

Spannungsversorgung für den Spurdetektor des P2-Experiments

von

Johannes Hoffmann

Bachelorarbeit in Physik
vorgelegt dem Fachbereich Physik, Mathematik und Informatik (FB 08)
der Johannes Gutenberg-Universität Mainz

am 14. Januar 2022

1. Gutachter: Prof. Dr. Niklaus Berger
2. Gutachter: Prof. Dr. Michael Wurm

Ich versichere, dass ich die Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt sowie Zitate kenntlich gemacht habe.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'J. Hoffmann', with a stylized flourish extending to the right.

Mainz, den 14. Januar 2022

Johannes Hoffmann
AG Berger
PRISMA
Institut für Kernphysik (KPH)
Staudingerweg 9
Johannes Gutenberg-Universität
D-55099 Mainz
jhoffman@students.uni-mainz.de

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	5
2	Vermessung von Kabeln	8
2.1	Kabelmaße und deren spezifische Eigenschaften	8
2.2	Netzgeräte	9
2.3	Lasten	10
2.4	Messinstrumente	10
2.5	Remote Sensing	10
2.6	Impedanz von Kabeln und Induktivitäten	11
2.6.1	Charakteristische Impedanz und Folgen von Induktivität	11
2.6.2	Induktivität planparalleler Leiter	12
3	Kabelprototypen und sukzessive Verringerung der Induktivität	14
3.1	Kabeldemonstrator Generation 1	14
3.2	Kabeldemonstratoren Generation 2	16
3.3	Kabeldemonstrator Generation 3	20
3.3.1	Netzgeräte-Vergleich: HMP 4040 gegen TDK-Lambda	24
3.3.2	Auffälligkeiten beim Ausschalten der elektronischen Last	25
3.3.3	Remote-Sensing-Kabel: Twisted Pair gegen Koaxialkabel	26
3.4	Sukzessive Verringerung der Induktivität	27
4	Zusammenfassung und Ausblick	28
5	Anhang	30
5.1	AWG-Tabelle: Kabeleigenschaften	30
5.2	Pearson'scher Korrelationskoeffizient	32
5.3	Ausschaltvorgänge der beiden Netzgeräte	32
5.4	Schema und Schaltplan der Platine für Demonstrator 3	34
6	Literaturverzeichnis	36
7	Abbildungsverzeichnis	37
8	Danksagung	38

Abstract

Die vorliegende Bachelorarbeit wurde mit dem Ziel verfasst, eine Spannungsversorgung des Spurdetektors beim P2-Experiment in Mainz vorzubereiten und wichtige Charakteristiken dieser Versorgung zu erfassen. Dabei wurde in einem Test-Aufbau über eine Strecke von 100 Feet - was circa 30,5 Metern entspricht - mit mehreren Kabeldemonstratoren untersucht, ob eine Versorgung mit konstanter Gleichspannung von 2 Volt bei hohen Strömen über weite Strecken zu verwirklichen ist.

Während beim ersten Kabeldemonstrator Spannungsspitzen von bis zu 22 Volt gemessen wurden, erreichte der finale Demonstrationsaufbau dieser Arbeit hinreichend gute Ergebnisse, um Spannungsspitzen zu verhindern sowie Ein- und Ausschaltvorgänge kontrollierbar machen zu können.

1 Einführung

Das im Laufe des 20. Jahrhunderts entwickelte Standardmodell der Teilchenphysik (siehe Abb. 1.1) erwies sich als überaus erfolgreich, indem theoretische Erwartungen und experimentelle Befunde miteinander in Einklang gebracht werden konnten. Dabei ist es gelungen, die elektromagnetische und schwache Wechselwirkung in einer Theorie der elektroschwachen Wechselwirkung zusammenzuführen. Eine grundlegende Rolle in der Beschreibung der elektroschwachen Wechselwirkung nimmt der Mischungswinkel θ_W ein. Der auch Weinberg-Winkel [1] genannte Parameter stellt ein Verhältnis der Stärken von elektromagnetischer und schwacher Wechselwirkung sowie über $\cos(\theta_W) = \frac{m_W}{m_Z}$ eine Relation für die Massenverhältnisse der die schwache Wechselwirkung vermittelnden Eichbosonen, W- und Z-Boson, her.

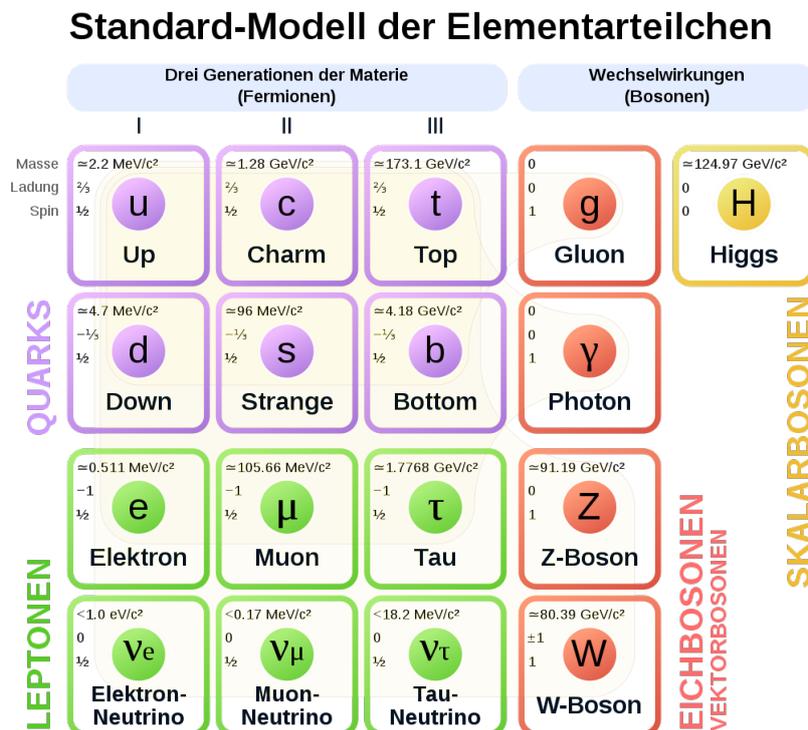


Abbildung 1.1: Teilchen im Standardmodell der Teilchenphysik [2].

1 Einführung

Ziel des P2-Experiments ist es, den Mischungswinkel der elektroschwachen Wechselwirkung mit bisher unerreichter relativer Genauigkeit von 0,0013 - also 0,13% - zu vermessen. Bei geringen Impulsübergängen in Elektron-Proton-Streuung soll dies eine der ersten Anwendungen des geplanten Mainzer Teilchenbeschleunigers MESA (**M**ainz **E**nergy **R**ecovery **S**uperconducting **A**ccelerator) werden.

Das P2-Experiment zielt darauf ab, $\sin^2(\theta_W)$ zu bestimmen, indem die paritätsverletzende Asymmetrie A_{PV} in Elektron-Proton-Streuung vermessen wird. Diese Asymmetrie resultiert aus den unterschiedlichen Wirkungsquerschnitten links- und rechtshändiger Elektronen σ_L bzw. σ_R und wird von der schwachen Ladung des Protons Q_W bestimmt:

$$A_{PV} = \frac{\sigma_L - \sigma_R}{\sigma_L + \sigma_R} = \frac{G_F \cdot Q^2}{4 \cdot \sqrt{2} \cdot \pi \cdot \alpha \cdot (Q_W + F(Q^2))}, \quad (1.1)$$

wobei α die Sommerfeld'sche Feinstrukturkonstante, G_F die Fermi-Konstante und Q^2 der Viererimpulsübertrag ist. Dem Fakt Rechnung tragend, dass das Proton kein Punktteilchen ist, werden daraus resultierende Korrekturen im Formfaktor $F(Q^2)$ zusammengefasst. Da $F(Q^2)$ für kleine Q^2 ebenfalls klein wird, wird das P2-Experiment bei kleinen Impulsüberträgen durchgeführt.

Die Elektronen, die in Quarzglas Cherenkov-Licht erzeugen, werden per Photomultiplier Tube (PMT) nachgewiesen, wobei deren Messstrom über eine Helizitäts-Periode integriert wird. Um den gemittelten Impulsübertrag $\langle Q^2 \rangle$ der gestreuten Elektronen zu bestimmen, wird ein Spurdetektor (siehe Abb. 1.2) verwendet. Der niedrige Impuls der Elektronen, der Coulomb-Streuung zur größten Ungenauigkeit bei der Impuls-Messung werden lässt, verlangt nach sehr dünnem Detektor-Material. Aus diesem Grund werden **High-Voltage Monolithic Active Pixel Sensors** (HV-MAPS) verwendet. An diese monolithischen Pixelsensoren werden von außen Spannungen um die 90 Volt angelegt, was in der sehr dünnen Verarmungszone eine sehr schnelle Ladungssammlung möglich macht [3]. Für diesen Spurdetektor wird die Niederspannungsversorgung als Thema der Arbeit vorgestellt.

1 Einführung

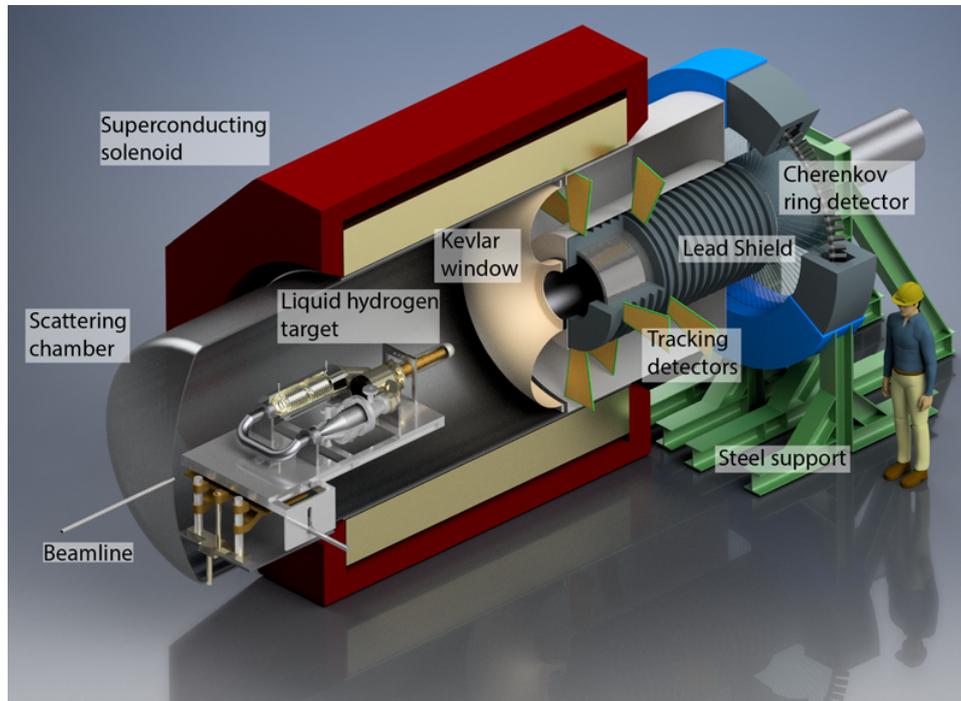


Abbildung 1.2: Schematische Darstellung des P2-Experiments [4].

Die 4320 HV-MAPS, die im P2-Tracker benutzt werden sollen, benötigen unter anderem eine 2V-Niederspannungsversorgung bei einer Leistung von mehr als 4 kW, was grundsätzliche Probleme für die Versorgung mit entsprechender Leistung birgt. Durch die hohen Ströme müssen nicht nur geeignete Kabel verwendet, sondern auch dadurch bedingte Effekte wie die Temperaturentwicklung im Auge behalten werden, weshalb für den Spurdetektor eine Kühlung mit gasförmigem Helium entwickelt wurde [5]. Für den P2-Tracker ist geplant, kommerziell verfügbare Gleichspannungs-Netzgeräte (DC Power Supplies) zu verwenden, diese an einem vor Strahlung geschützten Ort (Counting Room) zu platzieren und den Spurdetektor über hinreichend lange Kabel (30 - 50 m; Anhaltsgröße in der Größenordnung von 100 ft) zu versorgen. Dabei soll die über die Kabel abfallende Spannung über sog. Remote Sensing (ausführliche Erläuterung in Kapitel 2.5) kompensiert werden. Es wurde sich dagegen entschieden, DC/DC-Konverter direkt am Detektor zu nutzen, insbesondere um dem Problem des nur begrenzt zu Verfügung stehenden Platzes Rechnung zu tragen, ein gewisses Materialbudget einzuhalten und somit auch ungewollte Störungen wie Streuungen am Spurdetektor zu limitieren. Zudem wären DC/DC-Wandler für eine zusätzliche Wärmeentwicklung verantwortlich, was das Problem der Kühlung deutlich erweitern würde.

Nachfolgend wird nun zunächst auf den ersten Kabeldemonstrator eingegangen. Danach wird der optimierte Versuchsaufbau mit den verschiedenen weiteren Demonstratoren detaillierter beschrieben.

2 Vermessung von Kabeln

2.1 Kabelmaße und deren spezifische Eigenschaften

Aufgrund der speziellen Anforderungen und der Verfügbarkeit bei diversen Händlern wurden im Rahmen dieser Arbeit nicht nur metrische, sondern auch Kabel nach dem AWG-Standard verwendet. Tabelle 2.1 zeigt eine Übersicht der Kabelbezeichnungen und physikalischen Eigenschaften. Für die hier vorliegende Arbeit wurden insbesondere Kabel der Größen AWG 2 und AWG 18 verwendet.

Da, wie eingangs erwähnt, der Detektor etwa 50 Meter vom Counting Room entfernt sein soll, wurden - wenn nicht anders erwähnt - Kabeldemonstratoren mit einer Länge von ca. 30 m (100 ft) untersucht. Dabei ist grundsätzlich zunächst einmal zu bemerken, dass - analog z.B. zur Normung von Papier mit DIN-A-Formaten - ein Kabel desto dicker ist, je kleiner seine AWG-Zahl. Da man allgemein von runden Leitern ausgeht, korrespondieren Querschnittsflächen und Durchmesser miteinander und weil der spezifische Widerstand pro Länge nur von der Querschnittsfläche und damit vom Durchmesser abhängt, lässt sich jeder AWG-Größe ein Widerstandswert zuordnen.

AWG-Nummer	Querschnitt [mm ²]	Außen-Durchmesser [mm]	spez. Widerst. [mΩ/m]
AWG 1/0	53,116 - 54,750	9,347	0,31 - 0,32
AWG 1	41,397 - 43,187	8,331	0,40 - 0,42
AWG 2	33,201 - 34,416	7,417	0,50 - 0,52
AWG 10	4,740 - 5,317	2,590 - 2,946	3,2 - 3,6
AWG 16	1,229 - 1,440	1,290 - 1,524	12,0 - 14,0
AWG 18	0,811 - 0,963	1,020 - 1,245	17,9 - 21,8
AWG 20	0,507 - 0,615	0,813 - 0,965	28,3 - 34,6

Tabelle 2.1: Kabelparameter gemäß amerikanischer AWG-Tabelle [6].

In der Feinunterscheidung allerdings variieren die Kabelparameter gleicher AWG-Nummern trotzdem (deshalb auch die angegebenen Intervalle in Tabelle 2.1), so lassen sich verschiedene Größen durch unterschiedliche Kombinationen von Leitern realisieren (Litzendraht), die zu leicht unterschiedlichen Charakteristika führen. Eine detaillierte Übersicht mit mehreren Untergruppen einer AWG-Klasse findet sich im Anhang in Abschnitt 5.1.

2 Vermessung von Kabeln

Ein Kabel wie in der vorliegenden Anwendung lässt sich im Ersatzschaltbild als LCR-Komposition (Abb. 2.1) darstellen. Die Spannungsversorgung wird durch das *Power Supply* - oben bereits erwähntes Netzgerät - gewährleistet, als Verbraucher dienen ohmsche und elektronische *Lasten*. Im Folgenden sollen diese verwendeten Geräte vorgestellt und deren verschiedene Wirkungsweisen skizziert werden.

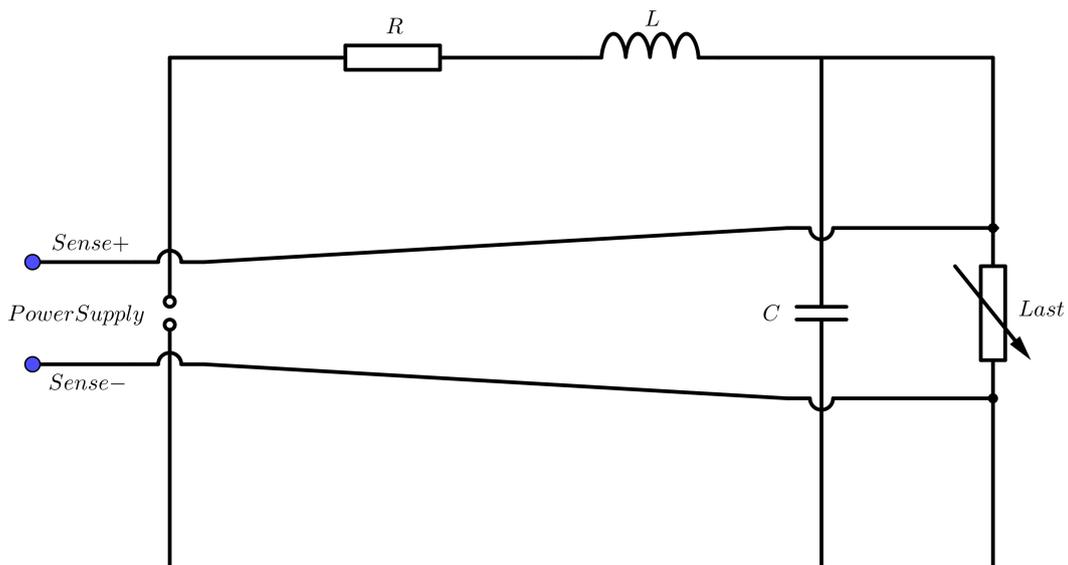


Abbildung 2.1: Vereinfachtes Ersatzschaltbild eines Kabels mit Spannungsversorgung, Remote-Sense-Anschlüssen und Last.

2.2 Netzgeräte

Für die Spannungsversorgung wurde sowohl ein HMP4040 von Rohde&Schwarz¹ als auch ein GH 30-50 von TDK-Lambda² verwendet, die beide Remote Sensing unterstützen (siehe dazu Abschnitt 2.5). Mit den Netzgeräten lassen sich die eingespeisten Spannungen sowie Maximalströme einstellen; werden diese Maximalströme überschritten, unterbricht das Netzgerät die Spannungsversorgung.

¹Rohde&Schwarz HMP 4040, Datenblatt: https://www.batronix.com/pdf/Rohde-Schwarz/HMP/HMP_Datasheet_DE.pdf

²TDK-Lambda GH 30-50, Datenblatt: https://product.tdk.com/system/files/dam/doc/product/power/switching-power/prg-power/catalog/genesys-plus-half_e.pdf

2.3 Lasten

Grundsätzlich dient die Verwendung einer Last dazu, einen Verbraucher zu simulieren. Hier wird zwischen elektronischen und ohmschen Lasten unterschieden. Während eine ohmsche Last einfach einen Widerstand darstellt, gibt es für elektronische Lasten differenziertere Möglichkeiten: In verschiedenen Modi lassen sich entweder festgelegte Stromstärken oder Widerstände verwirklichen. Als elektronische und damit leicht verstellbare Last wurde allein das Modell Statron-3229³ verwendet. Ohmsche Widerstände habe ich in einfachster Ausfertigung selbst "produziert", indem einfache 1Ω -Widerstände aneinander gelötet wurden. Später wurde dann auf verstellbare, kommerziell erhältliche ohmsche Widerstände mit Maximalwiderstand 10Ω der Spezifikation VRH320 von Arcol⁴ umgestiegen.

2.4 Messinstrumente

Für Strom- und Spannungsmessungen sowie Durchgangsprüfungen an unterschiedlichsten Bauteilen wurde das Hand-Multimeter UT-161 von UNI-T⁵ verwendet. Für schnelle Widerstands-, Kapazitäts- und Induktivitätsmessungen oder deren Abschätzungen habe ich das LCR-Meter BK Precision 880⁶ benutzt.

2.5 Remote Sensing

Beim sog. Remote Sensing geht es darum, die über die Kabel abfallende Spannung zu kompensieren. Dafür wird über eine separate Messleitung an der jeweiligen Last eine Spannungsmessung vorgenommen (vgl. dazu Abb. 2.1). Anstatt auf die Spannung zu regeln, die am Ausgang des Labornetzteils anliegt, wird beim Remote Sensing die Spannung eben direkt am Verbraucher ermittelt. Basierend auf dieser Messung kann das Power Supply seine Ausgangsspannung erhöhen, um die Kabelverluste auszugleichen. Die dafür eingesetzte Regelschleife des Netzgeräts kann insbesondere durch zu große parasitäre Effekte (siehe auch Abschnitt 2.6) empfindlich gestört werden.

³Statron-3229, Datenblatt: <http://www.statron.de/wp-content/uploads/datenblaetter/N1-1.pdf>

⁴Arcol VRH320, Datenblatt: <https://docs.rs-online.com/7eaa/0900766b8135ac5e.pdf>

⁵Digital-Multimeter UNI-T UT161, Datenblatt: <https://www.batronix.com/files/Uni-Trend/UT161/UT161.pdf>

⁶Handheld-PCR-Meter BK Precision, Datenblatt: https://www.mouser.de/datasheet/2/43/880_datasheet-947331.pdf

2.6 Impedanz von Kabeln und Induktivitäten

2.6.1 Charakteristische Impedanz und Folgen von Induktivität

Als ein Parameter für Kabel lässt sich die *charakteristische Impedanz* Z_0 definieren:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}}. \quad (2.1)$$

Je größer diese Kennzahl, desto stärker hat das Power Supply potentiell mit einer konstanten Spannungsversorgung zu kämpfen. Man stelle sich hierfür im Extremfall eine unendlich große Induktivität L vor. Daraus ergibt sich gemäß dem Induktionsgesetz $U_{ind} = -L \cdot \frac{dI}{dt}$ eine dazu proportionale (Induktions-)Spannung (unter der Annahme, dass kleine Stromfluktuationen δI immer vorliegen und unvermeidlich sind). In diesem Fall folgt augenscheinlich sofort, dass eine Regelung durch das jeweilige Power Supply nicht mehr möglich ist.

Geht man mehr ins Detail, so ist es nötig, die vorherige Parametrisierung eines Kabels mittels einer LCR-Komposition (gemäß Abb. 2.1) teilweise derart zu ersetzen bzw. zu ergänzen, dass Welleneigenschaften berücksichtigt werden müssen, was ab einer Kabellänge relevant wird, die ein Viertel der Wellenlänge vom übertragenen Signal deutlich überschreitet ($l \gg \frac{\lambda}{4}$), da für diese kritische Länge zum ersten Mal eine stehende Welle im Leiter auftreten kann.

Weil man für Kupfer und andere Metalle eine Lichtgeschwindigkeit von grob 70% der Vakuumlichtgeschwindigkeit annehmen darf, lässt sich damit eine Abschätzung angeben, ab welcher Frequenz die Betrachtung der Welleneigenschaft erforderlich ist:

$$f_{grenz} = \frac{c}{\lambda} = \frac{c}{4 \cdot l} \approx \frac{0.7 \cdot c_0}{4 \cdot 30 \text{ m}} \approx 1.7 \text{ MHz}. \quad (2.2)$$

Da auch darunter schon Effekte auftreten, setzt man als sichere Grenze 10% dieses Werts an. Somit ist es geboten, ab 170 kHz bereits Welleneigenschaften bei Berechnungen zu den Kabeln mit in Betracht zu ziehen.

Aus interner Korrespondenz mit der Firma Rohde&Schwarz geht hervor, dass für eine optimale Leistungsübertragung die Impedanz der Quelle (also im hier beschriebenen Aufbau folglich das Netzgerät) der Impedanz des Kabels entsprechen soll und unsere verwendeten Power Supplies dabei Impedanzen in der Größenordnung von einigen Hundert $\text{m}\Omega$ bis etwa 10Ω aufweisen. Wie man in Abb. 2.2 am blauen Graph für einen geschlossenen Loop sieht, verhält sich die Impedanz im Grenzfall kleiner Frequenzen konstant (wie ein Ohmscher Widerstand R), steigt dann mit der Frequenz (gemäß dem Term $i\omega L$ bzw. seinem Betrag für das Verhalten wie eine Induktivität) linear an und kommt schließlich auf ein weiteres Plateau, wenn die begrenzte Bandbreite des Feedback-Verstärkers erreicht ist. Dort wird der Regler zu langsam, die Closed-Loop-Impedanz konvergiert gegen die Open-Loop-Impedanz (ohne Regler).

Da es für die hier vorliegenden Kabel praktisch unmöglich ist, das angegebene Impedanzintervall für das Power Supply zu unterschreiten, setzt man sich als Ziel, die

2 Vermessung von Kabeln

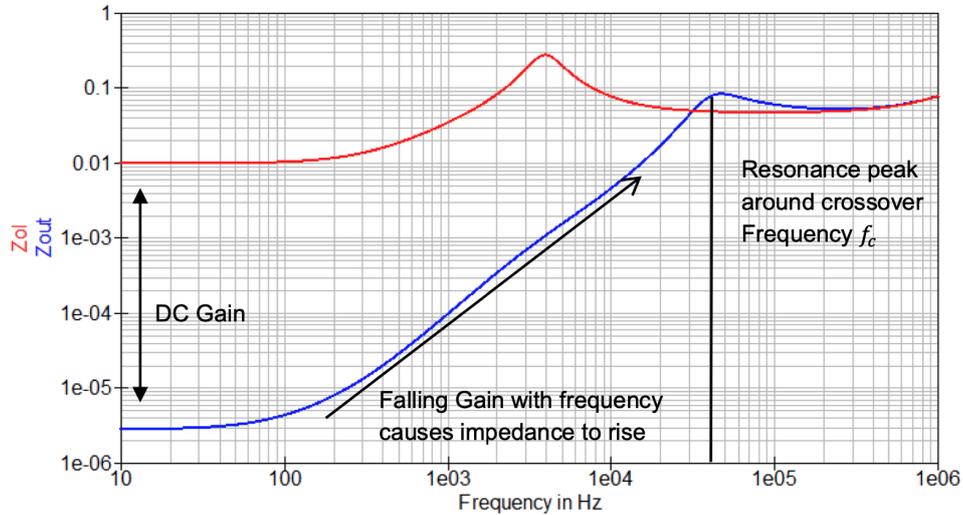


Abbildung 2.2: Impedanzverhalten in Abhängigkeit von der Frequenz, wobei unser Fall durch die blaue Linie repräsentiert wird (geschlossener Loop) [7].

bereits eingeführte charakteristische Impedanz des Kabels Z_0 so weit wie möglich zu senken.

Eine zweite Motivation für die Minimierung der Impedanz und dadurch der Induktivität liegt in der Reaktion des Reglers auf die Last, die ja in der hier beschriebenen Anwendung die HV-MAPS sind. Wird z.B. der Detektor ausgelesen, benötigt die Front-End-Elektronik plötzlich mehr Strom, was der Regler zu kompensieren versucht, indem sofort mehr Strom ins System eingespeist wird. Die Induktivität bremst die Durchleitung des Stroms, während per Remote-Sensing an den HV-MAPS weiterhin eine zu niedrige Spannung gemessen, die Versorgungsspannung durch den Regler damit überkompensiert und dadurch kurzzeitig instabil wird.

2.6.2 Induktivität planparalleler Leiter

Die Induktivität einer planparallelen Doppelleitung [8] zweier runder Kabel lässt sich über

$$L = \frac{\mu_0 \cdot l}{\pi} \cdot \left[\frac{1}{2} + \ln \left(\frac{d - R}{R} \right) \right] \quad (2.3)$$

beschreiben, wobei l die Länge der Doppelleitung, R der Radius eines solchen konzentrischen Kabels und d der Abstand zwischen beiden Leiternmittelpunkten ist. Dabei nimmt die Induktivität für geringere Abstände d zwischen Kabeln abwechselnder Polarität (also bei uns zwischen +2V und Ground (GND)) proportional zu $\ln(d)$ ab.

Im Folgenden soll das Hauptaugenmerk auf genau diesem dominierenden Effekt der Induktivitäten liegen. Ziel ist es, durch mehrere Generationen von Kabeldemonstratoren die Induktivität schrittweise immer weiter zu reduzieren und es damit den Netzge-

2 Vermessung von Kabeln

räten möglich zu machen, auch inkl. Remote Sensing eine konstante Spannungsversorgung von 2 Volt zu gewährleisten. Dabei wird auch der durch Gleichung 2.3 plausibel erscheinende Schritt gegangen, Kabel möglichst nahe aneinander zu legen.

3 Kabelprototypen und sukzessive Verringerung der Induktivität

3.1 Kabeldemonstrator Generation 1

Beim ersten Versuchsaufbau wurde über das HMP4040 die Spannungsversorgung sichergestellt und die Statron-3229 als Verbraucher verwendet. Als Kabel wurden zwei AWG-2-Kabel¹ mit einer Länge von 30 Metern benutzt. Da in der späteren Anwendung an den HV-Maps des Detektors möglichst genau 2 Volt anliegen sollen, wurde mit Remote Sensing gearbeitet. Für die Realisierung dieses Remote Sensing wurden zwei Laborkabel (Pomona B-36) verwendet, die allerdings ca. 30 cm lang sind und damit in keiner Weise die finale Anwendung widerspiegeln.

Zunächst wurde eine als Überprüfung des Aufbaus gedachte Strom-Spannungskennlinie aufgenommen. Hierbei (siehe Abb. 3.1) zeigte sich allerdings, dass für Ströme unterhalb von 5 Ampere kein streng linearer Zusammenhang für den Spannungsabfall - wie nach dem Ohmschen Gesetz $U = R \cdot I$ eigentlich zu erwarten - beobachtet werden konnte, sondern ein S-förmiger Verlauf.

¹Alpha Wire 460219

3 Kabelprototypen und sukzessive Verringerung der Induktivität

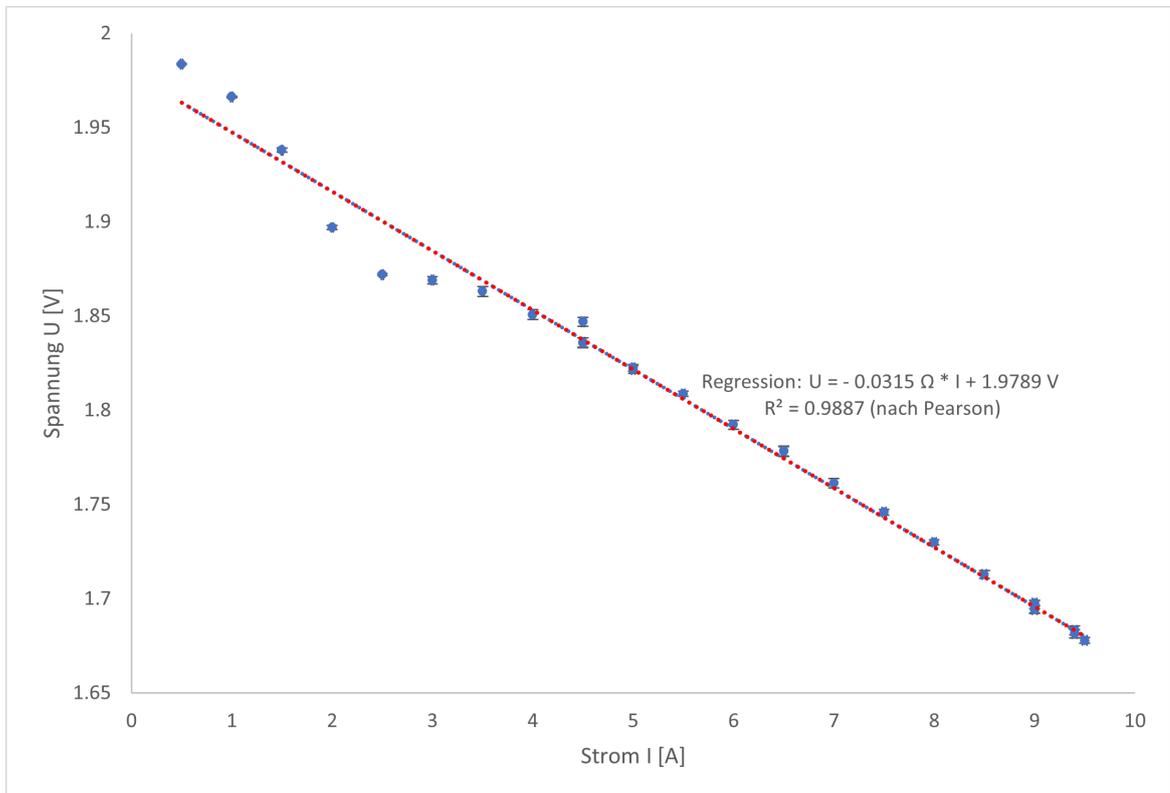


Abbildung 3.1: Strom-Spannungs-Kennlinie für Kabeldemonstrator 1.

Per Regression ermittelt man einen Widerstand von $31,5 \text{ m}\Omega$, den Kabel-Eigenschaften nach erwartet man genau dies. Es scheint also demzufolge so, dass die zu den Werten sehr gut passende Regression² ab etwa $4,5 \text{ Ampere}$ physikalische Konsistenz besitzt, das Verhalten davor ist durch das Ohmsche Gesetz aber nicht zu erklären.

Durch Wiederholung der Messung konnte die entsprechende Strom-Spannungs-Kennlinie reproduziert werden. Es ist zudem überprüft worden, dass hier kein Temperatureffekt vorliegt, indem die Ströme in beide Richtungen verändert wurden, d.h. es wurden Messreihen mit aufsteigenden und absteigenden Stromstärken durchgeführt, wobei beim Start von 10 A abwärts der Versuchsaufbau bereits hinreichend lange vor der Messung angeschaltet war, um eine gewisse Erwärmung zu erreichen.

Da die zwei jeweils 30 Meter langen Kabel auf Holzspulen eng gewickelt waren, wurden diese für die nächste Messung ausgerollt, um mögliche Kapazitäts- und Induktivitätseffekte auszuschließen. Allerdings konnte der Effekt auch nach Abrollen der Kabel reproduziert werden. Weitergehend wurden an der Last auch die Spannungsspitzen per Oszilloskop untersucht.

²Details zum Pearson'schen Korrelationskoeffizienten im Anhang, Teil 5.2.

3 Kabelprototypen und sukzessive Verringerung der Induktivität

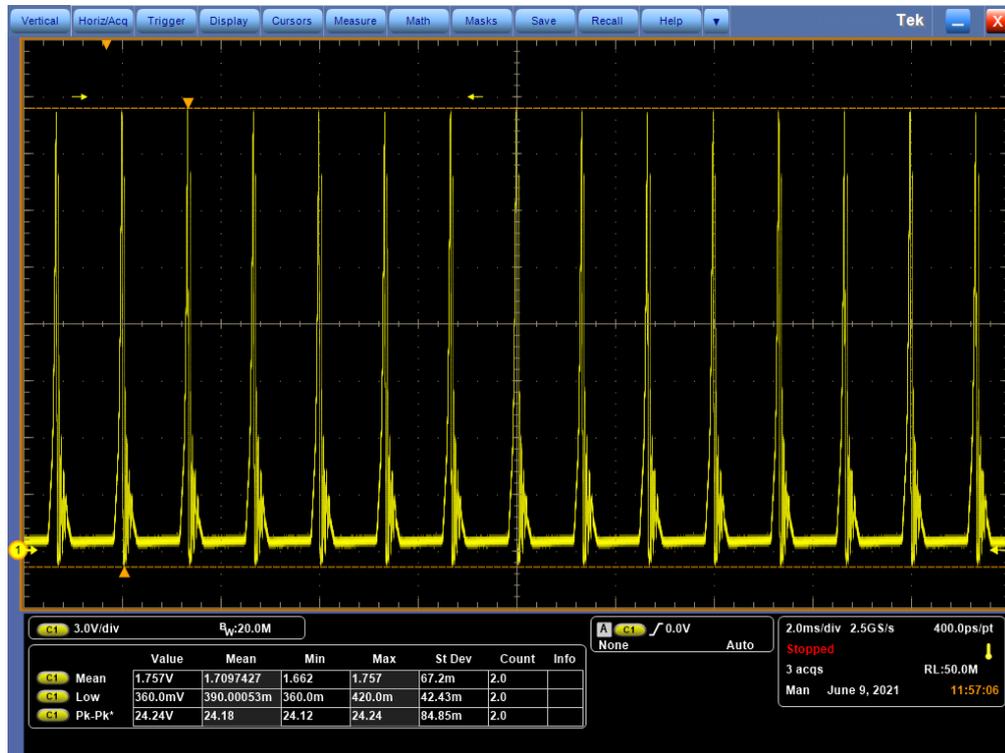


Abbildung 3.2: Spannungsspitzen bei Gleichspannung von 2 Volt mit Kabeldemonstrator 1.

Hierbei (Abbildung 3.2) konnten Spitzen von bis zu über 22 Volt aufgezeichnet werden, also einem Faktor 11 gegenüber der angestrebten 2-Volt-Gleichspannung.

Da der bisherige Aufbau sich somit für die angestrebte Anwendung als unzureichend erwiesen hatte, wurde dieser Versuchsaufbau verworfen. Es wurde derart nach einer Optimierung gesucht, dass die *charakteristische Impedanz* des Systems $Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}}$ - und hierfür zunächst einmal die dominierende Induktivität L - deutlich verringert werden müsse, um auftretende Spannungsspitzen stark abzumildern und eine reguläre Versorgung der HV-MAPS später überhaupt erst möglich zu machen.

3.2 Kabeldemonstratoren Generation 2

Ein erster Lösungsansatz lag darin, nicht auf volladriges, dicke Kupferkabel zu setzen, sondern einen Leiter zu konfektionieren, der aus vielen Litzen besteht, wobei diese einzelnen benachbarten Leiter möglichst so nebeneinander angeordnet werden, dass sie sich in ihrer Polarität abwechseln, um die Induktivitäten zu minimieren. Nehmen wir modellhaft die einzelnen Litzen nämlich als parallele gerade Leiter an, so erzeugt jede einzelne Litze ein konzentrisches Magnetfeld. Sind die Litzen eines Kabels alle mit der

3 Kabelprototypen und sukzessive Verringerung der Induktivität



Abbildung 3.3: Demonstrator 2a.



Abbildung 3.4: hier im Detail.

gleichen Polung versehen, so addieren sich deren Magnetfelder auf und die Regelung des Power Supplies ist mit der resultierenden Induktivität überfordert. Wechselt man die Polarisation zweier benachbarter Leiter dagegen ab, heben sich die Magnetfelder zwischen den Leitern auf und reduzieren die Induktivität des Kabels. Vorbild hierfür war in Ansätzen das vom CERN entwickelte Low Impedance Cable (LIC, [9]).

Basierend auf dieser Vermutung wurden im Rahmen dieser Arbeit zwei Kabeldemonstratoren mit 40 (nachfolgend auch Kabeldemonstrator 2a genannt) und dann noch einmal mit 52 Litzen (Kabeldemonstrator 2b) gefertigt (siehe Abbildungen 3.3 und 3.4), wodurch eine deutliche Reduzierung der Induktivität erreicht werden konnte. Im Detail wurden hier jeweils ca. 2 Meter lange Litzen mit 1 mm^2 Querschnitt zugeschnitten, in einer konzentrisch angeordneten Schablone eingesetzt und dabei alle 25 cm um eine Umdrehung miteinander verdreht, wobei darauf geachtet wurde, dass beim Einsetzen der Litzen in die Schablone bestmöglich die Polaritäten abwechselten, um parasitäre Effekte abzumildern.

Da ich hier aber weiterhin - wenn auch erniedrigte - Spannungsspitzen beobachten konnte, stand ich nun vor einer Weggabelung: Entweder man entscheidet sich dafür, das selbst gebaute Kabel in entsprechender Längenskalierung professionell fertigen zu lassen (und es dadurch besser zu machen) oder aber man intensiviert noch einmal seine Arbeit am Setup, um dort vielleicht einen intrinsischen Parameter zu lokalisieren, der die Störungen verursacht. Um diesen letzteren Aspekt genauer zu beleuchten, wurde der Versuchsaufbau dahingehend geändert, dass die Kabel durch 'reine' Induktivitäten von Würth Electronics³ ersetzt wurden.

Zusätzlich zu dieser Änderung wurde die elektronische Last durch zwei in Serie gelötete 1Ω -Widerstände ersetzt. Dies sollte sich in der Retrospektive als Meilenstein erweisen. Die elektronische Last war insbesondere in Kombination mit der Verwendung des Remote Sensing offenkundig nicht in der Lage, Leistung in einer wohldefinierten Art zu ziehen, so dass eine konstante Versorgung mit 2 Volt unmöglich wurde.

In den Abb. 3.5 und 3.6 sieht man beispielhaft für eine $100\mu\text{H}$ -Induktivität den Vergleich der Spannungsverläufe mit einer elektronischen und einer ohmschen Last. Die

³<https://www.we-online.com/catalog/en/WE-TIS>

3 Kabelprototypen und sukzessive Verringerung der Induktivität



Abbildung 3.5: Spannungsspitzen einer reinen 100 μ H-Induktivität mit elektronischer Last bei 1A.

Abbildung 3.6: Spannungsversorgung bei einer reinen 100 μ H-Induktivität mit ohmscher Last (1A).

verwendete Stromstärke war 1 Ampere, da dies laut dem Hersteller Würth die maximale Stromstärke für jene Induktivität ist. Während ich per Oszilloskop einen Spitze-Tal-Wert (Peak to Peak, V_{pp}) bei der elektronischen Statron-Last von $V_{pp} = 8,8V$ ausmesse, findet man für die ohmsche Last ein augenscheinlich viel konstanteres und damit vom Spannungsgerät regelbares Verhalten mit $V_{pp} = 80mV$ vor.

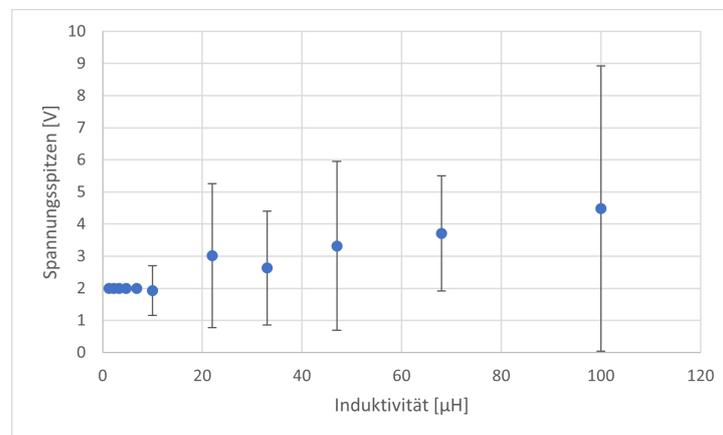


Abbildung 3.7: Spannungsspitzen bei verschiedenen Induktivitäten.

Für 11 verschiedene Würth-Induktivitäten wurden bei angelegter Nennspannung von 2 Volt Spannungsspitzen analog zu Abb. 3.5 aufgenommen. Wie sich das Auftreten von Spannungsspitzen in Abhängigkeit von der verwendeten Induktivität verhält, ist in Abb. 3.7 dargestellt. Dabei symbolisieren die Punkte den Mittelwert der aufgezeichneten Spannung, während die Balken bis zu den minimalen und maximalen Spannungsspitzen für die jeweilige Induktivität gehen. Auffällig ist zum einen der quasi

3 Kabelprototypen und sukzessive Verringerung der Induktivität

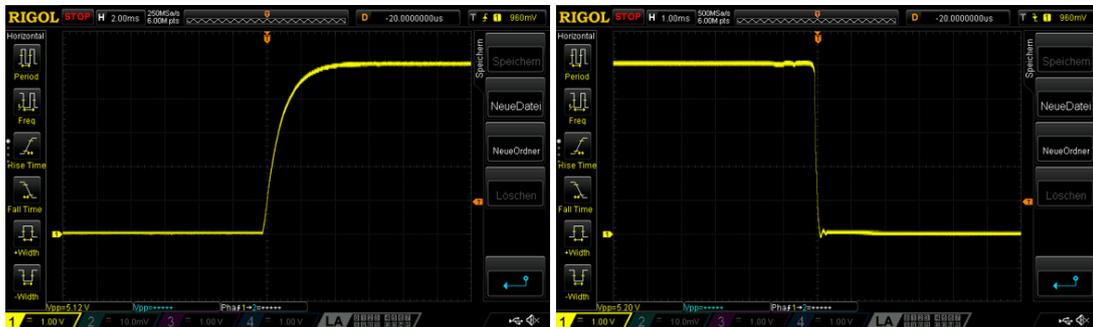


Abbildung 3.8: Einschaltvorgang einer reinen $100\mu\text{H}$ -Induktivität mit ohmscher Last.

Abbildung 3.9: Ausschaltvorgang einer reinen $100\mu\text{H}$ -Induktivität mit ohmscher Last.

nicht vorhandene Ausschlag bei Induktivitäten bis einschließlich $6,8\ \mu\text{H}$, während die nächst-größere verfügbare Induktivität von $10\ \mu\text{H}$ zum ersten Mal Spannungsspitzen aufweist, die sich in der Tendenz mit wachsendem L auch verstärken. Zum anderen soll nicht unerwähnt bleiben, dass die Mittelwerte anfänglich erwartungsgemäß dicht um die Nennspannung streuen, mit zunehmender Induktivität aber anwachsen.

Mit diesem Wissen konnte ich nun insofern weiterarbeiten, dass unter bestimmten Voraussetzungen die Spannungsgeber (Power Supplies) in der Lage sind, das Spannungssignal inkl. Remote Sensing auf konstant 2 Volt zu regeln; vor allem die elektronische Last wird durch die Induktivität aber stark beeinflusst, weshalb im Folgenden mit der ohmschen Last weitergearbeitet wird.

Um dieses deutlich bessere Funktionieren mit der ohmschen Last zu überprüfen, habe ich danach das Spannungsverhalten für Ein- und Ausschaltvorgänge am HMP 4040 untersucht. Das ist deshalb interessant, weil es besonders für diese Situationen der Theorie nach am ehesten zu erwarten wäre, dass die Regelung am Netzgerät Probleme bekommt.

Währenddessen blieb der zuvor verwendete Aufbau sonst unverändert, es wurde weiter die $100\mu\text{H}$ -Induktivität und entsprechend die für diese Induktivität laut Datenblatt maximal erlaubte Stromstärke von 1A verwendet, mit einer Ausnahme: um das Power Supply ein bisschen stärker zu testen, habe ich anstatt der sonst benutzten 2V-Nennspannung hier mit 5 Volt gearbeitet. Dabei wird sich aber zeigen, dass auch für diese erhöhte Spannung die Regelung ordentlich funktioniert, weshalb auf die Darstellung qualitativ identischer Oszilloskopbilder (analog zu den Abb. 3.8 und 3.9) verzichtet wird. Bei Verwendung der 5 Volt erhält man Spitze-Tal-Spannungen beim Einschalten von 5,12V bzw. für den Ausschaltvorgang von 5,20V. Dabei kann man kaum Überschwingungen erkennen, vielmehr konnte ich aber feststellen, dass der Einschalt- (Abb. 3.8) deutlich länger als der Ausschaltvorgang (Abb. 3.9) dauert.

3 Kabelprototypen und sukzessive Verringerung der Induktivität

Für Demonstrator 3 ergaben sich damit insbesondere folgende Fragestellungen:

- Das Kabel für das Remote Sensing muss bezüglich seiner Länge in die gleiche Größenordnung gebracht werden wie das Versorgungskabel selbst; ist dadurch weiterhin eine reguläre Spannungsversorgung möglich oder wird die Anwendung davon beeinträchtigt?
- Der Spurdetektor stellt am Ende auch keine rein-ohmsche Last dar. Inwiefern kann Kabeldemonstrator 3 auch die elektronische Last ohne Spannungsspitzen versorgen?

3.3 Kabeldemonstrator Generation 3

Die vorangegangenen Ergebnisse wurden zum Anlass genommen, mit dem Plan fortzufahren, einen dem vom CERN entwickelten Low Impedance Cable nachempfundenen Kabeldemonstrator zu bauen. Grundlage dafür war ein von Alpha Wire⁴ vertriebenes Kabel. Die vorhandenen 40 Litzen - vom Hersteller zunächst konzentrisch angelegt (vgl. Abb. 3.12) - wurden nun einzeln freigelegt, abisoliert und dann nach dem zuvor bereits erklärten Schema angeordnet, um Induktivitäten zu reduzieren.

Die 40 Litzen habe ich dazu in 8 Bündeln mit jeweils 5 Kabeln angeordnet (siehe Tab. 3.1). Die Eingruppierung in die 8 Bündel erfolgte unter dem Kriterium, möglichst benachbarte Kabel einem Bündel zuzuordnen. Innerhalb (!) eines solchen Bündels habe ich dann aber wieder auf die bestmöglich abwechselnde Zuordnung zu den Polaritäten geachtet, um erneut den Effekt auszunutzen, dass sich Induktivitäten im Innern gegenseitig teilweise aufheben (vgl. ausführlichere Erläuterung in 3.2). Eine Identifizierung der einzelnen beteiligten Litzen an den zusammengestellten Kabeln ist im Nachhinein durch ihren jeweiligen Farbcode auf der Isolierung möglich und ergibt sich für meine Auswahl aus Tabelle 3.1 unter Zuhilfenahme des Kabelquerschnitts (Abb. 3.12).

⁴30m Alpha Wire M4708 SL005, 40x1 COND, 18 AWG.

3 Kabelprototypen und sukzessive Verringerung der Induktivität



Abbildung 3.10: Detailansicht der selbst-zugeordneten Bündel für Demonstrator 3.

Danach wurden diese Kabelrohlinge mit Konnektoren und Schrumpfschläuchen versehen (siehe Abb. 3.10) und mit zwei Leiterplatten verbunden (Abb. 5.5: Anschluss “to Tracker Power Supply Cable Demonstrator” bzw. Abb. 5.6: Anschluss J11), wobei + mit der Nennspannung von 2 Volt korrespondiert und - mit der Masse (GND).

Für dieses Setup wurden zur Verknüpfung von Power-Kabel, Netzgerät, Last und Remote-Sense-Kabel nämlich zwei identische Leiterplatten verwendet (für das Design vgl. wie schon oben erwähnt Abb. 5.5), deren detaillierter Schaltplan in Gänze in Abschnitt 5.4 einzusehen ist. Der Hauptunterschied zu den zwei zuvor vorgestellten Demonstratoren besteht darin, dass ich nun sowohl für die Power als auch für das Remote Sensing von der Länge her vergleichbare Kabel benutzte, wie es auch später im P2-Experiment der Fall sein wird. Prinzipielle Idee hierbei war zudem, zwei verschiedene Kabeltypen für das Remote Sensing miteinander vergleichend zu testen: ein Twisted-Pair-Kabel⁵ und ein Koaxialkabel⁶ (im Unterkapitel 3.3.3). Wie man in Abb. 3.11 sieht, ist das graue Alpha-Wire-Kabel mit beiden Platinen verbunden, das blaue Remote-Sense-Kabel (in diesem Fall Twisted Pair) stellt gut sichtbar direkt eine

⁵LAPP 2320-2170296-DS-ND, Twisted Pair.

⁶Alpha Wire M4213BK005-ND, Koaxialkabel.

3 Kabelprototypen und sukzessive Verringerung der Induktivität

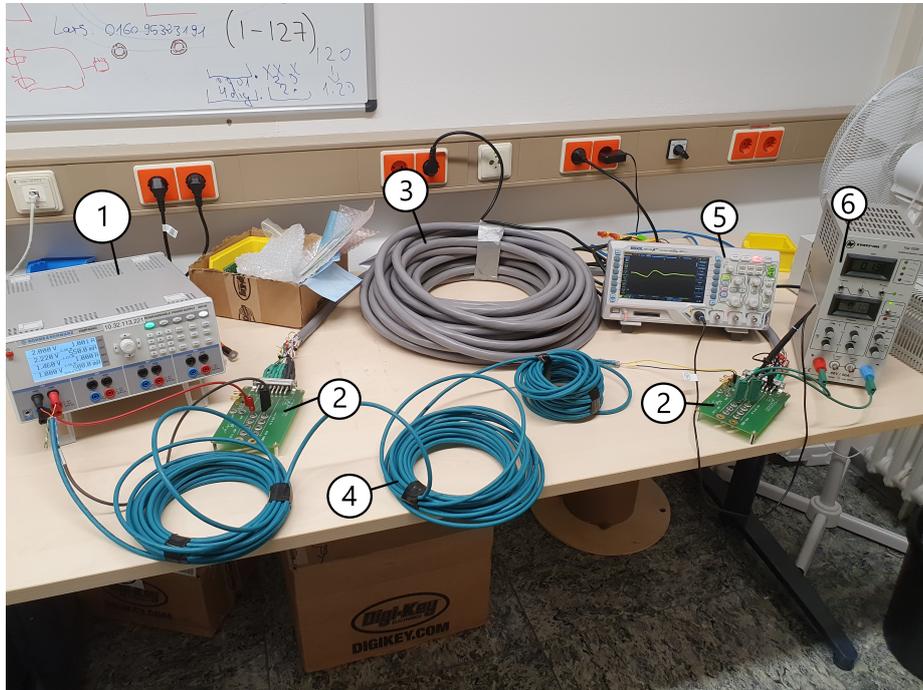


Abbildung 3.11: Test-Setup für den finalen Demonstrator Typ 3: 1) Power Supply, 2) Adapter-Platinen, 3) 30m Kabel, 4) Remote-Sense-Messleitung, 5) Oszilloskop, 6) elektr. Last.

Verbindung von der last-nahen Platine (auf der rechten Seite in Abb. 3.11) zum Netzgerät für die Kompensation des Spannungsabfalls her.

Im Vergleich zu den Abb. 3.5 und 3.6 konnte ich mit dem so konzipierten Kabeldemonstrator eine konstante Spannungsversorgung beobachten - und zwar sowohl für die elektronische (!) als auch die ohmsche Last. Damit lässt sich festhalten, dass die Idee für diesen Demonstrator der 3. Generation insofern gut begründet und sinnvoll war, dass nun auch für die elektronische Last die Regelung des Power Supply effektiv arbeitet. Da man eben bei der späteren Anwendung im Detektor auch nicht von einer rein-ohmschen Last ausgehen kann, war es nun für mich möglich, zum allgemeineren Setup mit der elektronischen Last zurückzukehren. Das dabei erzielte Ergebnis der konstant regulierten Spannungsversorgung gilt dabei auch für beide verwendeten Power Supplies (HMP 4040 und TDK-Lambda). Um nun klarere Unterschiede zwischen den Netzgeräten auszumachen, habe ich mir wieder die im Vergleich zum Normalbetrieb selektiveren und dadurch interessanteren Ein- und Ausschaltvorgänge angeschaut, was im nächsten Unterkapitel vorgestellt werden soll. Zunächst wird für das Remote Sensing ausschließlich das LAPP Twisted-Pair-Kabel benutzt.

3 Kabelprototypen und sukzessive Verringerung der Induktivität

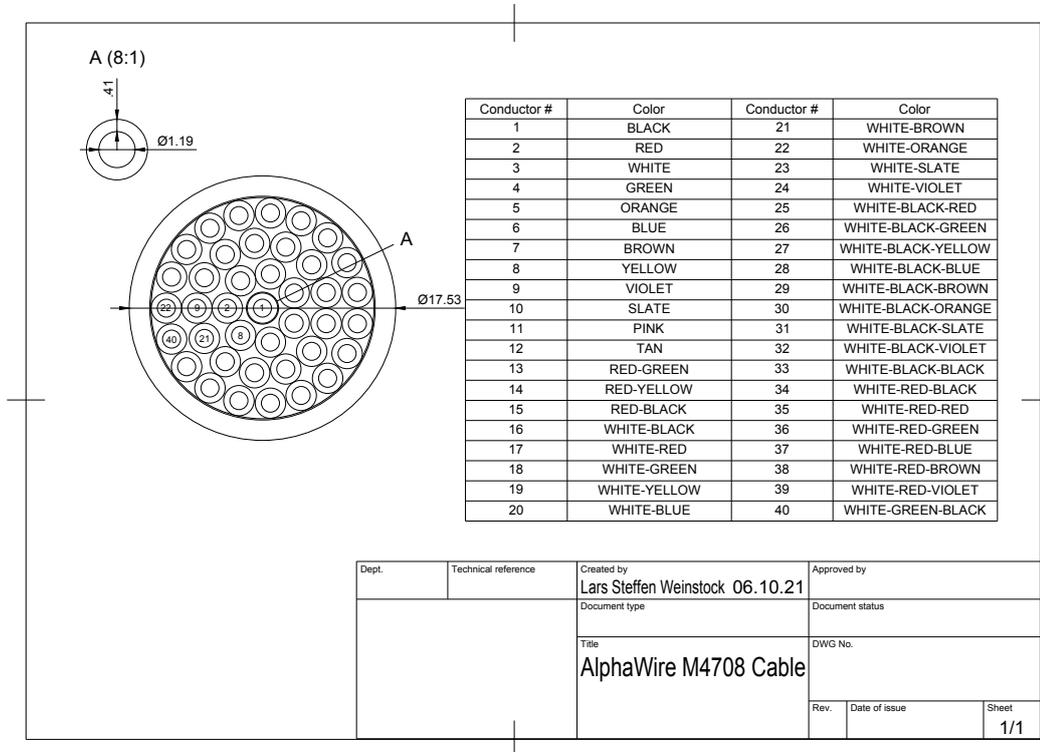


Abbildung 3.12: Querschnitt vom Powerkabel beim Demonstrator Nr.3 [10].

Kabelkonfektionierung des letzten Demonstrators (Nr.3)

Polung	Bündel	Nr.				
+	a	2	9	20	28	31
+	b	1	3	12	22	34
+	c	4	8	21	25	29
+	d	6	13	15	23	39
-	e	27	30	32	33	36
-	f	5	10	11	35	38
-	g	16	17	18	19	26
-	h	7	14	24	37	40

Tabelle 3.1: Zuordnung zu den Kabelbündeln gemäß Nummerierung aus 3.12.

3 Kabelprototypen und sukzessive Verringerung der Induktivität

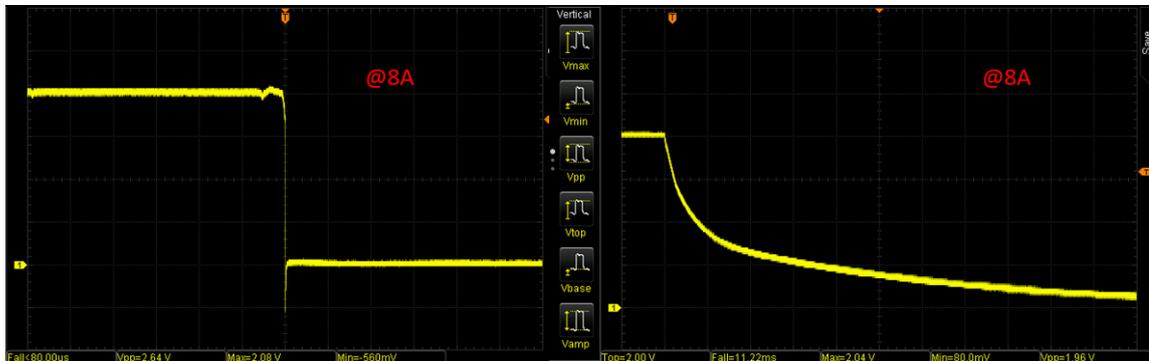


Abbildung 3.13: Vergleich von Ausschaltvorgängen mit Kabeldemonstrator 3 zwischen HMP 4040 (links) und TDK-Lambda (rechts) bei jeweils 8A auf Zeitbasis von 2ms/DIV.

3.3.1 Netzgeräte-Vergleich: HMP 4040 gegen TDK-Lambda

Nachdem ich herausgefunden habe, dass beide genannten Netzgeräte unter Normalbetrieb (also konstante 2V-Gleichspannung) bei Verwendung des Demonstrators der Generation Nr. 3 in Kombination mit der elektronischen Last die Spannung regeln können, sollen nun wieder das An- und Ausschalten untersucht werden, um Unterschiede herauszuarbeiten.

Prinzipiell ist es dabei möglich, sowohl die Ausgabe der Spannung am Power Supply als auch das Ziehen von Strom an der elektronischen Last zu (de)aktivieren. Überträgt man allerdings dieses Labor-Setup auf die spätere Umsetzung im Detektor, wird klar, dass die HV-MAPS hier der elektronischen Last entsprechen und diese nicht aktiv angesteuert werden (können). Das heißt, das reale Auftreten solcher An- und Ausschaltvorgänge besteht zum Beispiel darin, bei einem Leck im Heliumtank, das durch einen Druckabfall bemerkt wird, die Spannungsversorgung auf der Power Supply-Seite zu unterbrechen, eine Reparatur vorzunehmen und anschließend das System wieder anlaufen zu lassen. Als weiterer Effekt ist zu nennen, dass die Leistungsaufnahme auch ansteigen wird, wenn die HV-MAPS ausgelesen werden. Um deutlichere Unterschiede zwischen den Netzgeräten herauszuarbeiten, stelle ich nun Messungen vor, die bei recht hohen Strömen von 8 Ampere vorgenommen wurden. Hierbei habe ich die größten Unterschiede zwischen beiden Power Supplies beim Ausschaltvorgang erkannt. Während das HMP 4040 mit einer Fallzeit von $t_{fall} \approx 200\mu s$ sehr schnell arbeitet, nimmt man allerdings in Kauf, dass beim Abfall der Spannung, d.h. Ausschalten des Power Supplies, ein Dip bis zu $-600mV$ beobachtet wird (siehe im Anhang Abb. 5.3). Im Gegensatz dazu (Abb. 3.13) tritt diese Überschwungung bei der geregelten exponentiellen Abnahme für das TDK-Lambda nicht auf, allerdings dauert es dabei deutlich länger, bis die Spannung abgeklungen ist. Das Oszilloskop misst eine Fallzeit von 14,95ms aus, die damit also knapp 2 Größenordnungen über der des Geräts von Rohde&Schwarz liegt (vgl. im Anhang die Abbildungen 5.3 und 5.4). Der Abfall (Dip) kann damit erklärt werden, dass das HMP4040 am Ausgang ein Relais hat, welches beim TDK-Lambda nicht

3 Kabelprototypen und sukzessive Verringerung der Induktivität



Abbildung 3.14: Ausschaltvorgang bei 5A für Kabeldemonstrator 3. Abbildung 3.15: Ausschaltvorgang bei 8A für Kabeldemonstrator 3.

vorhanden ist.

Da die Fallzeit von ca. $15\mu\text{s}$ beim TDK-Lambda für die spätere Anwendung als trotzdem ausreichend schnell bewertet wird, akzeptiert man den Geschwindigkeitsverlust und bekommt dafür eine zuverlässige Eliminierung von Überspannungen/Spannungsspitzen bei Ausschaltvorgängen. Das TDK-Lambda hat sich für die entsprechende Anwendung als besser geeignet erwiesen, weshalb es von nun an weiter verwendet wird.

3.3.2 Auffälligkeiten beim Ausschalten der elektronischen Last

Kurz möchte ich noch auf eine Besonderheit hinweisen, die ich gefunden habe, als ich entgegen der Argumentation aus 3.3.1 doch einmal das Ausschalten an der elektronischen Last untersuchte. Hierbei wurde das Netzgerät, also gemäß dem letzten Abschnitt das TDK-Lambda, dauerhaft angelassen, weshalb auf den zugehörigen Bildschirmaufnahmen vom Oszilloskop (Abb. 3.14 und 3.15) dann auch wieder ein Einpendeln der Spannung nach Ausschalten der Last zu sehen ist: Sowohl vor als auch nach dem Vorgang liegen konstant 2 Volt an, dazwischen kommt es zu Störungen der Regelung. Bei Messungen für die Stromstärken 1, 5, 8 und 10 Ampere zeigt sich ein Effekt, dass man diese in 2 Kategorien einteilen kann: Während für 1 und 5 Ampere (siehe Abb. 3.14) das Netzgerät scheinbar mit einer Spannungsspitze wieder auf 2 Volt Nennspannung regeln kann, gibt es für 8 und 10 Ampere einen weiteren Peak (siehe Abb. 3.15), bevor wieder konstant 2 Volt anliegen. Es gibt also eine gewisse Grenze zwischen 5 und 8 Ampere, an dem die Regelung durch das abrupte Abschalten der Last so gestört ist, dass ein zweiter Spannungs-Ausschlag beobachtet wird.

3 Kabelprototypen und sukzessive Verringerung der Induktivität

3.3.3 Remote-Sensing-Kabel: Twisted Pair gegen Koaxialkabel

Unter Verwendung des TDK-Lambda als Netzgerät konnte im Vergleich der zwei Kandidaten als Remote-Sense-Kabel kein Unterschied festgestellt werden. Beide arbeiten genau gleich und erzeugen absolut identische Spannungslinien.

Dabei habe ich analog zu Abschnitt 3.1 wieder den Widerstand des Koaxialkabels⁷ über den Spannungsabfall bei verschiedenen Stromstärken ermittelt:

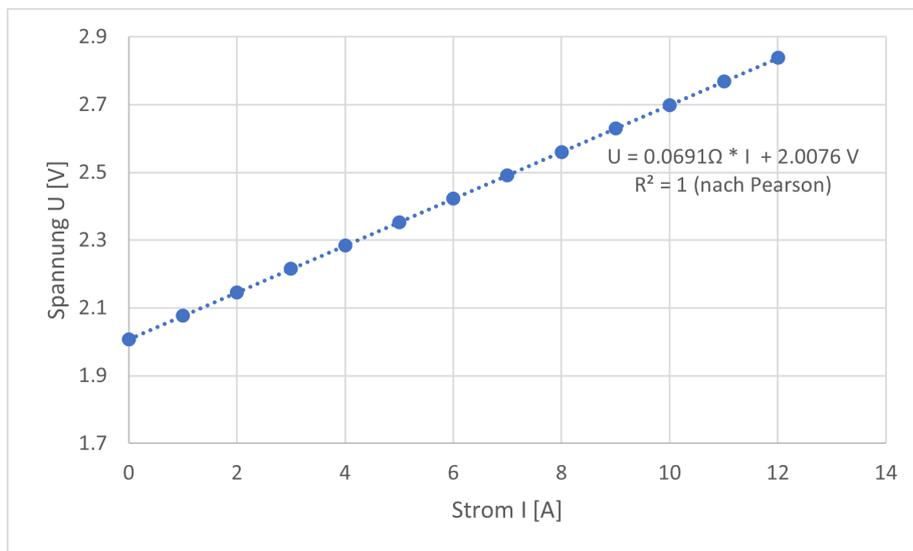


Abbildung 3.16: Strom-Spannungs-Kennlinie für das Koaxialkabel (100ft).

Man erhält einen Widerstandswert von $0,0691\Omega = 69,1\text{m}\Omega$. Diese Messung wird explizit deshalb hier aufgeführt, weil der ermittelte Wert nicht zu den angegebenen Widerständen im Datenblatt passt. Zwecks mangelnder Koaxialkabel des genau gleichen Typs und gleicher Länge bleibt dieses Ergebnis zunächst erst einmal ohne Einordnung bzw. Vergleich stehen, kann sich aber im weiteren Verlauf des Detektorbaus als möglicherweise hilfreich erweisen.

⁷Alpha Wire, M4213 BK005, 100ft, Koaxialkabel, Datenblatt: <https://www.alphawire.com/products/cable/alpha-essentials/coaxial-cable/m4213/>

3.4 Sukzessive Verringerung der Induktivität

Für den Kabeldemonstrator 1 der AWG-2-Kabel misst man per LCR-Meter⁸ eine spezifische Induktivität von $1,6 \mu\text{H}$ pro Meter. Durch die in den Abschnitten 3.2 und 3.3 vorgestellten selbstgebastelten Demonstratoren bzw. aufgebauten Setups konnte die Induktivität schrittweise um bis zu 96% abgesenkt werden, im Zwischenschritt erhielt man für die zwei eigenhändig verdrillten Konfektionierungen (KD Typ 2) 193 bzw. 160 nH pro Meter. Im finalen Setup ließ sich die Induktivität auf 59 nH/m drücken, was allerdings noch deutlich über dem vom CERN-entwickelten Low Impedance Cable (LIC) mit einem Richtwert von 13 nH/m liegt.

Demonstrator	Typ/Querschnitt	spez. Induktivität L [nH/m]
KD 1	AWG 2	1600
KD 2a	40x 1mm^2	193
KD 2b	52x 1mm^2	160
KD 3	40x AWG 18	59
LIC	50x $0,6\text{mm}^2$	13

Tabelle 3.2: Spezifische Induktivitäten der verschiedenen Demonstrator-Generationen.

⁸Handheld-*LCR*-Meter BK Precision 880, vgl. dazu Abschnitt 2.4

4 Zusammenfassung und Ausblick

Diese Arbeit befasst sich mit der Spannungsversorgung des Spurdetektors am P2-Experiment in Mainz.

Das P2-Experiment verfolgt das Ziel, den Mischungswinkel der elektroschwachen Wechselwirkung θ_W über die paritätsverletzende Asymmetrie in Elektron-Proton-Streuung mit davor nie erreichter Präzision von 0,13% zu bestimmen. Die dafür in Quarzglas Cherenkov-Licht erzeugenden Elektronen werden durch HV-MAPS detektiert, die sich durch geringes Materialbudget auszeichnen und sich damit wenig stör anfällig für Coulomb-Streuung zeigen. Um jene HV-MAPS allerdings zuverlässig betreiben zu können, ist eine Versorgung mit konstanter Gleichspannung von 2 Volt bei hohen Strömen nötig. Da die Steuerung wegen der hohen Strahlenbelastung am Detektor aus hinreichend großer Entfernung erfolgen soll, sind Strecken in der Größenordnung von ca. 30 Metern zu überbrücken, weshalb die getesteten Kabel auch diese Länge hatten. Ich habe mich damit befasst, wie sich parasitäre Effekte verschiedener Kabeltypen auf die Regelschleife der Netzgeräte negativ auswirken und welche Art von Kabeln in der Lage dazu ist, eine konstante Versorgung sicherzustellen. Dazu wurden drei Generationen von Kabeldemonstratoren entworfen, die dann jeweils in einem Test-Setup insbesondere auf Spannungsspitzen untersucht wurden.

Als erster Kabeldemonstrator wurden zwei jeweils 30 Meter lange, volladrigere AWG2-Kabel für Hin- und Rückleitung verwendet. Dabei habe ich Spannungsspitzen bis zu 22 Volt gemessen, wodurch jener Demonstrator sehr schnell verworfen wurde. Diese Spannungsspeaks entstehen maßgeblich dadurch, dass die Kabel zu hohe Induktivitäten aufweisen und damit den geregelten Betrieb der elektronischen Last gestört haben. Um folglich die Induktivitäten zu vermindern, wurde anschließend bei Demonstrator zwei und drei auf das Konzept gesetzt, nicht mehr massive Kabel zu nutzen, sondern solche, die aus vielen einzelnen Litzen bestehen und diese Litzen derart miteinander verdreht sind, wobei ein induktivitäts-reduzierender Effekt erzielt wird, wenn Litzen unterschiedlicher Polung sich möglichst abwechseln, d.h. Litzen unterschiedlicher Stromrichtung liegen bestenfalls schachbrettmuster-artig benachbart zueinander (analog zum als Vorbild dienenden Low Impedance Cable (LIC), das am CERN entwickelt wurde).

Zwei solche Kabeldemonstratoren (Generation 2) haben wir anschließend für Längen von ungefähr 2 Metern selbst gebaut. Mit jeweils 40 respektive 52 Litzen von je 1mm^2 Querschnittsfläche wurde eine mit konzentrischen Kreisen versehene Schablone abwechselnd nach Polaritäten besetzt und anschließend alle 25 cm um eine Umdrehung verdreht. Dadurch konnte die Induktivität von anfänglich 1600 nH/m (Demonstrator 1) auf 193 nH/m (für 40 Litzen) bzw. 160 nH/m (für 52 Litzen) reduziert werden. Als si-

4 Zusammenfassung und Ausblick

mulierende Verbraucher habe ich hier sowohl eine ohmsche als auch eine elektronische Last verwendet. Während für Zweitere weiterhin ein unregelmäßiges Verhalten mit Spannungsspitzen von mir beobachtet wurde, konnte für die ohmsche Last eine geregelte Spannungsversorgung sichergestellt werden. Durch zwischenzeitliche Messungen, bei denen reine Induktivitäts-Bausteine die Kabel ersetzten, konnte ich weiter herausarbeiten, dass die Verwendung der elektronischen Last in vorherigen Schritten bei verhältnismäßig größeren Induktivitäten ein Problem dargestellt hat und bin dann mit dem nächsten Setup fortgefahren, um dort die Induktivität weiter zu reduzieren und so auch die elektronische Last für das Netzgerät regelbar zu machen.

Für den dritten und damit letzten in dieser Arbeit behandelten Kabeldemonstrator habe ich ein industriell gefertigtes, wiederum 30m-langes Kabel von Alpha Wire genutzt, das aus 50 Litzen mit je $0,6 \text{ mm}^2$ Querschnittsfläche besteht. Durch eigene Zuordnung der Litzen konnte die Induktivität für diesen Demonstrator auf 59 nH/m gesenkt werden, wodurch sowohl weiterhin für die ohmsche als auch dann für die elektronische Last eine konstante Spannungsversorgung möglich wurde.

Des Weiteren habe ich unter Verwendung des dritten Kabeldemonstrators mit dem HMP 4040 von Rohde&Schwarz und dem TDK-Lambda GH 30-50 zwei Netzgeräte miteinander verglichen, wobei insbesondere Ein- & Ausschaltvorgänge von Interesse waren, um Unterschiede zwischen beiden Power Supplies herauszuarbeiten. Ich konnte feststellen, dass das HMP 4040 insbesondere unter Remote-Sensing-Bedingungen schneller arbeitet, aber signifikante Spannungsspitzen insbesondere beim Ausschalten verursacht werden, während das TDK-Lambda zwar deutlich langsamer regelt, dort aber die Spannung kontinuierlich abfällt und keine Ausreißer beobachtet werden konnten. Stand jetzt hat sich das TDK-Lambda damit als geeigneter für die Anwendung gezeigt, da dort die langsamere Geschwindigkeit akzeptiert werden kann.

Abschließend wurden bei Verwendung des TDK-Lambda als Netzgerät zwei verschiedene Typen (Twisted Pair und Koaxialkabel) als Kandidaten für das Remote-Sensing-Kabel gegeneinander getestet, wobei keine aussagekräftige Differenz von mir herausgearbeitet werden konnte.

In der Zukunft können die vorgenommenen Untersuchungen insofern vertieft werden, als dass ich zum einen immer nur stichprobenartig für verschiedene Stromstärken Messungen vorgenommen sowie viele Daten mit einfachen Handmessgeräten erhoben habe und damit genauere Analysen, z.B. durch Vektorielle Netzwerkanalysatoren, sinnvoll sein können. Zum anderen ist auch der Effekt, dass es unter Vollbetrieb zu einer nicht unerheblichen Temperaturentwicklung in den Kabeln und an den Platinen kommen kann, gänzlich unberührt geblieben. Um später keine Materialprobleme oder sogar -schäden am Spurdetektor unter maximal verwendeten Stromstärken zu verursachen, ist eine genauere Untersuchung dieser Thematik unbedingt erforderlich. Zudem kann es hilfreich sein, durch die Platzierung weiterer Bauteile auf der Platine (wie z.B. Kapazitäten) zu versuchen, aufbauend auf dem Setup für Kabeldemonstrator 3 die Ein- & Ausschaltvorgänge noch "glatter" zu machen.

5 Anhang

5.1 AWG-Tabelle: Kabeleigenschaften [6]

AWG Tabelle

Seite 1/2

AWG	AWG AUFBAU	LEITER QUERSCHNITT	LEITER AUFBAU	AUßEN DURCHMESSER	LEITER WIDERSTAND	LEITER GEWICHT
Nr.	nxAWG	nxDraht-Ø mm	mm²	mm	Ohm/ km	kg/ km
AWG 36						
36	massiv	massiv	0.013	0.127	1460.0	0.116
36	7/44	7x0.05	0.014	0.152	1271.0	0.125
AWG 34						
34	massiv	massiv	0.020	0.160	918.0	0.178
34	7/42	7x0.064	0.022	0.192	777.0	0.196
AWG 32						
32	massiv	massiv	0.032	0.203	571.0	0.284
32	7/40	7x0.078	0.034	0.203	538.0	0.302
32	19/44	19x0.05	0.037	0.229	448.0	0.329
AWG 30						
30	massiv	massiv	0.051	0.254	365.0	0.45
30	7/38	7x0.102	0.057	0.305	339.0	0.507
30	19/42	19x0.064	0.061	0.305	286.7	0.543
AWG 28						
28	massiv	massiv	0.080	0.330	232.0	0.71
28	7/36	7x0.127	0.087	0.381	213.0	0.774
28	19/40	19x0.078	0.091	0.406	186.0	0.81
AWG 27						
27	7/35	7x0.142	0.111	0.457	179.0	0.988
AWG 26						
26	massiv	massiv	0.128	0.409	143.0	1.14
26	10/36	10x0.127	0.127	0.533	137.0	1.13
26	19/38	19x0.102	0.155	0.508	113.0	1.38
26	7/34	7x0.160	0.141	0.483	122.0	1.25
AWG 24						
24	massiv	massiv	0.205	0.511	89.4	1.82
24	7/32	7x0.203	0.227	0.610	76.4	2.02
24	10/34	10x0.160	0.201	0.582	85.6	1.79
24	19/36	19x0.127	0.241	0.610	69.2	2.14
24	41/40	41x0.078	0.196	0.582	84.0	1.74
AWG 22						
22	massiv	massiv	0.324	0.643	55.3	2.88
22	7/30	7x0.254	0.355	0.762	48.4	3.16
22	19/34	19x0.160	0.382	0.787	45.1	3.4
22	26/36	26x0.127	0.330	0.762	52.3	2.94
AWG 20						
20	massiv	massiv	0.519	0.813	34.6	4.61
20	7/28	7x0.320	0.562	0.965	33.8	5.0
20	10/30	10x0.254	0.507	0.889	33.9	4.51
20	19/32	19x0.203	0.615	0.940	28.3	5.47
20	26/34	26x0.160	0.523	0.914	33.0	4.65
20	41/36	41x0.127	0.520	0.914	32.9	4.63
AWG 18						
18	massiv	massiv	0.823	1.020	21.8	7.32
18	7/26	7x0.404	0.897	1.219	19.2	7.98
18	16/30	16x0.254	0.811	1.194	21.3	7.22
18	19/30	19x0.254	0.963	1.245	17.9	8.57
18	41/34	41x0.160	0.824	1.194	20.9	7.33
18	65/36	65x0.127	0.823	1.194	21.0	7.32
AWG 16						
16	massiv	massiv	1.310	1.290	13.7	11.66
16	7/24	7x0.511	1.440	1.524	12.0	12.81
16	65/34	65x0.160	1.310	1.499	13.2	11.65
16	26/30	26x0.254	1.317	1.499	13.1	11.72
16	19/29	19x0.287	1.229	1.473	14.0	10.94
16	105/36	105x0.127	1.330	1.499	13.1	11.48

Abbildung 5.1: Ausführliche AWG-Tabelle, Teil 1.

5 Anhang

AWG Tabelle

Seite 2/2

AWG	AWG AUFBAU	LEITER QUERSCHNITT	LEITER AUFBAU	AUßEN DURCHMESSER	LEITER WIDERSTAND	LEITER GEWICHT
Nr.	nxAWG	nxDraht-Ø mm	mm ²	mm	Ohm/ km	kg/ km
AWG 14						
14	massiv	massiv	2.080	1.630	8,6	18,51
14	7/22	7x0.643	2.238	1.854	7,6	19,92
14	19/27	19x0.361	1.945	1.854	8,9	17,31
14	41/30	41x0.254	2.078	1.854	8,3	18,49
14	105/34	105x0.160	2.111	1.854	8,2	18,79
AWG 12						
12	massiv	massiv	3.31	2.05	5,4	29,46
12	7/20	7x0.813	3.63	2.436	4,8	32,30
12	19/25	19x0.455	3.09	2.369	5,6	27,50
12	65/30	65x0.254	3.292	2.413	5,7	29,29
12	165/34	165x0.160	3.316	2.413	5,2	29,51
AWG 10						
10	massiv	massiv	5.26	2.59	3,4	46,81
10	37/26	37x0.404	4.74	2.921	3,6	42,18
10	49/27	49x0.363	5.068	2.946	3,6	45,10
10	105/30	105x0.254	5.317	2.946	3,2	47,32
AWG 8						
8	49/25	49x0.455	7.963	3.734	2,2	70,87
8	133/29	133x0.287	8.604	3.734	2,0	76,57
8	655/36	655x0.127	8.297	3.734	2,0	73,84
AWG 6						
6	133/27	133x0.363	13.764	4.676	1,5	122,49
6	259/30	259x0.254	13.123	4.674	1,3	116,79
6	1050/36	1050x0.127	13.316	4.674	1,3	118,51
AWG 4						
4	133/25	133x0.455	21.625	5.898	0,80	192,46
4	259/27	259x0.363	26.804	5.898	0,66	238,55
4	1666/36	1666x0.127	21.104	5.898	0,82	187,82
AWG 2						
2	133/23	133x0.574	34.416	7.417	0,50	306,30
2	259/25	259x0.404	33.201	7.417	0,52	295,49
2	665/30	665x0.254	33.696	7.417	0,52	299,89
2	2646/36	2646x0.127	33.518	7.417	0,52	298,31
AWG 1						
1	133/22	133x0.643	43.187	8.331	0,40	384,37
1	259/25	259x0.455	42.112	8.331	0,41	374,80
1	817/30	817x0.254	41.397	8.331	0,42	368,43
1	2109/34	2109x0.160	42.403	8.331	0,41	377,39
AWG 1/0						
1/0	133/21	133x0.724	54.75	9.347	0,31	487,28
1/0	259/24	259x0.511	53.116	9.347	0,32	472,73
AWG 2/0						
2/0	133/20	133x0.813	69.043	10.516	0,25	614,48
2/0	259/23	259x0.574	67.021	10.516	0,25	596,49
AWG 3/0						
3/0	259/22	259x0.643	84.102	11.786	0,20	748,51
3/0	427/24	427x0.511	87.570	11.786	0,19	779,37
AWG 4/0						
4/0	259/21	259x0.724	106.626	13.259	0,16	948,97
4/0	427/23	427x0.574	110.494	13.259	0,15	983,39

Abbildung 5.2: Ausführliche AWG-Tabelle, Teil 2.

5.2 Pearson'scher Korrelationskoeffizient

Der Pearson'sche Korrelationskoeffizient R [11] ist ein Gütefaktor für lineare Regressionen. Er bewegt sich in einem Intervall zwischen 0 und 1; je größer der Wert, desto stärker korrelieren die Messpunkte mit der Ausgleichsgeraden:

$$\mathbf{R} = \frac{\sum_i (\mathbf{I}_i - \bar{\mathbf{I}}) * (\mathbf{U}_i - \bar{\mathbf{U}})}{\sqrt{\sum_i (\mathbf{I}_i - \bar{\mathbf{I}})^2 * \sum_i (\mathbf{U}_i - \bar{\mathbf{U}})^2}}$$

5.3 Ausschaltvorgänge der beiden Netzgeräte

In Bezug auf Kapitel 3.3.1 zeige ich hier die jeweiligen Oszilloskop-Bilder der Ausschaltvorgänge bei Stromstärke 8 Ampere für beide Power Supplies unter dem Aspekt der für den jeweiligen Ausschaltvorgang repräsentativen Zeitskala. Da die Dauer der Abklingvorgänge und die damit verwendeten Zeitbasen sehr unterschiedlich sind, können diese hier nicht direkt miteinander verglichen werden. Das ist wiederum in Abb. 3.13 gegeben.



Abbildung 5.3: Ausschaltvorgang am HMP 4040 für Kabeldemonstrator 3 bei 8A mit elektronischer Last, Zeitbasis: $50\mu\text{s}/\text{DIV}$.

5 Anhang

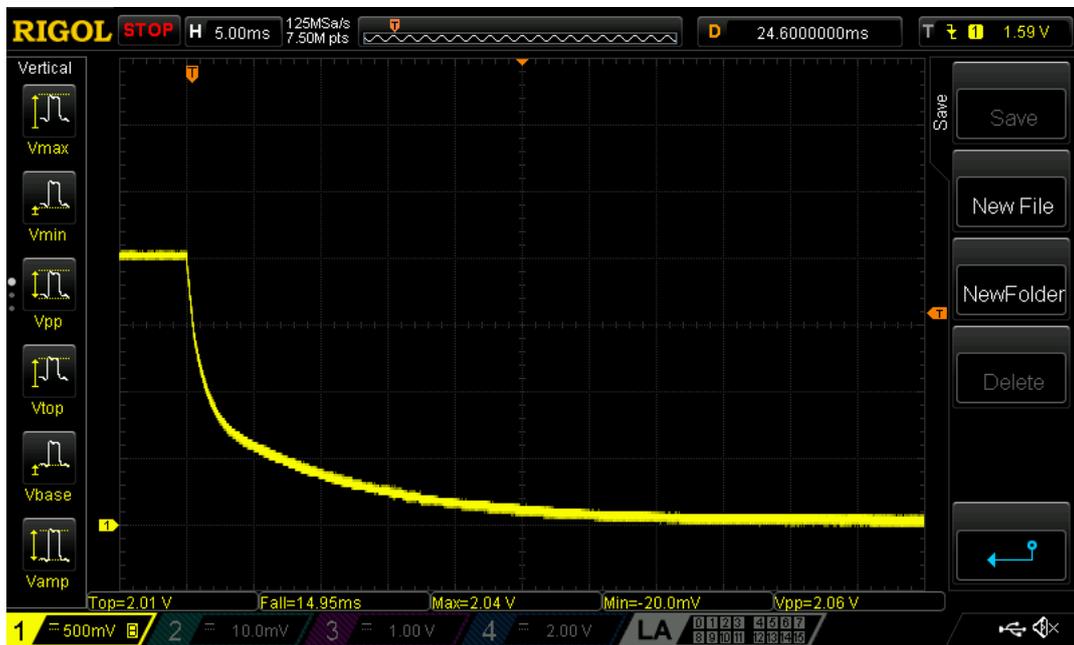


Abbildung 5.4: Ausschaltvorgang am TDK-Lambda für Kabeldemonstrator 3 bei 8A mit elektronischer Last, Zeitbasis: 5ms/DIV.

5.4 Schema und Schaltplan der Platine für Demonstrator 3

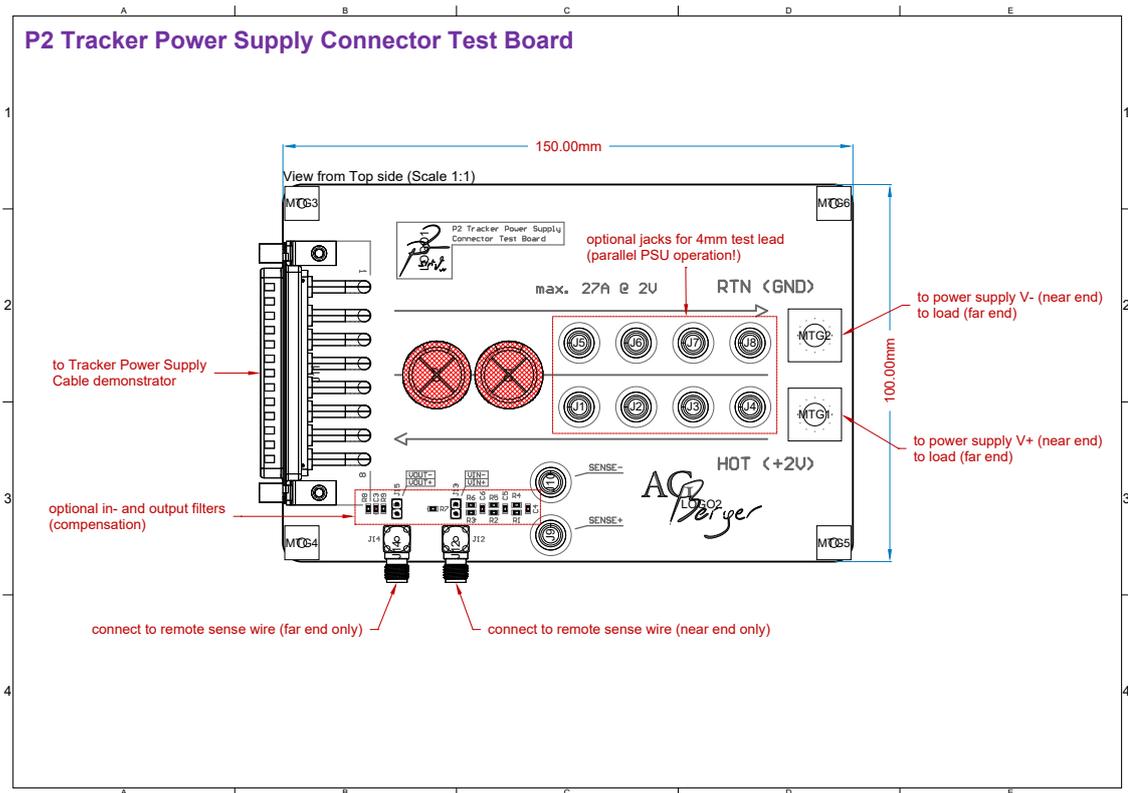


Abbildung 5.5: Schema der Platine für Kabeldemonstrator 3 [12].

5 Anhang

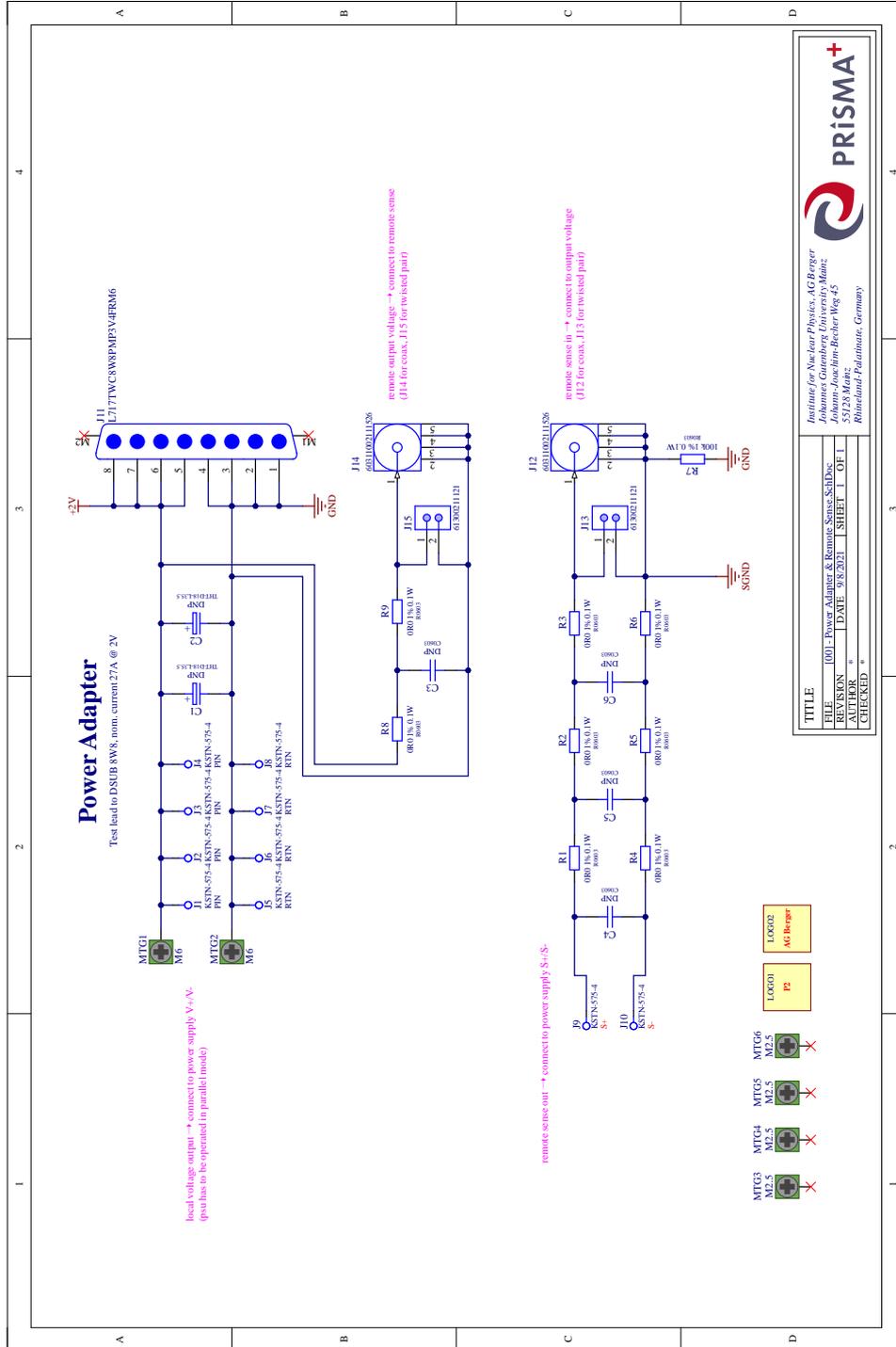


Abbildung 5.6: Schaltplan der Platine für Kabeldemonstrator 3 [13].

6 Literaturverzeichnis

- [1] S. Weinberg, "The Quantum theory of fields. Vol. 1: Foundations", Cambridge, UK: Univ. Pr. (1995)
- [2] Dt. Wikipedia, Standardmodell der Teilchenphysik: https://de.wikipedia.org/wiki/Standardmodell_der_Teilchenphysik#/media/Datei:Standard_Model_of_Elementary_Particles-de.svg, abgerufen am 18. Dezember 2021
- [3] N. Berger et al., "Measuring the weak mixing angle with the P2 experiment at MESA", arXiv:1511.03934 (2015), JUSTC 46, 481-487 (2016)
- [4] AG Berger, Schematische Darstellung des P2-Experiments: <https://agberger.kph.uni-mainz.de/experiments/p2/>, abgerufen am 14. Dezember 2021
- [5] M. Zimmermann, "Particle Rate Studies and Technical Design Development for the P2 Silicon Pixel Tracking Detector", Seite vii, 26. Mai 2019
- [6] W. Knap, "Ausführliche AWG-Tabellen", <http://www.knap.at/datenblaetter/all/awg-tabelle.pdf>, abgerufen am 10.01.2022
- [7] F. Hämmerle, Omicron Lab, "Bode 100 - Application Note", verwendete Grafik: "Open-loop and Closed-loop output impedance", S. 6 (2020)
- [8] Physik Universaldenken, Herleitung Selbstinduktivität (Induktivität) - zwei stromdurchflossene Leiter: <https://de.universaldenker.org/argumentationen/328>, abgerufen am 05.01.2022
- [9] S. Paoletti et al., "The Implementation of the power supply system of the CMS Silicon Strip Tracker" (DOI:10.5170/CERN-2007-007.377; Corpus ID: 55548852) und "The Powering Scheme of the CMS Silicon Strip Tracker", Sesto Fiorentino, ITA (2007), abgerufen am 18. Dezember 2021
- [10] L.S. Weinstock, Querschnittszeichnung vom Kabel AlphaWire M4708, 6. Oktober 2021
- [11] Support Microsoft, "PEARSON-Funktion", <https://support.microsoft.com/de-de/office/pearson-funktion-0c3e30fc-e5af-49c4-808a-3ef66e034c18>, abgerufen am 07. Januar 2022
- [12] L.S. Weinstock, Schematische Darstellung der Platine für Demonstrator Typ 3, 8. September 2021
- [13] L.S. Weinstock, Schaltplan der Platine für Demonstrator Typ 3, 8. September 2021

7 Abbildungsverzeichnis

1.1	Teilchen im Standardmodell der Teilchenphysik [2]	5
1.2	Schematische Darstellung des P2-Experiments [4].	7
2.1	Vereinfachtes Ersatzschaltbild eines Kabels mit Spannungsversorgung, Remote-Sense-Anschlüssen und Last	9
2.2	Impedanzverhalten in Abhängigkeit von der Frequenz	12
3.1	Strom-Spannungs-Kennlinie für Kabeldemonstrator 1	15
3.2	Spannungsspitzen bei Kabeldemonstrator 1	16
3.3	Foto vom Demonstrator Typ 2a	17
3.4	Foto vom Demonstrator Typ 2a - Detailansicht	17
3.5	Spannungsspitzen einer reinen $100\mu\text{H}$ -Induktivität mit elektronischer Last bei 1A	18
3.6	Gleichmäßige Spannungsversorgung bei einer reinen $100\mu\text{H}$ - Induktivität mit ohmscher Last	18
3.7	Spannungsspitzen bei verschiedenen Induktivitäten	18
3.8	Einschaltvorgang einer reinen $100\mu\text{H}$ -Induktivität mit ohmscher Last. . .	19
3.9	Ausschaltvorgang einer reinen $100\mu\text{H}$ -Induktivität mit ohmscher Last. . .	19
3.10	Detailansicht der selbst-zugeordneten Bündel für Demonstrator Typ 3 . .	21
3.11	Test-Setup für den finalen Demonstrator Typ 3	22
3.12	Querschnitt vom Powerkabel für Demonstrator Typ 3 [10]	23
3.13	Vergleich von Ausschaltvorgängen mit Kabeldemonstrator 3 zwischen HMP 4040 und TDK-Lambda mit Demonstrator Typ 3 bei 8A	24
3.14	Ausschaltvorgang an der elektronischen Last mit Demonstrator Typ 3 bei 5A	25
3.15	Ausschaltvorgang an der elektronischen Last mit Demonstrator Typ 3 bei 8A	25
3.16	Strom-Spannungs-Kennlinie für das Koaxialkabel (100 ft)	26
5.1	Ausführliche AWG-Tabelle, Teil 1.	30
5.2	Ausführliche AWG-Tabelle, Teil 2.	31
5.3	Ausschaltvorgang am HMP 4040 für Kabeldemonstrator 3 bei 8A mit elektronischer Last	32
5.4	Ausschaltvorgang am TDK-Lambda für Kabeldemonstrator 3 bei 8A mit elektronischer Last	33
5.5	Schema der Platine für Kabeldemonstrator 3 [12]	34
5.6	Schaltplan der Platine für Kabeldemonstrator 3 [13]	35

8 Danksagung

An dieser Stelle möchte ich allen danken, die mir bei der Erstellung dieser Arbeit geholfen haben.

Ganz besonders danke ich zum einen meinem Betreuer Niklaus Berger für seine Hilfen und Vorschläge während des Schreibens sowie der Laborphase und zum anderen seinem Postdoc Lars S. Weinstock, der mich sozusagen mit einem Fahrplan für diese Bachelorarbeit ausgestattet, mir viele praktische Hinweise aus der Welt der Elektrotechnik gegeben hat und die Einbettung in das gesamte P2-Experiment im Blick hatte.

Patricia Theobald unterstützte mich während Lars' Urlaub im Labor und mein Bruder Julius musste beim Schreiben einige Fast-Weltuntergangs-Szenarien miterleben, wenn \LaTeX meine Eingaben mal wieder anders ausführen wollte als ich - auch vielen Dank an Euch!

Und nicht zuletzt allen, die vielleicht gar nicht erwarten hier Erwähnung zu finden, aber mir bei Materialsuche in den Labors oder durch die Weitergabe von Erfahrungen bei Messtechniken, mit guten Tipps und Tricks an der Löt-Station, am Oszilloskop und vielem mehr praktisch sehr weitergeholfen haben!