die rechteckigen Streifen anzupassen. In Bild 5.27a ist eine Spule mit vergrößerter Fläche, mit einer Größe von 57 mm x 16 mm, zu sehen. Der Durchmesser der innersten Windung beträgt in Längsrichtung 43 mm, somit überdeckt auch der innerste Bereich der Spule die gesamte Länge des Schaltelementes (42 mm).

In Bild 5.28 sind Messungen mit dieser Spule auf einem Schaltelement mit 12 mm und 15 mm Breite gezeigt. Aufgetragen ist die reziproke Schaltzeit gegen den HF-Strom im Supraleiter. Der Vorstrom betrug 1 A unter dem jeweiligen Schaltstrom. Zum Vergleich

ist die Messung (von Bild 5.26) auf dem 10 mm Breiten Schaltelement mit der kleineren Spule (49 mm x 12 mm) nochmals eingetragen.

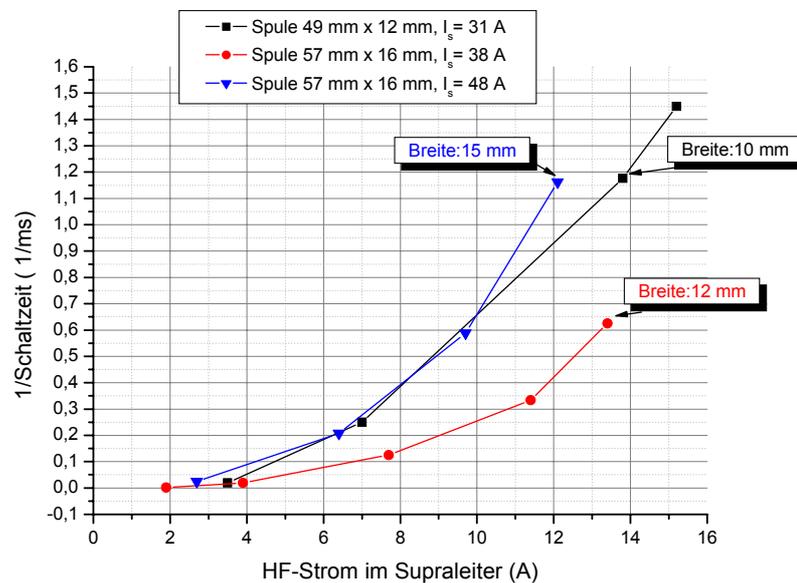


Bild 5.28: $1/\text{Schaltzeit}$ gegen HF-Strom im Supraleiter: Messungen mit verschieden großen Spulen

Es zeigt sich das gleiche Verhalten wie in der vorigen Messung, mit steigendem HF-Strom nehmen die reziproken Schaltzeiten zu. Die größere Spule hat eine höhere Induktivität ($L=0,7 \mu\text{H}$) als die kleinere Spule ($L=0,4 \mu\text{H}$) und damit auch einen höheren Wechselstromwiderstand (ωL). Dies trägt hier hauptsächlich dazu bei, dass sie einen geringeren HF-Strom im Supraleiter erzeugen kann (es wurde jeweils wieder bis zur maximalen Verstärkerleistung gemessen). Für den Streifen mit 12 mm Breite für den die Spule zu groß ist, ergeben sich etwas schlechtere Schaltzeiten als in der vorigen Messung (Bild 5.26) mit der kleinen Spule. Für das Schaltelement mit 15 mm Breite, auf das die Spulengröße angepasst ist, ergeben sich deutlich bessere Schaltzeiten als mit der kleineren Spule. Die Schaltzeiten sind sogar vergleichbar mit der eingezeichneten Messung des 10 mm breiten Elementes. Dieses erreicht jedoch durch die kleinere Spule bei gleicher Leistung einen höheren HF-Strom und damit eine kürzere minimale Schaltzeit.

Durch die Anpassung der Größe der Spule an den jeweiligen Streifen lassen sich die kürzesten Schaltzeiten erzielen. Bei breiteren Streifen kann damit sogar bei gleicher HF-Leistung eine Verschlechterung der Schaltzeiten durch das schlechtere HF-Strom zu Vorstrom-Verhältnis verhindert werden. Eine Begrenzung für die Größe der Spule ist dabei die zunehmende Induktivität und der daraus resultierende Wechselstromwiderstand.

5.1.4.3 Spulenart

Die Unterscheidung in Spulenarten meint die Verwendung einer supraleitenden Spule oder einer Spule aus versilbertem Kupferdraht. Um die beiden Arten zu vergleichen wurde eine Spule aus versilbertem Kupferdraht ($L=0,66 \mu\text{H}$; $n=4,5$) mit den gleichen Maßen wie die große supraleitende Spule (Bild 5.27a; $L=0,7 \mu\text{H}$; $n=4,5$) gewickelt (in Kapitel 4.2, S. 18, Bild 4.9 zu sehen). Bild 5.29 und Bild 5.30 zeigen Vergleichsmessungen mit diesen beiden Spulen auf einem Einzel-Schaltelement (20 mm x 60 mm) mit verschiedenen HF-Strömen. Der Schaltstrom des Elements betrug 33 A die Messung wurde durchgeführt bei einem Vorstrom von 32 A und einer Frequenz von 16 MHz. Aufgetragen ist der Spannungssprung bzw. die reziproke Schaltzeit gegen den HF-Strom im Supraleiter. Für beide Spulen ergibt sich ein vergleichbares Ansteigen des Spannungssprunges und der reziproken Schaltzeit mit steigendem HF-Strom im Supraleiter.

Bei kleinen HF-Strömen im Supraleiter sind Spannungssprung und daraus resultierende reziproke Schaltzeit bei beiden Spulen vergleichbar. Bei höheren Strömen sind die Spannungssprünge und die Schaltzeiten bei der Drahtspule höher bzw. kürzer. Da die supraleitende Spule einen etwas höheren Strom im Supraleiter erzeugen kann, erreicht sie insgesamt die kürzeste Schaltzeit.

Allgemein sind beide Spulen vergleichbar, für die spätere Anwendung wird aber aus Kostengründen und wegen der einfacheren Handhabbarkeit die Drahtspule bevorzugt werden.

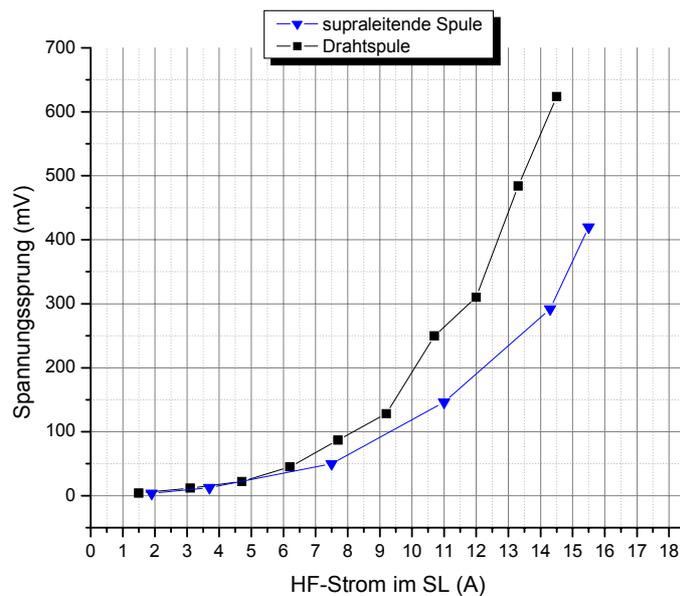


Bild 5.29: Spannungssprung gegen HF-Strom im Supraleiter: Vergleich Drahtspule/supraleitende Spule

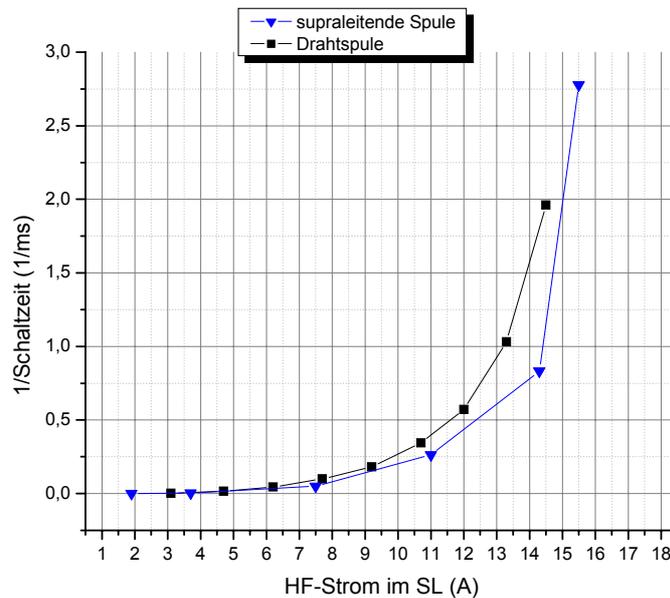


Bild 5.30: $1/\text{Schaltzeit}$ gegen HF-Strom im Supraleiter: Vergleich Drahtspule/supraleitende Spule

Die im Vergleich zur supraleitenden Spule geringfügig höheren Spannungssprünge und reziproken Schaltzeiten können, wie im nächsten Kapitel beschrieben, durch die Position der Spule verursacht sein.

5.1.4.4 Spulenposition

Durch die Befestigung der Spule am Semirigidkabel und der Verschiebungseinheit (siehe Bild 5.4, S. 23) lässt sich diese sowohl verdrehen als auch in der Ebene in jede Richtung verschieben. Bild 5.31 und Bild 5.32 zeigen wieder die Messungen aus dem vorigen Kapitel, ergänzt durch zwei weitere Messungen mit der Drahtspule. Die Spule wurde dabei jeweils nur um 1-2 Grad verdreht. Aufgetragen ist der Spannungssprung bzw. die reziproke Schaltzeit gegen den HF-Strom im Supraleiter. Bei erster und zweiter Messung mit verdrehter Spule zeigen sich höhere Spannungssprünge als bei der ursprünglichen Messung, bei der die Spule möglichst genau in der Mitte des Schaltelementes platziert war. Durch den erhöhten Spannungssprung erwärmt sich das Element schneller und es werden nun deutlich kürzere Schaltzeiten auch unter $100\ \mu\text{s}$ (reziproke Schaltzeit über 10) erreicht.

Um dieses Verhalten genauer zu untersuchen wurden Messungen bei Positions-Veränderung der Spule auf einem Schaltelement eines 4-Zoll Wafers wiederholt. Dieser war so befestigt, dass es möglich war die Spule beliebig weit zu allen Seiten zu verschieben. Bild 5.33 zeigt schematisch die Positionen der Spule auf dem Schaltelement und die dazu gewählten Bezeichnungen. Diese werden in der Messung der reziproken Schaltzeit bei verschiedenen Spulenpositionen (Bild 5.34) in der gleichen Reihenfolge angegeben.

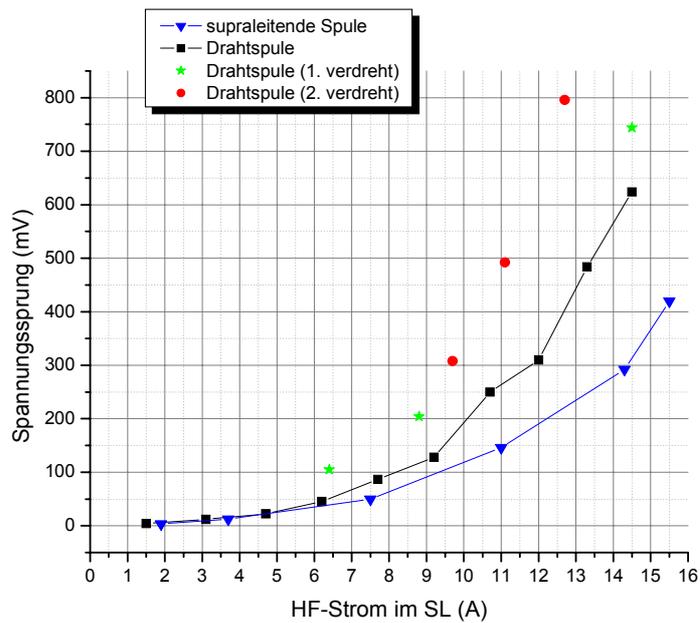


Bild 5.31: Spannungssprung gegen HF-Strom im Supraleiter: Messungen mit verdrehter Spule

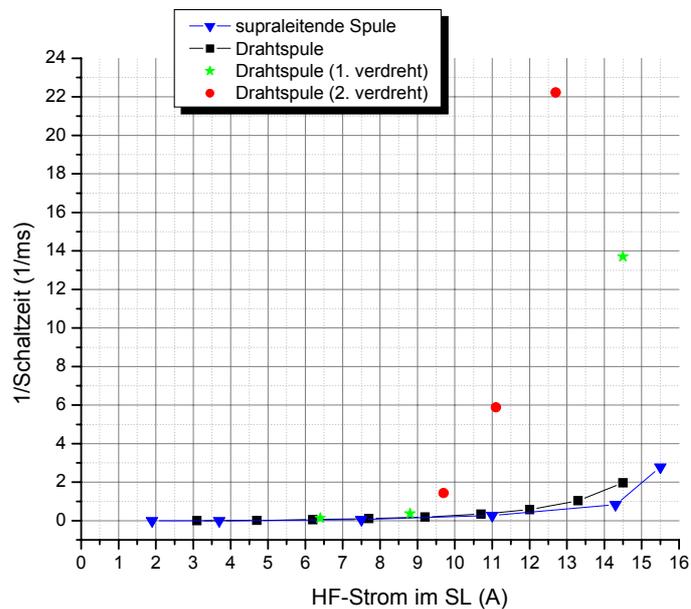


Bild 5.32: 1/Schaltzeit gegen HF-Strom im Supraleiter: Messungen mit verdrehter Spule

Durchgeführt wurden die Messungen mit einer kleinen Drahtspule (42 mm x 10 mm), da man mit dieser selektiver untersuchen konnte, ob bestimmte Bereiche des Schaltelementes besonders auf die Hochfrequenz reagieren. Die Frequenz betrug 18 MHz, der Vorstrom des Schaltelementes 27 A (28 A Schaltstrom).

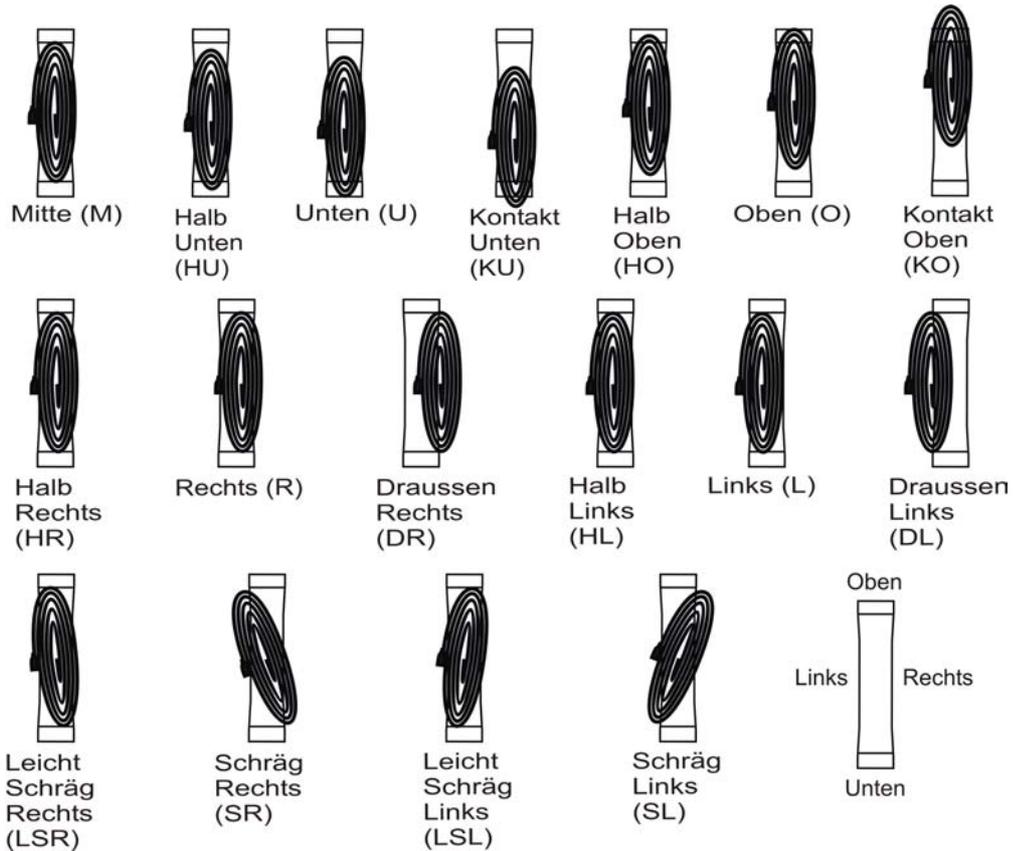


Bild 5.33: Bezeichnungen für die gemessenen Spulenpositionen

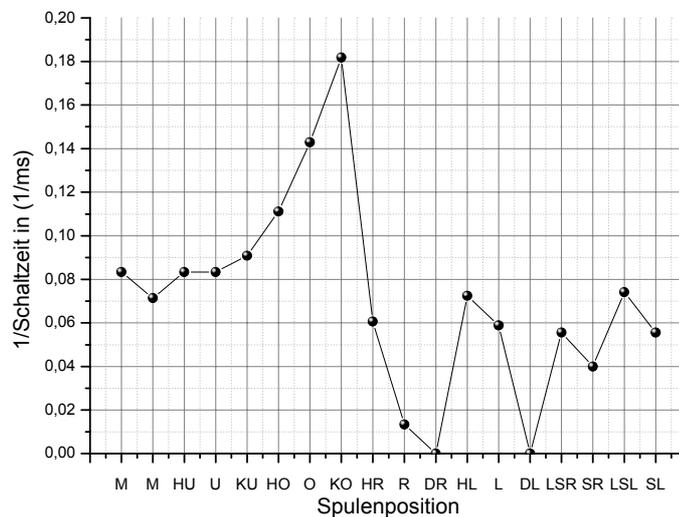


Bild 5.34: 1/Schaltzeit gegen Spulenposition

Zunächst wurde zweimal versucht die Spule genau in die Mitte des Schaltelementes zu setzen (normale Messposition der Spulen), dabei sieht man nur einen kleinen Unterschied der beiden Werte. Die folgenden Schaltzeiten für Positionen im unteren Teil des Elementes erreichen vergleichbare Werte wie in der Mitte. Die kürzesten

Schaltzeiten erreicht man für Positionen im oberen Bereich des Schaltelementes, den besten für die Position über dem Kontakt oben. Die längste Zeit braucht der Schalter bei der Position rechts des Schaltelements. Im weiteren sind die Position im rechten Bereich immer etwas schlechter als bei linker oder schräg linker (verdrehter) Position. Kein Schalten erreicht man, wenn die innerste Windung der Spule außerhalb des Streifens positioniert wird (Positionen: DL, DR).

Als Erklärung bietet sich bei diesem Schaltelement ein Defekt (Stelle mit geringerem j_c) oder mehrere Defekte im oberen und linken Bereich des Elementes an, da die Hochfrequenz dort am stärksten wirken kann und die kürzesten Schaltzeiten erreicht. Eine magneto-optische Aufnahme des Schaltelementes kann darüber Aufschluss geben, da sie in das Schaltelement eingedrungene Magnetfelder besonders an Defekten sichtbar macht. Die Erstellung der magneto-optischen Aufnahmen wird in Kapitel 5.1.6 genauer beschrieben. Bild 5.35 zeigt zwei jeweils aus mehreren Bildern zusammengesetzte Magneto-optische Aufnahmen des Schaltelementes bei Anlegen eines externen Magnetfeldes von 6 mT und 10 mT.

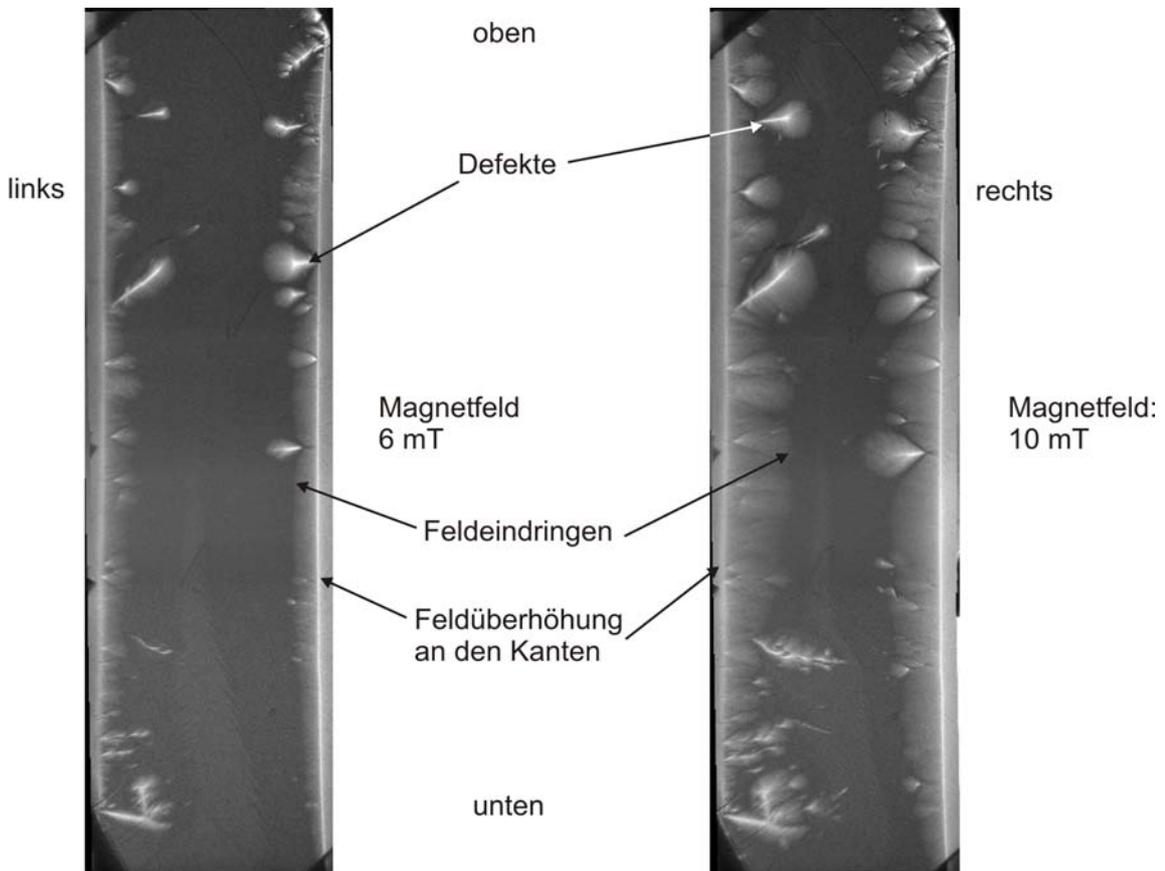


Bild 5.35: Magneto-optische Aufnahmen des Schaltelementes im externen Feld bei 6 mT und 10 mT

Das eingedrungene Feld wird heller bis weiß dargestellt. An der Feldüberhöhung an den Kanten des Schaltelementes ist deutlich die Ausdehnung des Streifens zu erkennen. Die Anzahl der Defekte und auch das Feldeindringen ist im oberen Bereich des Streifens erhöht. Außerdem ist die Anzahl der Defekte in der linken Hälfte des Elementes größer

als in der rechten Hälfte. Vergleicht man auch die verdrehten Spulenpositionen, so werden immer dann die kürzesten Schaltzeiten erreicht, wenn die Spule möglichst viele Defekte überdeckt.

Die Hochfrequenz wirkt also selektiv auf Defekte im Schaltelement. Um möglichst kurze Schaltzeiten zu erreichen, ist es sinnvoll mit der Spule möglichst das gesamte Schaltelement zu überdecken, um alle Defekte zu erreichen. Wie gezeigt (Bild 5.32), erhält man dadurch nicht die besten Schaltzeiten, erreicht aber schon Zeiten im Bereich von einigen 100 μs . Darüber hinaus ist es möglich durch Verschiebung der Spule auf dem Schaltelement die Schaltzeiten noch zu verbessern, da dadurch die innerste Wicklung der Spule mit dem stärksten Magnetfeld (besonders auch in den beiden Krümmungen) [Hie01] auf Defekte ausgerichtet werden kann. Dass dadurch nicht mehr alle Windungen (die äußeren) auf dem Schaltelement liegen, spielt dabei, wie in der Messung zu sehen, keine Rolle. Eine Anpassung der Spule auf das jeweilige Schaltelement mit seinen Defekten kann durch eine vorherige magneto-optische Messung erfolgen.

Eine weitere Untersuchung zur Position der Spule galt der Veränderung des Abstands der Spule vom Schaltelement. Bild 5.36 zeigt eine Messung bei konstantem HF-Strom von 9 A in der Spule. Aufgetragen ist die reziproke Schaltzeit gegen den Abstand der Spule vom Schaltelement. Es wurde dabei eine aus versilbertem Kupferdraht gewickelte Spule verwendet. Dies bedeutet, dass der Abstand null einem durch die Isolierung bedingten Abstand der Spule vom Supraleiter von 0,73 mm entspricht (Kapitel 5.1.1). Bei jedem Messwert wurde der Schwingkreis neu auf seine Resonanzfrequenz abgestimmt.

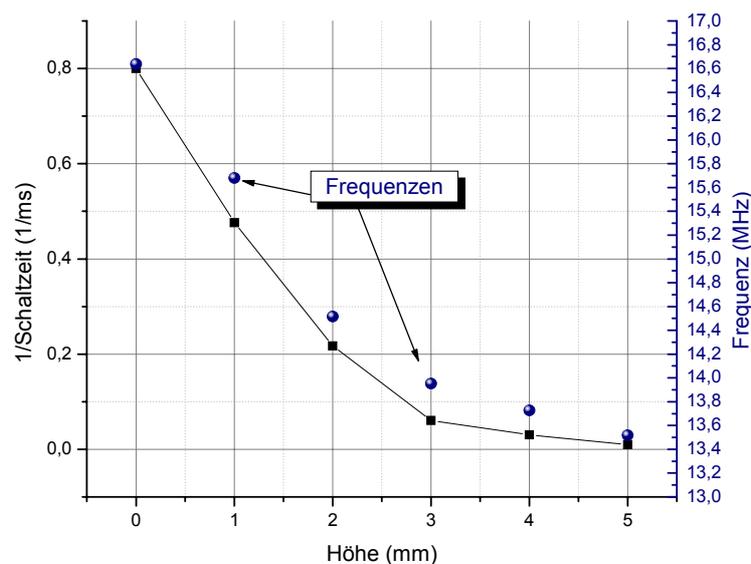


Bild 5.36: $1/\text{Schaltzeit}$ gegen Abstand Spule - Schaltelement

Die jeweils verwendeten Frequenzen sind ebenfalls eingezeichnet (16,8 MHz – 13,4 MHz). Mit steigendem Abstand nimmt die reziproke Schaltzeit ab. Zu größeren Abständen hin geht die Kurve gegen null.

Durch den größer werdenden Abstand wird die Kopplung zwischen Supraleiter und Spule immer schwächer. Es wird ein geringerer HF-Strom im Supraleiter induziert und dieser schwächer geheizt, daraus ergeben sich die zunehmenden Schaltzeiten. Der Abstand Spule Schaltelement sollte also nach Möglichkeit so klein wie möglich sein.

Nach der Vorstellung von Messergebnissen verschiedener Parameter folgen im nächsten Abschnitt optische Untersuchungen des Schaltvorganges.

5.1.5 Optische Untersuchungen

Die beim Schaltvorgang entstehende Wärme wird an das Substrat bzw. an den flüssigen Stickstoff abgegeben. Je nach Temperaturdifferenz zeigt sich ein unterschiedlicher Wärmeübergang in den flüssigen Stickstoff. Bei geringem Temperaturunterschied erfolgt der Wärmetransport über Konvektion. Dies äußert sich in einer Dichteänderung des flüssigen Stickstoffs. Bei höheren Temperaturunterschieden kommt es zunächst zum Blasensieden. An Keimen wie Kratzern oder Kanten kommt es zur Blasenbildung. Diese Blasenbildung nimmt mit steigender Temperatur zu, bis das Schaltelement mit einem Dampffilm bedeckt ist. Dies wird als Filmsieden bezeichnet. Sowohl Dichteänderungen, als auch die Blasen im Stickstoff lassen sich optisch untersuchen.

Für optische Beobachtungen des Schaltvorganges wurde ein bereits bestehender Aufbau aus [Hei01] weiterentwickelt. Hier soll nur kurz der schematische Messaufbau für die Messungen mit HF und die Neuerungen vorgestellt werden.

Bild 5.37 zeigt schematisch den optischen Messaufbau.

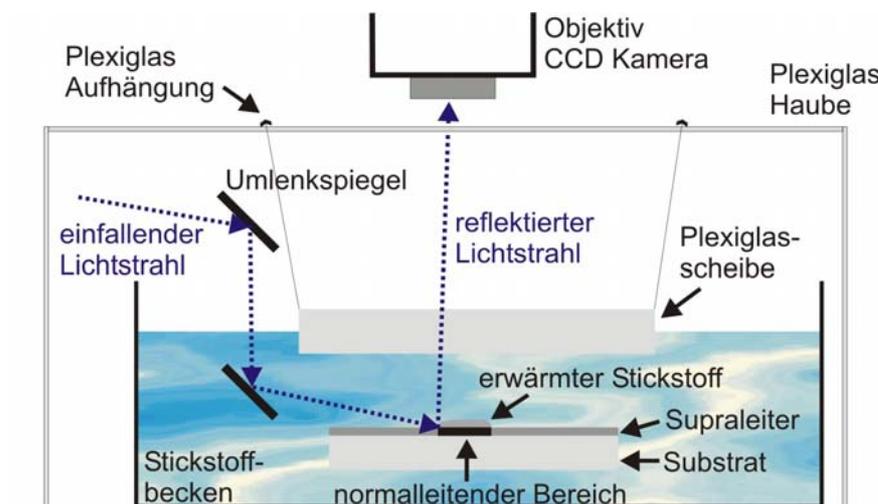


Bild 5.37: Skizze des Optischen Messaufbaus

Der einfallende Lichtstrahl eines 250 W Diaprojektors wird über Umlenkspiegel unter flachem Einfallswinkel zum Schaltelement geführt. Eine s/w CCD-Kamera mit sehr kurzen Belichtungszeiten oder wahlweise eine Digitalkamera befindet sich 20 cm oberhalb des Supraleiters. Erwärmt sich das Schaltelement und kommt es zu Dichteänderungen oder Blasenbildung treten Streureflexe in Richtung der Kamera auf, die aufgenommen werden. Oberhalb des Supraleiters befindet sich eine 2 cm dicke Plexiglasscheibe. Der Stickstofffüllstand befindet sich immer zwischen Ober- und Unterkante der Scheibe, damit durch die Bewegung der Stickstoffoberfläche kein verschwommenes Bild entsteht. Diese Plexiglasscheibe ist außerdem nur durch vier Drähte an den Ecken aufgehängt, so dass durch beliebiges Schrägstellen der Scheibe ungewollt auftretende Blasen (z.B. an den Kontakten des Schaltelements oder an den Klebebändern zur Befestigung) zur Seite abgeleitet werden können und nicht an der Unterseite der Scheibe entlang über den Bildausschnitt des Supraleiters wandern. Die dabei verwendete supraleitende Spule wurde auf die Unterseite des Schaltelementes gelegt und beide zusammen auf zwei Teflonblöcke mit Isolierband geklebt. Der sonstige HF-Aufbau wurde übernommen. Der gesamte kryogene Bereich befindet sich in einem Plexiglasgehäuse um zu verhindern, dass sowohl die Kamera als auch die Plexiglasscheibe vereisen.

Es wurden Bilder eines Schaltelements mit und ohne HF aufgenommen. Bild 5.38 zeigt zwei Bilderserien in zeitlicher Reihenfolge von links nach rechts. Aufgenommen wurde jeweils ein Schaltelement dessen Kontakte oben und unten am Bildrand noch zu sehen sind. Bei der oberen Serie wurde der Schaltstrom des Elements (28 A) überschritten und dabei eine Serie von Bildern aufgenommen. In dieser Funktion macht die CCD-Kamera alle 300 ms ein Bild (Belichtungszeit 500 μ s). Der Startpunkt der Aufnahmen ist daher zeitlich nicht festgelegt. Schaltet der Supraleiter nur durch die Erhöhung des Stromes (passiver Schaltvorgang), ergibt sich immer die in der Bildserie dargestellte „Quenchbewegung“. Zunächst schaltet dieser Supraleiter am Kontakt. Der Quench bewegt sich dann von dort zur Mitte des Streifens und wieder zurück zum Kontakt. Es wurde ein Echtzeit-Video mit einer Digitalkamera aufgenommen, das mehrere Schaltversuche und die darauffolgende Quenchbewegung zeigt (Video1.avi auf CD).

Durch die zusätzliche Heizung am Kontaktwiderstand hat diese Stelle des Supraleiters zunächst den geringsten Schaltstrom und der Quench bildet sich am Kontakt. Durch die Taillierung des Schaltelements und die allgemeine Erwärmung des YBCO-Films und des Substrates bleibt der Kontakt als wärmste Stelle nicht ausgezeichnet, sondern der „Quench“ wandert vom Kontakt zur Mitte des Streifens und wieder zurück. Dieses hin- und herbobeln des „Quenches“ bei langen Zeiten könnte auf eine Wärmeumverteilung im Substrat aufgrund der entstehenden Stickstoffblasen zurückzuführen sein. Eine genauere Untersuchung des Kühlprozesses durch den flüssigen Stickstoff wäre eine Aufgabe für die Zukunft.

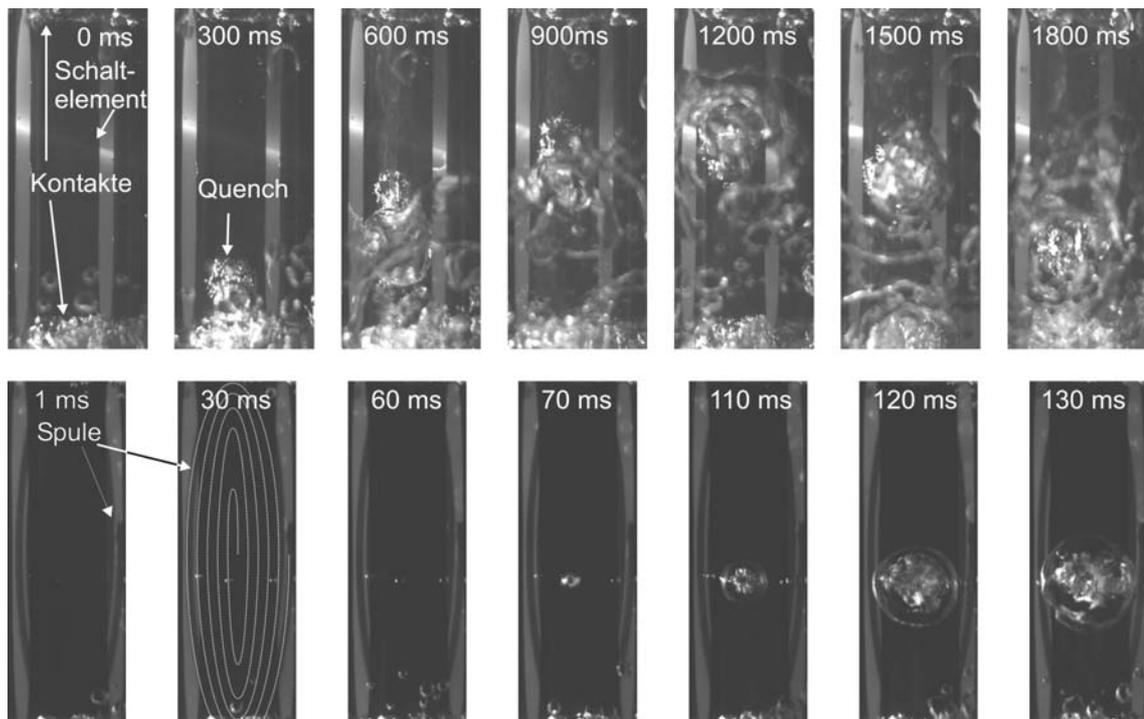


Bild 5.38: Bilderserien des gestreckten Schaltelementes: oben ohne HF / unten mit HF

In den Bildern der unteren Reihe (Bild 5.38) wurde der Schaltvorgang bei einem Vorstrom von einem Ampere unter dem Schaltstrom ($I_s=29$ A) durch einen HF-Puls (1,6 ms Schaltzeit) ausgelöst. Dabei wurde die CCD Kamera getriggert und Bilder im Abstand von 10 ms aufgenommen (Belichtungszeit 2ms). Eine Auswahl von Bildern mit angegebenen Zeiten ist dargestellt. Zu sehen ist auch die durch das Substrat scheinende Spule an den Rändern des Schaltelementes. Zur Veranschaulichung ist eine Skizze der Spule eingezeichnet. Im Unterschied zum Schaltvorgang ohne HF entsteht hier der Quench immer etwas unterhalb der Mitte des Schaltelementes. Dort ist wohl eine Stelle mit geringerem Schaltstrom an der die HF am besten heizen kann. Es bildet sich durch die Verengung des Strompfades sehr schnell ein Quench über die gesamte Breite des Schaltelementes aus. Im Video2.avi auf der beigelegten CD ist die Bilderserie auch als Bildfolge zu sehen. In ihm und besonders im Echtzeit-Video3.avi (auf CD) sieht man, dass auch dieser „Quench“ anschließend über den gesamten Streifen von Kontakt zu Kontakt zu wobbeln beginnt.

Auch die HF heizt also zunächst an der „schlechtesten“ Stelle des Schaltelementes und trägt nicht dazu bei einen größeren Bereich des Streifens auf einmal schalten zu lassen. Eine Verringerung der hot-spot-Gefahr kann so durch die HF nicht erreicht werden. Es würde sich jedoch anbieten, durch bewusst eingebrachte Defekte im Schaltelement, die Quenchbildung durch die HF zu beeinflussen.

Der Nachteil der optischen Untersuchungen ist die indirekte Beobachtung über die Erwärmung des flüssigen Stickstoffs. Obwohl die Schaltzeit im Millisekunden-Bereich

liegt sieht man in den Aufnahmen den Quench erst nach mehreren zehn Millisekunden. Außerdem wird der eigentliche Quench durch die aufsteigenden Blasen überdeckt. Die Magnetooptik bietet hier eine Verbesserung, da direkt die magnetischen Felder im Supraleiter betrachtet werden können. Magnetooptische Beobachtungen sollen im nächsten Abschnitt vorgestellt werden.

5.1.6 Magnetooptische Untersuchungen

Die hier vorgestellten magnetooptischen (MO) Aufnahmen wurden in Zusammenarbeit mit der Universität Augsburg erstellt. Der Aufbau soll hier nur kurz schematisch beschrieben werden. Genauere Details finden sich in [Hei01]. Das Messprinzip beruht auf dem magnetooptischen Faraday-Effekt in einem optisch aktiven Medium, das bei Anlegen eines Magnetfeldes die Polarisation eines einfallenden Lichtstrahls dreht.

Bei dieser Methode wird auf die supraleitende Schicht ein magnetooptischer Indikator (Eisengranatfilm) gelegt (Bild 5.39). Ein senkrechter linear polarisierter Lichtstrahl durchläuft diesen und wird an seiner mit Aluminium verspiegelten Rückseite reflektiert. Er durchläuft den Granatfilm erneut und trifft auf einen Analysator. Analysator und Polarisator sind dabei senkrecht zueinander ausgerichtet. So passiert also nur Licht den Analysator, das eine vom Magnetfeld abhängige Drehung der Polarisationsrichtung erfahren hat. Dies geschieht nur an den Stellen, wo in den Supraleiter bereits magnetischer Fluss eingedrungen ist. Dies tritt zunächst an Inhomogenitäten oder geometrisch bedingt durch Flussüberhöhung an den Randbereichen des Supraleiters auf. Dabei können sowohl ein zur Oberfläche des Supraleiters senkrecht äußeres Feld, als auch die durch den Transportstrom entstehenden senkrechten Magnetfeldkomponenten betrachtet werden. Es kann so die lokale Flussdichteverteilung $B_z(x,y)$ in einer supraleitenden Schicht als Intensitätsverteilung (Graustufung) $I(x,y)$ dargestellt werden.

Der MO-Indikator, die Probe und die darunter liegende HF-Spule wurde für die Hochfrequenzmessungen auf einem Kühtisch aus Kupfer befestigt und thermisch kontaktiert. Dieser ist thermisch mit dem Kaltkopf eines Kryo-Kühlers verbunden. Um die Anordnung herum sind Kühlschilder angebracht. Außerdem befindet sich die Probe und der Kaltkopf zur thermischen Isolierung in einer evakuierten Kammer. Zusätzlich kann unter dem Probenhalter ein verschiebbarer Magnet eingebaut werden, um im externen Magnetfeld zu messen. Verschiedene elektrische Durchführungen erlauben die Einspeisung des Stroms für das Schaltelement und den HF-Strom für die Spule. Die Messung von Strom und Spannung am Schaltelement und die Spannungsmessung an der Spule wird über HF-Filter, und die Messung der Temperatur anhand mehrerer Sensoren durch extra Messdurchführungen realisiert.

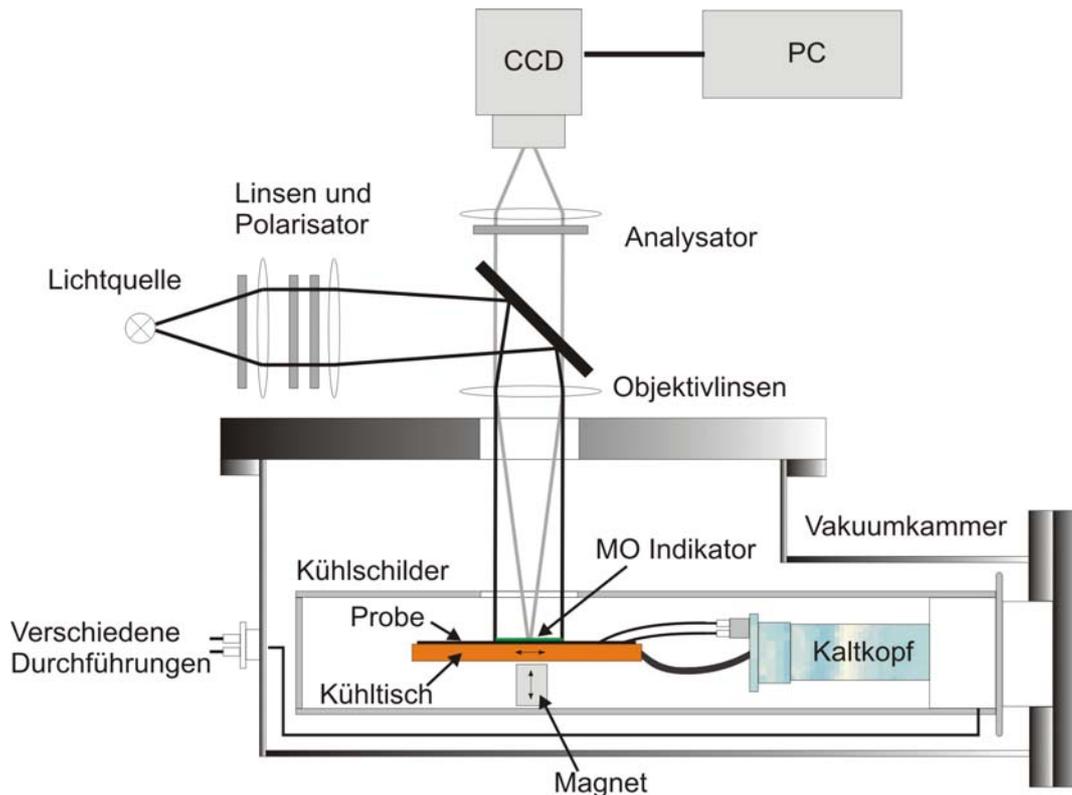


Bild 5.39: Skizze: Magnetooptischer Aufbau

Das optische System ist aufgebaut aus einer Beleuchtungs- und Abbildungseinheit, sowie einer CCD-Kamera und einem PC zur Weiterverarbeitung. Das Licht einer 200 W Halogenlampe wird über einen Filter nur im Wellenlängenbereich 500-560 nm in das Beleuchtungssystem eingekoppelt. In diesem Wellenlängenbereich weisen die Eisengrantfilme den größten Faraday-Effekt auf. Durch verschiedene Linsen wird das Licht auf die Probe fokussiert. Über zwei Polarisationsfilter die in diesem Fall in nicht ganz gekreuzter Stellung (ein paar Grad verdreht) verwendet werden und einen Halbspiegel wird das Licht linear polarisiert, zur Probe geschickt und das reflektierte Licht analysiert. Das nach dem Analysator entstehende Graustufenbild wird von einer CCD Kamera mit sehr kurzen Belichtungszeiten aufgenommen. Durch das leichte Verdrehen der Polarisationsfilter bekommt man ein Basis-Bild (ohne Magnetfeld) mit einer leicht grünlischen Farbe. Nun lassen sich die beiden verschiedenen Magnetfeldrichtungen ($-B_z$, $+B_z$) deutlich machen, da in einer Richtung des Magnetfeldes das Bild heller und in der anderen dunkler wird.

Bild 5.40 zeigt oben und unten zwei Serien von jeweils drei Bildern. Es wurde ein Bildausschnitt von zwei verschiedenen Schaltelementen aufgenommen. Zunächst fällt in allen Bildern der Spalt zwischen den beiden zu dieser Messung verwendeten Grantfilme auf. Leider stand für diese Messung kein durchgehender Granatfilm zur Verfügung. Die Bilder zeigen in der jeweiligen Reihe drei Aufnahmen eines Streifens. Das Bild „vor HF“ wurde aus jungfräulichem Zustand bei angelegtem Vorstrom aufgenommen (Oben 5 A, Unten 15 A).

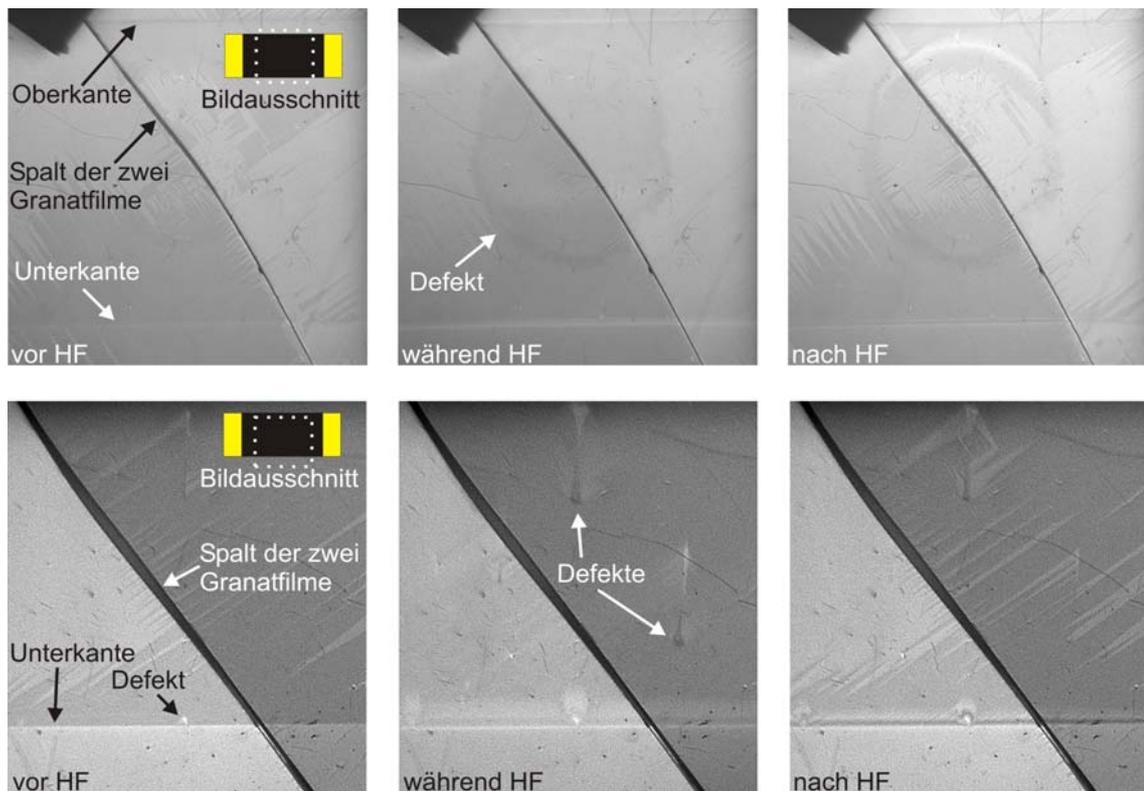


Bild 5.40: MO-Aufnahmen: Oben Schaltelement mit 5 A Vorstrom; Unten Schaltelement mit 15 A Vorstrom

„Während HF“ im zweiten Bild bedeutet, dass die Aufnahme (Belichtungszeit 30ms) gleichzeitig mit dem HF-Puls (Dauer 100 ms) bei $t=0$ ms gestartet wurde. „Nach HF“ ist eine Aufnahme die beim Ende des HF-Pulses $t=100$ ms mit ebenfalls 30 ms Belichtungszeit erstellt wurde. Bei den in fast allen Bildern zu findenden fransigen, hellen Flecken handelt es sich um eine Domänenbildung im Granatfilm. Bei höheren Feldern verschwinden diese wieder (z.B.: während der HF).

In der oberen Bildreihe wurde ein Bildausschnitt über die gesamte Breite des Schaltelementes aufgenommen. Die durch den Vorstrom bedingte Feldüberhöhung am Rand des Supraleiters ist an der Ober- und Unterkante des Schaltelementes deutlich zu erkennen. Während der HF ist das Eindringen des Feldes an einem kreisförmigen Defekt in der Mitte des Schaltelementes und auch am Rand des Supraleiters zu erkennen. Verdeutlicht wird dies durch die Aufnahme nach der HF, die das in den Supraleiter eingedrungene remanente Feld zeigt.

Der Bildausschnitt des Schaltelementes der unteren Bildreihe ist etwas nach unten verschoben, so sieht man hier nur die Unterkante des Elementes. Dieses Schaltelement besitzt mehrere kleine Defekte. Das Eindringen des Feldes ist hier an einem Defekt an der Unterkante schon durch den Vorstrom ohne die HF zu erkennen. Dieses Eindringen wird während der HF deutlich verstärkt. Nicht nur an der Unterkante, sondern auch an

Defekten innerhalb des Filmes dringt das Feld ein. Im Bild nach der HF ist dies wieder am remanenten Feld im Supraleiter zu erkennen.

Die magnetooptischen Untersuchungen belegen, was schon die optischen Messungen zeigten, dass die HF stark auf Defekte im Supraleiter wirkt. Ein gleichmäßigeres Schalten des Filmes zur Vermeidung von hot-spots ist durch die HF also nicht möglich.

5.2 Neue Geometrie

Im folgenden Kapitel sollen die Entwicklung und die Messungen zu einer neuen Geometrie des Schaltelementes vorgestellt werden.

5.2.1 Einleitung

Die Idee zur Entwicklung einer neuen Geometrie kam aus der Erkenntnis, dass durch das Magnetfeld der HF-Spule ein Kreisstrom im Supraleiter induziert wird. Betrachtet man dies zu einem Zeitpunkt, so fließt dieser HF-Strom im Supraleiter auf der einen Hälfte des supraleitenden Streifens in Richtung des Vorstroms und verstärkt ihn, auf der anderen Hälfte fließt er entsprechend entgegengesetzt und vermindert den Vorstrom. Nun sollte ein Schaltelement entworfen werden, in dem der HF-Strom nur in eine Richtung fließt und so auf der gesamten Breite des supraleitenden Streifens den Strom verstärkt oder vermindert. Bild 5.41 zeigt schematisch das neue Schaltelement, das eine kreisförmige Struktur besitzt.

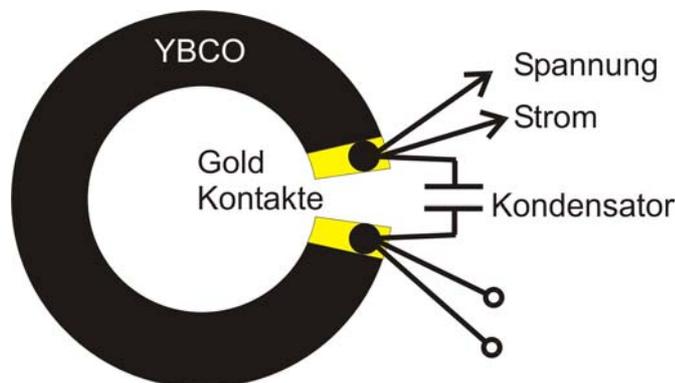


Bild 5.41: Skizze der neuen ringförmigen Geometrie: Kondensator ermöglicht kreisförmiges fließen des HF-Stromes

Der Schaltelement-Ring ist an einer Seite geöffnet, um das Element mit einem Gleichstrom (Vorstrom) zu belasten. Dort wird auch die Spannung abgegriffen. Über einen Kondensator wird der Ring geschlossen. Dadurch kann nur der HF-Strom im Kreis fließen. In Bild 5.42 ist ein Foto des aus einem 300 nm dicken YBCO-Film strukturierten 1 cm breiten ringförmigen Elementes und der dazugehörigen Spule zu sehen. Beide sind auf einen 2-Zoll Saphir Wafer strukturiert. Die kritische Stromdichte des Schaltelementes beträgt $0,8 \text{ MA/cm}^2$, die der Spule ist höher und beträgt 2 MA/cm^2 . Die Spule hat acht Windungen mit einer Breite von 1 mm und weist eine Induktivität von $3,05 \mu\text{H}$ auf.

5.2.2 Messaufbau

Es kam weitgehend der gleiche Messaufbau wie bei dem gestreckten Schaltelement zur Verwendung. Die Befestigung des Schaltelements und der Spule wurde über zwei mit Isolierband befestigte Teflonblöcke realisiert, in die ein Spalt gesägt und beide Wafer Rücken an Rücken geklemmt wurden (Bild 5.43).



Bild 5.42: Foto des ringförmigen Schaltelementes und der dazu passenden Spule

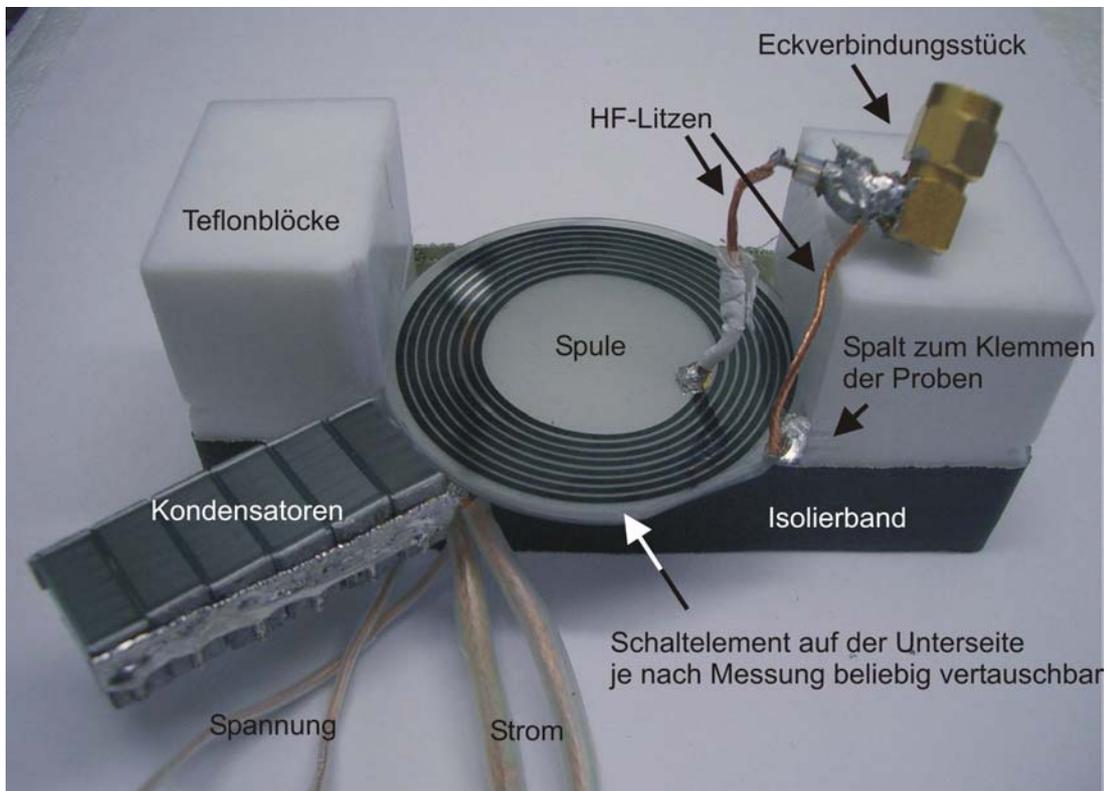


Bild 5.43: Foto der Probenbefestigung bei der neuen Schaltelementgeometrie

Je nach Messung kann dabei die Spule oder das Schaltelement oben liegen, um z.B. optische Aufnahmen anzufertigen. Die Spule wurde über HF-Litzen an ein Eckverbindungsstück gelötet, das an das Semirigidkabel des bestehenden Aufbaus geschraubt werden kann. Als Kondensatoren für den Kurzschluss des HF-Stromes am ringförmigen Schaltelement wurden (MKT) Folienkondensatoren verwendet. Diese wiesen genügend hohe Kapazitäten (bis mehrere μF) und eine gute Haltbarkeit im flüssigen Stickstoff auf. Ihre Kapazität verringerte sich im flüssigen Stickstoff um 10%, aber auch nach mehrmaligem Abkühlen und aufwärmen behielten sie den gleichen Kapazitätswert.

5.2.3 Typische Messung / Schaltvorgang

Der Schaltvorgang unterscheidet sich nicht vom gestreckten Schaltelement. Es ist wieder ein thermischer induzierter Übergang durch die Heizung des Vor- und HF-Stromes am zusätzlich durch die HF im Supraleiter erzeugten Widerstand. Bild 5.44 zeigt eine typische Messung mit dem ringförmigen Schaltelement. Das Schaltelement wies einen Schaltstrom von 29 A auf. Durchgeführt wurde diese Messung bei einer Frequenz von 210 kHz mit einer Kapazität am Schaltelement von 11 μF und einem Vorstrom von 28 A. Die Spule wurde dabei ohne Schwingkreis bei einer Leistung von 40 W betrieben.

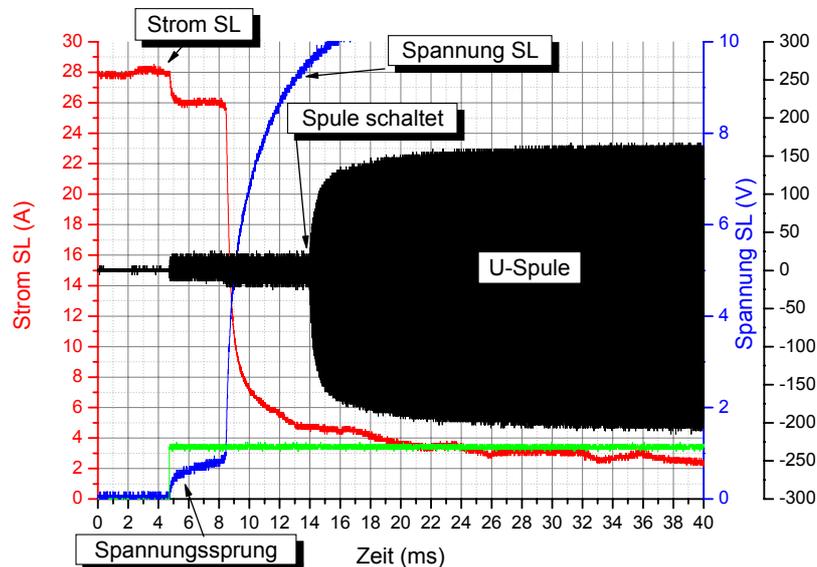


Bild 5.44: Typische Messung: Neues ringförmiges Schaltelement

Im Graph ist wieder der typische HF-getriggerte Schaltverlauf zu erkennen. Bei Beginn der Hochfrequenz ($t=4,3\text{ms}$) tritt sofort ein Spannungssprung am Schaltelement auf (400 mV) und nach einer „Heizzeit“ von 4 ms mit einem linearen Anstieg der Spannung schaltet der Supraleiter und die Spannung wächst stark an. Dabei wird der Strom am Supraleiter innerhalb der ersten 8 ms auf ca. 1/6 des Ausgangswertes (5 A) begrenzt.

Danach wird der Strom durch die weitere Erwärmung langsamer reduziert und beträgt nach 40 ms 2,5 A. Eingezeichnet ist auch die Spannung an der Spule und der Triggerpuls. In der Spule floss (bei maximaler Verstärkerleistung gemessen) ein HF-Strom (Scheitelwert) von 5 A ($I_{\text{HF-SL}}=19$ A). Dies reicht aus, dass auch die Spule nach 9 ms schaltet und die Spannung an der Spule stark ansteigt. Die Spule wurde dabei weder zerstört noch verschlechtert. Bei einer genaueren Untersuchung konnte festgestellt werden, dass diese Spule bei HF-Strömen über 4 A innerhalb maximal einer Sekunde schaltet. Es sind deshalb Messungen bei HF-Strömen über 4 A nur jeweils in dem Zeitraum möglich, in dem die Spule noch nicht geschaltet hat. Bei kleinen Schaltzeiten, die kürzeste bisher erreichte beträgt 2,7 ms, ist dies jedoch nicht von Bedeutung.

Ein wichtiger Grund für die etwas erhöhten Schaltzeiten (im Vergleich mit dem gestreckten Schaltelement) ist das größere Substrat des ringförmigen Elementes. Eine Entfernung des innerhalb des Schaltelementringes ungenutzten Bereiches würde eine Verkürzung der Schaltzeiten, durch eine Reduzierung der Wärmekapazität, bewirken (vergleiche Kapitel 5.1.4.1).

Die im Vergleich zum gestreckten Schaltelement höheren maximalen HF-Ströme sind auf den geringeren Wechselstromwiderstand der Spule bei der neuen Geometrie zurückzuführen. Da diese bei Frequenzen im hundert kHz Bereich (gestrecktes Schaltelement $f > 3$ MHz) betrieben wird, ist der Wechselstromwiderstand ωL trotz der größeren Induktivität der Spule kleiner. Eine höhere Induktivität geht aber positiv in die Berechnung des HF-Stromes im Supraleiter ein (Kapitel 6).

Im nächsten Abschnitt soll nun die Frequenzabhängigkeit dieser neuen Geometrie betrachtet werden.

5.2.4 Frequenzabhängigkeit

Die Messungen zur Frequenzabhängigkeit wurden bei einem Vorstrom von 24 A durchgeführt. Die Kapazität am Schaltelement betrug 4 μF die Spule wurde ohne Schwingkreis bei einem HF-Scheitelstrom in der Spule von 0,6 A betrieben. Bild 5.45 zeigt diese Messung (eine frühere, ergänzende Messung ist ebenfalls eingezeichnet: ohne Linien verbundene Messpunkte). Aufgetragen ist die reziproke Schaltzeit gegen die Frequenz. Deutlich ist ein Resonanzpeak bei 480 kHz zu sehen. Es entsteht ein Schaltelement Schwingkreis aus der Induktivität des YBCO-Ringes und den Kondensatoren am Schaltelement. Wird dieser Schwingkreis durch die HF-Spule bei seiner Resonanzfrequenz angeregt, erreicht man die kürzesten Schaltzeiten. Im Vergleich zum gestreckten Schaltelement sind nun auch Frequenzen unter 3 MHz möglich. Dabei wurden durch Vergrößerung der Kapazität am Schaltelement Resonanzfrequenzen bis zu 190 kHz getestet.

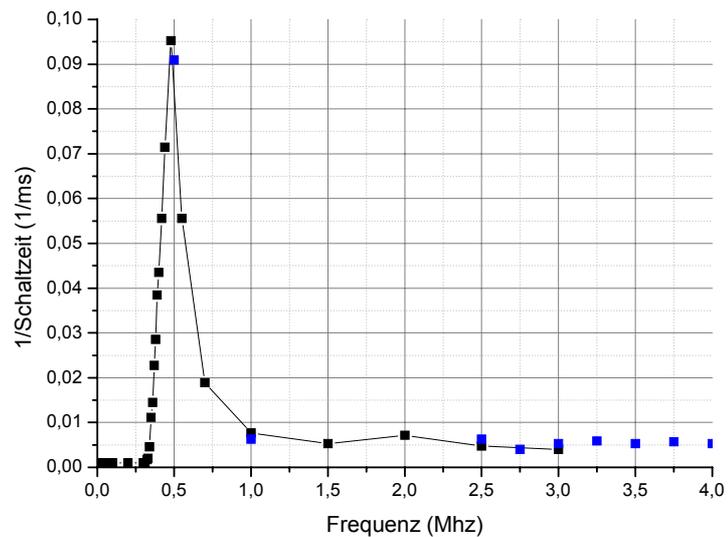


Bild 5.45: Frequenzabhängigkeit des ringförmigen Schaltelementes

5.2.5 Vorstromabhängigkeit

Die Vorstromabhängigkeit des ringförmigen Schaltelements ist in Bild 5.46 und Bild 5.47 dargestellt. Aufgetragen ist der Spannungssprung bzw. die reziproke Schaltzeit gegen den Vorstrom des Supraleiters. Eingezeichnet sind die Daten einer Messung und einer Simulation.

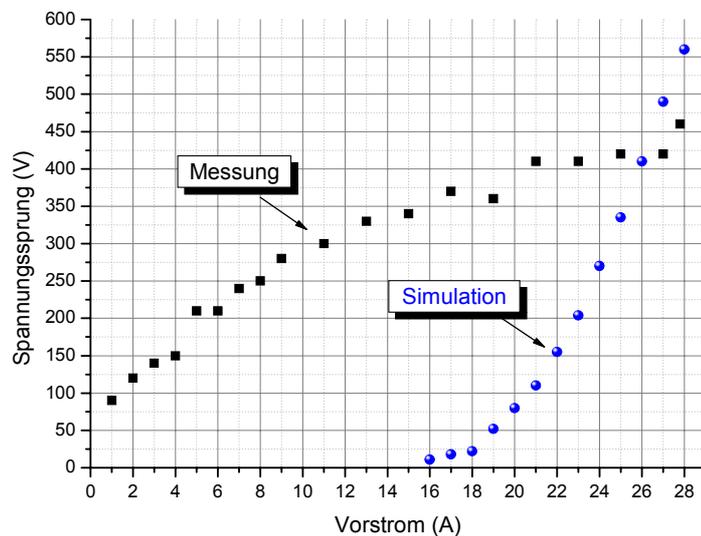


Bild 5.46: Spannungssprung gegen Vorstrom: Vorstromabhängigkeit des ringförmigen Schaltelementes (Messung und Simulation)

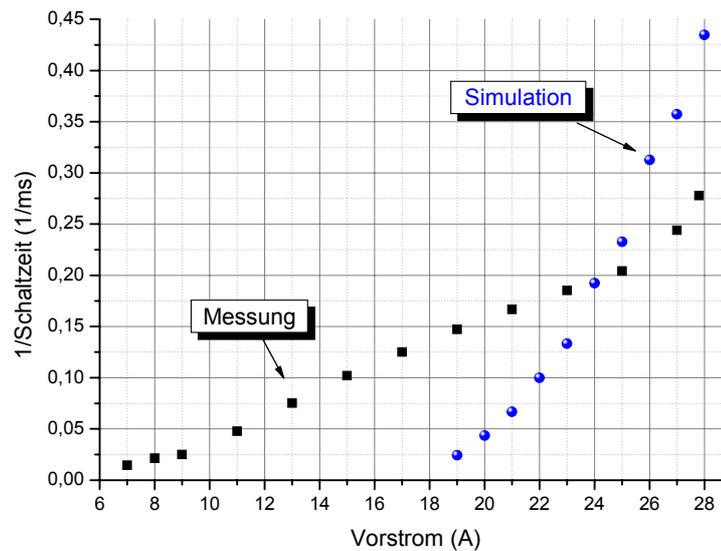


Bild 5.47: $1/\text{Schaltzeit}$ gegen Vorstrom: Vorstromabhängigkeit des ringförmigen Schaltelementes (Messung und Simulation)

Die Messung wurde bei einer Frequenz von 213 kHz, mit einer Kapazität am Schaltelement von 11 μF , durchgeführt. Der Schaltstrom des Elementes betrug 29 A. Es wurde bei einem HF-Scheitelstrom in der Spule von 5 A ($I_{\text{HF-SL}}=19$ A) gemessen. Die Schaltzeit der Spule beträgt hier ca. 70 ms. Es konnten so ohne Schalten der Spule von 28 A bis 7 A Vorstrom Schaltversuche durchgeführt werden. Mit steigendem Vorstrom nimmt die Höhe des Spannungssprunges zu, wobei die anfängliche Steigung etwas abnimmt. Die simulierte Messkurve hat hier einen steileren Verlauf, und die Werte sind zunächst niedriger und später höher als bei der Messung. Dies gilt genauso bei der simulierten, reziproken Schaltzeit. Die reziproken Schaltzeiten der Messung zeigen oberhalb von 6 A einen nahezu linearen Anstieg mit zunehmendem Vorstrom. Bei Vorströmen im Bereich von 1 A bis 6 A tritt eine Art Push-Button-Mode auf. Nach mehreren 100ms HF-Pulsdauer wies das Schaltelement, obwohl dabei die Spule schon geschaltet hat, einen Widerstand auf und wurde nach Ende des HF-Pulses nach einer gewissen Kühlzeit wieder supraleitend. Ein Beispiel hierfür ist im Bild 5.48 bei einem Vorstrom von 5 A gezeigt. Vom Einschalten der Hochfrequenz bis zum Schalten der Spule zeigt sich der bekannte Spannungssprung, dann fällt er fast auf null ab. Nun zeigt sich ein langsamer Anstieg der Spannung bis zum Schaltvorgang des Elements und einem starken Anstieg. Der Strom wird dabei auf 1,5 A begrenzt. Nach dem Ausschalten der HF wird das Element nach 80 ms wieder supraleitend. Die Spannung an der Spule und am Supraleiter wurden bei dieser Messung herausgezoomt (zur besseren Darstellung hier verkleinert) und sind deshalb bei hohen Werten abgeschnitten. Die Spannung an der Spule nach dem Schalten beträgt in voller Auflösung ca. 150 V.

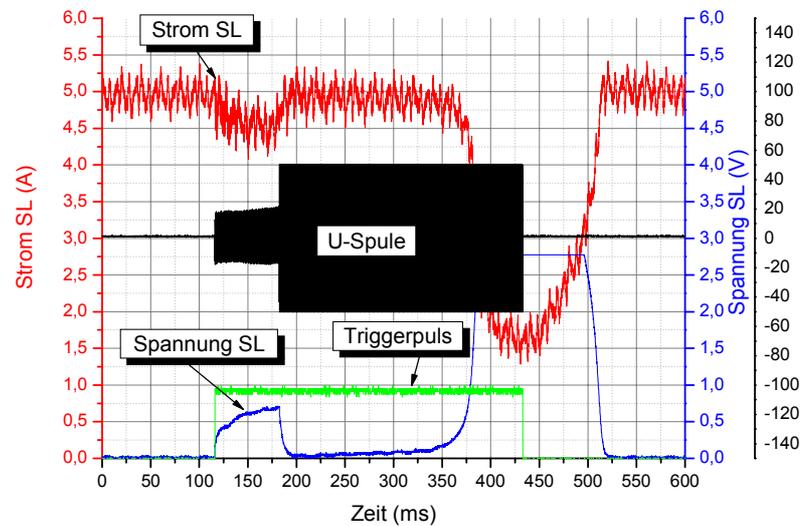


Bild 5.48: Beispielmessung: "Push-Button-Mode" durch Heizen der Spule

Bei einer starken Erwärmung der geschalteten Spule ist im Bereich von mehreren hundert Millisekunden eine Übertragung der Wärme an das rückseitig, aufliegende Schaltelement und den umgebenden Stickstoff möglich. Deshalb handelt es sich bei dem angesprochenen „Push-Button-Mode“ um eine indirekte Heizung des Schaltelementes durch die Erwärmung der normalerweise nicht leitend gewordenen Spule. Da die beiden Rückseiten der Substrate (Schaltelement und Spule) einfach zusammengepresst werden, ist nur ein schlechter Wärmeübergang möglich. Unter Verwendung eines doppelseitigen Substrates, wäre es möglich auf eine Seite die Spule und auf die andere Seite das Schaltelement zu strukturieren. Da die Wärmeleitung im Saphir sehr gut ist wäre es so möglich einen „supraleitenden Heizer“ für das Schaltelement zu entwickeln. Dies wäre auch einfach durch einen Gleichstrompuls auf ein zweites Schaltelement mit niedrigem Schaltstrom auf der Rückseite eines doppelseitigen Substrates realisierbar.

Im Folgenden soll nun auch auf die HF-Stromabhängigkeit des ringförmigen Schaltelementes eingegangen werden.

5.2.6 HF-Stromabhängigkeit

Der im Schaltelement fließende HF-Strom wurde wie beim gestreckten Schaltelement aus dem in der Spule fließenden Strom berechnet (siehe dazu Kapitel 6). Bild 5.49 und Bild 5.50 zeigen den Spannungssprung bzw. die reziproke Schaltzeit aufgetragen gegen den HF-Strom im Supraleiter. Auch hier ist eine zugehörige Simulation des Schaltelementes eingezeichnet. Es wurde mit den gleichen Parametern wie beim vorigen Abschnitt 5.2.5 gemessen. Der Vorstrom betrug 28 A (Schaltstrom 29 A).

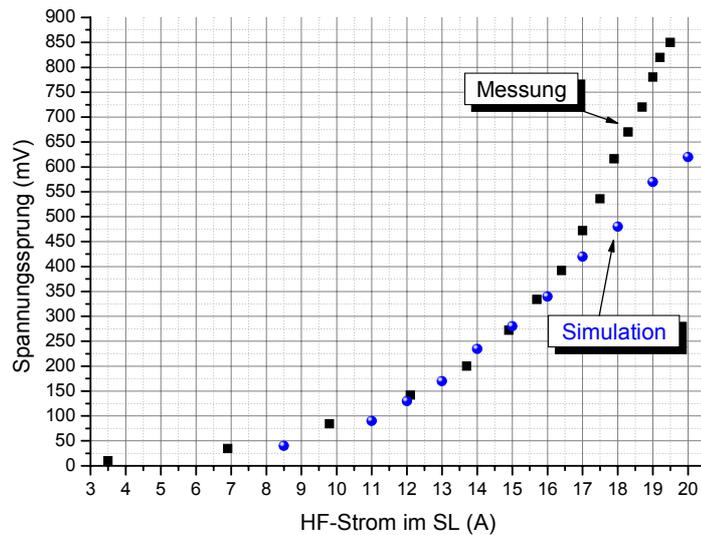


Bild 5.49: Spannungssprung gegen HF-Strom im SL: HF-Stromabhängigkeit des ringförmigen Schaltelementes (Messung und Simulation)

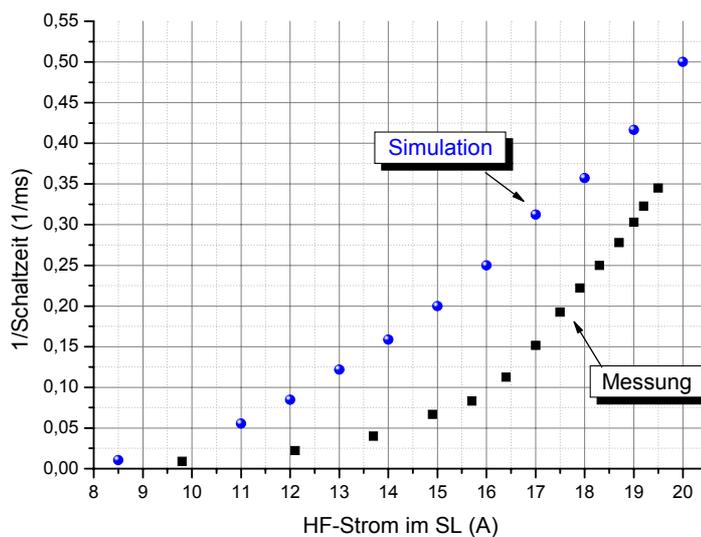


Bild 5.50: 1/Schaltzeit gegen HF-Strom im SL: HF-Stromabhängigkeit des ringförmigen Schaltelementes (Messung und Simulation)

Bei der Messung ist ab einem HF-Strom von $I_{\text{HF-SL}} = 3,5 \text{ A}$ im Rauschen ($\pm 5 \text{ mV}$) ein Spannungssprung von 10 mV erkennbar. Anschließend steigt der Spannungssprung mit zunehmendem HF-Strom parabelförmig an. Zum Ende der Kurve hin bis zu maximaler Verstärkerleistung (bei einem HF-Strom von $I_{\text{HF-SL}} = 19,5 \text{ A}$) nimmt die Kurve einen nahezu linearen Verlauf an. Die aus der Simulation erhaltenen Werte für die Spannungssprünge passen gut zur Messung. Bei höheren HF-Strömen verläuft die simulierte Kurve allerdings etwas flacher. Die reziproke Schaltzeit zeigt einen ähnlichen

Verlauf. Zunächst ist ein parabelförmiger Anstieg zu erkennen bis zu einem annähernd linearen Verlauf am Ende der Kurve. Dabei wurde eine Schaltzeit unter einer Sekunde erst ab einem HF-Strom von $I_{\text{HF-SL}} = 9,8 \text{ A}$ erreicht. Die Simulation zeigt hier einen ähnlichen leicht gekrümmten Verlauf, ist allerdings zu höheren reziproken Schaltzeiten verschoben.

Insgesamt zeigt sich im Vergleich zum gestreckten Schaltelement eine schwächere Abhängigkeit vom HF-Strom und (wie im vorigen Kapitel gezeigt) vom Vorstrom. Damit ist dieses Schaltelement stabiler bei Schwankungen der HF-Amplitude oder des Vorstromes.

5.2.7 Optische Untersuchungen

Wie beim gestreckten Schaltelement in Abschnitt 5.1.5 wurden auch für das ringförmige Schaltelement optische Aufnahmen erstellt. Bild 5.51 zeigt eine zeitliche Fotoserie eines Schaltvorgangs. Die Belichtungszeit betrug dabei 2 ms. Fotografiert ist das ringförmige Schaltelement mit den Strom- und Spannungsanschlüssen. Die Spule auf der Rückseite des Schaltelementes war hier leicht verschoben und ist deshalb im Bild zu sehen. Die Schaltzeit betrug 6,5 ms. In den Bildern ist die Entstehung des Quenches am oberen linken Rand des Elementes zu erkennen. Im weiteren Verlauf beginnt der Quench zu wandern. Dies ist auf einem Video (Video4.avi auf CD), das mit einer Digitalkamera aufgezeichnet wurde, gut zu sehen. Es zeigt mehrere Schaltversuche mit HF. Der erste Quench tritt immer an der selben Stelle im Ring auf, beginnt sich dann zu bewegen und wobbelt willkürlich von Kontakt zu Kontakt.

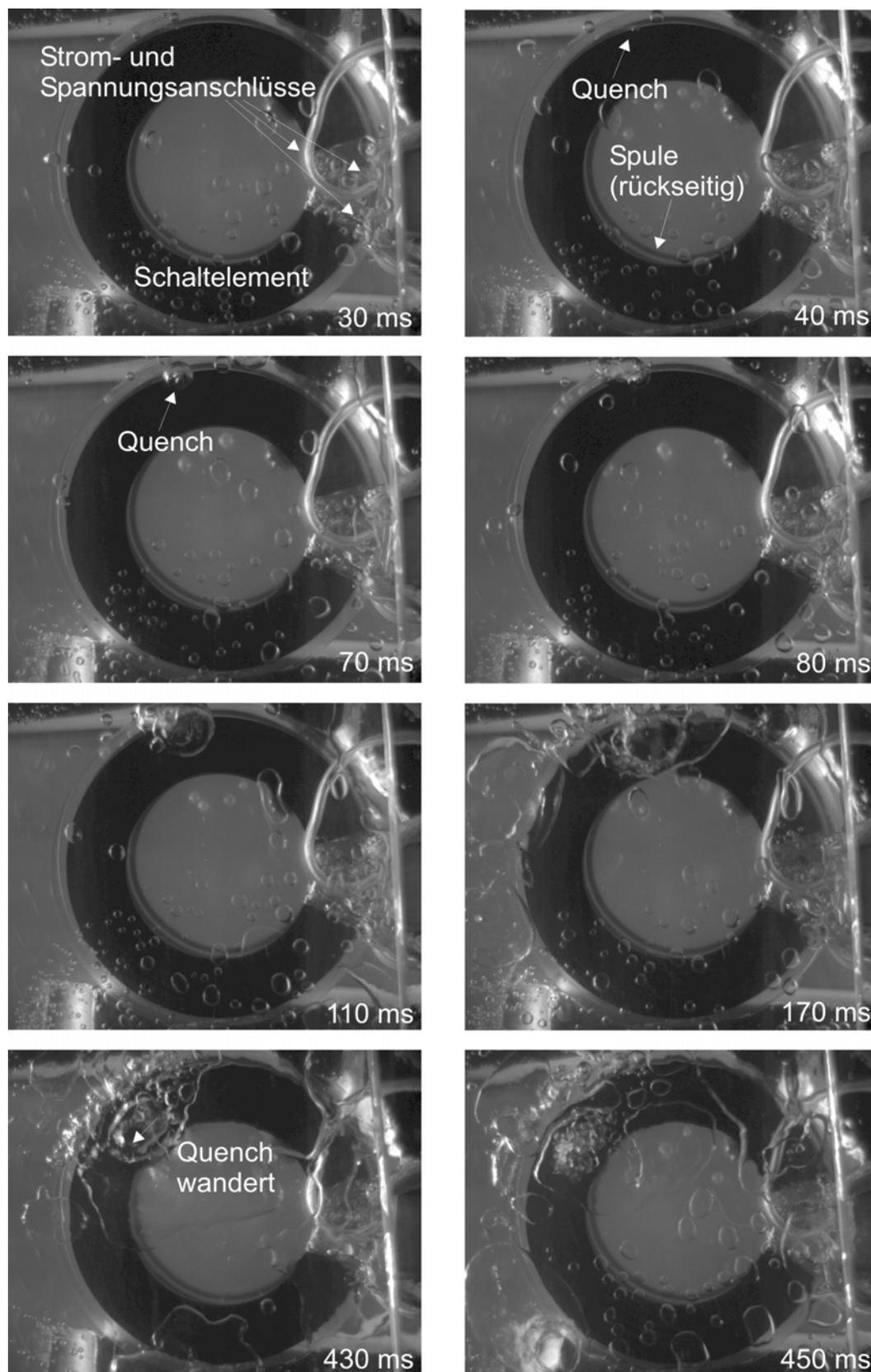


Bild 5.51: Fotoserie eines Schaltvorgangs des ringförmigen Schaltelements

6 Deutung der Messergebnisse

Aus den vorgestellten Messergebnissen konnte eine Theorie für den Schaltvorgang entwickelt und mit einem Simulationsprogramm von H. Kinder bestätigt werden. Dies soll im Folgenden beschrieben werden.

6.1 Theorie für den Schaltvorgang

Durch die HF-Spule wird ein Kreisstrom im Schaltelement induziert. Dies ist, zu einem Zeitpunkt betrachtet, in Bild 6.1 schematisch dargestellt. Skizziert ist auch ein anliegender Vorstrom.

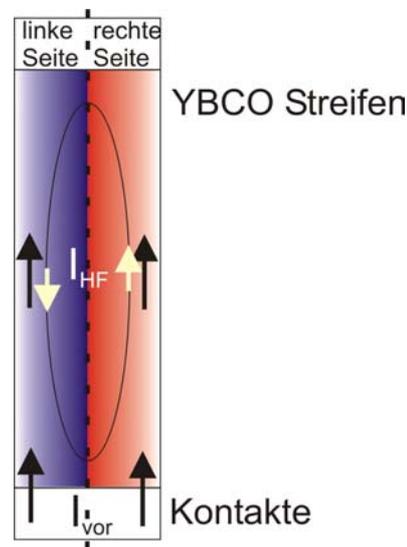


Bild 6.1: Schematische Darstellung der Ströme im Schaltelement

Nun kommt es zu einer Addition der beiden Ströme im Schaltelement. Auf der rechten Seite wird der Vorstrom durch den HF-Strom verstärkt auf der linken Seite wird er vermindert. Dazu betrachtet man nun die U-I Kennlinie eines solchen Schaltelementes bei 77 K (Bild 6.2). Gemessen wurde diese Kennlinie an einem Standard Element (10 mm x 42 mm x 300 nm) im flüssigen Stickstoff (77 K). Geht man z.B. von einem Vorstrom von 24 A aus und addiert und subtrahiert einen HF-Strom von 4 A, so sieht man anhand der U-I-Kennlinie die sich daraus ergebenden Spannungen im Supraleiter. Aufgrund der starken Krümmung der Kurve erhält man für die Addition der beiden Ströme eine 24 mal höheren Spannungswert als für die Subtraktion. Daraus folgt, dass die rechte Seite des Schaltelementes in Bild 6.1 einen stark erhöhten Widerstand aufweist und die linke Seite einen nur etwas erniedrigten. Trägt man die Spannung für eine Seite des Schaltelementes zeitabhängig auf (Bild 6.3) so erkennt man den sich ergebenden Gleichrichtereffekt.

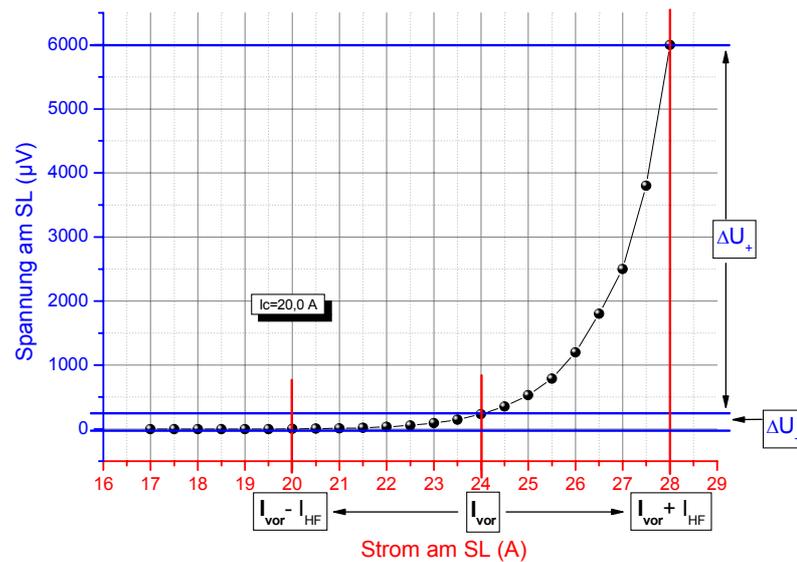


Bild 6.2: U - I -Kennlinie eines 1 cm breiten 42 mm langen und 300 nm breiten YBCO - Schaltelementes bei 77K: Verdeutlichung der Wirkung des HF-Stromes

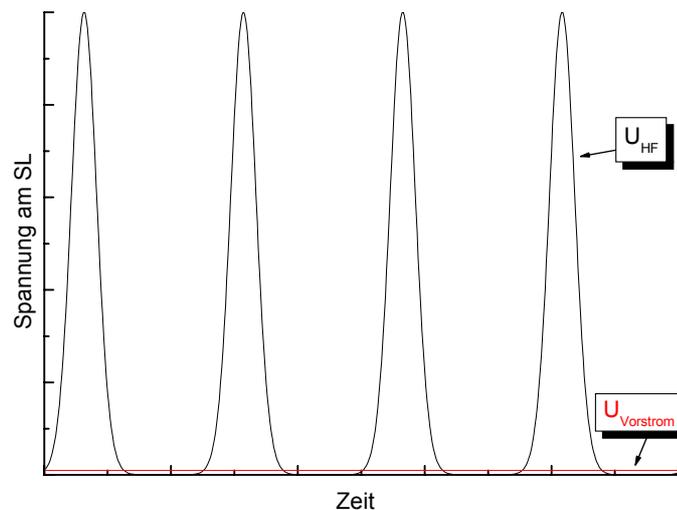


Bild 6.3: Skizze: Zeitabhängiger Spannungsverlauf im Supraleiter durch die HF

Aus dem Mittelwert dieser Spannungsspitzen ergibt sich der durch die HF erzeugte Spannungssprung im Supraleiter der zu einem thermischen Schaltvorgang führt.

In Kapitel 5.1.3.1 wurde gezeigt, dass die Höhe des Spannungssprunges abhängig von der Frequenz ist. Sie sollte jedoch unabhängig von der Frequenz sein, da der Mittelwert für verschiedene Frequenzen gleich ist (Bild 6.4).

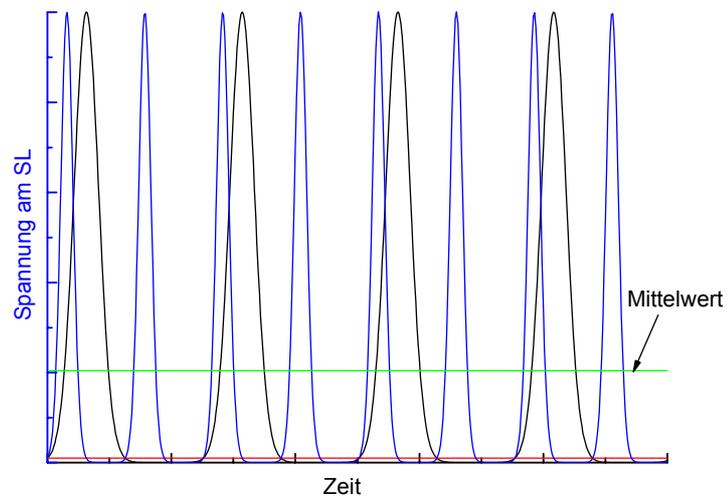


Bild 6.4: Skizze: Zeitabhängiger Spannungsverlauf im Supraleiter durch die HF bei verschiedenen Frequenzen

Betrachten wir dazu noch einmal die Stromverteilung im Schaltelement (Bild 6.5).

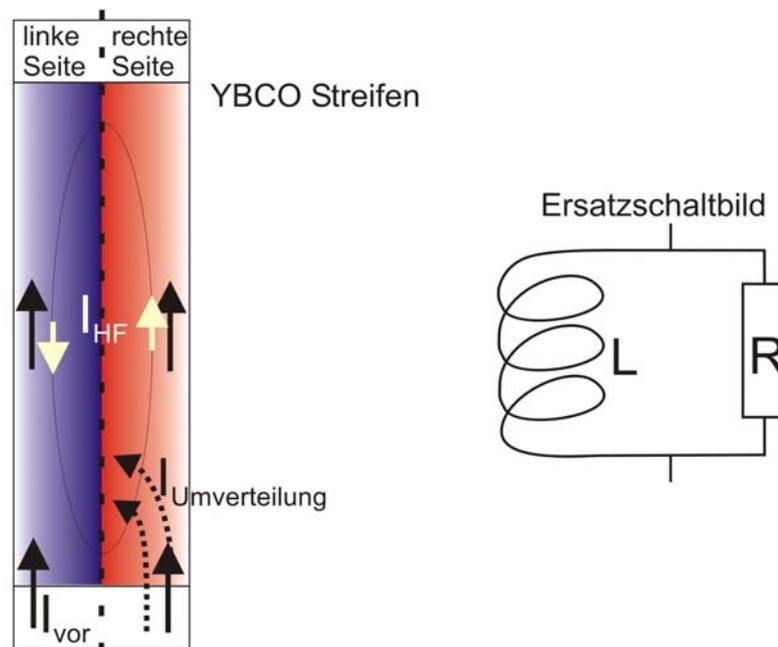


Bild 6.5: Skizze: Stromverteilung im Schaltelement und Ersatzschaltbild

Tritt auf der rechten Seite des Schaltelements durch die Addition der beiden Ströme ein erhöhter Widerstand auf, würde sich der Strom normalerweise auf die andere Seite des Streifens mit geringem Widerstand umverteilen. Dem steht der induktive, frequenzabhängige Widerstand entgegen. Ein Ersatzschaltbild für die beiden Widerstände ist ebenfalls in Bild 6.5 skizziert. Solange der Wechselstrom-Widerstand

ωL kleiner ist als der durch die HF erzeugte Widerstand R , verteilt sich der Strom um und es entsteht nur ein geringer Spannungsabfall. Wird jedoch die Frequenz höher und damit auch der Wechselstromwiderstand ωL , muss der Strom immer mehr auch über den von der HF erzeugten Widerstand fließen. Dadurch nimmt der Spannungsabfall immer mehr zu.

Der Widerstand im Supraleiter beträgt in unserem Fall ca. $0,5 \Omega$ und die Induktivität einer Stromschleife im Schaltelement wurde bestimmt zu 15 nH (Kapitel 6.2). Daraus folgt für die Grenzfrequenz:

$$\nu = \frac{R}{2\pi L} \approx 5 \text{ MHz} \quad (6.1)$$

Diese Frequenz liegt im Bereich der gemessenen Grenzfrequenz (ca. 3 MHz) für das gestreckte Schaltelement in Kapitel 5.1.3.1 (Bild 5.11, S.29).

Da diese Frequenzabhängigkeit jedoch nur von der Stromverteilung im Supraleiter abhängt, wurde eine neue ringförmige Geometrie entwickelt. In dieser fließt der HF-Strom über die gesamte Breite des Streifens nur in eine Richtung. Wie in Kapitel 5.2.4 (S.58) gezeigt, sind damit auch Frequenzen unter 3 MHz möglich. Die Frequenzabhängigkeit des ringförmigen Schaltelementes besteht nur darin das Schaltelement und die HF-Kurzschluss-Kondensatoren in Resonanz schwingen zu lassen.

Eine weiterer Unterschied zwischen dem gestreckten Schaltelement und dem ringförmigen Schaltelement ist die annähernd lineare Abhängigkeit des Spannungssprungs und der reziproken Schaltzeit für große Stromwerte (Kapitel 5.2.5 und 5.2.6). Die lineare Abhängigkeit auch bei kleinen Stromwerten, bei den vorstromabhängigen Messungen (Kapitel 5.2.5), ist bisher unklar. Aber für große Stromwerte kann man sich ein Modell vorstellen, dass einen linearen Anstieg zulässt. Dazu betrachten wir die U-I-Kennlinie bei höheren konstanten Strömen. Bild 6.6 zeigt die Skizze einer solchen U-I-Kennlinie. Diese Kennlinie erreicht bei hohen Strömen nicht unendliche Spannungen, sondern verläuft nach dem Erreichen des Schaltstromes parallel zur Kennlinie des normalleitenden Widerstandes linear weiter. Da der Schaltvorgang im ringförmigen Schaltelement bei höheren HF-Strömen abläuft (ca. 5 A höher als beim gestreckten Element) befindet man sich bei der Messung der Vorstrom und HF-Stromabhängigkeit schon deutlich im linearen Bereich der Kennlinie. Dadurch lassen sich die annähernd linearen Abhängigkeiten von Spannungssprung und reziproker Schaltzeit erklären. Bei dem gestreckten Schaltelement ist dieses lineare Verhalten in den Messungen noch nicht zu erkennen.

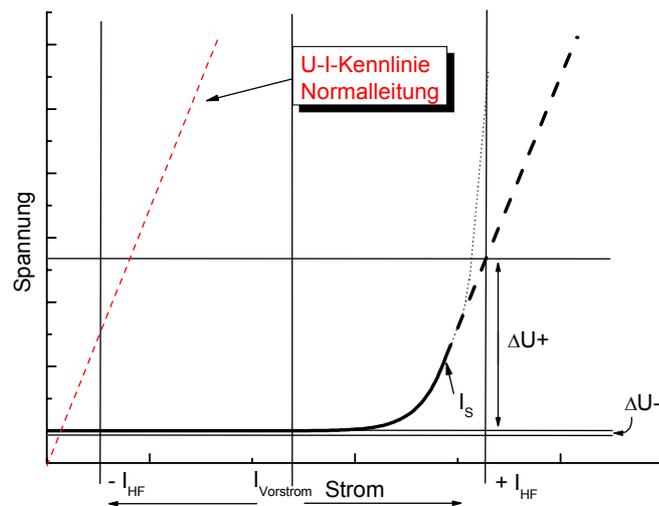


Bild 6.6: Skizze: U-I-Kennlinie bei höheren konstanten Strömen; Übergang zur parallel verschobenen normalleitenden Kennlinie

6.2 Berechnung des HF-Stromes im Supraleiter

Aus der Theorie konnte eine Abschätzung für den von der Erregerspule im Schaltelement erzeugten HF-Strom erreicht werden. Dazu betrachten wir die Erregerspule als Primärspule eines Transformators, dessen Sekundärspule das supraleitende Schaltelement darstellt. Bild 6.7 zeigt die Skizze eines Transformators mit einer beliebigen Last Z im Sekundärkreis. Eingezeichnet sind die jeweiligen Verlustwiderstände (R_1, R_2), Induktivitäten (L_1, L_2) und die Gegeninduktivität M .

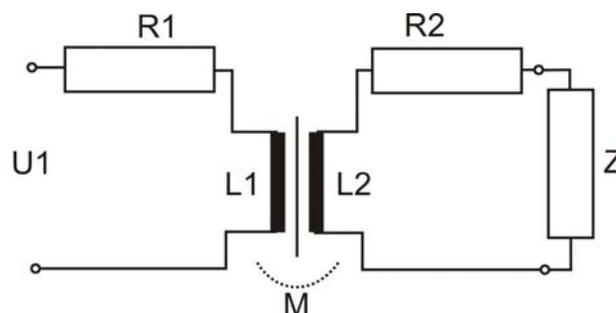


Bild 6.7: Skizze eines Transformators mit beliebiger Last Z

Daraus ergeben sich folgende Gleichungen für die Sekundärspannung:

$$U_2 = i\omega M I_1 + (R_2 + i\omega L_2) I_2 \quad \text{und} \quad U_2 + Z I_2 = 0 \quad (6.2)$$

Daraus folgt für das Stromübersetzungsverhältnis:

$$\frac{I_2}{I_1} = -\frac{i\omega M}{R_2 + i\omega L_2 + Z} \quad \text{mit } M = k\sqrt{L_1 L_2} \quad (k := \text{Kopplungsfaktor}) \quad (6.3)$$

Im Fall des gestreckten Schaltelementes ist nun $Z=0$. Beim ringförmigen Schaltelement mit den angeschlossenen Kondensatoren zum Kurzschluss der HF gilt:

$$Z = \frac{1}{i\omega C}, \quad \text{in Resonanz } Z = -i\omega L_2 \quad (6.4)$$

Zur Bestimmung der jeweiligen Kopplungsfaktoren wurde die Induktivität der Spulen L_1 und die Induktivität der Spule mit untergelegtem Supraleiter L_m (kurzgeschlossener Transformator) gemessen. Nach [Ibt04] lässt sich folgendes Ersatzschaltbild dafür benutzen (Bild 6.8).

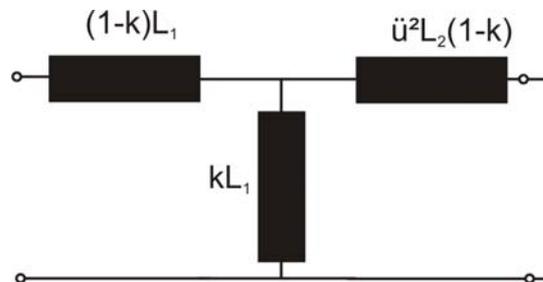


Bild 6.8: Ersatzschaltbild eines Transformators (vereinfacht) zur Bestimmung des Kopplungsfaktors

Aus einer Summierung der Induktivitäten und Auflösen nach k ergibt sich für den Kopplungsfaktor:

$$k = \frac{\sqrt{-L_1(L_m - L_1)}}{L_1} \quad \text{mit Übertragungsfaktor } \ddot{u}^2 = \frac{L_1}{L_2} \quad (6.5)$$

Die Kopplungsfaktoren liegen bei den verwendeten Spulen für das gestreckte Schaltelement im Bereich von 0,61 bis 0,66 und bei 0,89 für die ringförmige Spule.

Nun sind alle Parameter zur Bestimmung des Stromes im Sekundärkreis I_2 nach Formel (6.3) bis auf den Widerstand R_2 (hier Widerstand des Supraleiters) bekannt. Da nun aber der Widerstand R_2 des Supraleiters nicht konstant, sondern stark abhängig vom Strom ist, muss dieser genauer betrachtet werden.

Für den Strom im Supraleiter aus Vorstrom und HF-Strom gilt (näherungsweise cosinusförmig):

$$I(t) = I_{vor} + I_0 \cos \omega t \quad (6.6)$$

Aus der Strom-Spannungs-Charakteristik (z.B. Bild 6.2) eines Supraleiters folgt:

$$U(t) = AI^n(t) \quad (6.7)$$

Für die Abschätzung soll nun die Leistung betrachtet werden, die vom HF-Strom I_0 , während der ersten Schwingung an einem effektiven ohmschen Widerstand „ R_2 “ erbracht wird.

Diese effektive Leistung ist:

$$P_{eff} = \frac{R_2 I_0^2}{2} \quad (6.8)$$

Diese muss gleich der tatsächlichen Leistung des HF-Stromes während der ersten Schwingung (0 bis 2π) sein:

$$\frac{R_2 I_0^2}{2} = \frac{A}{2\pi} \int_0^{2\pi} (I_{vor} + I_0 \cos \tau)^{n+1} d\tau \quad \text{mit } \tau = \omega \cdot t \quad (6.9)$$

Aus Gleichung (6.3) (dem Betrag von R_2) und (6.9) ergibt sich nun für das gestreckte Schaltelement folgende Gleichung:

$$\frac{I_1 \omega k \sqrt{L_1 L_2} I_2}{2} = \frac{A}{2\pi} \int_0^{2\pi} (I_{vor} + I_2 \cos \tau)^{n+1} d\tau \quad \text{mit } I_0 = I_2 \quad (6.10)$$

Für das ringförmige Schaltelement mit dem Schaltelementschwingkreis ergibt sich:

$$\frac{(I_1 k \sqrt{L_1 L_2} - I_2 L_2) \omega I_2}{2} = \frac{A}{2\pi} \int_0^{2\pi} (I_{vor} + I_2 \cos \tau)^{n+1} d\tau \quad \text{mit } I_0 = I_2 \quad (6.11)$$

Nun wurden beide Gleichungen (6.10, 6.11) numerisch integriert und der unbekannte Strom im Supraleiter I_2 mit einem numerischen Lösungsverfahren ermittelt. Dabei wurde der Vorfaktor A und die Potenz n aus der Messung der U-I-Kennlinie des jeweiligen verwendeten Schaltelementes genommen. Dazu wurden U-I-Kennlinien bei 77K bis zu einem Spannungswert von 10 μV gemessen und angefitet. Da diese Abschätzung den HF-Strom für die erste Schwingung bestimmt, ist hier noch keine Erwärmung zu erwarten und die Verwendung der Kennlinie bei 77 K angebracht. Für das in den meisten Messungen verwendete, gestreckte Standard Schaltelement ergab sich $A=5\text{e-}34$ und $n=19$ (Bild 6.2). Die jeweiligen Induktivitäten wurden mit einem Induktivitätsmessgerät bei 4 MHz gemessen. Die Induktivität der supraleitenden Schaltelemente wurde mit einem schwach gekoppelten Schwingkreis aus einer dem jeweiligen Element entsprechenden Kupferfolie und einem bekannten Kondensator über die Resonanzfrequenz ermittelt. Sie beträgt 15 nH für das gestreckte Schaltelement und 16 nH für das ringförmige Element. Beim gestreckten Schaltelement wurde dabei über einen Schlitz in der Mitte des Kupferplättchens die Induktivität eines im Supraleiter fließenden Kreisstroms nachempfunden. Die so erhaltenen HF-Ströme im Supraleiter wurden in dieser Arbeit angegeben. Dabei ist zu beachten, dass dies der Strom im

Supraleiter während der ersten Schwingung ist und sich im weiteren Verlauf des Schaltvorganges ändert, wie auch der Strom in der Primärspule (Kapitel 5.1.2).

Durch diese Abschätzung lässt sich der Strom im Supraleiter auch in Abhängigkeit von der Frequenz berechnen. Dies ist bei niedrigen Frequenzen für das ringförmige Schaltelement von besonderer Bedeutung, da es technisch einfacher wäre das Schaltelement bei sehr niedrigen Frequenzen zu betreiben. Bild 6.9 zeigt den Strom im Schaltelement bei einem HF-Strom von 5 A in der Primärspule für verschiedene Frequenzen. Mit sinkender Frequenz nimmt der in das Schaltelement übertragene Strom ab. Zunächst ist der Abfall noch schwach, nimmt jedoch immer mehr zu. Schon bei 1 kHz erreicht man den Fall, dass in Primärspule und Schaltelement in etwa der gleiche Strom fließt. Der Transformator „verliert“ also seine Wirkung. Dies liegt an der Querinduktivität (kL_1), die im Ersatzschaltbild Bild 6.8 zu sehen ist. Mit sinkender Frequenz nimmt der Widerstand dieser Querinduktivität ab und der Strom fließt dort und dadurch nicht mehr zur Sekundärseite.

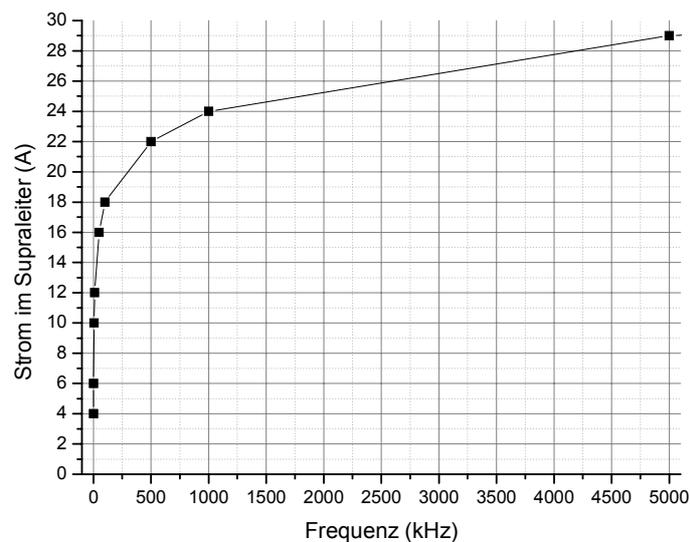


Bild 6.9: Strom im Supraleiter gegen Frequenz bei einem HF-Strom von 5 A in der Primärspule des ringförmigen Schaltelementes

6.3 Simulation

Zur Bestätigung der Theorie wurde ein Simulationsprogramm von Prof. H. Kinder entwickelt. Nach Eingabe aller für ein Schaltelement und den Schaltvorgang notwendigen Parameter, berechnet diese Simulation zweidimensional, da es sich um dünne Schichten handelt, die Stromverteilung in Film und Substrat (wenn leitfähig). Dazu werden beide in beliebig viele Blöcke zerteilt und die Werte dafür berechnet. Aus der Stromverteilung ergibt sich dann je nach Widerstand ($R(j,T)$ aus Messdaten) eine gewisse Wärmeentwicklung und Diffusion, die in 3-D berechnet werden. Damit kann

die Temperaturverteilung im supraleitenden Film dargestellt werden. Diese Reihenfolge wird nun in Echtzeit wiederholt. Abhängig vom Vorstrom kann so die langsame Erwärmung eines supraleitenden Filmes und dessen Schaltvorgang vollständig zeitabhängig simuliert werden. Die Abhängigkeit der kritischen Stromdichte vom Magnetfeld wird dabei bisher nicht berücksichtigt.

Um nun auch die Hochfrequenz simulieren zu können wird zur Gleichspannungsquelle eine Wechselfspannungsquelle addiert. Durch einen einstellbaren Vorwiderstand wird so der sich abhängig von der Frequenz verändernde Vorstrom (Vorstrom + HF-Strom) in Echtzeit simuliert. Dabei wird nur berücksichtigt, dass der HF-Strom im Schaltelement in eine Richtung fließt. Bild 6.10 zeigt die erhaltenen Daten eines simulierten Schaltvorgangs an einem gestreckten Schaltelement. Es ist der typische Spannungssprung (370 mV), der schwache Anstieg der Spannung bis zum Schaltvorgang (Schaltzeit ca. 1,3 ms) und die Begrenzung des Stromes zu erkennen.

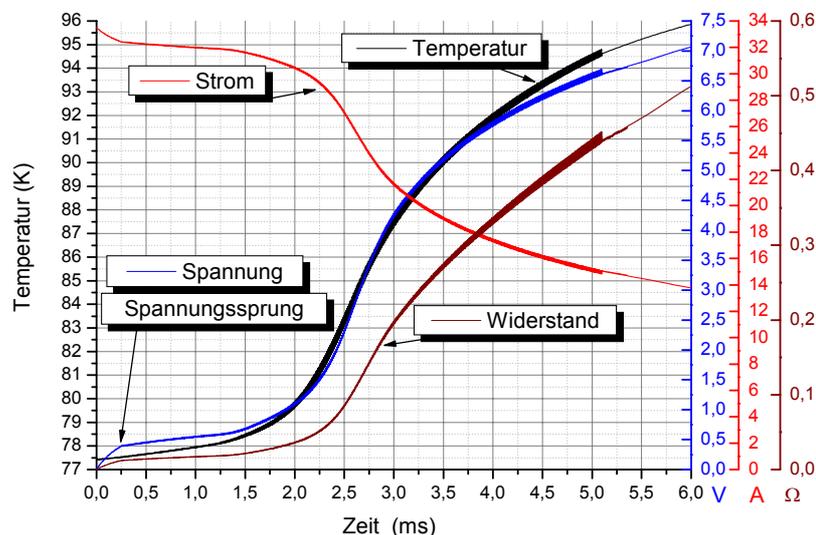


Bild 6.10: Simulation einer Typischen Messung: Aufgetragen sind die Temperatur an der wärmsten Stelle und Strom, Spannung und Widerstand am Schaltelement

Aufgetragen ist dabei auch die Temperatur an der heißesten Stelle im Film, die beim Schaltvorgang stark zunimmt. Der Widerstand des Schaltelementes ist ebenfalls eingetragen. Für diese Simulation wurde ein Schaltelement mit einer kritischen Stromdichte von $0,8 \text{ MA/cm}^2$ und einer kritische Temperatur von 88 K angenommen. Der Schaltstrom betrug dabei 35 A und der Vorstrom 34 A . Bei einem Vorstrom von 34 A konnte in der Simulation bis zu einer Zeitdauer von einer Sekunde kein passiver Schaltvorgang beobachtet werden. Auch die anfänglich steigende Temperatur pendelte sich auf einen konstanten Wert ein, so dass von einem stabilen Zustand ausgegangen werden konnte.

Wie in den einzelnen Messungen gezeigt, passen die Ergebnisse der Simulation bis auf einen kleinen Faktor gut zu den experimentellen Resultaten beim gestreckten

Schaltelement. Dadurch wird auch die zugrunde liegende Theorie für den Schaltvorgang mit HF bestätigt, die auf dem Erzeugen eines Spannungssprungs durch die HF beruht. Dieser Spannungssprung lässt sich in der Simulation auflösen, und die einzelnen gleichgerichteten Spannungsspitzen zeigen, die experimentell nur gemittelt gemessen werden können (Bild 6.11: Ausschnitt zu Beginn des Schaltvorganges). Zu sehen sind auch die daraus resultierenden Temperaturpeaks.

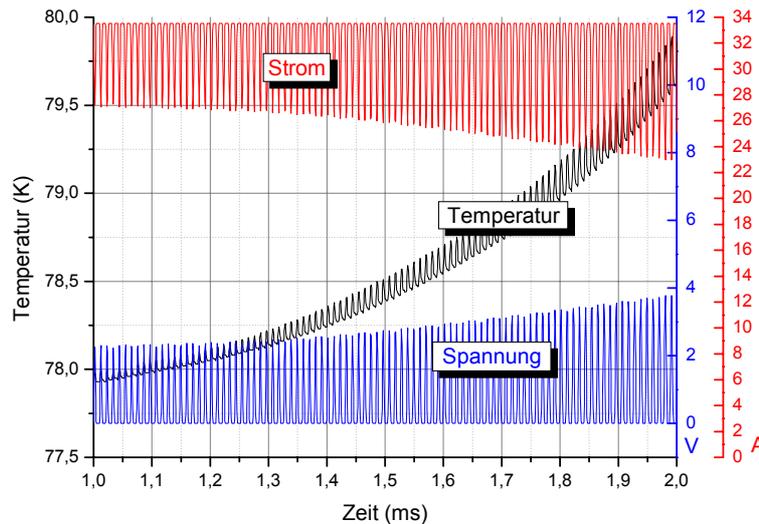


Bild 6.11: Simulation des Schaltvorgangs ohne Glättung der HF: es sind die Spannungs-, Strom- und Temperaturpeaks zu sehen die experimentell nur gemittelt gemessen werden können

Beim ringförmigen Schaltelement passen die simulierten Daten nicht so gut zu den Messwerten. Dies liegt zum einen an der zur Simulation benutzten geometrischen Auflösung. Aufgrund von sonst zu langen Rechenzeiten wurde das ringförmige Schaltelement nur in 1 mm große Pixel zerlegt. Eine Verfeinerung könnte hier eine Verbesserung erbringen.

Ein zweiter Punkt gilt für alle erhaltenen Simulationsergebnisse. Die hier gemessenen U-I-Kennlinien gehen stark in die in dieser Arbeit verwendete Abschätzung der HF-Ströme im Supraleiter ein. Für die Simulation wurden andere temperaturabhängig gemessene Kennlinien verwendet. Durch eine geringe Variation dieser Kennlinien bei verschiedenen Proben kann hier also eine Veränderung der Ergebnisse erzeugt werden. Zum anderen wird in der Simulation die Abhängigkeit des Magnetfeldes bisher nicht berücksichtigt. Vor allem bei breiteren Proben verändert sich durch die Feldüberhöhung am Rand aber die U-I-Kennlinie. Die der Simulation zur Verfügung stehenden Daten stammen von 1 mm breiten Proben. In diesem Zusammenhang ist das durch die Krümmung erhöhte Magnetfeld im Inneren des ringförmigen Schaltelementes ein weiterer Grund für die abweichenden Simulationsergebnisse.

Trotz dieser Abweichungen sind die Ergebnisse des Simulationsprogramms vor allem für das gestreckte Schaltelement schon sehr nahe am Experiment. Somit ist es gut geeignet verschiedene Schichten und Substrate in verschiedenen Formen zunächst nur am Computer auf ihre Schalteigenschaften mit und ohne HF zu untersuchen.

7 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurde ein neuartiges Hochfrequenz - getriggertes Schaltelement entwickelt und untersucht, wie es z.B. für die Entladung eines SMES gebraucht wird. Ein mit einem Vorstrom belasteter supraleitender Film wird dabei einem Hochfrequenzpuls ausgesetzt und geht dadurch in die Normalleitung über bzw. schaltet. Für die Anwendung ist hierbei ein wesentliches Ziel, Schaltelemente bei möglichst kurzer Schaltzeit mit möglichst geringer Leistung anzusteuern.

Zunächst wurde ein gestrecktes Schaltelement untersucht. Die kürzeste damit erreichte Schaltzeit (Länge des benötigten HF-Pulses, um den Supraleiter zu schalten) lag bei 39 μ s. Dafür wurde eine Hochfrequenzleistung von ca. 30 W benötigt. Im Vergleich zu thermischen Schaltern (mehrere hundert Watt) mit einem Heizfilm auf der Rückseite ist dies ein deutlich geringerer Leistungsbedarf.

Unter den elektrischen Eigenschaften dieses Schaltelementes ist besonders die Frequenzabhängigkeit zu erwähnen. Bei einem konstanten im Supraleiter induzierten HF-Strom ist die erreichte Schaltzeit des Elementes erst oberhalb einer Frequenz von 3 MHz nahezu frequenzunabhängig. Wie gezeigt werden konnte, ist dies auf die geometrische Verteilung der Ströme im Schaltelement zurückzuführen.

Neben der Frequenzabhängigkeit wurde auch die Abhängigkeit vom HF-Strom, vom Vorstrom, von der HF-Leistung und vom kritischen Strom gezeigt.

Des Weiteren wurde der Einfluss der Magnetfeldrichtung auf das Schaltverhalten untersucht. Dabei konnten durch spezielle Spulendesigns Felder in die drei Raumrichtungen erzeugt werden. Es zeigte sich, dass eine Pfannkuchenspule mit einem Magnetfeld senkrecht zur Oberfläche des Supraleiters die kürzesten Schaltzeiten ermöglichte.

Eine deutliche Verbesserung der Schaltzeiten wurde durch die genauere Betrachtung der Position der Spule erzielt. Wie in der Arbeit gezeigt ist die Hochfrequenz selektiv auf Defekte im Schaltelement. Deshalb sollte die Spule möglichst den gesamten Supraleiter überdecken und der innere Bereich des höchsten Magnetfeldes einer solchen Spule auf Defekte ausgerichtet werden. Durch diese zusätzliche Ausrichtung ließen sich die normalen Schaltzeiten von einigen 100 μ s auf unter 100 μ s verbessern.

Eine weitere wichtige Erkenntnis dieser Arbeit war die Verkleinerung des Substrates und damit dessen Wärmekapazität. Es konnte so eine deutlich schnellere Erwärmung des Schaltelementes und damit eine kürzere Schaltzeit erzielt werden. Eine Zerstörung der Schaltelemente durch zu starke Erwärmung wurde dabei nicht beobachtet.

Um den Einfluss des Spulenmaterials zu erforschen, wurden sowohl mit supraleitenden Spulen, als auch mit versilberten Kupferdrahtspulen Schaltversuche durchgeführt. Dabei zeigte sich, dass die supraleitenden Spulen keinen wesentlichen Vorteil bringen. Aus wirtschaftlichen Gründen und wegen der einfachen Handhabbarkeit sind deshalb Drahtspulen zu empfehlen.

Beim gestreckten Schaltelement wurde gezeigt, dass es eine untere Grenzfrequenz für den Schaltbetrieb gibt. Um ein Schalten auch bei niedrigeren Frequenzen zu ermöglichen, wurde erstmals ein ringförmiges Schaltelement entwickelt. Dadurch konnte die Stromverteilung im Supraleiter so beeinflusst werden, dass dieses Schaltelement auch bei Frequenzen im hundert kHz – Bereich gute Schaltzeiten erzielt. Die kürzeste bisher erreichte Schaltzeit für dieses Element betrug 2,7 ms. Dabei würde eine Optimierung der Substratgröße die Schaltzeiten deutlich verbessern.

Durch eine höhere Induktivität der Spule dieses ringförmigen Schaltelementes und dem bei kleineren Frequenzen trotzdem geringeren Wechselstromwiderstand, erreicht man bei gleicher Verstärkerleistung höhere HF-Ströme im Schaltelement. Es konnte gezeigt werden, dass sich dadurch eine schwächere Abhängigkeit von HF- und Vorstrom ergibt. Dies verbessert die Stabilität des Schaltelementes bei Schwankungen des HF- bzw. Vorstromes.

Erstmals konnten in dieser Arbeit optische und magnetooptische Untersuchungen zeigen, dass durch das Schalten mit Hochfrequenz keine gleichmäßige Erwärmung des Schaltelementes erreicht wird. Die Hochfrequenz wirkt am stärksten an Defekten im Supraleiter und das Schalten beginnt an der Stelle mit der geringsten Stromdichte j_c . Es konnten aber dennoch Proben mit kritischen Stromdichten bis zu $1,8 \text{ MA/cm}^2$ ohne Beschädigung mit HF geschaltet werden.

Ein wichtiger Teil dieser Arbeit war die Entwicklung einer Theorie des Schaltvorganges mit Auslösung durch einen Hochfrequenzpuls und deren Bestätigung durch ein Simulationsprogramm von H. Kinder.

Durch den am Supraleiter anliegenden Vorstrom und dem im Supraleiter induzierten HF-Strom entsteht an der stark nichtlinearen U-I-Charakteristik des supraleitenden Schaltelementes eine Art Gleichrichtereffekt. Daraus ergibt sich ein durch die HF erzeugter effektiver Spannungsabfall im Schaltelement. Dieses erwärmt sich dadurch und es tritt ein thermischer Schaltvorgang ein.

Durch ein Simulationsprogramm von H. Kinder mit der alle Strom und Temperaturverteilungen in Supraleiter und Substrat zeitabhängig berechnet werden können, konnte dies durch Aufprägung eines Wechselstromes auf den Vorstrom bestätigt werden. Es ließen sich die experimentell gemessenen Ergebnisse durch die Simulation vor allem für das gestreckte Schaltelement weitgehend nachbilden.

Durch die Betrachtungsweise des Schaltelementes und des Schwingkreises bzw. der Spule als Transformator wurde eine Abschätzung des im Supraleiter induzierten HF-

Stromes durchgeführt. Damit lassen sich nun alle Parameter je nach Design auf einen möglichst großen HF-Strom optimieren.

Ausblick

Die Grundlagen dieses neuartigen Schalters sind nun weitgehend erforscht und die Erprobung der Schalter in der Anwendung sollte folgen.

Als weitere Aufgabe wäre eine Aufskalierung der Schaltleistung durch die Verwendung mehrerer Schaltelemente möglich.

Insbesondere die Weiterentwicklung des neueren ringförmigen Schaltelementes wäre eine signifikante Aufgabe für die Zukunft.

Ein weiterer Punkt wäre die gezielte Einbringung von Defekten in das Schaltelement, um die Eigenschaft der Hochfrequenz auszunutzen, vor allem auf Defekte zu wirken.

Eine wichtige Aufgabe wäre auch das Einfügen der Magnetfeldabhängigkeit in die Simulation, um das ringförmige Schaltelement besser simulieren zu können.

Literaturverzeichnis

- [Buc97] W. Buckel, „Supraleitung, Grundlagen und Anwendungen“, Springer Verlag (1997)
- [Bed86] J.G. Bednorz, K.A. Müller, Z. Phys. B Condensed Matter 64, pp. 189 (1986)
- [Ber94] P. Berberich, B. Utz, W. Prusseit, H. Kinder, „Homogeneous high quality YBCO films on 3in. and 4in. substrates“, Physica C 219, pp. 419 (1994)
- [Crc97] Handbook of Chemistry and Physics 78th Edition, D.R.Lide und H.P.R. Frederikse (Hrsg.), CRC Press, Boca Raton (1997)
- [Dzu98] A. S. Dzurak et al., Phys. Rev. B, Vol. 57, No. 22, pp. 14084
- [Geh03] R. Gehring „Supraleitende Magnetische Energiespeicher“, Tagung zur Dezentralen Energiespeicherung von Eurosolar e.V. und Energieagentur NRW, April 2003, <http://www.ea-nrw.de/database/data/datainfoool/Tagung/Gehring.pdf> (2004)
- [Han04] J. Handke, „Herstellung langer ReBCO-Bandleiter mit ISD-Puffer“, Diplomarbeit, Physik Department E10, TU München (Januar 2004)
- [Hei01] A. Heinrich, „Passives und Aktives Schalten von YBCO-Filmen“, Dissertation TU München, Mensch & Buch Verlag (2001)
- [Hei99] A.Heinrich, R. Semerad, H. Kinder, H. Mosebach, M. Lindmayer, IEEE trans. on applied supercond. Vol. 9, No. 2, pp. 660 (1999)
- [Hie01] A. Hiebl, „Hochfrequenz induzierte Schalten von YBCO Dünnschichten“, Diplomarbeit, Physik Department E10, TU München (April 2001)
- [Ibt04] O. Dössel, „Lineare elektrische Netze“, Vorlesungsskript, http://www-ibt.etec.uni-karlsruhe.de/linette/skript_de.html
- [Kin99] H. Kinder, „Supraleitung und Tieftemperaturphysik“, Vorlesungsskript, <http://www1.physik.tu-muenchen.de/lehrstuehle/E10> (2004)
- [Leh01] A. Lehner, „Untersuchungen des Passiven Schaltvorgangs bei YBCO – Dünnschichten“, Diplomarbeit, Physik Department E10, TU München (Juli 2001)

-
- [Leh02] A. Lehner, A. Heinrich, K. Numssen, H. Kinder, „Probing the temperature during switching of YBCO films“, *Physica C*, Vol. 372-376, pp. 1619 (2002)
- [Pal88] T.M. Palsgtra, B. Batlog, L.F. Schneemayer, R.B. van Dover, J.V. Waszczak, *Phys. Rev. B* 38, pp. 5102 (1988)
- [Sor97] S.M. Sorley, R.P. Champion, P.J. King, *Inst. Phys. Conf. Ser. No. 158*, pp. 249 (1997)
- [Wan93] F. Wang, R. Wördenweber, *Thin Solid Films*, Vol. 227, pp. 200 (1993)
- [Wel89] U. Welp, W.K. Know, G.W. Cabtree, K.G. Vandervoort, J.Z. Liu, *Phys. Rev. Lett.* 62, pp. 1908 (1989)

Danksagung

Ich möchte an dieser Stelle allen danken die zu dieser Arbeit beigetragen haben:

Herrn Prof. Dr. Helmut Kinder für seine Idee zu dieser Arbeit und für viele interessante und oft sehr lehrreiche Gespräche in Labor und Büro. Für seinen hervorragenden Lehrstuhl E10 an dem ich für einige Zeit teilhaben und diese Arbeit durchführen durfte.

Herrn Dr. Kai Numssen und Dr. Robert Semerad für die Herstellung der Proben und auch die sonstige Unterstützung.

Herrn Dipl. Phys. Georg Sigl für einige interessante Diskussionen und die Durchsicht der Arbeit.

Von der Universität Augsburg, meinem ehemaligen Diplombetreuer Dr. Andreas Maria Heinrich für die gute Zusammenarbeit bei der Magnetooptik, für viele Gespräche, die Durchsicht der Arbeit und Herrn Dipl. Phys. Simon Che'Rose, für die großartigen magnetooptischen Aufnahmen.

Herrn Dr. Werner Weck , Herrn Dr. Anton Müller und insbesondere Herrn Dipl. Ing. Hermann Schölderle von der Firma Magnet Motor für die fruchtbare Zusammenarbeit innerhalb des gemeinsamen Forschungsprojektes.

Herrn Thomas Rapp, Herrn Thomas Neukel und Herrn Dipl. Ing. Hagen für die Hilfeleistung bei allen elektrotechnischen Problemen.

Allen Mitarbeitern in der Werkstatt für die gute Zusammenarbeit.

Frau Roswitha Hoppen, der ich durch einige Dienstreisen und meinen zahllosen Werkstudenten einigen Verwaltungsaufwand brachte, den sie mit Bravur meisterte.

Meinen vielen Werkstudenten die mich bei den zahllosen Messungen unterstützten.

Allen Angehörigen von E10 für das hervorragende Arbeitsklima und die gegenseitige Hilfsbereitschaft.

Zu guter Letzt meinen Eltern, die mir durch ihre Unterstützung ein „sorgenfreies“ Studium ermöglichten.