

Entwicklung eines
Hochspannungsnetzteils
für den Betrieb von
Hochleistungsgasentladungslampen

Harald Noack

Matrikelnummer: 0030344

*Ich danke meinen Eltern
Eva und Dipl. Ing. Jürgen Noack
für die Unterstützung und die Ermöglichung meines Studiums.*

*Meiner Frau Mag. Julia Noack-Windholz
und
Peter.*

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommene Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am 15. März 2010

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	6
Schlüsselwörter.....	6
Abstract.....	6
Keywords.....	6
Einleitung	7
Aufgabenstellung.....	11
Spektrallampe.....	12
Blitzlampe.....	12
Hohlkathodenblitzlampe.....	15
Anforderung an das Netzteil.....	16
Lösung.....	18
Gesamtschaltplan.....	18
Blockschaltbild Gesamtsystem.....	18
Gesamtschaltplan Hochspannungsteil.....	21
Wechselspannungsnetzteil.....	23
Wechselhochspannungserzeugung.....	24
Schaltplan Wechselhochspannungserzeugung.....	29
Sicherheitseinrichtungen.....	30
Allgemeine Sicherheitsvorkehrungen.....	30
Wechselspannungsnetzteil	30
Schaltplan Sicherheitseinrichtungen.....	33
Hochspannungsgleichrichter.....	34
Hochspannungskondensatorbank	34
Schaltfunkenstrecke.....	35
Zündtransformator.....	35
Zündschaltung.....	35
Impulsformerplatine.....	36
Hochspannungsgleichrichter.....	36
Hochspannungskondensatorbank.....	42

Schaltfunkenstrecke.....	44
Aufbau.....	49
Beschaltung der Schaltfunkenstrecke.....	52
Zeitlicher Verlauf der Zündung.....	54
Justierhilfe für die Abstandsregulierung.....	56
Zündtransformator.....	57
Zündschaltung.....	63
Impulsformerplatine.....	66
Schaltungsbeschreibung	68
Ergebnisse und Diskussion.....	71
Allgemeines.....	71
Betrieb von Spektrallampen.....	72
Betrieb von Blitzlampen.....	74
Betrieb von Hohlkathodenblitzlampen.....	76
Anhang.....	80
Wolfram elektrisch kontaktieren.....	80
Mechanische Vorbehandlung.....	80
Beizen.....	81
Verkupfern.....	82
Glas mit Messing verlöten	84
Glas versilbern.....	85
Kupfer auf Silber galvanisch abscheiden.....	86
Speckstein als Werkstoff.....	88
Vermessung der Hochspannungskondensatoren.....	89
Kapazität.....	89
Parallelwiderstand.....	89
Spannungsfestigkeit.....	89
Serieninduktivität.....	90

Zusammenfassung

In dieser Diplomarbeit wird die Entwicklung und Inbetriebnahme eines Hochspannungsnetzteils für den Betrieb von Gasentladungslampen dokumentiert. Die Anforderungen an dieses Netzteil sind vielfältig, denn es soll der Betrieb von Spektrallampen, Blitzlampen und Hohlkathodenblitzlampen ermöglicht werden.

Der Aufbau wurde möglichst induktionsarm durchgeführt um möglichst kurze Entladungszeiten und große Spitzenleistungen in den Gasentladungslampen zu erreichen. Bei Betrieb von Spektrallampen mit Gleichstrom wurde eine Restwelligkeit des Stroms von kleiner 1% erreicht. Bei Betrieb von Blitzlampen und Hohlkathodenblitzlampen wurden FDHM-Zeiten kleiner $10\mu\text{s}$ bei Entladeleistungen im zweistelligen MW-Bereich erreicht. Durch den Einsatz von Hohlkathodenblitzlampen konnte eine nahezu punktförmige Lichtquelle realisiert werden, die eine wesentlich höhere Lichtintensitätsdichte als Blitzlampen aufweist und sehr gut kollimiert werden kann.

Weiters wird auf die Besonderheiten von schnellen, hochenergetischen Hochspannungsentladungen und den eingesetzten Schaltfunkenstrecken mit deren Zündtransformatoren und deren Ansteuerung eingegangen. Die an das Netzteil gestellten Anforderungen konnten durch das dargestellte Projekt abgedeckt werden und durch dessen modularen Aufbau kann es leicht an zukünftige Aufgabenstellungen angepasst werden.

Schlüsselwörter

Hochspannungsnetzteil, Spektrallampe, Blitzlampe, Hohlkathodenblitzlampe, Schaltfunkenstrecke

Abstract

In this diploma thesis, the development and implementing of a high voltage power supply for energizing gas discharge lamps is documented. This made great demands on the flexibility of the system, because the high voltage power supply should be applicable to spectral lamps, flash lamps and pinhole flash lamps.

The power supply was low inductive assembled to enable a minimization of the discharge time and maximize the discharge power delivered to the gas discharge lamp. It is shown that the direct current flow through a spectral lamp is stabilized better than 1%. Powering flash lamps and pinhole flash lamps in the MW range is possible at a FDHM-time shorter than $10\mu\text{s}$. Using pinhole flash lamps it is possible to realize a point shaped light source that has a much time higher light density than normal flash lamps and can be well collimated.

Furthermore the characteristics of fast high energy gas discharges, triggered spark gaps and their ignition electronics and transformers are discussed. All the demands on the power supply are fulfilled and according to the modular construction it is easily adaptable for future development.

Keywords

high voltage power supply, spectral lamp, flash lamp, pinhole flash lamp, switching spark gap

Einleitung

Am Institut für Medizintechnik der Technischen Universität Graz wird seit längerem in Kooperation mit Industriepartnern an der Verbesserung der Bildrekonstruktion von Magnetresonanztomografieaufnahmen gearbeitet.

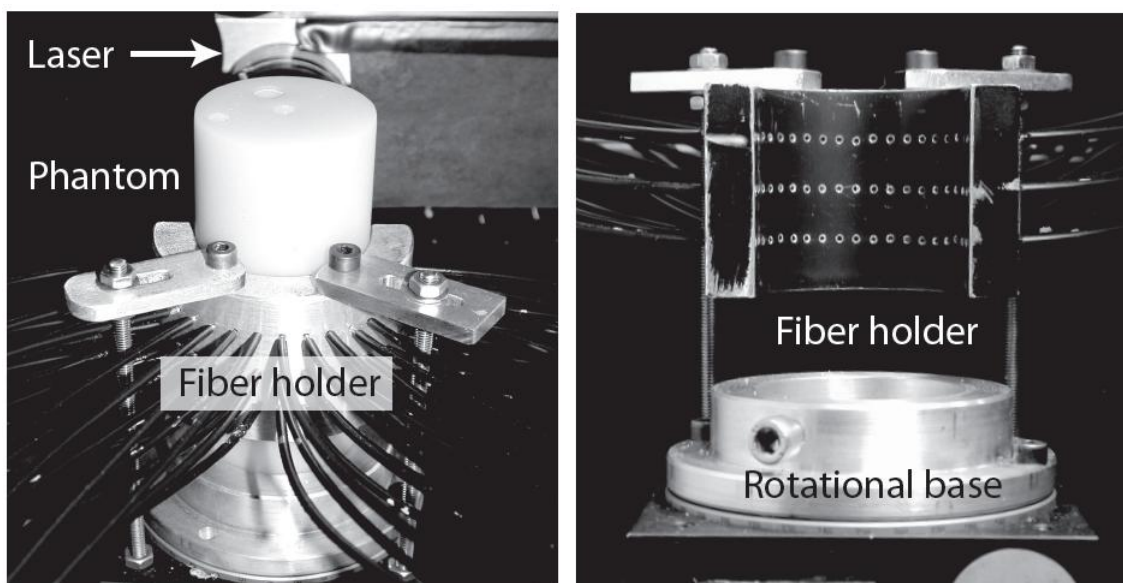
Um den Forschungsschwerpunkt zu erweitern, wurde als zweiter Schwerpunkt das Thema „Fluoreszenztomografie“ gewählt.

Das Fluoreszenzverfahren ist in der Mikroskopie ein seit langem eingesetztes und bewährtes Verfahren zur Gewebeidentifikation. Dabei ist als besonders wichtig zu erwähnen, dass Fluoreszenzfarbstoffe als Marker an Antikörper angekoppelt werden können und somit selektiv Zellarten eingefärbt werden können. Weiters gibt es auch Fluoreszenzfarbstoffe die ihre Eigenschaften abhängig vom Vorhanden- oder Nicht-Vorhandensein von speziellen Ionen (zum Beispiel Ca^+) beziehungsweise vom pH-Wert verändern können. Dies betrifft nicht nur eine Veränderung des Emissionsspektrums, sondern kann auch die mittlere Lebensdauer des angeregten Zustandes und somit die Abklingkurve beeinflussen. Dieser Umstand kann zum Beispiel zur Sauerstoffpartialdruckmessung in Geweben eingesetzt werden.

Da es viele Farbstoffe gibt, die auf Körpergewebe nicht toxisch wirken, lässt sich ein wiederholtes Screening durchführen, um zeitliche Veränderungen dieses Gewebes zu dokumentieren, ohne eine nachhaltige Schädigung zu verursachen. Dies bietet die Möglichkeit, durch wiederholtes Screening beispielsweise von Mäusen mit Tumoren die Wirksamkeit von Krebsmedikamenten an lebenden Objekt zu verifizieren. Da organisches Gewebe auf Licht jedoch stark streuend und wellenlängenabhängig absorbierend wirkt, muss um den Erfolg eines eingesetzten Präparates verifizieren zu können, die Geometrie des durch einen Fluoreszenzfarbstoff eingefärbten Tumors ermittelt werden. Die Mathematik der Bildrekonstruktion ist hierbei sehr anspruchsvoll und der Erfolg hängt entscheidend von dem Signal-Rausch-Verhältnis der für die Rekonstruktion eingesetzten Quellbilder ab.

Ausgangspunkt für dieses Projekt war, dass am Institut für Medizintechnik im Rahmen einer Dissertation [1] eine Software für die 3-dimensionale Bildrekonstruktion von 2-dimensional aufgenommenen Rundum-Fluoreszenztomografie Bildern entwickelt wird. Die dafür verwendeten Bilddaten wurden durch Simulation ermittelt. Für die Verifikation dieser Bildrekonstruktionsmodelle werden jedoch real aufgenommene Fluoreszenztomografiebilder benötigt.

Die Aufgabenstellung war die Entwicklung eines Aufbaus, bei dem ein Kleinnagetier, zumeist eine Maus, mit einer Lichtquelle angestrahlt und das gestreute Licht aus verschiedenen Richtungen aufgenommen wird. Ursprünglich war geplant, dass in einem Rohr mehrere Glasfasern und Kollimatoren zum Aussenden beziehungsweise Empfangen von Licht angeordnet werden, und zwar so, dass die Glasfaserkollimatoren an der Innenseite des Rohrs konzentrisch zur angenommenen Mittelachse der Maus angeordnet sind.



*Abbildung 1: Ursprünglicher geplanter Aufbau
Abbildungen aus [2]*

Dieses System weist den Nachteil auf, dass nur wenige Messpunkte möglich sind, nämlich genau so viele wie Lichtwellenleiter vorhanden sind. Dadurch kann die Oberfläche nur sehr grob abgetastet werden, was die Möglichkeiten der

nachfolgenden Bildrekonstruktion stark einschränkt. Das durch die Lichtwellenleiter empfangene Licht weist Anteile des Anregungs- und Fluoreszenzlichts auf und muss mittels Filter getrennt werden. Dies macht das System sehr unflexibel, da bei Farbstoff- beziehungsweise Anregungslichtfarbwechsel ein Filterwechsel nötig ist und diese Filter, sowie ebenso benötigte Glasfaser-Switches, Foto-Multiplier und Glasfaserkollimatoren hohe Kosten verursachen, und der Filterwechsel auch einen hohen Wartungsaufwand erfordert.

Zudem zeigte Schulz in [3], dass die Ergebnisse nicht überzeugend waren, und Verbesserungen in vielerlei Hinsicht möglich schienen.

Aufgrund der dargestellten Nachteile wurde ein neues Konzept entwickelt. Dabei sollten diese Nachteile von vorne herein vermieden und eine bessere örtliche und spektrale Auflösung ermöglicht werden.

Aus diesem Grund wurde der Einsatz einer Spektalkamera als Fotoempfänger und die Beleuchtung mit einer schmalbandigen Lichtquelle angestrebt. Die Lichtquelle sollte möglichst schmalbandig und gut in einen Lichtwellenleiter einkoppelbar sein. Dies schloss den Einsatz von Leuchtdioden aus, da diese eine typische spektrale Bandbreite von 20-40nm aufweisen. Weitere Optionen waren die Verwendung eines Lasers, von über einen Monochromator gefiltertem Licht von Blitz- beziehungsweise Hohlkathodenblitzlampen sowie von Spektrallampen.

Spektrallampen sollten als Referenzlichtquellen dienen, und somit eine Wellenlängenkalibrierung der Spektalkamera bezogen auf die genau definierten atomaren Übergänge der Spektrallampe ermöglichen. Der Aufbau und die Funktion der Spektalkamera sowie nähere Beschreibungen des durchstimmbaren Farbstofflasers und der Hohlkathodenlampe sind in der Diplomarbeit [4] beschrieben.

Das oben beschriebene neue Konzept ermöglicht folgenden Messaufbau:

Die Maus wird drehbar vor einer Spektalkamera gelagert. Zuvor wird dem Versuchstier ein Fluoreszenzfarbstoff, der den zu untersuchenden Prozess sichtbar macht verabreicht und das Tier betäubt, damit es schonend senkrecht fixiert werden kann. Durch die definierte Position des Versuchstieres kann es von allen Seiten abgeleuchtet werden.

Die Lichtquelle kann koaxial zur Drehachse der Maus gedreht werden. Somit ist es möglich, mit der Spektalkamera unterschiedliche Oberflächensegmente (Streifen) der Maus aus unterschiedlicher Position beleuchtet aufzunehmen. Es ist also möglich, Durchlichtaufnahmen sowie Streulichtaufnahmen durchzuführen. Der Vorteil dieser Methode liegt einerseits darin, dass durch den Einsatz einer Spektalkamera von einem Punkt der Mausoberfläche das Lichtspektrum aufgenommen wird und somit das Anregungslicht leicht vom Fluoreszenzlicht separierbar ist. Andererseits kann durch die Drehung der Maus diese mit sehr feiner Winkelauflösung gescannt werden. Gegenüber einer Abtastung mit wenigen Lichtwellenleitern bringt dies den Vorteil flexiblerer Anpassung an das jeweils angewandte mathematische Rekonstruktionsmodell mit sich. Da dieser Aufbau die Voraussetzung für sehr viele Freiheitsgrade in Bezug auf die möglichen Messabläufe schafft, ist eine leichte Adaptierung an die jeweiligen Gegebenheiten gewährleistet. Die Flexibilität des Aufbaus lässt die Investitionskosten in Bezug auf deren zukünftige Erweiterbarkeit als gerechtfertigt erscheinen.

Für die Beleuchtung des Objekts ist eine starke, schmalbandige Lichtquelle erforderlich, die speziell für diese Anwendung im Rahmen dieses Projektes entwickelt wurde und in der Diplomarbeit [4] beschrieben ist. Die Stromversorgung für diese Lichtquelle stellt den Inhalt dieser Diplomarbeit dar und wird im Folgenden beschrieben.

Aufgabenstellung

Da die Einsetzbarkeit des Netzteils für zukünftige Weiterentwicklungen gewährleistet sein sollte, musste das System möglichst flexibel aufgebaut werden. Zum Zeitpunkt des Beginns der Arbeit sollte das Netzteil den Betrieb von drei Arten von Gasentladungslampen ermöglichen, nämlich von Blitzlampen mit Xenon- oder Kryptonfüllung, optional auch von selbstgebauten Blitzlampen mit Luftfüllung, von Hohlkathodenblitzlampen sowie von Spektrallampen.

Das von den Blitzlampen ausgesendete Licht kann zum Pumpen von Lasermedien eingesetzt werden. Je nach zu pumpendem Medium ergeben sich dabei unterschiedliche Anforderungen. Nd:YAG beispielsweise weist eine mittlere Lebensdauer des angeregten Zustandes von einigen hundert μs auf, und ist somit mit nahezu jedem Blitzgerät pumpbar. Am Institut für Experimentalphysik der Technischen Universität Graz wird für Lehrveranstaltungen ein Nd:YAG-Laser sogar mit einem Halogenstab gepumpt. Um eine möglichst hohe Flexibilität für zukünftige Beleuchtungsmöglichkeiten zu schaffen, soll jedoch die Möglichkeit bestehen, mittels Blitzlampe auch Farbstoffe zu pumpen. Dies stellt hohe Ansprüche an die schnelle Bereitstellung von elektrischer Energie an die Blitzlampe dar, da der Blitzlichtimpuls maximal $10\mu\text{s}$ betragen darf. Dieser Wert ergibt sich aus der sehr kurzen Verweildauer des Farbstoffes im angeregten Zustand. Für Rhodamin 6G beträgt er circa 4ns .

Je nach Lampentyp müssen spezifische Voraussetzungen gegeben sein:

Spektrallampe

Der Betrieb einer Spektrallampe soll mit Gleichstrom bis maximal 10mA möglich sein und eine möglichst gute Stabilisierung aufweisen, um mögliches Aliasing aufgrund der Restwelligkeit des gleichgerichteten Stromes und der Belichtungszeit der Spektalkamera, wenn diese nicht ein Vielfaches von 1/50-Sekunde ist, zu verhindern.

Da Spektrallampen zum Zünden eine hohe Gleichspannung brauchen, soll die Leerlaufspannung höher sein als die 5000V-Spitzenspannung des mit den Spektrallampen bei „Edmund Optics“ erworbenen Wechselspannungsnetzteils (Spectrum Analysis Power Supply: NT71-560, Edmund Optics, 76227 Karlsruhe, Deutschland).

Blitzlampe

Blitzlampen werden normalerweise serien- oder parallelgezündet.

Bei Serienzündung [5] wird ein kleiner Transformator in den Entladekreis eingefügt, mit Hilfe dessen der Hochspannungszündimpuls erzeugt wird. Dieser Transformator erhöht die Entladekreisinduktivität, wodurch der Entladespitzenstrom geringer und die Entladedauer länger wird. Hieraus ist ersichtlich, dass dieser Betriebsmodus zum Erreichen von schnellen Blitzentladungen ungeeignet ist.

Bei Parallelzündung [5] tritt der zuvor genannte Nachteil der längeren Entladedauer nicht auf, jedoch kommt es durch die undefinierte Streamerausbreitung an der Innenseite der Glaswand der Blitzlampe zu erhöhtem Zündjitter.

Sowohl Serien- als auch Parallelzündung haben den Nachteil, dass die an der Blitzlampe angelegte Spannung nicht höher sein kann als die Selbstzündspannung. Somit sind beide Betriebsarten zum Erreichen schneller Blitzentladungen, die wenig Zündverzögerung und Zündjitter aufweisen ungeeignet.

Da das Netzteil die Option ermöglichen soll, mittels Blitzlampenanregung einen Farbstofflaser [6] zu betreiben, ist es notwendig, dass der Blitzlichtimpuls möglichst kurz ist, um ein Befüllen der Tripletniveaus des Farbstoffes sowie der Zerstörung der Homogenität des Farbstoffes in der Laserküvette aufgrund von Druckwellenausbreitung zu minimieren [7].

Aus diesen Bedingungen ergibt sich, dass das Netzteil den selten genutzten Betriebsmodus der Überspannungszündung [8] beherrschen muss. Dieser Betriebsmodus weist den Vorteil auf, dass über ein Schaltelement eine Spannung, die um ein vielfaches höher sein kann als die Selbstzündspannung der Blitzlampe, an diese angelegt werden kann. Somit ist nur mehr die Spannungsfestigkeit des Schaltelements entscheidend.

Durch den Betrieb mit sehr hoher Spannung kann trotz unvermeidbarer geometrisch bedingter parasitärer Entladekreisinduktivität eine hohe Stromanstiegsgeschwindigkeit beziehungsweise ein hoher Spitzenentladestrom erreicht werden. Hieraus ergeben sich an das Schaltelement folgende Bedingungen:

- Hochspannungsfestigkeit
- Hochstromfähigkeit
- geringer Zündverzug
- geringer Schaltjitter

Diese Bedingungen führten zur Wahl einer Schalfunkenstrecke, die auch als Trigatron beziehungsweise Kaltkathodenthyatron bekannt ist.

Neben dem Betrieb der Blitzlampe mit Überspannungszündung soll das Netzteil die Option bieten, die Blitzlampe zu simmern [5] [9]. Das bedeutet, eine kontinuierliche, wandabgelöste Gleichstromplasmaentladung mit geringer Stromstärke durch die Blitzlampe fließen zu lassen, um einen definierten Plasmakanal für die Hochstromentladung vorzugeben. Somit bildet sich das Hochstromplasma in der Mitte der Blitzlampe aus und ist von allen Seiten möglichst weit von der

Glasummantelung entfernt. Dies wirkt Lebensdauer verlängernd, da weniger Glas verdampft beziehungsweise durch Ionenbombardement abgesputtert wird und somit einer schnellen Trübung des Glases vorgebeugt wird. Durch die mittige Positionierung der Hochstromentladung in der Blitzlampe trifft die Druckwelle des Entladungsplasmas überall zeitgleich auf die Glasumhüllung. Dies vermeidet punktuelle mechanische Überbelastungen der Glasumhüllung und vermindert deren Bruchgefahr.

Weiters soll das Netzteil die Möglichkeit bieten, eine Prepulse-Entladung [9] vor der Hauptpulsentladung durchzuführen, um das Füllgas größtenteils vorzuionisieren, das heißt den Innenwiderstand zu senken und somit die Stromanstiegsgeschwindigkeit der Hauptentladung zu beschleunigen.

Hohlkathodenblitzlampe

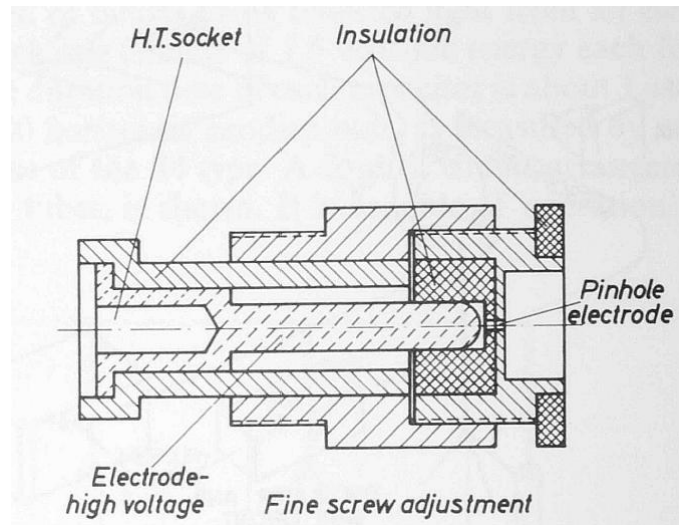


Abbildung 2: Skizze Hohlkathodenblitzlampe

[10]

Die Hohlkathodenblitzlampe [10] ist ein Exot unter den Blitzlampen und genießt ein Nischendasein. Sie wird kommerziell nur für kleine Entladungsleistungen gebaut und meist für die Einkopplung von Licht in Glasfasern konzeptioniert. Für den hier erforderlichen Anwendungsfall können kommerziell angebotene nicht eingesetzt werden, da die zulässige Entladungsenergie viel zu gering ist. Somit ist nur mehr der Selbstbau einer Hohlkathodenblitzlampe möglich. Aufgrund des einfacher zu realisierenden Aufbaus wird diese bei Atmosphärendruck betrieben. Die Beschreibung des Aufbaus ist in der Diplomarbeit [4] enthalten. Elektrisch verhält sie sich wie eine Standardblitzlampe, jedoch aufgrund des höheren Gasdruckes mit wesentlich erhöhten Spannungsfestigkeitswerten pro Längeneinheit. Dies führt zu einer nötigen Leerlaufspannung der Simmerung von 3-4kV/mm Elektrodenabstand der Hohlkathodenblitzlampe.

Der Simmerbetrieb unterscheidet sich jedoch dahingehend, dass der Simmerstrom nur einen leitfähigen Plasmakanal für die Hauptentladung zur Verfügung stellt, dieser bildet sich jedoch als Kriechentladung in der Kapillarbohrung des Isolators aus. Somit brennt das durch die Kapillarbohrung eingeschnürte Plasma direkt auf der

Oberfläche des Isolators und verdampft letzteren. Dieses Verdampfen kann unter Umständen zur Verstärkung des ausgesandten Lichtes ausgenutzt werden, wenn dem Isolationsmaterial Oxide von seltenen Erden beigemischt wurden.

Ebenso trägt das Elektrodenmaterial, das aufgrund des stark eingeschnürten Plasmakanals punktuell verdampft, zur Beeinflussung des ausgesendeten Lichtes bei. Beispielsweise erzeugt Kupfer eine grünliche Färbung der Plasmafackel. Über den Innendurchmesser der Kapillarbohrung im Isolator, die die Plasmaentladung einschnürt und somit in dieser Region den Entladungswiderstand erhöht, kann der zeitliche Mittelwert des Entladungswiderstandes eingestellt werden. Dies ist zum Erreichen einer asymptotischen, nicht oszillierenden Entladung notwendig. Aufgrund der kurzen Entladungsstrecke sowie deren Einschnürung können weit höhere Energiedichten als in Blitzlampen erreicht werden. Würde in Hohlkathodenblitzlampen nicht Luft, sondern Xenon als Betriebsgas eingesetzt werden, könnte eine Wirkungsgradsteigerung um circa den Faktor drei erreicht werden. Aufgrund des hohen Xenonpreises ist dies jedoch unrealistisch.

Anforderung an das Netzteil

Bedingt durch die flexiblen Verwendungsmöglichkeiten müssen folgende Anforderungen erfüllt werden:

- Die maximale dem Stromnetz entnehmbare Leistung soll auf 3,6kW begrenzt werden, um ein Auslösen der Leitungsschutzschalter beim Laden der Hochspannungskondensatoren zu vermeiden.
- Die Hochspannung soll mithilfe von kaskadierten Mikrowellenhochspannungstransformatoren geschehen, um die Kosten niedrig zu halten.
- Die Hochspannungskondensatoren sollen möglichst günstig, überlastbar und schnell sein. Idealerweise enthalten sie hochspannungsfeste Entladewiderstände.

- Der Betrieb von Spektrallampen soll mit bis zu 10mA sehr gut stabilisiertem Gleichstrom möglich sein, wobei die Leerlaufspannung so hoch sein muss, dass die Spektrallampe zündet.
- Der Betrieb von Blitzlampen unter Einsatz der Methode der Überspannungszündung soll in Kombination mit Prepulse- und Simmerbetrieb möglich sein. Hierbei ist zu beachten, dass die maximale Entladedauer 10 μ s nicht überschreitet, um die Option des Pumpens eines Farbstofflasers zu ermöglichen [5] [9] [6].
- Um einen möglichst großen Spektralanteil des von der Blitzlampe ausgesendeten Lichts im blauen bis grünen Spektralbereich zu haben soll eine Stromdichte in der Blitzlampe von circa 6000A/cm² angestrebt werden [11].
- Der Betrieb von Hohlkathodenblitzlampen unter Einsatz der Methode der Überspannungszündung soll in Kombination mit Simmerbetrieb möglich sein [10].
- Das gesamte Netzteil muss gegen diverse Fehlerfälle wie Übertemperatur, festgeklebte Relaiskontakte, Kurzschlüsse und dergleichen abgesichert sein, um die Gefahr für den Benutzer so klein wie möglich zu halten.
- Die Aussendung eines Blitzimpulses beziehungsweise die Aktivierung der Hochspannung muss vom Computer aus steuerbar sein.

Lösung

Gesamtschaltplan

Blockschaltbild Gesamtsystem

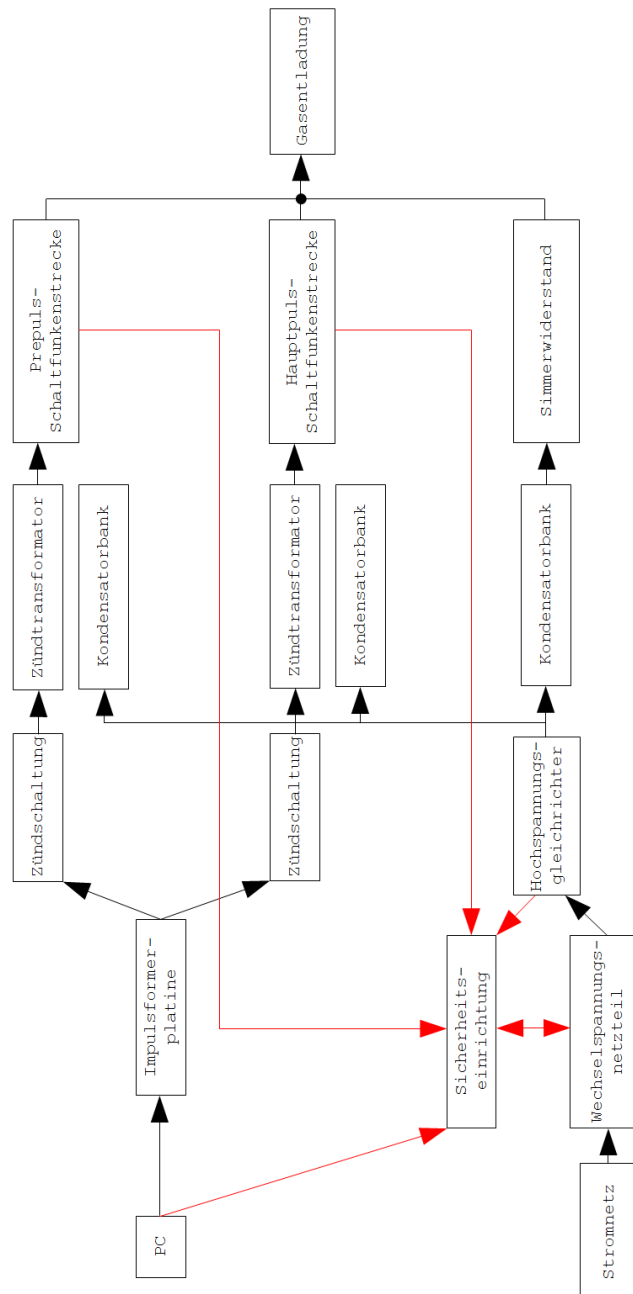


Abbildung 3: Blockschaltbild Gesamtsystem

Die einzelnen Blöcke sind Systemkomponenten, die folgend im Dokument beschrieben werden.

Da das hier vorgestellte Netzgerät aufgrund seiner vielfältigen Einsatzmöglichkeiten sehr komplex ist und viele Teilkomponenten selbst entwickelt wurden, wurde das Netzgerät in Einzelmodulen realisiert. Diese konnten somit einzeln aufgebaut und ihre technischen Eigenschaften überprüft werden, bevor sie in das Gesamtkonzept integriert wurden (siehe Abb. 3).

Im Schaltplan sind die Anschlussverbindungen der Module untereinander symbolisiert, wobei die roten Verbindungen die Rückmeldemöglichkeiten für anormale Betriebszustände an die Sicherheitseinrichtung darstellt.

Im Folgenden wird kurz anhand des Blockschaltbildes das Zusammenspiel der einzelnen Systemkomponenten umrissen.

Der PC, der hier als Steuerrechner dient, bedient die in der Diplomarbeit [4] beschriebene Spektrallampe sowie die Halte- beziehungsweise Dreheinrichtung der Maus und die Gasentladungssteuerung. Dabei hat der Computer zwei Steuereingänge am Netzgerät zur Verfügung. Der eine ist für die Aktivierung der Hochspannungsversorgung zuständig, wenn die Sicherheitseinrichtung sowie der Schlüsselschalter und der Notausschalter dies zulassen. Der zweite Eingang ist für das Auslösen eines Blitzlichtimpulses zuständig.

Die Impulsformerplatine leitet den vom PC kommenden Steuerimpuls an die zwei Zündschaltungen weiter. Dabei wird der Impuls, der an die Zündschaltung, die für die Hauptpulsentladung zuständig ist, einstellbar von 0-100 μ s verzögert. Weiters beinhaltet dieses Modul diverse Schaltungsteile, die die maximal an die Zündschaltung weitergegebene Pulsfrequenz sowie deren minimale und maximale Pulsdauer begrenzt.

Die Zündschaltungen erzeugen die Spannungsimpulse, die mithilfe der Zündtransformatoren auf einen steilflankigen Hochspannungsimpuls transformiert wird, der ein Zünden der jeweiligen Schaltfunkenstrecke ermöglicht.

Das Wechselspannungsnetzteil transformiert, so die Sicherheitseinrichtung dies zulässt, die vom Netz bereitgestellte Spannung in eine Hochspannung, die vom Hochspannungsgleichrichter gleichgerichtet wird. Die gleichgerichtete Hochspannung lädt die Simmer-, Prepuls- und Hauptpulshochspannungskondensatorbänke. Über den Simmerwiderstand, der im Hochspannungsgleichrichter integriert ist, kann ein konstanter Strom für das Simmern von Blitz- und Hohlkathodenblitzlampen sowie für den Betrieb von Spektrallampen bereitgestellt werden. Über die Prepuls- und Hauptpulsschaltfunkenstrecke können in einstellbarem zeitlichen Abstand Kondensatorentladungen durch die Blitzlampe abgegeben werden.

Aus Sicherheitsgründen wurden alle Schaltungsteile, die Hochspannung führen beziehungsweise in nahem Zusammenhang mit Hochspannung stehen, in eine geerdete Metallgitterumhüllung eingebaut. Weiters sind alle temperaturkritischen Komponenten mit Übertemperaturschaltern ausgerüstet.

Für eine detaillierte Darstellung wird auf das Kapitel Sicherheitseinrichtungen verwiesen (Seite 31).

Gesamtschaltplan Hochspannungsteil

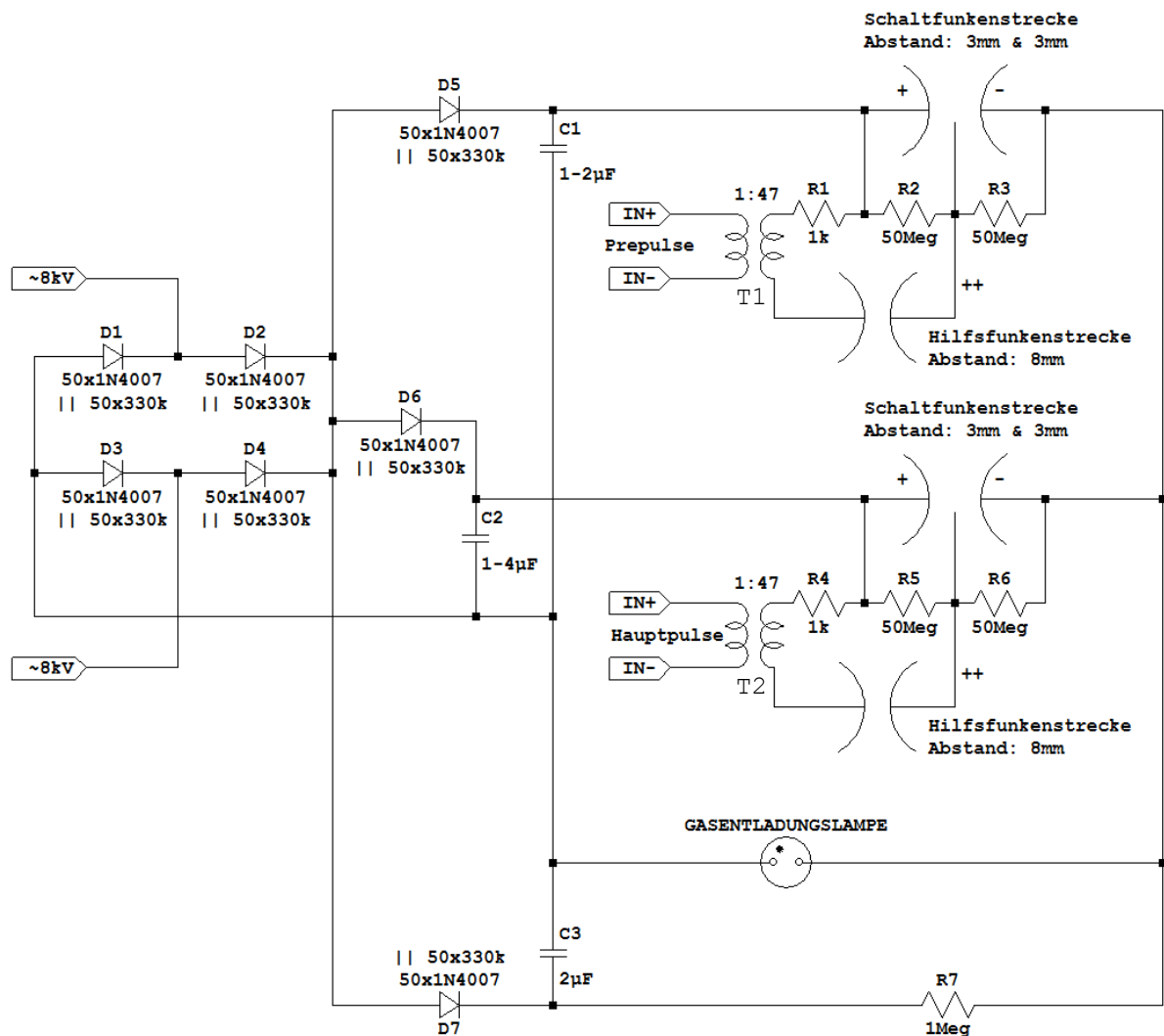


Abbildung 4: Gesamtschaltplan Hochspannungsteil

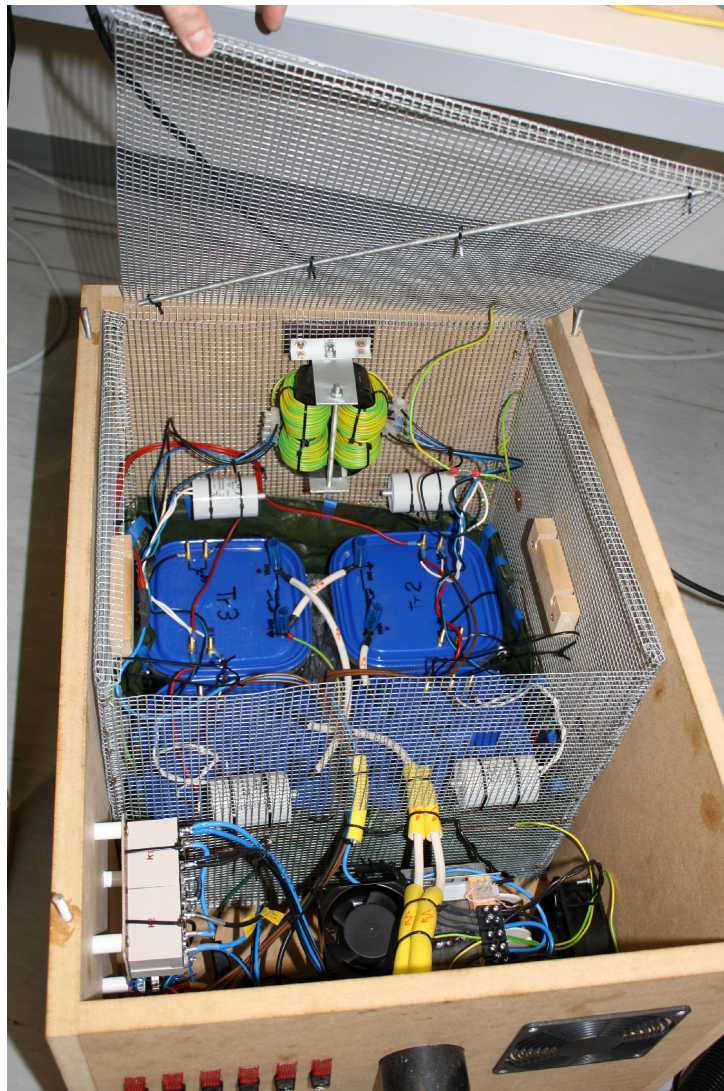
Die vom Wechselspannungsnetzteil zur Verfügung gestellte Hochspannung von circa $8kV_{\text{eff}}$ wird über einen Brückengleichrichter, bestehend aus vier Hochspannungsgleichrichterelementen (D1 - D4), die im Hochspannungsgleichrichter eingebaut sind, gleichgerichtet. Diese pulsierende Gleichspannung lädt über D5 die Prepulskondensatorbank, D6 die Hauptpulscondensatorbank sowie über D7 die Simmerkondensatorbank. Hierbei isolieren die Hochspannungsgleichrichterelemente D5, D6 und D7 die Kondensatorbänke gegeneinander und sie können zeitlich unabhängig voneinander entladen werden. T1, R1, R2, R3, die Prepulshilfsfunkenstrecke sowie die Prepulsschaltfunkenstrecke bilden das Hochspannungsschaltelement, um die Prepulskondensatorbank durch die

Gasentladungslampe zu entladen. T2, R4, R5, R6, die Hauptpuls Hilfsfunkenstrecke und die Hauptpulsschaltfunkenstrecke bilden das Hochspannungsschaltelement, um die Hauptpuls kondensatorbank durch die Gasentladungslampe zu entladen. R7 stellt den Simmerstrom für Blitzlampen beziehungsweise Betriebsstrom für Spektrallampen zur Verfügung und begrenzt ihn.

Sollten die Hochspannungsgleichrichterelemente D5, D6, D7 leitend sein, während ein Hochspannungsschaltelement zündet, müsste ein Hochspannungsgleichrichterelement sehr schnell vom leitenden in den Sperrzustand übergehen. Dies soll, um die Bauteile zu schonen, vermieden werden. Daher wird nur wenn D5 – D7 im Sperrzustand sind, ein Zünden der Hochspannungsschaltelemente durch die Impulsformerplatine freigegeben.

Wechselspannungsnetzteil

Als Wechselspannungsnetzteil wird hier die gesamte auf Rollen gelagerte, verschiebbare Holzbox, die die Wechselhochspannungserzeugung sowie die Sicherheitseinrichtungen enthält, bezeichnet. In diesem Abschnitt werden zuerst die Wechselhochspannungserzeugung und anschließend die diversen Sicherheitseinrichtungen behandelt (siehe Abb. 5).



*Abbildung 5: Gesamtansicht Wechselspannungsnetzteil
Der Metallkäfig beinhaltet die Hochspannungstransformatoren (blau).
Vorne links sind die Relais mit der Sicherheitseinrichtung zu sehen.
Vorne rechts der Streufeld-Trenntransformator mit Kühlung.
Auf der Frontplatte sieht man die Sicherungen mit Signalisierung.*

Wechselhochspannungserzeugung

Mit Hilfe der Wechselhochspannungserzeugung werden die nach der Gleichrichtung der Hochspannung befindlichen Hochspannungskondensatorbänke geladen. Im ungeladenen Zustand wirken die Hochspannungskondensatorbänke wie ein Kurzschluss und es würde über die Hochspannungstransformatoren ein unzulässig hoher Strom fließen, der zu einem Auslösen der Leitungsschutzschalter führen würde. Aus diesem Grund muss durch geeignete Maßnahmen eine Strombegrenzung geschaffen werden, die die aus dem Stromnetz entnommene maximale Leistung auf Werte begrenzt, die nicht zu einem Ansprechen der Leitungsschutzschalter führt.

Zwei Methoden sind dabei naheliegend:

- Einsatz eines Kaltleiters, der in Serie zur Primärseite der Hochspannungstransformatoren geschaltet wird.
- Einsatz eines Trenntransformators, der als Streufeldtransformator aufgebaut ist und an dessen Sekundärseite die Primärseiten der Hochspannungstransformatoren angeschlossen sind.

Als Kaltleiter werden für kleine Leistungen Halbleiterwiderstände mit großem, positiven Temperaturkoeffizienten eingesetzt. Diese sind jedoch nur für kleine Leistungen bis circa 200W verfügbar. Für große Leistungen, wie hier gefordert, würden sich Glühbirnen beziehungsweise Halogenstäbe anbieten, da diese ausreichend belastbar sind. Wolfram, aus dem zum Beispiel die Glühwendeln in Halogenstäben gefertigt sind, weist einen positiven Temperaturkoeffizienten von circa $4,8 \cdot 10^{-3}/K$ auf, und der Widerstandswert verdreifacht sich circa beim Übergang von kalt zu glühend. Dieser Effekt kann zur Strombegrenzung eingesetzt werden. Diese Methode der Strombegrenzung wurde erprobt, jedoch aufgrund des Problems der Wärmeabfuhr sowie konstruktiver Probleme nicht weiter verfolgt.

Der Einsatz eines Streufeldtransformators, der ein Übersetzungsverhältnis von 1:1 aufweist, also als Trenntransformator eingesetzt werden kann, liegt nicht auf der Hand, da solche Transformatoren selten eingesetzt werden und nur als Sonderanfertigungen erhältlich sind. Sie weisen jedoch den Vorteil auf, dass durch einen eingefügten magnetischen Nebenschluss, der maximale sekundärseitig entnehmbare Strom begrenzt wird. Der magnetische Nebenschluss wirkt so wie wenn man einem Trenntransformator sekundärseitig eine Induktivität in Serie schaltet. Diese Induktivität begrenzt den maximal sekundärseitig entnehmbaren Strom, verursacht jedoch keine nennenswerten thermischen Verluste.

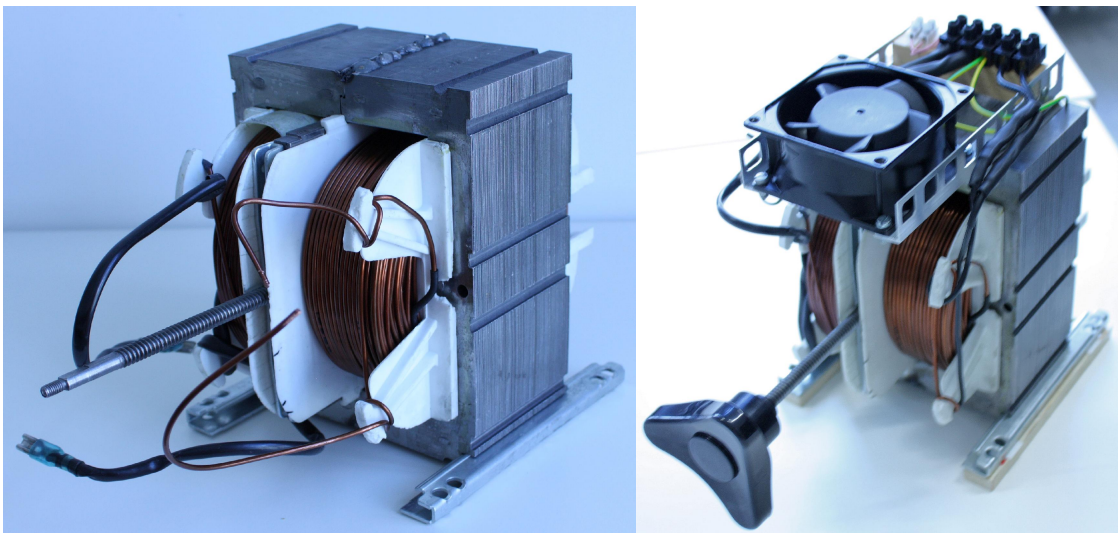
Wird dieser magnetische Nebenschluss verschiebbar ausgeführt, kann sekundärseitig der maximal entnehmbare Strom variiert werden. Das stellt das typische Prinzip eines normalen Wechselspannungshandschweißgerätes dar.

Diese Wechselspannungshandschweißgeräte weisen die Möglichkeit auf, sekundärseitig eine Leistung von circa 2-6kW einstellbar über einen mittels Gewindestange verschiebbaren magnetischen Nebenschlusses zu entnehmen. Somit kann der geforderte Anschlusswert des Netzgerätes an das Stromnetz (Standard 16A Leitungsschutzschalter der Auslösecharakteristik B) angepasst werden. Jedoch weist ein Wechselstromhandschweißgerät nur eine Leerlaufspannung von circa $40V_{\text{eff}}$ auf. Deshalb muss für den hier angestrebten Zweck die Sekundärseite neu bewickelt werden.

Da Schweißtransformatoren ein großserienmäßig hergestelltes Massenprodukt sind, ist der Eisenkern nicht gegensinnig geschichtet aufgebaut, sondern aus zwei verschweißten, laminierten E-Kernhälften hergestellt. Die Schweißnaht wurde mittels Einhandwinkelschleifers geöffnet und der Transformator in seine Einzelteile zerlegt. Wichtig ist dabei, dass aufgrund des Kostendruckes in der Produktion die Wicklung nicht aus Kupfer sondern aus Aluminium aufgebaut ist. Somit ist mehrmaliges Verbiegen der Anschlussdrähte der Primärseite zu vermeiden, da der Aluminiumlackdraht sehr viel leichter als Kupferlackdraht bricht und nur mit speziellen Aluminiumloten gelötet werden kann. Die Sekundärseite wurde mit einem

Draht, der den gleichen Querschnitt wie der Draht der Primärseite aufwies bewickelt, jedoch wurde statt des Alulackdrahtes ein Kupferlackdraht eingesetzt.

Die Anzahl der sekundär aufzubringenden Windungen wurde so ermittelt, dass der magnetische Nebenschluss komplett entfernt (der Streufeldtransformator also in einen „normalen“ Transformator umgebaut wurde) und die Sekundärspannung gemessen wurde. Nach dem Zerlegen des Transformators wurde die Sekundärseite vom Wicklungskörper abgewickelt und deren Windungsanzahl ermittelt. Es ergab sich eine Windungsspannung von circa einem Volt pro Windung. Das bedeutet, dass um einen Trenntransformator - beziehungsweise ein 1:1 Übersetzungsverhältnis zu erreichen - circa 230 Windungen sekundärseitig aufgebracht werden mussten. Nach dem Bewickeln, Zusammenbauen und Wiederverschweißen mittels MAG-Schweißgerät konnte die Funktion verifiziert werden (siehe Abb. 6).



*Abbildung 6: Streufeld-Trenntransformator
mit verschiebbaren magnetischem Nebenschluss und aktiver Kühlung*

Um die Gefahr für den Anwender etwas zu verringern, wurde der magnetische Nebenschluss so eingestellt, dass maximal circa 2kW sekundärseitig entnommen werden können. Da bei einem so starken magnetischen Nebenschluss der Kern magnetisch ausgelenkt wird, treten dabei die magnetischen Hystereseverluste stark in den Vordergrund und es kommt zu einer großen Eigenerwärmung des Kerns. Deswegen wird der Kern von zwei der Primärseite parallel geschalteten Ventilatoren aktiv gekühlt.

Die Primärseite weist den gleichen Querschnitt wie die Sekundärseite auf, ist jedoch aus Aluminium, das schlechter leitet als Kupfer, aufgebaut. Daher wird die Temperatur der Primärwicklung mittels Temperaturschalter überwacht, der bei Überschreiten einer Temperatur von 90°C das komplette Netzteil vom Netz trennt.

An die Sekundärseite des Streufeldtrenntransformators werden die vier parallelgeschalteten Primärseiten der Hochspannungstransformatoren angeschlossen. Diese Transformatoren sind modifizierte Mikrowellenherdtransformatoren, die zur Erhöhung der Isolationsfestigkeit in Paraffinöl [12] gelagert werden.

Ursprünglich waren die Transformatoren so aufgebaut, dass eine 230V Primärwicklung und zwei – eine davon 4V, die andere circa 2200V – Sekundärwicklungen vorhanden waren. Um die Isolationsstrecke zu vergrößern, wurde die 4V Wicklung, die im Mikrowellenherd normalerweise für die Heizung des Magnetrons zuständig ist, entfernt. Die 2200V Wicklung ist normalerweise auf einer Seite mit dem Kern verbunden. Diese Verbindung wurde aufgetrennt.

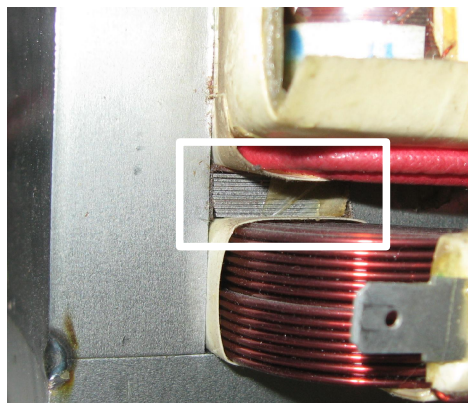


Abbildung 7: Magnetischer Nebenschluss Mikrowellentransformator

Die rote Wicklung ist die Heizwicklung des Magnetrons.

Vier Mikrowellentransformatoren wurden wie eben beschrieben modifiziert, und in vier Kunststoffgefäße eingebaut, die zur Erhöhung der Isolationsfestigkeit des Transformators mit Paraffinöl gefüllt wurden.

Transformatoren, die in Mikrowellenherden eingesetzt werden, versorgen über im Normalbetrieb über eine kapazitive Spannungsverdopplerschaltung das Magnetron

mit Spannung. Im Einschaltmoment wirkt der ungeladene Kondensator wie ein Kurzschluss und das Magnetron weist in Durchlassrichtung einen sehr kleinen differentiellen Widerstand auf (siehe Datenblatt [13]). Um eine Strombegrenzung zu erreichen, weisen die verwendeten Transformatoren einen magnetischen Nebenschluss auf (siehe Abb. 7). Somit sind auch Mikrowellentransformatoren Streufeldtransformatoren, wobei jedoch der magnetische Nebenschluss nicht einstellbar ist.

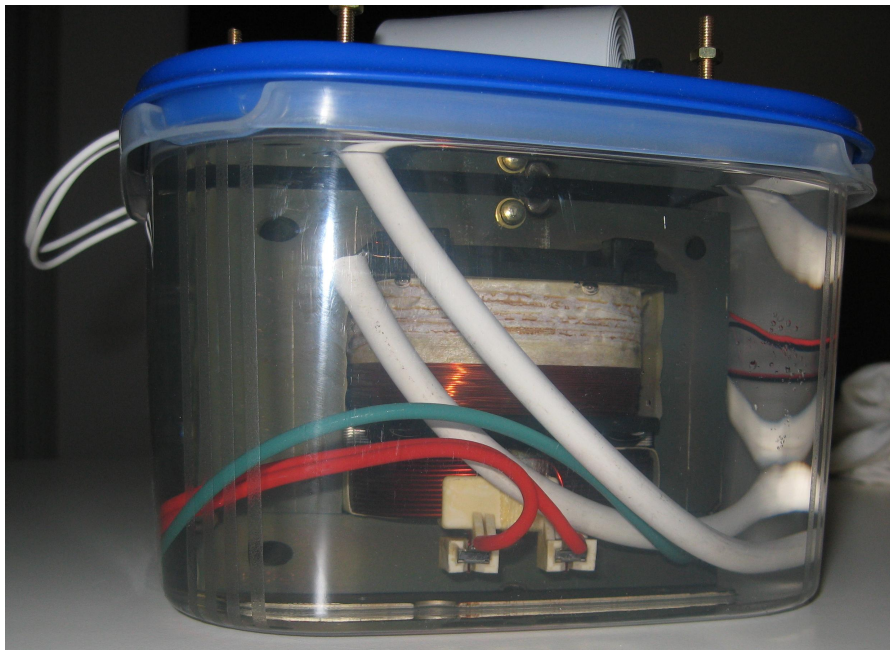


Abbildung 8: Modifizierter Mikrowellentransformator in Paraffinöl

Schaltplan Wechselhochspannungserzeugung

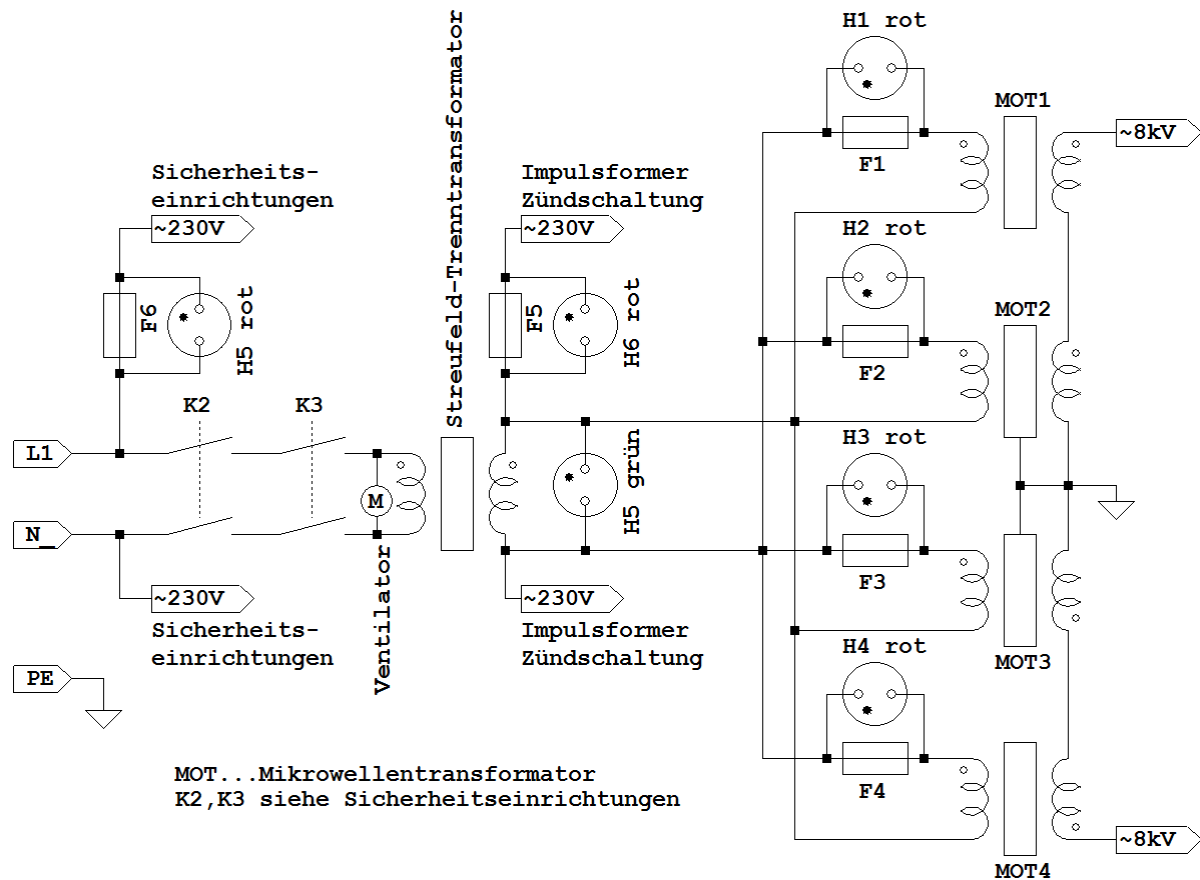


Abbildung 9: Schaltplan Wechselspannungsnetzteil

Der Streufeld-Trenntransformator, der mittels Sicherheitseinrichtung an das Stromnetz geschaltet werden kann, begrenzt die aus dem Stromnetz entnommene Leistung und stellt diese den vier modifizierten primärseitig parallel geschalteten Mikrowellentransformatoren zur Verfügung. Die Mikrowellentransformatoren transformieren diese in eine gegen Erde symmetrische gegenphasige Wechselspannung von jeweils $4kV_{\text{eff}}$. Hieraus ergibt sich, dass an den Hochspannungsgleichrichter eine Wechselspannung von $8kV_{\text{eff}}$ angelegt wird. Somit liegen an den Ausgängen des Hochspannungsgleichrichters circa $+6kV$ und $-6kV$ gegen Erde an.

Der Trenntransformator stellt auch die Versorgungsspannung für die Impulsformerplatine sowie die zwei Zündschaltungen zur Verfügung. Für die Sicherheitseinrichtungen wird auf das nachfolgende Kapitel verwiesen.

Sicherheitseinrichtungen

Um die Gefahr für den Anwender zu minimieren, wurde ein komplexes System aus verschiedenen Sicherheitseinrichtungen entwickelt. Dabei war besonders wichtig, die benutzerfreundliche Bedienbarkeit weiterhin zu gewährleisten. Im Folgenden werden die Sicherheitseinrichtungen nach Systemkomponenteneinteilung behandelt.

Allgemeine Sicherheitsvorkehrungen

Um die Anwesenheit von Hochspannung beziehungsweise die Aktivierung des Hochspannungsteils zu signalisieren, ist in der oberen Holzbox eine Signallampe eingebaut. Weiters kann die Hochspannung nur nach Freigabe mittels Schlüsselschalter und Freigabe des Notausschalters aktiviert werden. Es wird empfohlen, das Hochspannungsnetzgerät nur bei Vorhandensein einer zweiten, mit Hochspannung vertrauten Person in Betrieb zu nehmen, um bei einem möglichen Hochspannungsunfall eine Erstversorgung zu gewährleisten. Diese Person sollte über die nötigen Schritte zur Abschaltung der Hochspannung informiert sein und keinen leitfähigen, nicht geerdeten Kontakt zur anderen Person haben. Zusätzlich wird empfohlen, dass die Person, die vom Hochspannungsnetzteil am weitesten entfernt ist, den Notausschalter einsatzbereit in der Hand hält. Sollte an der Apparatur in der Nähe von aktivierter Hochspannung gearbeitet werden, so ist einhändig vorzugehen, wobei idealerweise ein dicker, nicht leitender Handschuh getragen wird und isolierendes Werkzeug verwendet wird. Im Idealfall ist der eingesetzte Arm niederohmig mit einem Metallband geerdet, sodass bei einem Stromunfall Verletzungen auf den Bereich zwischen Einschlagsort und der Erdung begrenzt sind.

Wechselspannungsnetzteil

Da diese Systemkomponente die Schnittstelle zwischen den restlichen Systemkomponenten und dem Stromnetz darstellt, und weiters in diesem die Hochspannungserzeugung integriert ist, erfordert dieses Systemkomponente eine besondere Absicherung gegen Fehlerfälle.

Da vor Anschluss des Gesamtgerätes an das Stromnetz alle in diesem verbauten Energiespeicher beziehungsweise Kondensatoren ungeladen sind, ist im Einschaltmoment mit einer großen Einschaltstromspitze zu rechnen. Dies könnte zum Fehlerfall des Verklebens der Relaiskontakte des Relais, das den Trenntransformator vom Stromnetz trennt, führen. Sollte dies passieren, könnte der Trenntransformator mit den an diesen angeschlossenen Hochspannungstransformatoren nur mehr durch mechanisches Trennen vom Stromnetz beispielsweise „Stecker ziehen“ getrennt werden. Somit wäre die Notausfunktion wirkungslos.

Um diesen Fehlerfall sicher auszuschließen, wurden die Kontakte zweier stark überdimensionierter Relais in Serie geschaltet, wobei durch elektronische Beschaltung sichergestellt wurde, dass ein Relais immer lastlos schaltet. Das bedeutet, dass das lastlos schaltende Relais zuerst ein beziehungsweise zuletzt ausschaltet (siehe Abb. 10).

Im Wechsellspannungsnetzteil sind weiters integriert der Trenntransformator sowie vier Hochspannungstransformatoren. Der Trenntransformator begrenzt die von den Hochspannungstransformatoren dem Netz entnehmbare Leistung. Somit fließt über den Trenntransformator so gut wie die gesamte vom Netz entnommene Leistung und erwärmt ihn. Sollte sekundärseitig ein Kurzschluss auftreten, der nicht zu einem Auslösen der Sicherungen der Primärseite der Hochspannungstransformatoren führt, könnte sich der Trenntransformator unzulässig stark erwärmen. Mögliche hieraus entstehende Brandgefahr wird durch ein Überwachen mittels Übertemperaturschalter erreicht. Der Übertemperaturschalter trennt, wenn die Primärwicklung des Trenntransformators 90°C erreicht, die Stromversorgung der Sicherheitsschaltung. Dies führt zur Trennung des gesamten Netzgerätes vom Stromnetz (siehe Abb. 10).

Die Hochspannungstransformatoren sind in Paraffinöl gelagert. Dieses ist brennbar, weshalb eine Überhitzung zuverlässig vermieden werden muss. Deshalb weist jeder der vier Hochspannungstransformatoren eine Übertemperaturabschaltung bei 70°C auf. Auch diese Übertemperaturschalter führen zu einer Trennung der Stromversorgung der Sicherheitsschaltung (siehe Abb. 10). Jeder Primärseite der

Hochspannungstransformatoren ist eine Sicherung in Serie geschaltet, die so dimensioniert wurde, dass ein sekundärseitiger Kurzschluss zum Auslösen der Sicherung führt. Der Sicherung wurde eine 230V Glimmlampe parallel geschaltet, die den Defekt einer Sicherung anzeigt. Auf der Hochspannungsseite der Transformatoren können keine Sicherungen eingebaut werden, da sie beim Auslösen einen Lichtbogen erzeugen würden. Um die Gefahr, die von der sekundärseitigen Hochspannung ausgeht zu minimieren, wurde der gesamte Hochspannungsteil in eine Metallumhüllung, die aus einem Metallgitter mit einer Maschenweite von 5mm besteht, eingebaut. Diese Metallumhüllung wurde geerdet.

Schaltplan Sicherheitseinrichtungen

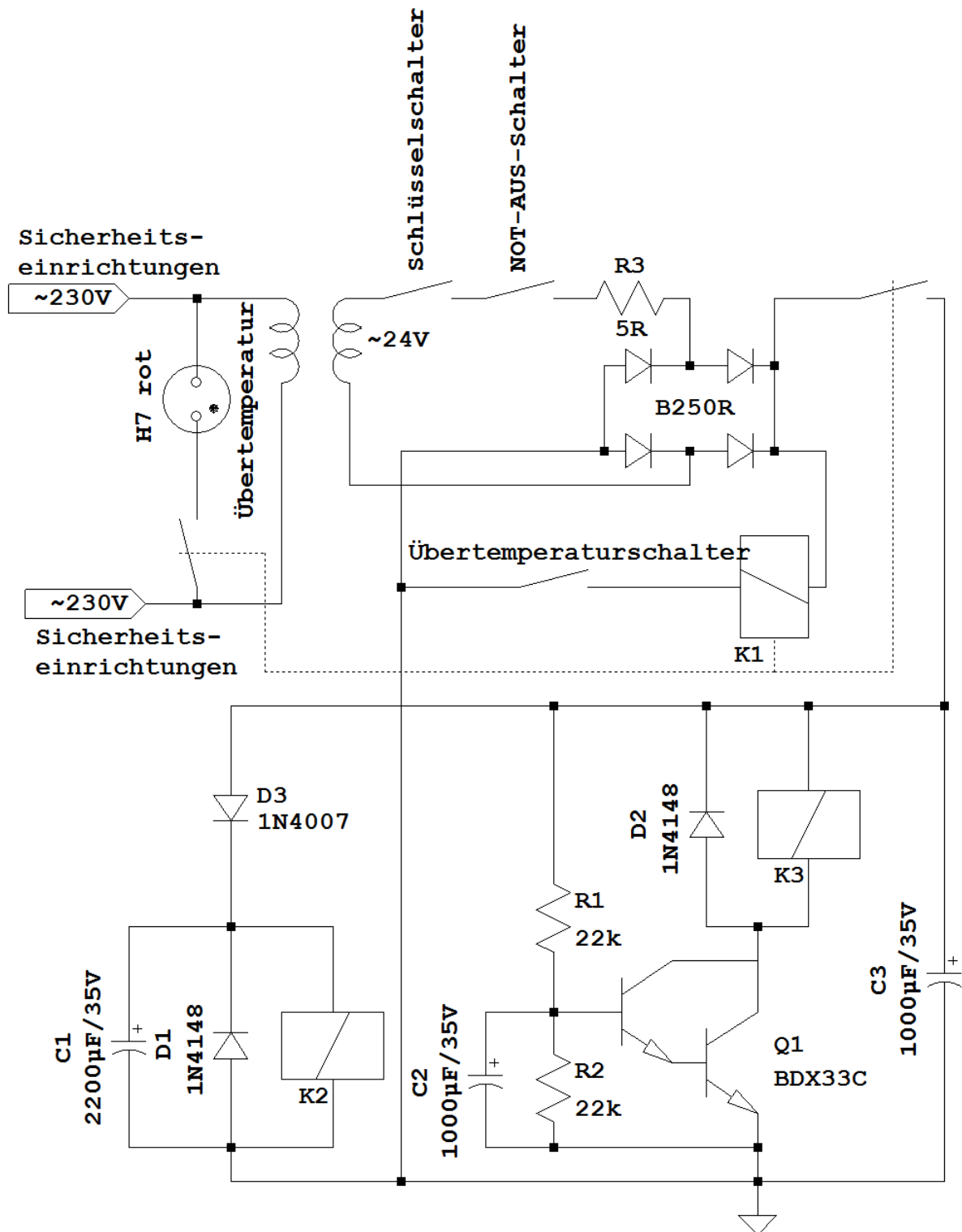


Abbildung 10: Schaltplan Sicherheitseinrichtungen

Sobald das Wechsellspannungsnetzteil mit dem Stromnetz verbunden wird, ist diese Schaltung aktiv. Wird der Notausschalter gelöst und mittels Schlüsselschalter freigegeben, wird wenn keine Übertemperatur in einem der Module vorliegt, mittels K1 die Versorgungsspannung an die in Serie geschalteten Relais die den Trenntransformator vom Stromnetz trennen, gelegt. K2 in Verbindung mit D1 und C1 sorgt für ein schnelles Einschalten und langsames Abfallen von K2. K3 in Verbindung mit R2, R3, C2 und Q1 sorgt für ein langsames Einschalten und schnelles Abfallen von K3. Hieraus ist ersichtlich, dass K2 vor K3 einschaltet, und K2 nach K3 ausschaltet. Dies bewirkt, dass K2 immer lastlos schaltet, wodurch ein Verschweißen der Kontakte von K2 zuverlässig verhindert wird. K2 dient hierbei als Reserve beziehungsweise Schutzrelais, um ein sicheres Trennen des Trenntransformators vom Stromnetz zu gewährleisten.

Hochspannungsgleichrichter

Der Hochspannungsgleichrichter, der den Simmerwiderstand beinhaltet, ist aus isolationstechnischen Gründen mit Paraffinöl gefüllt. Daher muss, wie bereits bei den Hochspannungstransformatoren ausgeführt, besonderer Wert auf die Übertemperaturschaltung gelegt werden.

Hochspannungskondensatorbank

Die Hochspannungskondensatorbank stellt sicherheitstechnisch eine besondere Gefahr dar, da in ihr die für die Entladung benötigte Energie gespeichert wird. Pro Kondensatorbank können bis zu 72J bei 12kV gespeichert werden. Die besondere Gefahr liegt darin, dass schon eine Annäherung des Anwenders wenige Millimeter zu den Kondensatorbänken zu einem Funkenüberschlag führen kann, der potentiell tödlich ist. Deshalb sind die Hochspannungskondensatorbänke in eine geerdete Umhüllung aus einem Metallgeflecht mit 5mm Maschenweite eingebaut. Die Maschenweite soll sicherstellen, dass auch das versehentliche Hineingreifen mit einem Finger zuverlässig verhindert wird.

Schaltfunkenstrecke

In der Schaltfunkenstrecke findet ein Funkenüberschlag statt, der möglicherweise zu einer Zerstörung des Glases mit möglichem Splitterflug führen kann. Aus diesem Grund, und damit eine Berührung durch den Anwender verhindert wird, ist auch die Schaltfunkenstrecke in eine Metallgeflechtumhüllung eingebaut.

Zudem muss man immer darauf achten, dass eine Schaltfunkenstrecke auch fehl auslösen kann und daher an alle Schaltungsteile, die mit ihr verbunden sind, nur im spannungslosen beziehungsweise entladenen Zustand gearbeitet werden darf.

Zündtransformator

An den Zündtransformator werden isolationstechnisch besondere Anforderungen gestellt, weil er die Zündschaltung von dem Hochspannungs-Hochleistungsteil um die Schaltfunkenstrecke isoliert. Dies wurde durch eine mehrfache Überdimensionierung der Isolationsstrecke zwischen Primär- und Sekundärwicklung erreicht. Weiters wurde, um eine Selbstheilung der Isolation sicherzustellen, der Zündtransformator mit Paraffinöl gefüllt.

Zündschaltung

Bei der Zündschaltung ist besonders die galvanische Trennung zwischen dem Impulseingang, der an den steuernden Computer angeschlossen wird und der Zündtransformatoransteuerung wichtig. Aufgrund der Anschlussbelegung des als Schaltelement dienenden Leistungsthyristors liegt dessen Kühlkörper auf einem für Menschen potentiell gefährlich hohem Potential. Um trotzdem für den Anwender eine gewisse Sicherheit gewährleisten zu können, wird diese Schaltung über einen Trenntransformator, der aus vier Transformatoren à 15W aufgebaut ist, galvanisch getrennt versorgt (siehe Abb. 34 auf Seite 64). Weiters ist diese Schaltung ebenso wie die Hochspannungskomponenten in eine geerdete Metallumhüllung berührungssicher eingebaut.

Impulsformerplatine

Die Impulsformerplatine wird nur mit Sicherheitskleinspannung aus einem Transformator versorgt und mit den galvanisch getrennten Eingängen der Zündschaltung beziehungsweise dem steuernden Computer verbunden. Somit können von dieser Schaltung keine nennenswerten Gefahren ausgehen.

Hochspannungsgleichrichter

Der Hochspannungsgleichrichter hat die Aufgabe, die Wechselhochspannung in Gleichhochspannung umzuwandeln und weiters die drei Kondensatorbänke (Simmer-, Prepuls- und Hauptpuls-kondensatorbank) so zu laden, dass die Kondensatorbänke unabhängig voneinander auf beliebige Art und Weise entladen werden können. Die Simmerkondensatorbank soll über den Simmerwiderstand entladen werden, und die Prepuls- und Hauptpuls-kondensatorbank über die Schaltfunkenstrecken.

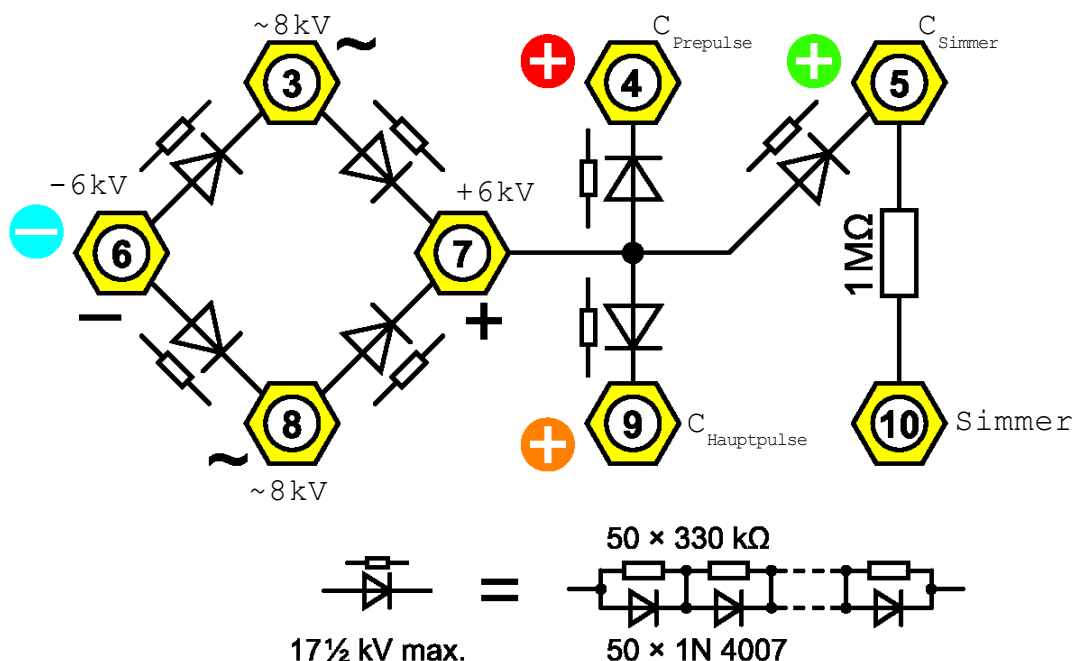


Abbildung 11: Hochspannungsgleichrichterschaltplan
mit Anschlussbelegung

Die elektrisch robusteste Methode der Gleichrichtung ist der Einsatz von Röhrentechnik. Hierbei können Vakuum-, Gas-, oder Quecksilbergleichrichter eingesetzt werden, wobei jedoch zwei zu lösende Probleme auftreten:

- Kühlung
- Hochspannungsisolierte Transformatoren für die Kathodenheizung

Da an der Anode der Gleichrichterröhre eine hohe Verlustleistung auftritt, müssten die Röhren aktiv über Ventilatoren gekühlt werden. Die auftretende Verschmutzung durch Staubablagerungen würde einen zuverlässigen Betrieb auf Grund der Ausbildung von Kriechstreifen sehr erschweren. Außerdem sind die hochspannungsisolierten Heiztransformatoren nicht marktüblich und müssten somit sonderangefertigt werden, wodurch hohe Kosten entstehen würden. Weiters ist die zukünftige Verfügbarkeit von Hochspannungsgleichrichterröhren ungeklärt.

Aus diesen Gründen fiel die Wahl auf Hochspannungsgleichrichter auf Halbleiterbasis. Da keine Hochspannungsdioden mit für diesen Anwendungsfall geeigneten technischen Daten gefunden werden konnte, wurde der Selbstbau vorgezogen.

Die Wahl fiel auf eine Serienschaltung von 50 Stück 1N4007 Standardgleichrichterdioden. Um diese für Gleichspannung zu symmetrieren, wurde zu jeder Diode ein Widerstand von 330k Ω parallel geschaltet. Somit besteht ein Hochspannungsgleichrichterelement aus 50 Dioden und 50 Widerständen. Um dieser Konstruktion mechanische Stabilität zu verleihen, wurden die Dioden auf der einen und die Widerstände auf der gegenüberliegenden Seite eines Glasstabes mit Hilfe von „Uhu plus endfest 300“ fixiert.

Eigenschaften „UHU plus endfest 300“:

Klebefestigkeit (ausgehärtet bei Raumtemperatur):	1700N/mm
Temperaturbeständigkeit:	200°C
Spezifischer Widerstand:	5,6-5,8 $\times 10^{13}$ Ω -cm
Beständigkeit gegen viele Lösungsmittel, verdünnte Säuren und Laugen.	

Im folgenden wird die Montage einer Hochspannungsdiode beschrieben:

1. Eine ein Meter lange M6-Gewindestange wurde in der Länge halbiert, die 2 Hälften parallel angeordnet und durch Abstandshalter voneinander separiert, sodass die Widerstände beziehungsweise Dioden verrutschsicher aufgelegt werden konnten.
2. Nachdem die Widerstände parallel aufgelegt worden waren, wurde ein Glasstab mit einem Durchmesser von 4mm passend zugeschnitten. Hierzu wurde der Glasstab mittels einer Dreikantfeile rundherum eingeritzt und anschließend vom Körper weg abgebrochen. Um die Schnittgefahr zu verringern, wurde die Schnittkante mit einem 220er-Nassschleifpapier nass geschliffen. Weiters wurde, um die sehr glatte Oberfläche des Glasstabes aufzurauen, diese ebenfalls mit 220er-Nassschleifpapier nass geschliffen.
3. Der Glasstab wurde mit Spiritus entfettet, anschließend mit „UHU plus endfest 300“ auf einer Längsseite bestrichen und vorsichtig auf die Widerstände gelegt (siehe Abb. 12). Das Aushärten dauerte bei Raumtemperatur circa 24 Stunden.
4. Die Anschlussdrähte der Widerstände wurden gebogen, abgelängt und verlötet.
5. Die Dioden wurden in abwechselnder Ausrichtung parallel auf die Gewindestangen gelegt.
6. Die noch unbeklebte aufgeraute Seite des Glasstabes wurde mit Spiritus entfettet, anschließend mit „UHU plus endfest 300“ bestrichen und vorsichtig auf die Dioden gelegt.
7. Nach circa 24 Stunde wurden die Anschlussdrähte der Dioden gebogen, abgelängt und verlötet (siehe Abb. 13).

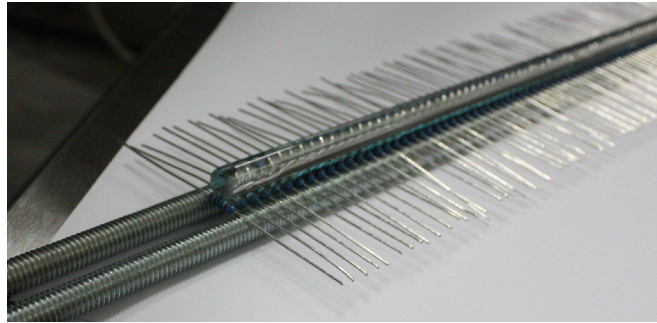


Abbildung 12: Montage Hochspannungsdiode

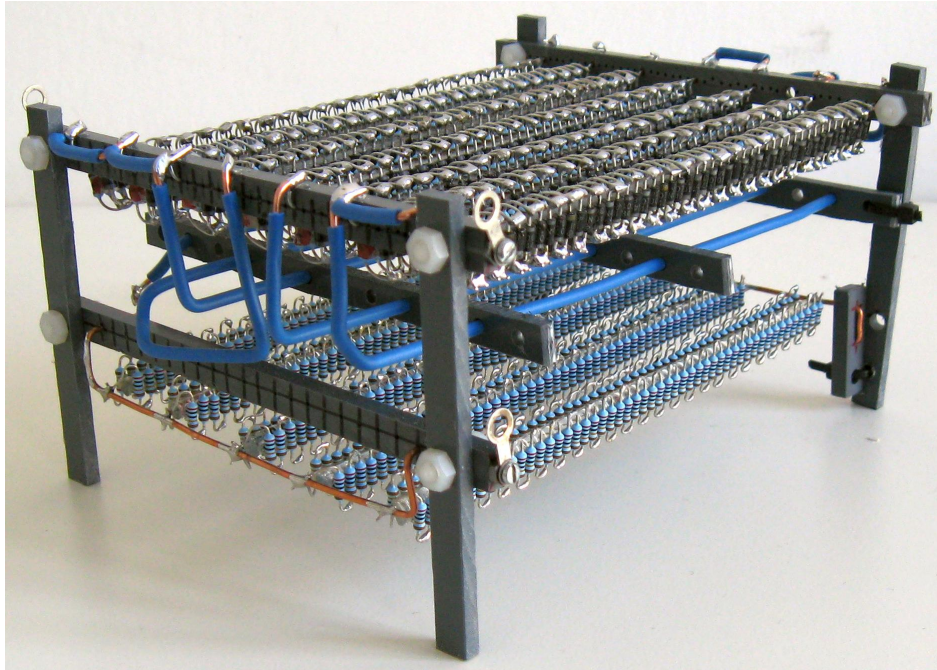
Da die Flussspannung einer 1N4007 circa 0,6V beträgt, weist eine nach der oben beschriebenen Anweisung aufgebaute Hochspannungsdiode (siehe Abb. 13) eine Flussspannung von circa 30V auf. Um den fehlerfreien Aufbau der Hochspannungsdioden zu überprüfen, wurde diese in Serie mit einer 60W-Glühbirne an die gleichgerichtete Ausgangsspannung eines Trenntransformators so angeschlossen, dass die Glühbirne leuchtet und mit einem Voltmeter die Flussspannung nämlich circa 30-40V, überprüft.

Anschließend wurde die Hochspannungsdiode umgepolt und somit in Sperrrichtung betrieben. Da zu den Dioden Widerstände parallelgeschaltet sind, wurde deren korrekter Anschluss durch Messen der an den Dioden anliegenden Sperrspannung ermittelt. Diese beträgt circa 1/50 der an die Hochspannungsdiode angelegten Spannung. Bei korrekter Ausführung der Hochspannungsdiode liegt an allen Dioden aufgrund des parallel geschalteten Widerstandsspannungsteiler eine gleich große Sperrspannung an.



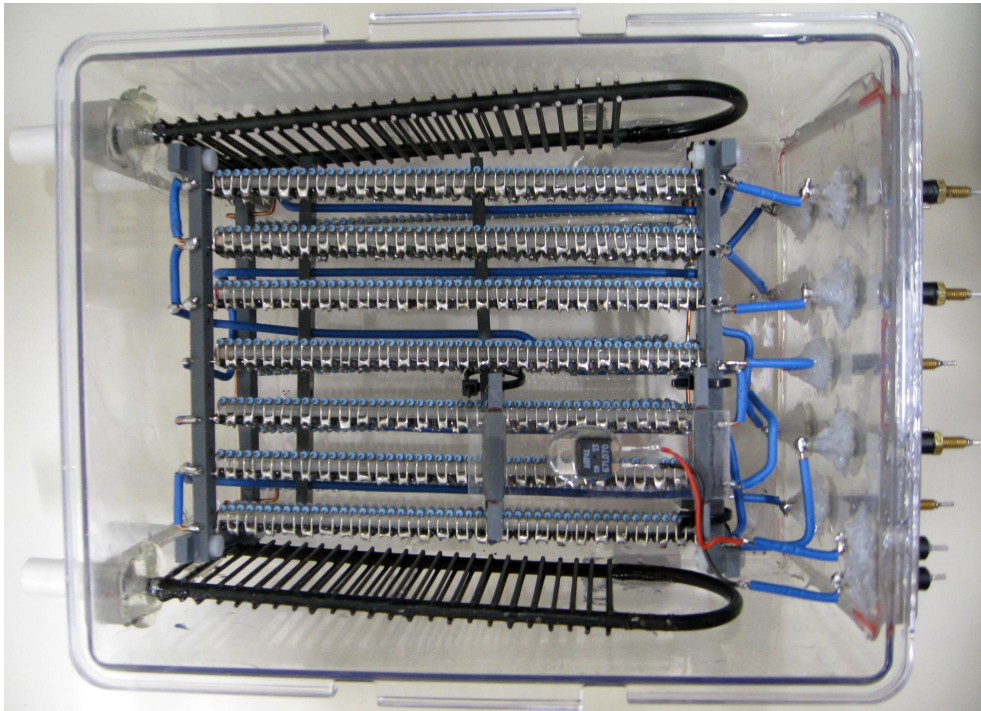
*Abbildung 13: Hochspannungsgleichrichterelemente
Ober- und Unterseite*

Um die 7 Stück Hochspannungsgleichrichterelemente, die eine Verlustleistung von circa 5W pro Stück haben, ausreichend kühlen sowie elektrisch isolieren zu können, wurden sie in eine Plastikbox eingebaut und die Box mit Paraffinöl gefüllt. Da in dieser Box noch Platz war, wurde auch der Simmerwiderstand, der eine Verlustleistung von circa 140W aufweist, in die Box eingebaut (siehe Abb. 14).



*Abbildung 14: Innerer Aufbau des Hochspannungsgleichrichters
7 Hochspannungsgleichrichterelemente oben und
10 parallelgeschaltete 10MΩ-Hochspannungswiderstände unten,
die den Simmerwiderstand bilden*

In der Hochspannungsgleichrichterbox wird im Durchschnitt eine Leistung von circa 150W in Wärme umgewandelt. Diese heizt das Paraffinöl (circa 3,5 Liter) auf. Um ein Überhitzen und eine dadurch möglicherweise entstehende Brandgefahr zu vermeiden, wurde eine Übertemperaturabschaltung (siehe Abb. 15) integriert. Diese trennt bei Erreichen einer Temperatur des Paraffinöls von 70°C den Trenntransformator, an den die Hochspannungstransformatoren angeschlossen sind, vom Netz. Um die Betriebszeit zu verlängern, muss die Paraffinöltemperatur niedrig gehalten werden. Dazu wurden zwei Kühlschlangen in die Box eingebaut, die aus Teilen eines Kühlschranks gefertigt sind, was zusätzlich den Aufbau einer Wasserkühlung ermöglicht (siehe Abb. 15).



*Abbildung 15: Hochspannungsgleichrichterbox Innenansicht
oben und unten: Kühlschlangen*

Mitte unten rechts: Übertemperaturabschaltung bei 70°C

rechts: Hochspannungsdurchführungen, innen aus Silikon, außen aus Epoxidharz gefertigt

Die Innenseite der Box wurden mit einer 10mm PMMA-Platte verstärkt. Diese wurde vollflächig mittels 5-Minuten-Eboxy mit dem ABS-Gehäuse vergossen. Nach dem Aushärten wurden die Löcher für die Gewindestangen gebohrt und die M4-Gewinde geschnitten.

Die Durchführungen der elektrischen Anschlüsse bestehen aus M4-Messing-Gewindestangen. Diese wurden in die Kunststoffgewinde der Boxseite mit 5-Minuten-Eboxy eingeklebt. Auf der Außenseite der Box wurden, um die Kriechstrecken zu verlängern, Kunststoffhülsen über die Gewindestangen geschoben und mit 5-Minuten-Eboxy vergossen (siehe Abb. 16). Auf der Innenseite der Box wurden die Gewindestangen nach dem Anlöten der Verbindungskabel mit neutral vernetzendem Silikon vergossen (siehe Abb. 15 rechter Bildteil).

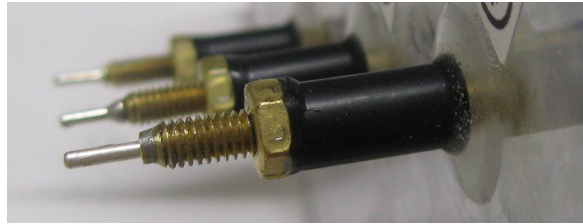


Abbildung 16: Hochspannungsdurchführung

Durch den Einsatz von zwei Klebstoffen, die einen unterschiedlichen chemischen Aufbau und unterschiedliche chemische Beständigkeiten aufweisen, sollte eine sichere und dauerhafte Abdichtung gegeben sein.

Hochspannungskondensatorbank

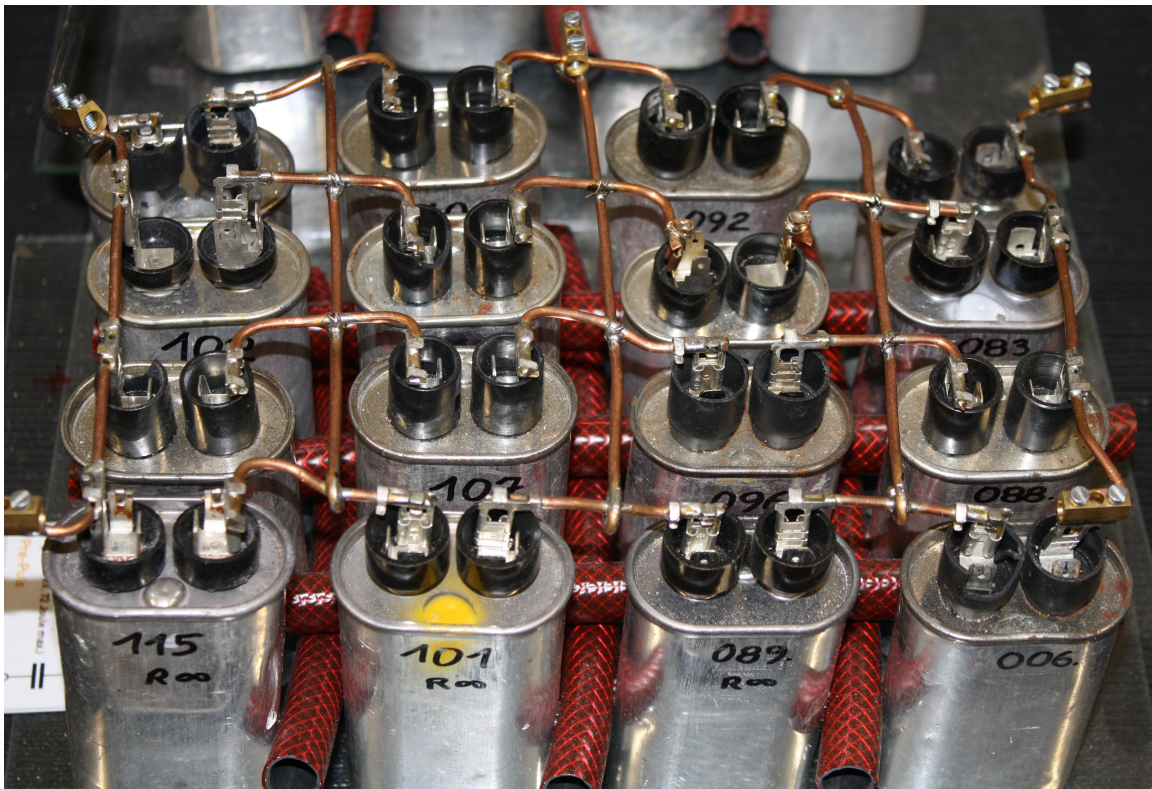
Reguläre Hochspannungskondensatoren sind relativ teuer und schwer beschaffbar. Deshalb musste für dieses Projekt auf weit verbreitete, hochspannungsfeste Mikrowellenkondensatoren zurückgegriffen werden. Da auch diese, wenn sie als Ersatzteil bezogen werden, teuer sind, wurde ungeprüfte Ausschlichtware zu Kilopreisen verwendet. Die Kondensatoren wurden mechanisch gereinigt, und anschließend deren elektrische Parameter ermittelt (siehe Anhang Seite 90).

Da sechs möglichst gleiche Kondensatorbänke zu je 16 Kondensatoren benötigt wurden, wurden die Kondensatoren passend ausgewählt und verbunden. Besonders wichtig dabei war, dass die Gehäuse der Kondensatoren einen konstanten Abstand aufweisen, um Überschlänge zwischen den Gehäusen der Kondensatoren zu verhindern. Dies war insbesondere deshalb wichtig, da viele der verwendeten Kondensatoren zwischen dem Gehäuse und einem Kondensatoranschluss eine Diode eingebaut haben. Somit kann das Gehäuse auf einem Hochspannungspotential liegen.

Um den konstanten Abstand zwischen den Kondensatorgehäusen sicherzustellen, wurden Gartenschlauchabschnitte als Puffer verwendet, dies weil sie aus nicht leitendem Material bestehen, das äußerst günstig und elastisch ist.

Um die Kondensatorbänke isoliert in das Hochspannungsnetzteil einbauen zu können, wurden sie mit doppelseitigem Klebeband („Glaserband“) auf eine 4mm starke Glasscheibe geklebt. Somit können die Kondensatorbänke wie in einem Schubladensystem sehr leicht eingeschoben und wieder entfernt werden.

Die einzelnen Kondensatorbänke wurden so aufgebaut, dass jeweils vier Kondensatoren parallel, sowie vier solcher Gruppen in Reihen geschaltet wurden (siehe Abb. 17). Da jeder Kondensator eine Spannungsfestigkeit von mindestens 3kV Gleichspannung aufweist, und eine Kapazität von circa $1\mu\text{F}$ aufweist, hat die Kondensatorbank wieder $1\mu\text{F}$, jedoch mit einer Spannungsfestigkeit von 12kV und kann somit 72 Joule elektrische Energie speichern.



*Abbildung 17: $1\mu\text{F}$ -Kondensatorbank mit Isolationsspacer
Spannungsfestigkeit mindestens 12kV*

Wie in Abb. 17 zu sehen ist, wurden die Kondensatoren sternförmig miteinander verbunden, um das Fließen möglicher Ausgleichsströme durch Bauteiltoleranzen zu ermöglichen.

Schaltfunkenstrecke

Um große Impulsleistungen im Megawatt Bereich schalten zu können, muss ein möglicher Schalter folgende Eigenschaften aufweisen:

- Schaltspannung im Kilovoltbereich
- Schaltstrom im Kiloamperebereich
- Widerstand im geschlossenen Zustand kleiner $0,1 \Omega$

Soll diese hohe Impulsleistung bei möglichst wenig gespeicherter Energie erzeugt werden, muss der Entladekreis möglichst induktivitätsarm aufgebaut werden. Dies verursacht eine große Stromanstiegsgeschwindigkeit im $\text{kA}/\mu\text{s}$ Bereich.

Da, wie im Kapitel Wechselhochspannungserzeugung beschrieben der Trenntransformator auf eine übertragbare Leistung von circa 2kW eingestellt ist, und eine $1\mu\text{F}$ -Kondensatorbank bei 12kV 72J Energie speichern kann, ist eine Schaltfrequenz von mindestens 25Hz erforderlich, um die 2kW aus dem Stromnetz entnehmen zu können.

Hieraus ergeben sich weitere Eigenschaften, die der Hochspannungsschalter erfüllen muss:

- möglichst schneller Übergang vom sperrenden in den leitenden Zustand
- möglichst geringer Schaltverzug
- möglichst geringer Schaltjitter
- Schaltfrequenz bis 25Hz möglich

Aus den oben genannten Kriterien lässt sich ableiten, dass Halbleiter wie IGBTs oder Standardthyristoren ausscheiden. Die einzige Möglichkeit, Halbleiter zu verwenden, stellen spezielle Hochspannungsthyristoren mit sternförmiger Gatezündung dar, da

diese Stromanstiegsgeschwindigkeiten, wie sie hier auftreten, verkraften können. Allerdings sind diese von ABB gefertigten Hochspannungsschalter extrem teuer und noch im Experimentalstadium.

Die einzige robuste Methode, schnelle Hochleistungsimpulse zu schalten, stellt nach wie vor die Röhrentechnik dar. Folgende Röhren könnten beispielsweise für diesen Anwendungsfall eingesetzt werden:

- Ignitron
- Duratron
- Krytrons
- Sprytron
- Kaltkathodenthyratron

Das Ignitron, das Duratron und andere könnte man einsetzen, da diese jedoch hauptsächlich während des Zweiten Weltkrieges und kurz danach produziert wurden und später durch den Halbleiterboom verdrängt wurden, sind sie kaum noch zu beschaffen. Um von der Versorgungslage unabhängig zu werden, wurde entschieden, einen solchen Schalter selbst zu bauen.

Wegen des relativ einfachen Aufbaus fiel die Wahl auf ein Kaltkathodenthyratron. Der gebräuchlichere Name hierfür ist „Schaltfunkenstrecke“. Um den Aufbau einfach und die Länge des Entladekanals kurz zu halten, wurde beschlossen, bei Atmosphärendruck zu arbeiten. Eine besondere Herausforderung stellt dabei das Zünden der Schaltfunkenstrecke dar, da diese möglichst schnell vom sperrenden in den leitenden Zustand bei einem möglichst geringen Schaltwiderstand übergeführt werden soll.

Funkenwiderstand nach Toepler [14]:

$$R_F(t) = \frac{k \cdot L}{\int_0^t i(t) dt} \quad k_{Luft} = 0,00008 \frac{Vs}{m} \quad L \dots \text{Elektrodenabstand in mm} \quad [1]$$

Dieses Gesetz stellt eine gute Näherungsformel für den zeitlichen Verlauf des Funkenwiderstandes dar. Es ist nur für kurzzeitige stromstarke Kondensatorentladungen gültig. Statische Lichtbogenwiderstände können hiermit nicht berechnet werden.

k ist die Funkenkonstante, die von der Gaszusammensetzung sowie der Temperatur abhängig ist. Sie kann aus Tabellen wie zum Beispiel [15] entnommen werden.

Funkenwiderstand nach Toepler am Ende der Entladung [14]:

$$R_F = \frac{k \cdot L}{C \cdot U} \quad [2]$$

C ist die Kapazität des Hochspannungskondensators, der die Energie für den Entladefunken speichert. U ist die Ladespannung des Hochspannungskondensators.

Da oft angenommen wird, dass eine Schalfunkenstrecke im Leitzustand einen hohen Innenwiderstand hat, und somit ein beträchtlicher Teil der durch die Kondensatorbank zur Verfügung gestellten Energie in Wärme umgesetzt wird, soll nun in einem Beispiel, dessen Bauteilwerte den real gegebenen Werten des Netzteils entsprechen, gezeigt werden, dass diese Annahme nicht zutrifft:

Beispiel:

Eine Kondensatorbank, von 1µF die auf 12kV aufgeladen ist, wird über eine Schaltfunkenstrecke, deren Elektroden einen Abstand von 6mm haben entladen (siehe Abb. 18).

Somit stellt sich ein Funkenwiderstand am Ende der Entladung von 40mΩ ein:

$$R_F = \frac{0,00008 \cdot 6}{1 \cdot 10^{-6} \cdot 12 \cdot 10^4} = 40 \text{ m}\Omega$$

Wenn dieser Funkenwiderstand mit einem Kupferkabel von 1mm² Querschnittsfläche verglichen wird (~17,3mΩ/m), ist zu erkennen, dass die Funkenstrecke am Ende der Entladung den gleichen Widerstand wie circa 2 Meter Kupferkabel aufweist.

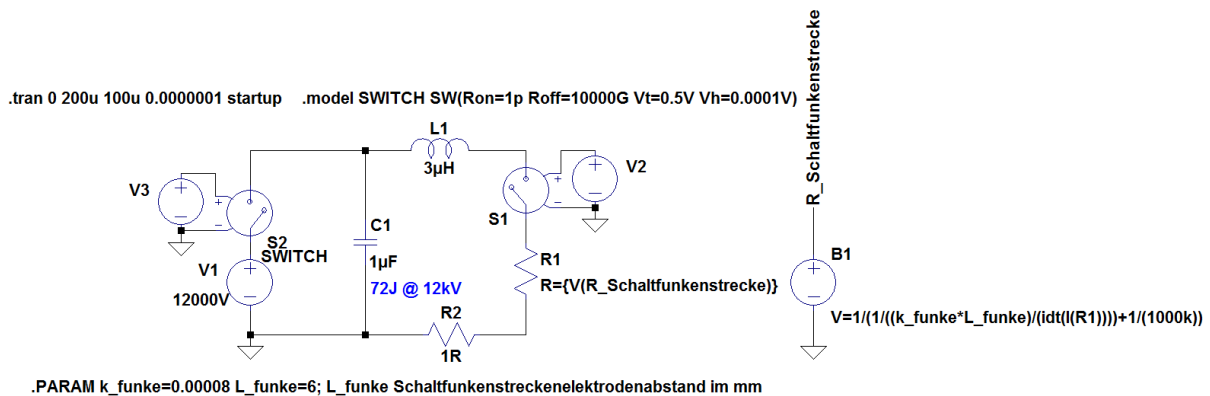


Abbildung 18: Simulation der Schaltfunkenstrecke mit realen Bauteilwerten

Wird der Entladungsverlauf eines 1µF Kondensators, der auf 12kV aufgeladen ist, über die oben beispielhaft erläuterte Schaltfunkenstrecke in eine 1Ω-Last (Blitzlampe) unter Berücksichtigung der parasitären Entladekreisinduktivität simuliert, wird ersichtlich, dass 89% der im Kondensator gespeicherten Energie in der Last in Wärme und Licht umgewandelt werden können (siehe Abb. 18).

Wird der Hochspannungskondensator von 1µF auf 4µF vergrößert, können in der 1Ω-Last 95,5% der im Kondensator gespeicherten Energie in der Last in Wärme und Licht umgewandelt werden.

Hieraus ist ersichtlich, dass eine Schaltfunkenstrecke in der schnellen Hochspannungstechnik der Halbleitertechnik mindestens ebenbürtig ist beziehungsweise auf Grund ihrer Robustheit und Überlastbarkeit der Halbleitertechnik sogar immer noch überlegen ist.

Um eine möglichst schnelles Schalten der Schaltfunkenstrecke zu erreichen, muss der Zündimpuls eine möglichst hohe Spannungsanstiegsgeschwindigkeit aufweisen. Diese erzeugt über die parasitäre Kapazität der Triggerelektrode einen dielektrischen Verschiebungsstrom, der zu einem Koronaleuchten führt. Diese Korona Strahlung beinhaltet sehr kurzweilige UV-Strahlung, die einen Bereich von bis zu 5mm um die Triggerelektrode erleuchtet und somit ionisiert. Es entsteht dabei ein leitfähiges Plasma [16] . Dieser Prozess findet vor dem Ausbilden eines Überschlages zwischen der Triggerelektrode und der Hauptelektrode statt.

Aufbau

Um einen möglichst verschleißarmen Betrieb zu ermöglichen, wurde die Schaltfunkenstrecke gasdicht im Inneren eines Glaszylinders aufgebaut. Aus diesem Grund wurden die justierbaren Elektroden mit O-Ring Dichtungen versehen (siehe Abb. 19) und die Glas-Metall-Verbindung verlötet (siehe Abb. 20).

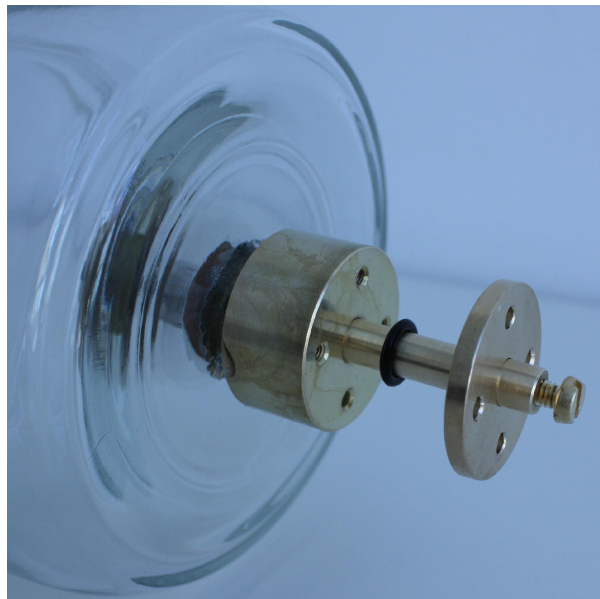
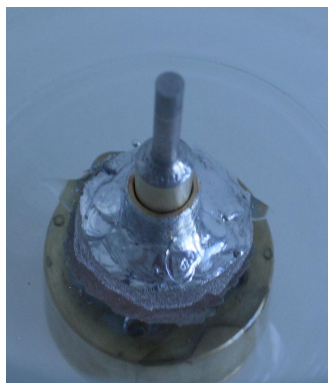


Abbildung 19: Gasdichte Elektrodendurchführung



*Abbildung 20: Gasdichte Metall-Glas-Verbindung
mit eingebauter Wolframelektrode*

Dies ermöglicht den Betrieb unter Inertgasatmosphäre. Als Inertgas bietet sich Argon an, da es schwerer ist als Luft und somit bei einer möglichen Undichtheit der roten

Dichtung (siehe Abb. 21) im unteren Bereich der Schaltfunkenstrecke die Elektroden weiterhin bedecken und somit vor Korrosion schützen würde. Wird die Gasfüllung der Schaltfunkenstrecke in ihrem Druck oder der chemischen Zusammensetzung verändert, muss der Elektrodenabstand neu eingestellt werden. Dies ist aus dem Paschen-Gesetz sowie aus dem Umstand, dass Argon nur circa 1/5 der Durchschlagfestigkeit von Luft aufweist, ersichtlich [17].



Abbildung 21: Gesamtansicht Schaltfunkenstrecke unjustiert vor Einbau des Specksteinisolators für die Triggerelektrode

Die Elektroden wurden aus einem möglichst verschleißarmen Material aufgebaut. Dieses soll einen möglichst hohen Schmelz- und Siedepunkt aufweisen, erst bei einer möglichst hohen Temperatur mit Sauerstoff oxidieren und wegen der mechanischen Belastung durch das Plasma eine hohe Härte aufweisen. Dies schränkt die Auswahl auf Hafnium, Molybdän, Niob, Chrom, Tantal, Iridium, Wolfram und wenige andere Werkstoffe ein. Auf Grund der einfachen Beschaffbarkeit fiel die Wahl auf Wolfram, das in der WIG-Schweißtechnik breite Anwendung findet. WIG-

Elektroden werden pulvermetallurgisch gesintert und anschließend auf Maß geschliffen.

Um den Abbrand der WIG-Elektroden sowie die Austrittsarbeit zu verringern, wird diesen Cer(IV)oxid, Lanthanoxid, Thoriumdioxid, Zirconium(IV)oxid vor dem Sintern beigemischt. Thoriumdioxid ist ein α -Strahler und wird daher zunehmend, wegen der von lungengängigem Schleifstaub ausgehenden Gefahr durch die anderen zuvor genannten Elemente ersetzt. Da diese Zusatzstoffe die Austrittsarbeit verringern, wird hierdurch auch der Zündverzug verkürzt [18]. Dies ist wünschenswert um den Zündjitter zu minimieren. Da diese Zusatzstoffe jedoch nicht feinst verteilt wie in einer Legierung, sondern in Körnern (Korngröße 10-1000nm) im Sintermaterial eingelagert sind kommt es beim Zünden zur Bildung eines „Hot Spots“ am Seltene-Erde-Oxid-Korn und dieses verdampft. Somit sind nach einigen Zündungen alle an der Oberfläche befindlichen Seltene-Erde-Oxid-Körner verdampft und die Elektrode verhält sich wie eine reine Wolfram-Sinterelektrode.

Diese unkontrollierte Veränderung der Eigenschaften ist als äußerst negativ anzusehen und es fiel die Wahl auf die Verwendung reiner 1/8“-Wolfram-Sinterelektroden, die wie im Anhang auf Seite 81 beschrieben verkupfert und eingelötet wurden (siehe Abb. 22).



*Abbildung 22: Detailansicht Haupt- und Triggerelektrode
mit Specksteinisolator*

Um dem Zündjitter zu minimieren könnte der Abstand der Elektroden verringert und der Gasdruck erhöht werden. Weiters würde ein Vorionisieren des Gases zwischen

den Elektroden den Zündjitter verringern. Hierfür würde sich Nickel-63, ein β -Strahler anbieten, wie es früher in Krytrons eingesetzt wurde. Auf den Einsatz von Nickel-63 wurde auf Grund des Anwenderschutzes verzichtet.

Die Triggerelektrode wurde ringförmig aufgebaut und mittig zwischen den Elektroden angeordnet. Der Elektrodenabstand beträgt, um ein sicheres Eigenzünden zu verhindern, für 12kV Schaltspannung circa 5mm bei Atmosphärendruck und bei Verwendung von Luft als Füllgas. Es wurde, um die Eigenzüandsicherheit weiter zu erhöhen, ein Sicherheitsfaktor von 20% hinzugefügt, und somit ein Elektrodenabstand von 6mm eingestellt (siehe Abb. 22).

Um die Potentialverteilung durch die Triggerelektrode möglichst wenig zu beeinflussen, wurde diese symmetrisch, mittig zwischen den Elektroden (3mm Abstand zu jeder Elektrode) angeordnet und über zwei $50M\Omega$ Hochspannungswiderstände auf Mittelpotential gelegt (siehe Abb. 24).

Für die mechanische Zentrierung und Befestigung wurde ein aus Speckstein gedrehter Isolationskörper verwendet (siehe Abb. 22).

Als Triggerelektrode wurde eine Lötöse mit einem Innendurchmesser von 10mm eingesetzt, da die elektrische Belastung und somit der Abbrand gering ist.

Beschaltung der Schaltfunkenstrecke

Die Schaltfunkenstrecke soll durch einen Hochspannungsimpuls gezündet werden. Da die Triggerelektrode durch den Hochspannungsteiler ($100M\Omega$ Hochspannungswiderstand mit Mittelanzapfung siehe Abb. 23) auf Mittelpotential gelegt wird, kann die Sekundärseite des Zündtransformators nicht direkt mit der Triggerelektrode verbunden werden.



*Abbildung 23: Hochspannungswiderstand
aus 50 Stück 0207-Widerständen aufgebaut (Spannungsfestigkeit min. 15kV)*

Es muss eine Gleichspannungstrennung eingefügt werden. Hierfür gibt es zwei Möglichkeiten:

- Es wird ein Hochspannungskondensator eingesetzt.
- Es wird eine Hilfsfunkenstrecke mit einer höheren Zündspannung als die Schaltfunkenstrecke eingesetzt.

Bei Verwendung eines Hochspannungskondensators müsste der genannte Kondensator eine Spannungsfestigkeit aufweisen, die größer ist als die maximale Leerlaufausgangsspannung des Zündtrafos. Diese wurde mittels Hochspannungstastkopf gemessen und betrug circa 40kV. Um diesen Wert zu verifizieren, wurde die Überschlagsweite in Luft gemessen, welche circa 20mm betrug und eine Spitzenspannung von 65kV als realistisch erscheinen lässt.

Da kein Hochspannungskondensator mit ausreichender Spannungsfestigkeit zur Verfügung stand, fiel die Entscheidung auf die Verwendung einer Hilfsfunkenstrecke.

Um eine Schaltfunkenstrecke schnell, jitterarm und zuverlässig zünden zu können, kommt es auf die Polarität des Zündimpuls in Bezug auf die an den Elektroden angelegten Potentiale an. Dies wird in [19] beschrieben.

Zeitlicher Verlauf der Zündung

Die eine Hauptelektrode liegt auf +6kV und die andere, an der die gesimmerte Blitzlampe die die Last darstellt angeschlossen ist, auf circa -6kV. Die Triggerelektrode liegt in der Mitte bei circa 0V Ruhepotential (siehe Abb. 24).

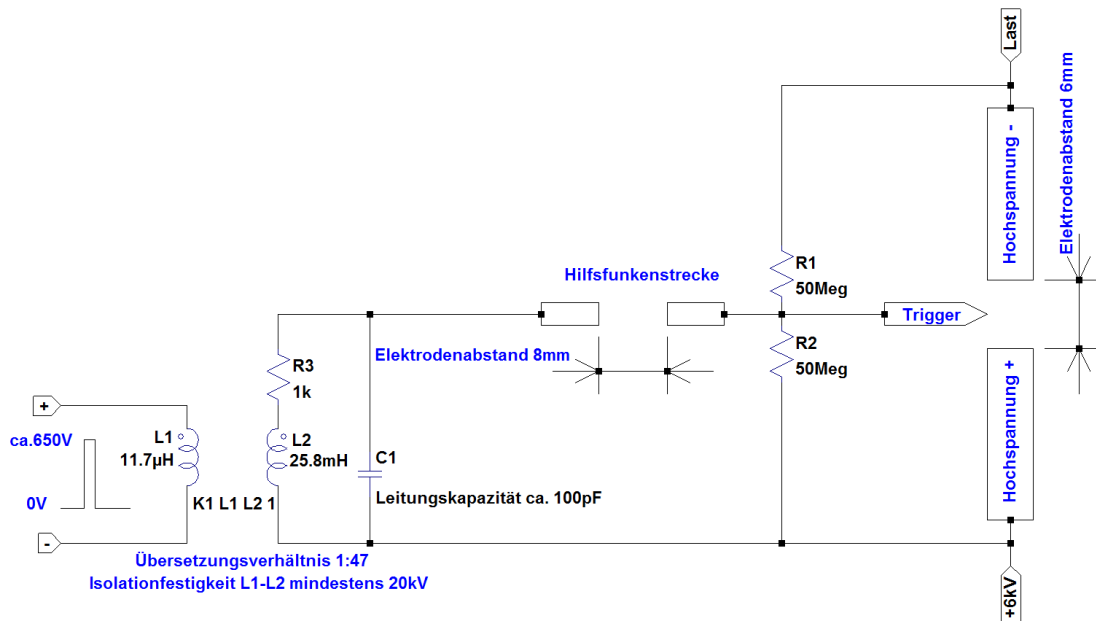


Abbildung 24: Schaltfunkenstrecke schematisch mit dem Hochspannungsteil der Zündschaltung

Der von der Zündschaltung in der Primärwicklung des Zündtransformators erzeugte Spannungsimpuls wird sekundärseitig in einen Hochspannungsimpuls umgewandelt. Dieser lädt die parasitäre Leitungskapazität der Anschlussleitungen auf. Erreicht die Spannung an der Hilfsfunkenstrecke nach circa $1\mu\text{s}$ eine Spannung von circa 24kV , bricht die Hilfsfunkenstrecke (siehe Abb. 25) durch und es wird die Triggerelektrode vom Ruhepotential sehr schnell auf circa 30kV gezogen. Somit liegt zwischen der Triggerelektrode und der Hauptelektrode, an die die Last angeschlossen ist, nun 30kV bei einem Abstand von nur 3mm an. Dies übersteigt die Spannungsfestigkeit des Isolationsgases Luft bei Atmosphärendruck um den Faktor drei.

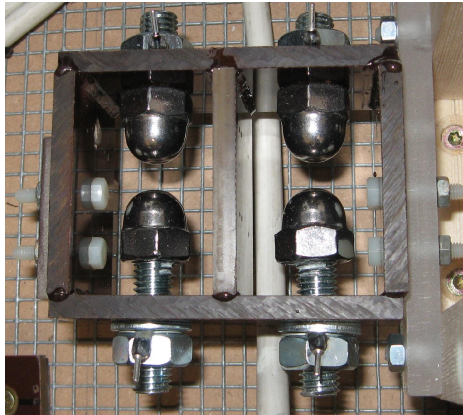


Abbildung 25: Hilfsfunkenstrecken

Der Steg zwischen den Hilfsfunkenstrecken verhindert, dass die UV-Strahlung der zuerst zündenden Funkenstrecke die andere Hilfsfunkenstrecke vorionisiert und mitzündet.

Da nach dem Durchbrechen der Hilfsfunkenstrecke die parasitäre Zuleitungskapazität eine sehr steife Spannungsquelle für das Umladen der parasitären Kapazität der Triggerelektrode darstellt, wird die Triggerelektrode mit einer sehr großen Spannungsänderungsrate nach circa 30kV gezogen. Dies bewirkt einen über die parasitäre Triggerelektrodenkapazität fließenden Verschiebungsstrom, der zu einer Korona Entladung führt. Diese erzeugt kurzweilige UV-Strahlung, die das umgebende Isolationsgas ionisiert und die Ausbildung von Streamern begünstigt.

Erreicht die Triggerelektrode eine Spannung, die der Durchbruchsspannung Triggerelektrode zu Hauptelektrode (Lastseite) entspricht, bricht diese durch. Dies geschieht durch die zuvor beschriebene Vorionisation sehr schnell. Es bildet sich eine niederohmiger Plasmakanal zwischen der Triggerelektrode und der Hauptelektrode (Lastseite). Dies zieht die Triggerelektrode auf das Potential der Hauptelektrode (Lastseite), ionisiert mittels kurzweiliger UV-Strahlung die Strecke Triggerelektrode zu Hauptelektrode (+6kV) und führt zu einer akustischen Ioneninjektion in diese. Hierdurch wird die Durchbruchsspannung der Strecke Triggerelektrode zu Hauptelektrode (+6kV) überschritten.

Es bildet sich ein Plasmakanal zwischen den beiden Hauptelektroden aus und es beginnt ein Strom in die Last zu fließen. Mit ansteigendem Strom schnürt sich der Plasmakanal immer stärker ein, wird hierdurch zentriert und fließt nicht über die Triggerelektrode. Diese wird somit durch die stromstarke Hauptentladung nicht

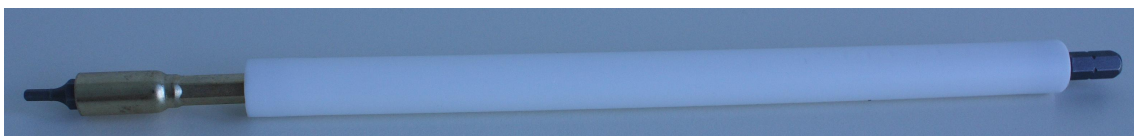
korrodiert. Die zeitliche Entwicklung des Widerstandes des Plasmakanals wird durch die Toeplersche Funkenformel [14] (siehe Formeln auf Seite 47) beschrieben.

Der Zündjitter hängt hauptsächlich von der Konstanz der Hilfselektrode ab. Deshalb wurden diese, um eine gleichmäßige Potentialverteilung zu erreichen, mit runden Elektroden versehen. Weiters wurde, um eine gegenseitige Beeinflussung durch UV-Strahlung zu verhindern, eine optische Abschirmung zwischen den Hilfselektroden eingefügt (siehe Abb. 25).

Justierhilfe für die Abstandsregulierung

Um den Abstand der Elektroden unter Spannung verändern zu können, wurde eine hochspannungsisolierte Bit-Verlängerung entwickelt (siehe Abb. 26). Das Isolationsmaterial ist PTFE (Handelsname Teflon) und die Isolationsstrecke weist mehr als 150mm auf.

Luft weist eine Durchschlagsfestigkeit von circa 3kV/mm auf. Durch Oberflächenverschmutzungen ist die Durchschlagsfestigkeit von Luft an einer Isolator kriechstrecke auf circa 1kV/mm reduziert. Hieraus ist ersichtlich, dass um eine Isolationsfestigkeit von 6kV erreichen zu können, mindestens 6mm Isolationskriechstrecke vorhanden sein müssen. Aus Sicherheitsgründen wurde eine Isolationskriechstrecke von mehr als 150mm eingesetzt. Dies stellt einen Sicherheitsfaktor von mehr als 25 dar. Weiters wurde der Bit-Halter, der in die Hand genommen wird mittels Erdungskabel geerdet um die Anwendungssicherheit weiter zu erhöhen.



*Abbildung 26: Hochspannungsisolierter Bit-Halter
für die Justierung des Elektrodenabstandes unter Spannung*

Zündtransformator

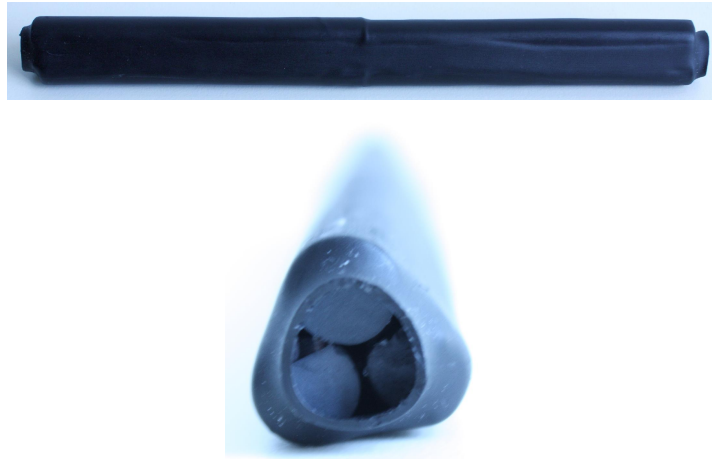
Der Zündtransformator hat die Aufgabe, den relativ kleinen Spannungsimpuls der Zündschaltung, der circa 650V beträgt, in einen Hochspannungszündimpuls für das Zünden der Schaltfunkenstrecke zu transformieren.

Hierfür muss dieser Transformator folgende Randbedingungen erfüllen:

- Der Kopplungsfaktor soll möglichst nahe 1 sein, um eine geringe Streuinduktivität zu erreichen.
- Die Induktivität der Primärspule muss so bemessen werden, dass die maximal zulässige Stromanstiegsgeschwindigkeit der Zündschaltung nicht überschritten wird.
- Die Isolationsfestigkeit zwischen Primär- und Sekundärwicklung muss mindestens die doppelte maximale Durchbruchsspannung der Schaltfunkenstrecke betragen.
- Die Isolation des Zündtrafos sollte selbst heilend sein.
- Die Spannungsfestigkeit der Sekundärwicklung muss mindestens die doppelte maximale Durchbruchsspannung der Schaltfunkenstrecke betragen.

Im Folgenden wird nun darauf eingegangen, wie diese Parameter konstruktiv erfüllt wurden:

Der Wickelkörper wurde so aufgebaut, dass jeweils zwei Ferritstäbe mit einem Durchmesser von 10mm und einer Länge von 100mm aneinander geklebt wurden, um eine Länge von 200mm zu erreichen. Danach wurden drei solcher Stäbe übereinander geschichtet und miteinander verklebt (5-Minuten-Epoxy) und zum Schluss mit Schrumpfschlauch überzogen (siehe Abb. 27).



*Abbildung 27: Wickelkörper Zündtransformator
Aufgebaut aus 6 Ferritstäben*

Die Primärwicklung wurde so ausgeführt, dass Alufolie so gefaltet wurde, dass sie die folgenden Maße erfüllte: Breite 18cm, Länge 2,5m.

An einem Ende dieser Folie wurde ein Messingblech mit Alulot angelötet, um die Stromverteilung zu verbessern und einen besser leitfähigen Anschlussdraht zu erzeugen.

Auf die Alufolie wurde der Wickelkörper gelegt, beginnend mit jener Seite an die zuvor das Messingblech angelötet wurde. Bevor die erste Windung vollendet war, wurde als Isolation Kopierpapier eingelegt. Danach wurden die gesamten 2,5 Meter Alufolie aufgewickelt, wobei zwischen den einzelnen Schichten jeweils Kopierpapier eingelegt wurde (siehe Abb. 28).

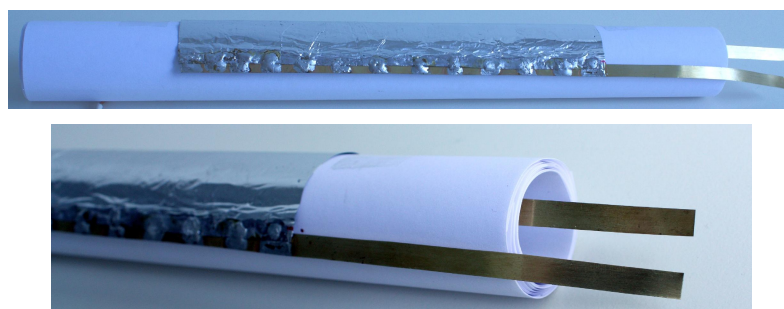


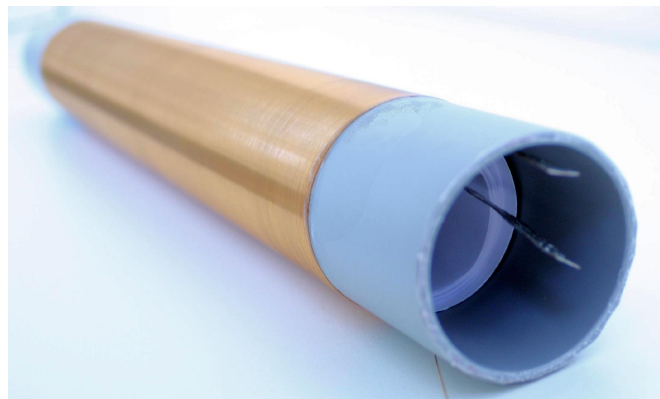
Abbildung 28: Primärwicklung Zündtransformator

Aufgrund der Schaltungssimulation der Zündschaltung wurde ermittelt, dass die Primärwicklung des Zündtrafos einen Wert von circa $10\mu\text{H}$ nicht unterschreiten darf, um die maximal zulässige Stromanstiegsgeschwindigkeit des Zündthyristors (50RIA120) der Zündschaltung nicht zu überschreiten. Die Zündschaltung ist auf Seite 64 näher beschrieben.

Mit einem Induktivitätsmessgerät (AADE L/C Meter IIB) wurde die Induktivität der Primärwicklung gemessen und solange Alufolie abgewickelt, bis ein Induktivitätswert von circa $10\mu\text{H}$ erreicht wurde. Anschließend wurde auch dieses Aluminiumfolienende mittels Alulot und Messingblech kontaktiert. Abschließende Messungen ergaben eine Primärinduktivität der Zündtrafos von circa $11,7\mu\text{H}$.

Die Sekundärwicklung wurde folgendermaßen aufgebaut:

Auf ein Abwasserrohr mit Durchmesser von 50mm wurde Kupferlackdraht mit einem Durchmesser von 0,25mm aufgewickelt. Das Abwasserrohr hatte eine Länge von 40cm. Die mittleren 25cm des Rohrs wurden mit Draht umwickelt (siehe Abb. 29).



*Abbildung 29: Sekundärwicklung Zündtransformator
mit eingeschobener Primärwicklung*

Anschließend wurde die Primärwicklung in das umwickelte Abflussrohr eingeschoben und mit 5-Minuten-Epoxy fixiert. Die Hochspannungskabel- und die Niederspannungsanschlüsse wurden jeweils am entgegengesetzten Ende des Rohres positioniert, um ein Überspringen der Hochspannung zu verhindern. An die Anschlüsse der Hochspannungswicklung (Sekundärspule) wurde ein TV-40 Kabel angeschlossen (siehe Abb. 30).

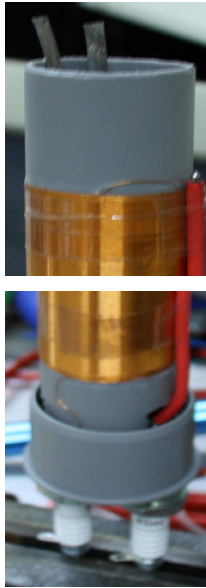


Abbildung 30: Komplettansicht Zündtransformator

Auf der Niederspannungsseite wurde die Kontaktierung mit eingeklebten M4-Messingschrauben durchgeführt. Auf der Hochspannungsseite wurden Zündkerzen als Hochspannungsdurchführungen verwendet (siehe Abb. 31).

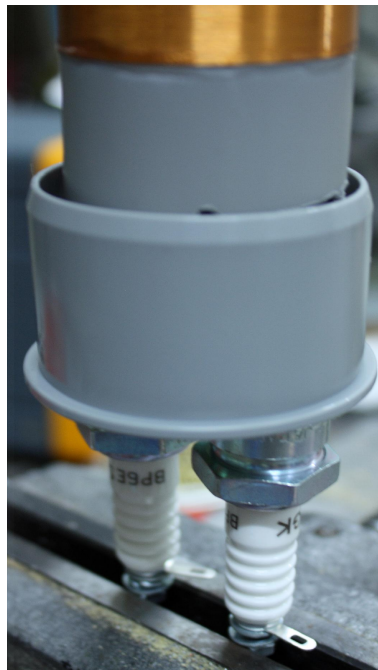


Abbildung 31: Hochspannungsdurchführung Zündtransformator

Vor der Inbetriebnahme wurde der Zündtrafo mit Paraffinöl zur Isolation gefüllt. Dies stellt auch die Selbstheilung sicher (siehe Abb. 32).

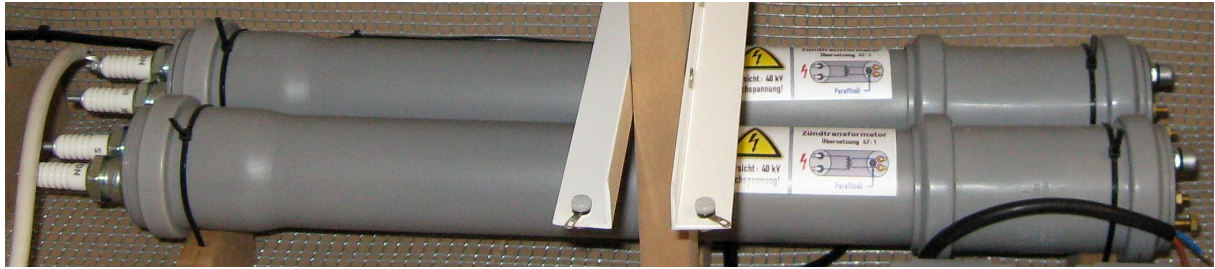


Abbildung 32: Zündtransformator komplettiert

Die Polung der Spulen sowie das Übersetzungsverhältnis wurden mittels Funktionsgenerator und Oszilloskop ermittelt, wobei ein Übersetzungsverhältnis von 47:1 ermittelt wurde. Das heißt, ein 650V Eingangsimpuls erzeugt einen Spannungsimpuls von circa 30kV.

Dieser Hochspannungsimpuls wurde mittels Hochspannungstastkopf abgegriffen und auf dem Oszilloskop dargestellt. Dabei wurde eine Spannungsanstiegsgeschwindigkeit von $33,6\text{kV}/\mu\text{s}$ gemessen, wobei die Schaltfunkenstrecke und alle Kabel mit ihren parasitären Kapazitäten angeschlossen waren. Der Kurzschlussspitzenstrom wurde mit circa 8A_{Peak} ermittelt. Somit ergibt sich eine maximal erreichbare sekundäre Zündleistung von circa 240kW. Dies ist um ein vielfaches mehr, als die von kommerziellen Herstellern wie beispielsweise „e2v technologies“ angebotenen Transformatoren liefern können.

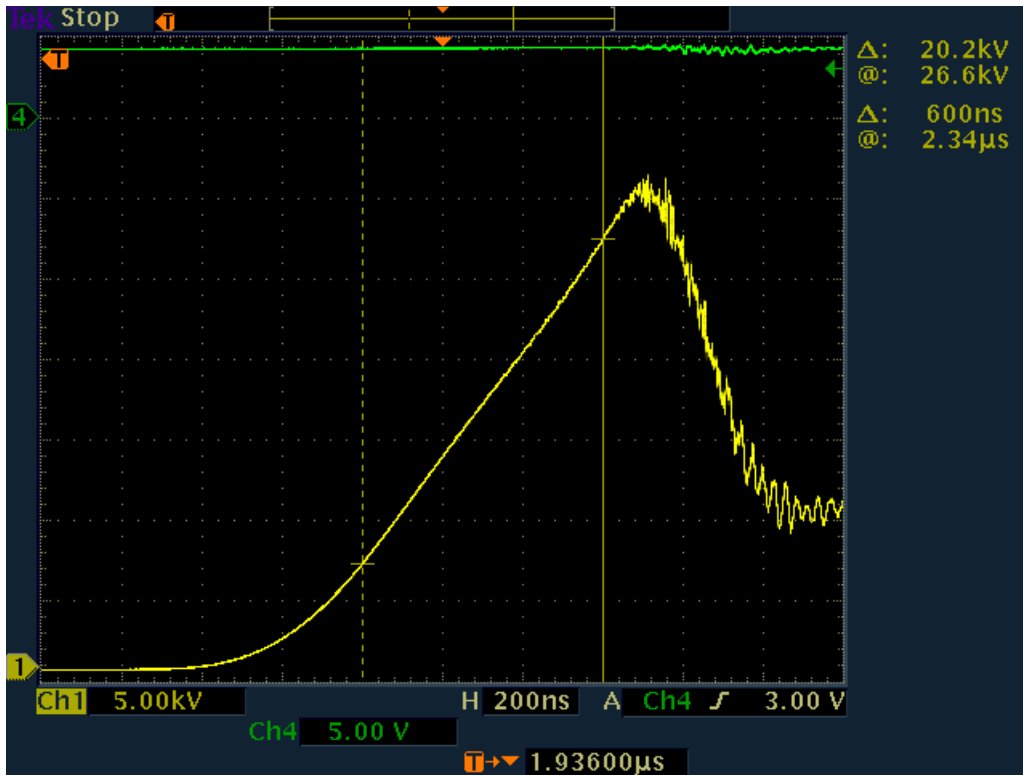


Abbildung 33: Spannungsanstieg am Zündtransformator bis zum Zünden
im eingebauten Zustand

Zündschaltung

Die Zündschaltung hat die Aufgabe, einen galvanisch getrennt empfangenen TTL-Impuls (5V-Impuls) in einen Spannungspuls mit $650V_{Peak}$ zu übersetzen und diesen mittels Zündtrafo in einen Hochspannungszündimpuls für das Zünden der Schaltfunkenstrecke zu transformieren. Dieser Spannungsimpuls verursacht in der Primärwicklung des Zündtrafos einen mehrere hundert Ampere starken Stromimpuls, der auch durch das Schaltelement der Zündschaltung fließt. Somit muss das Schaltelement der Zündschaltung stromstarke Impulse ohne Schaden überstehen können. Da dieses Element relativ schnell, spannungs- und impulsfest sein muss, fiel die Wahl auf einen Thyristor (50RIA120).

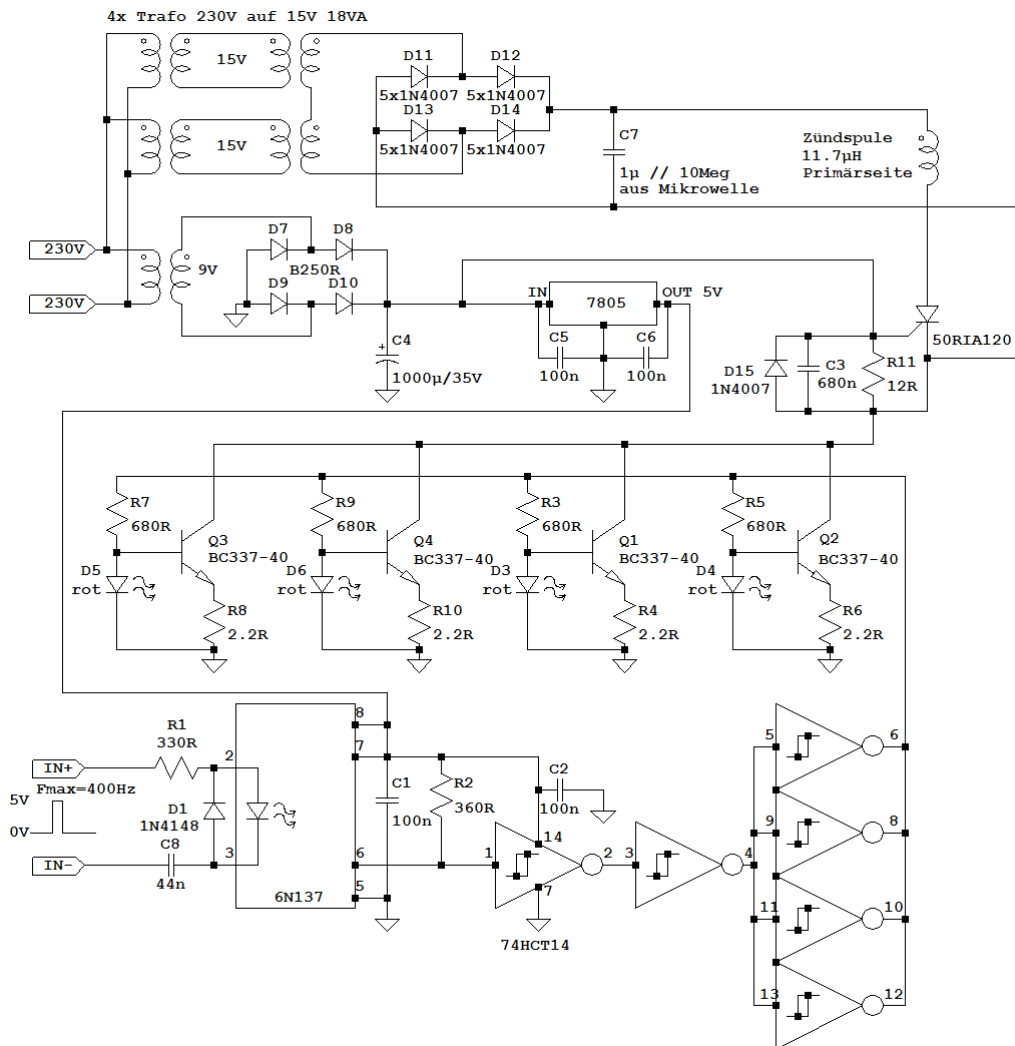


Abbildung 34: Zündschaltung Schaltplan

Die Schaltung ist wie folgt aufgebaut (siehe Abb. 34):

Die positive Eingangsflanke des TTL-Impulses verursacht in der Leuchtdiode des 10MBAud-Optokoppler 6N137 einen Strom- und somit Lichtimpuls. C8 und R1 wirken hierbei wie ein Differenzierglied und sorgen somit dafür, dass nur während und kurz nach der Flanke circa $20\mu\text{s}$ lang Strom durch die Leuchtdiode des Optokopplers fließen kann.

Dieser Optokoppler besitzt hinter der Photodiode einen Verstärker mit folgendem Schmitttrigger und gibt ein invertiertes Logiksignal über einen Open-Collector-Ausgang aus (Collector-Widerstand R2). Dieser Impuls (circa $20\mu\text{s}$) wird über den ersten invertierenden Schmitttrigger des 74HCT14 auf TTL-Niveau gebracht, der die Flanken versteilert. Der zweite invertierende Schmitttrigger des 74HCT14 invertiert den Puls.

Die vier parallel geschalteten invertierenden Schmitttrigger des 74HCT14 vermindern den Ausgangswiderstand. An diesem Ausgang wird ein positiver 5V-Impuls mit circa $20\mu\text{s}$ Impulsdauer erzeugt, wenn am Optokopplereingang eine positive 5V-Flanke angelegt wird.

Dieses Signal steuert die vier parallel geschalteten 0,45A-Stromquellen. Somit stehen zum Zünden des Thyristors circa 1,7A zur Verfügung wobei circa 100mA durch R11 fließen. Die Stromanstiegszeit der Stromquellen beträgt circa 40-50ns und ist von der Geometrie beziehungsweise parasitären Induktivität der Verkabelung abhängig. Die Stromabstiegszeit ist mit circa 80ns ungefähr doppelt so lang wie die Stromanstiegszeit. Da diese Stromquelle zum Zünden eines Thyristors eingesetzt wird, ist die Stromabstiegszeit irrelevant.

Da in geringer Entfernung zu dieser Schaltung die Zündfunkenstrecke mehrere Megawatt schaltet, wurden gelegentlich Fehlzündungen der später zündenden zweiten Zündschaltung auf Grund kapazitiver Einkopplungen beobachtet. Diese wurde durch das Zünden der Schaltfunkenstrecke mit gezündet (zu hohes dV/dt an den Thyristoranschlüssen). Dies konnte durch den Einbau von C3, D15 und R11 sowie durch Einbau von Abschirmungen endgültig unterbunden werden.

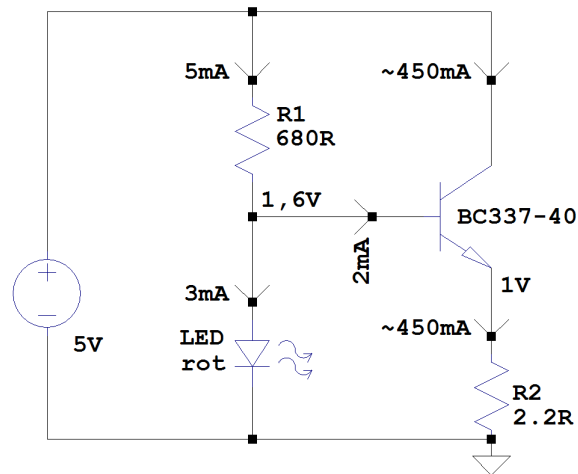


Abbildung 35: Konstantstromquelle Schaltplan

Funktionsweise Konstantstromquelle (siehe Abb. 35):

Die rote Leuchtdiode hat eine Flussspannung von circa 1,6V. Die Basis-Emitter-Strecke des Transistors weist eine Flussspannung von circa 0,6V auf. Weiters hat der Transistor (BC337-40) eine Stromverstärkung von mindestens 250.

Es stellt sich ein Spannungsabfall über R2 von circa 1V ein. Dies führt zu einem Stromfluss durch R2 von circa 0,45A. Durch die Basis fließt nur I_{R2}/β also circa 2mA. Somit stellt sich ein Kollektorstrom von circa 0,45A ein, der von der am Kollektor angelegten Spannung unabhängig ist.

Impulsformerplatine

Die Impulsformerplatine hat folgende Aufgaben zu erfüllen: Ein vom Computer kommender Spannungsimpuls wird eingespeichert und erst nahe dem Spannungsulldurchgang der Versorgungsspannung des Hochspannungsnetzteiles an zwei Ausgänge weitergeleitet, wobei die positive Flanke des zweiten Ausganges gegenüber der positiven Flanke des ersten Ausganges zwischen 0 und 100µs variabel einstellbar verzögert werden kann.

Weiters begrenzt diese Schaltung die maximal erreichbare Pulsfrequenz auf circa 200Hz. Das Freigeben nahe dem Ulldurchgang der Versorgungsspannung des Hochspannungsnetzteiles ist deswegen wichtig, weil alle im Hochspannungskreis befindlichen Hochspannungsdioden beim Zünden des Entladekreises im Sperrzustand sein müssen. Dies stellt eine Reduzierung der elektrischen Belastung der Hochspannungsdioden dar, weil keine Diode sehr schnell durch das Zünden einer Schaltfunkenstrecke vom leitenden in den sperrenden Zustand übergehen muss, und somit mögliche Spannungsunsymmetrierungen durch Herstellungstoleranzen der Einzeldioden, aus denen die Hochspannungsdioden aufgebaut ist, vermieden werden.

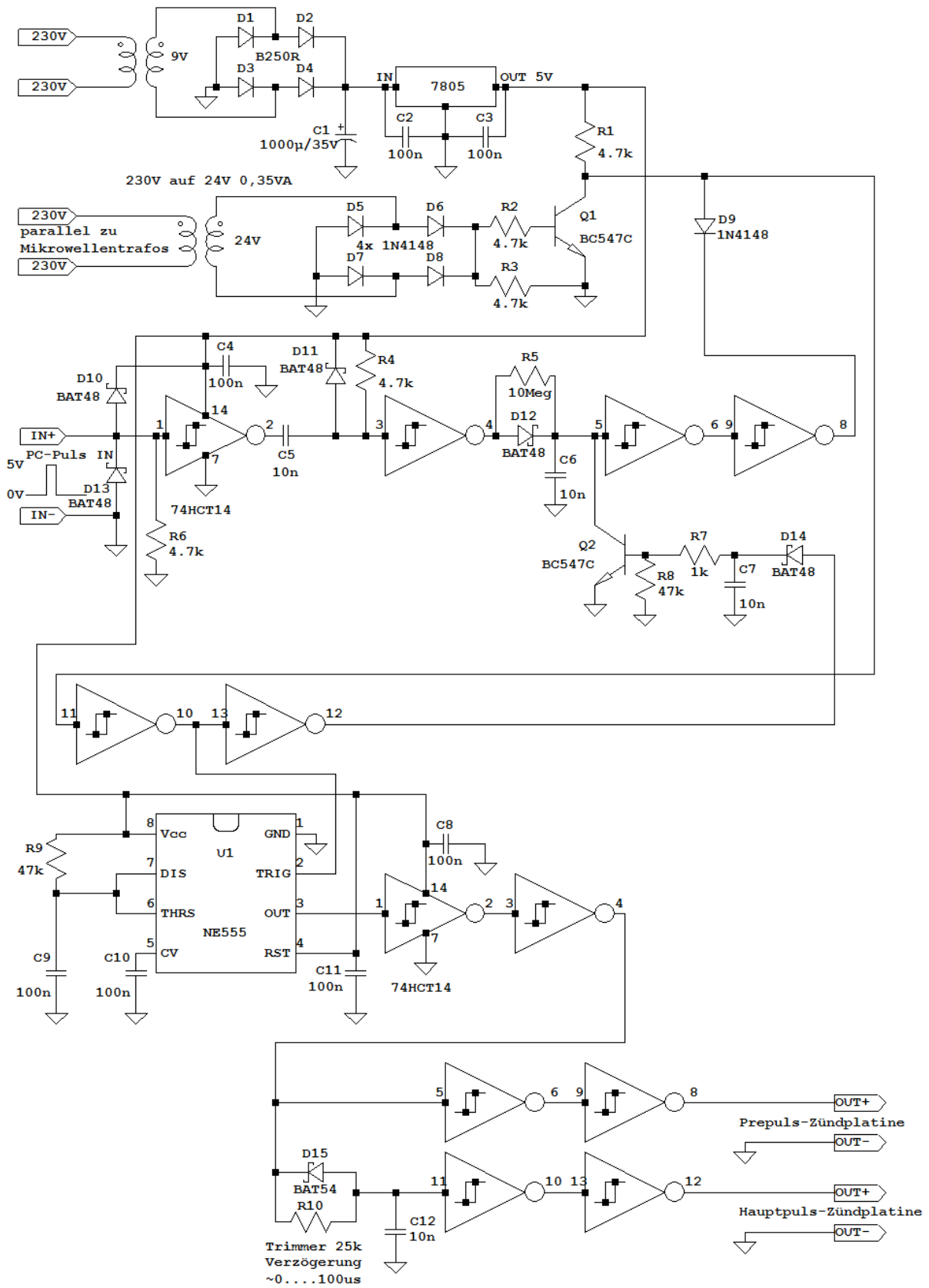


Abbildung 36: Impulsformerplatine Schaltplan

Schaltungsbeschreibung

Diese Schaltungsbeschreibung bezieht sich auf den Schaltplan in Abb. 36.

Der von PC kommende 5V Impuls, der länger als $20\mu\text{s}$ sein muss, wird durch den Schmittinverter 74HCT14 in ein TTL-konformes Signal umgewandelt. D10 und D13 schützen den Eingang des Schmittinverter (Pin 1) vor elektrostatischer Zerstörung. R6 legt den Eingang auf einen definierten Pegel, wenn an den Eingang kein Verbindungskabel angeschlossen ist.

C4 dient als Stützkondensator, um die Versorgungsleitungen für die HF-Schaltsignalanteile niederohmiger zu machen.

Das Ausgangssignal des Schmittinverters (Pin 2) wird durch C5 und R4 differenziert, wobei R4 auch gleichzeitig das Ruhepotential des nächsten Schmittinvertereingangs (Pin 3) festlegt. D11 schützt den Schmittinvertereingang (Pin 3) vor Spannungen, die größer als die Versorgungsspannung des Schmittinverters sind.

Das Ausgangssignal des Schmittinverters (Pin 4) ist nach dem Differenzieren ein circa $20\mu\text{s}$ langer positiver 5V-Impuls, dessen Länge von der Eingangsimpulslänge unabhängig ist. Der Eingangsimpuls vom PC muss länger als $20\mu\text{s}$ sein.

Dieser 5V-Impuls (Pin4) lädt über D12 C6 auf. R5 legt das Ruhepotential des Schmittinvertereingangs (Pin 5) fest. In C6 wird somit der vom PC kommende Impuls eingespeichert.

Die Schmittinverter (Pin 5 bis Pin 8) dienen nur als Komparator und Impedanzwandler.

Für die Nulldurchgangserkennung wird ein kleiner Trafo als Spannungswandler parallel zu den Primärseiten der Mikrowellentrafos an die Sekundärseite des Trenntrafos angeschlossen. Dessen Ausgangsspannung wird über D5 bis D8 gleichgerichtet und lässt, wenn die gleichgerichtete Spannung größer als 0,6V wird, über R2 einen Strom in die Basis von Q1 fließen. Dieser Strom verursacht einen Kollektorstrom und zieht den Kollektor gegen Masse. R3 sorgt dafür, dass wenn die Sekundärspannung des Trafos unter 1,2V fällt die Basis des Transistors auf Masse gezogen wird und der Transistor schnell in den Sperrzustand übergeht.

Q1, D9 und R1 bilden eine Wired-AND-Logik die von der Nulldurchgangserkennung und C6 angesteuert wird.

Da es zwei Eingänge gibt ergeben sich vier mögliche Eingangskombinationen, die im Folgenden behandelt werden:

Netzspannung fern vom Nulldurchgang und kein Impuls in C6 eingespeichert:

Dieser Zustand stellt den Quasi-Ruhezustand dar, da dieser Zustand den Großteil der Zeit vorliegt. Beide oben beschriebenen Schaltungsteile geben ein Signal nahe Masse aus und ziehen das Wired-AND Q1, D9 und R1 nach Masse. Somit legt ein LOW-Signal am Schmittinvertereingang (Pin 11) an.

Netzspannung fern vom Nulldurchgang und ein Impuls in C6 eingespeichert:

Da ein Impuls eingespeichert ist, zieht dieser Schaltungsteil das Wired-AND nicht nach Masse. Jedoch zieht die Nulldurchgangserkennung das Signal nach Masse und es liegt ein LOW-Signal am Schmittinvertereingang (Pin 11) an.

Netzspannung nahe am Nulldurchgang und kein Impuls in C6 eingespeichert:

Die Nulldurchgangserkennung gibt ein HIGH aus, da nahe dem Nulldurchgang der Transistor Q1 nicht durch gesteuert wird. Da jedoch kein Impuls in C6 eingespeichert ist, wird das Wired-AND nach Masse gezogen.

Netzspannung nahe am Nulldurchgang und ein Impuls in C6 eingespeichert:

Die Nulldurchgangserkennung gibt ein HIGH aus, Q1 sperrt. Da ein Impuls in C6 eingespeichert ist, wird auch hier ein HIGH ausgegeben. Das Wired-AND gibt somit ein 5V Signal (HIGH) aus. Dieses wird von nachfolgenden Schmittinverter invertiert und an den Triggereingang des NE555 (U1) angelegt.

Die durch den HIGH-LOW-Übergang entstehende negative Flanke sorgt für das Entladen des Kondensators C9 und der Ausgang (Pin 3) des NE555 geht auf +5V (HIGH). C9 wird über R9 aufgeladen und setzt, wenn die Spannung an C9 $\frac{2}{3}$ der Versorgungsspannung erreicht, der Ausgang (Pin 3) auf LOW zurück.

Die Bauteilanordnung U1, R9 und C9 bilden somit ein nicht nachtriggerbares Monoflop mit einer Zeitkonstante von circa 5ms. C11 dient als Stützkondensator für die Versorgungsspannung und C10 stützt die Referenzspannung.

Der erste Schmittinverterteil (Pin 1 und 2) des zweiten 74HCT14 versteilert die Flanken und der zweite Schmittinverter (Pin 3 und 4) invertiert den Impuls des Monoflops. Somit liegt am Pin 4 ein positiver 5V-Impuls mit circa 5ms Impulsdauer an.

Dieser Impuls wird über die zwei in hintereinander geschalteten Schmittinverter direkt an den Ausgang durchgeschaltet und stellt das Eingangssignal für die Zündplatine des Prepuls-Teils dar.

Der vom Schmittinverterausgang (Pin 4) kommende Impuls lädt über R10 (Cermet Trimmer 15-gängig) C12 auf. Erreicht die Spannung an C12 die Schaltschwelle des Schmittinverters wird an den zweiten Ausgang ein 5V-Signal ausgegeben. Dieses Signal stellt das Eingangssignal für die Zündplatine des Hauptpuls-Teils dar. D15 dient dazu, den Kondensator C12 schnell zu entladen, wenn das Ausgangssignal (Pin 4) nach LOW wechselt.

Da die Zündplatinen nur die positive Flanke (0V nach 5V-Übergang) auswerten, ist die Pulsdauer der Ausgangssignale der Impulsformerplatine belanglos. Es kommt nur auf den zeitlichen Abstand der positiven Flanken der beiden Ausgangssignale zueinander an. Dieser Abstand ist über den 15-gängigen Cermet Spindeltrimmer R10 im Bereich 0-100 μ s einstellbar.

Ergebnisse und Diskussion

Allgemeines

Es zeigte sich, dass es zu einer oszillatorischen Schwingung des Entladestroms kommt, wenn der ohmsche Widerstand der Gasentladung zu gering ist. Dies verlängert die Entladedauer und führt zu einer verstärkten Belastung der Hochspannungskondensatorbatterien. Die kürzesten Entladezeiten, also unter $10\mu\text{s}$, werden in dem hier vorgestellten System bei einem zeitlichen Mittelwert des Widerstandes der Gasentladung von circa $1\text{-}2\Omega$ erhalten, da hierbei eine nahezu asymptotische Entladung erreicht wird. Dies ist jedoch nur begrenzt möglich, da die Auswahl von Blitzlampenmodellen begrenzt ist und in den meisten Datenblättern der Lampenwiderstand nicht angegeben wird.

Wird dagegen eine Hohlkathodenblitzlampe eingesetzt, kann über den Bohrungsdurchmesser der Widerstand der Gasentladung in Grenzen eingestellt werden. Weiters ist zu beachten, dass diese Anpassung nur für den zeitlichen Mittelwert des Widerstands der Gasentladung stattfinden kann, da eine Gasentladung einen zeitabhängigen und stromflußabhängigen Widerstand darstellt.

Die messtechnische Erfassung der Entladestrom- beziehungsweise Entladungsspannungskurve erweist sich als sehr störbehaftet, da durch die unzureichende Abschirmung der Laborkoaxialkabel das Messsignal verfälscht wurde.

Daher wurde auf eine quantitative Darstellung der Entladekurve verzichtet. Die Messungen erlaubten es jedoch wenigstens, das Vorliegen Oszillationen oder eines asymptotischen Verlaufs zu erkennen.

Die wesentliche Funktion dieses Netzteiles in Verbindung mit einer Gasentladungslampe stellt die Erzeugung von Licht dar. Aus diesem Grund sind der zeitliche Verlauf des ausgesendeten Lichts und dessen spektrale Eigenschaften von besonderer Bedeutung. Deshalb wurde auf den in der Diplomarbeit [4] beschriebenen mittels Lichtwellenleiter angekoppelten Oszilloskop-Fotodiodenvorsatz zurückgegriffen. Hierbei wurde festgestellt, dass die Blitzlampen-

sowie Hohlkathodenblitzlampenentladung die in der Aufgabenstellung formulierten Anforderungen erfüllen. Es ist besonders wichtig, bei diesen Messungen darauf zu achten, dass angeregtes Krypton und Xenon Relaxationsprozesse aufweisen, die infrarotes Licht aussenden, und dies, da Fotodioden eine verstärkte Sensitivität im Infraroten aufweisen, zu einer Verfälschung des dargestellten Impulses im Sichtbaren führen kann. Aus diesem Grund wurde ein Grünfilter als Abschwächungs-, UV- und IR-Filter eingesetzt. Es wurde dafür ein günstiges und in verschiedenen Abschwächstufen erhältliches Schweißglas verwendet.

Zusammenfassend werden die folgenden Anwendungsmöglichkeiten abgedeckt, die im Folgenden näher behandelt werden:

- Betrieb von Spektrallampen
- Betrieb von Blitzlampen
- Betrieb von Hohlkathodenblitzlampen

Betrieb von Spektrallampen

Da die Spektralkamera unterschiedlichste Belichtungszeiten zulässt, muss um ein Aliasing der Belichtungszeit mit der Netzfrequenz zu vermeiden, der Betriebsstrom der Spektrallampe (siehe Abb. 37) gut stabilisiert werden. Dies wurde durch den Einsatz eines großen Hochspannungsstützkondensators, nämlich des Simmerkondensators mit $2\mu\text{F}$, erreicht. Es stehen für den Betrieb der Spektrallampe zwei hochspannungsfeste Vorwiderstände, einer mit $100\text{M}\Omega$ und einer mit $1\text{M}\Omega$ zur Verfügung. Somit ist der Strom durch die Spektrallampe auf $0,1\text{mA}$ oder 10mA einstellbar. Es wird jeweils eine Stromkonstanz von besser 1% erreicht und es tritt kein Aliasing auf. Dies konnte mithilfe des in der Diplomarbeit [4] beschriebenen mittels Lichtwellenleiter angekoppelten Oszilloskop-Fotodiodenvorsatz verifiziert werden. Da Gasentladungslampen in diesem Betriebszustand einen negativen Innenwiderstand aufweisen, ist es besonders wichtig, die Anschlussleitung zwischen Simmerwiderstand und Spektrallampe möglichst kurz zu halten, um durch die

parasitäre Kapazität der Leitung ausgelöstes Oszillieren des Entladestroms zu vermeiden.

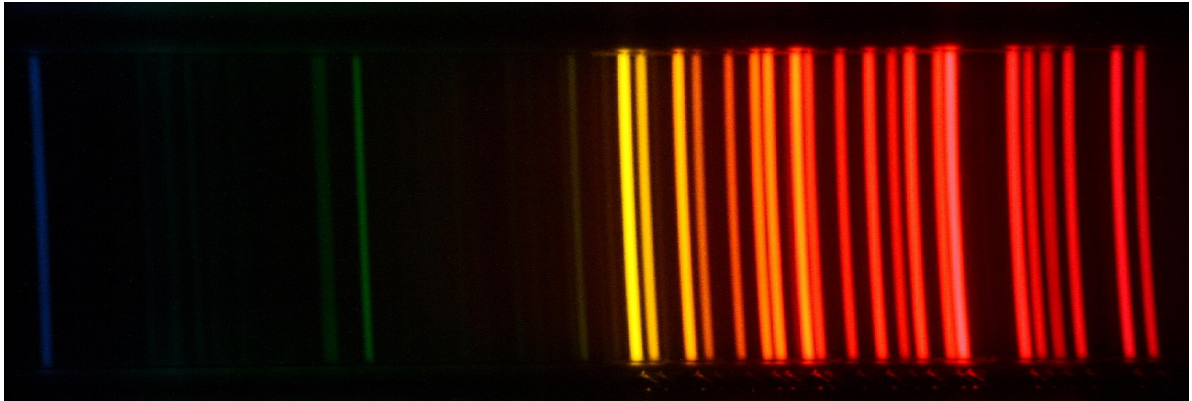
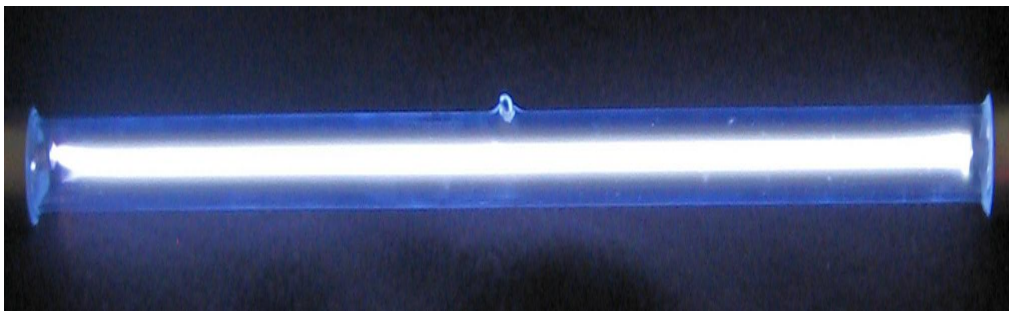


Abbildung 37: Neon-Spektrallampe, durch optisches Gitter mit 600 Linien/mm betrachtet

Achtung! Es ist besonders wichtig, dass für diesen Betrieb die Prepulse- sowie Hauptpuls-Kondensatorbänke abgeklemmt werden, weil im Falle einer unvorhergesehenen Zündung der Schaltfunkenstrecken ein mehrere kA betragender Strom durch die dünne Kapillare der Spektrallampe fließen würde. Dies hätte die instantane Detonation zur Folge und es können Gehörschäden durch die Druckwelle sowie Verletzungen durch Splitterflug, insbesondere Augenverletzungen nicht ausgeschlossen werden.

Betrieb von Blitzlampen

Aufgrund der hohen Leerlaufspannung sind nahezu alle gängigen mit Krypton oder Xenon gefüllten Blitzlampen einsetzbar, es müssen jedoch deren maximale Entladungsenergie, die mittlere umsetzbare Leistung sowie die maximale Strombelastbarkeit beachtet werden. Die Selbstzündspannung der eingesetzten Blitzlampe muss kleiner sein als die Ladespannung der Simmerkondensatorbank. Dadurch wird der Simmerbetrieb (siehe Abb. 38) erst möglich.



*Abbildung 38: Blitzlampe Simmerbetrieb
deutlich sichtbar der wandabgelöste zentrische Plasmakanal*

Derzeit ist das Netzteil auf minimale Entladungszeit (siehe Abb. 39) und maximalen Entladestrom, insbesondere für das Pumpen von Farbstofflasern optimiert. Durch Einfügen von hochspannungsfesten Induktivitäten können jedoch der Entladestrom und die Entladedauer an die jeweilige Applikation, wie zum Beispiel das Pumpen von Rubin- oder Nd:YAG-Laser angepasst werden.

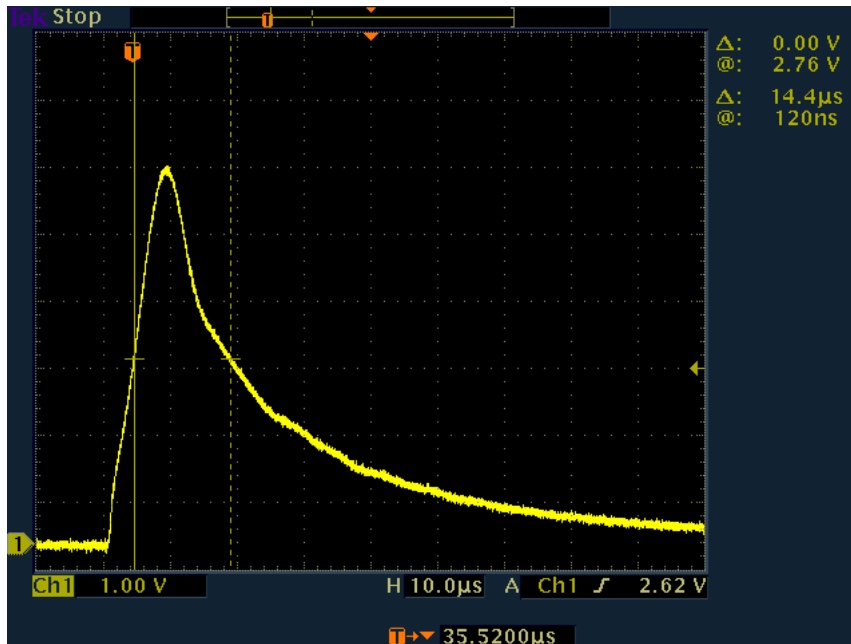


Abbildung 39: Lichtintensitätsverlauf einer Blitzlampenentladung bei 72J
 nicht induktionsarm temporär verkabelt daher verlängerte Entladedauer und leichte
 Oszillationen in der abfallenden Flanke

LWL-Lichtdetektor: BPW34 bei 15V mit 100R-Bürde und 5m-LWL-Kabel

Über die Stromdichte in der Blitzlampe während der Entladung kann in gewissem Rahmen das Spektrum des abgegebenen Lichts beeinflusst werden. Hierbei bedeutet eine geringe Stromdichte eine Dominanz der der jeweiligen Gasfüllung zugehörigen Spektrallinien, die mit zunehmender Stromdichte mehr und mehr in das Spektrum eines thermischen Strahlers übergeht [11].

In dem hier vorgestellten Aufbau können Stromdichten bis circa 6kA/cm^2 erreicht werden und das entstehende Plasma sendet Licht aus, das der Strahlung eines thermischen Strahlers mit mehr als 10000K entspricht. Der Kolben der Blitzlampen ist auf Grund der mechanischen und thermischen Belastung aus Quarzglas gefertigt. Da Quarzglas für UVA-, UVB- und UVC-Strahlung durchlässig ist, ist mit einer erheblichen Strahlenbelastung zu rechnen. Diese kann zu Hautirritationen beziehungsweise zu Hautbrand und seinen Spätfolgen sowie zu Augenentzündungen führen. Sollte das aus der Blitzlampe austretende Licht direkt aus nächster Nähe oder unter Verwendung eines optischen Hilfsmittels betrachtet werden, kann es aufgrund der hohen Energiedichte zu Netzhautverbrennungen, die

bis zur Erblindung führen können, kommen. Es ist daher immer ein ausreichender Augenschutz zu tragen.

Blitzlampen sind Verschleißteile und somit muss mit ihrem Versagen jederzeit gerechnet werden. Da während der Entladung Leistungen im zweistelligen Megawatt-Bereich in der Blitzlampe umgesetzt werden, kann ein mechanisches Versagen der Blitzlampe zu einer Detonation mit dem damit verbundenen Splitterflug und Druckwellenausbreitung führen. Dies kann zu Augen-, Haut- und Trommelfellverletzungen führen.

Betrieb von Hohlkathodenblitzlampen

Der Betrieb einer selbstgebauten Hohlkathodenblitzlampe ist ohne Probleme möglich, solange der Elektrodenabstand ein Zünden der Simmerentladung (siehe Abb. 40) zulässt.

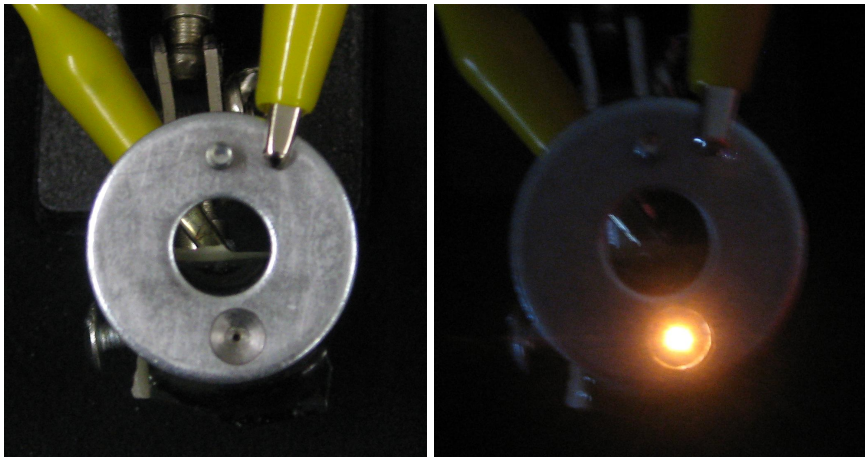


Abbildung 40: Hohlkathodenblitzlampe Frontansicht ohne/mit Simmerbetrieb

Bohrungsdurchmesser circa 1mm

Dies ist bei einer Leerlaufspannung von 12kV und einem Elektrodenabstand von 3mm auf jeden Fall gegeben. Der Plasmaentladungskanal, der durch eine kleine Bohrung im Isolationsmaterial die 1mm Durchmesser aufweist, in seiner Ausdehnung beschränkt wird, weist einen gegenüber einer nicht eingeschränkten Entladung

höheren Plasmakanalwiderstand auf, wodurch dessen Entladeeigenschaften dem einer Niederdruckblitzlampenentladung ähnlich sind (siehe Abb. 41). Da das Entladungsvolumen jedoch wesentlich kleiner ist als bei einer Blitzlampenentladung ist die abgestrahlte Energiedichte wesentlich höher (siehe Abb. 42). Dieses kleine Entladungsvolumen stellt die ideale Voraussetzung dafür dar, dass das erzeugte Licht über Linsen kollimiert werden kann.

Somit kann diese sehr lichtstarke, nahezu punktförmige Lichtquelle mittels Monochromator in ihre spektralen Komponenten aufgeteilt und in eine Glasfaser eingekoppelt werden. Dies kann als schmalbandige Lichtquelle für die Beleuchtung von Fluoreszenztomografieproben eingesetzt werden.

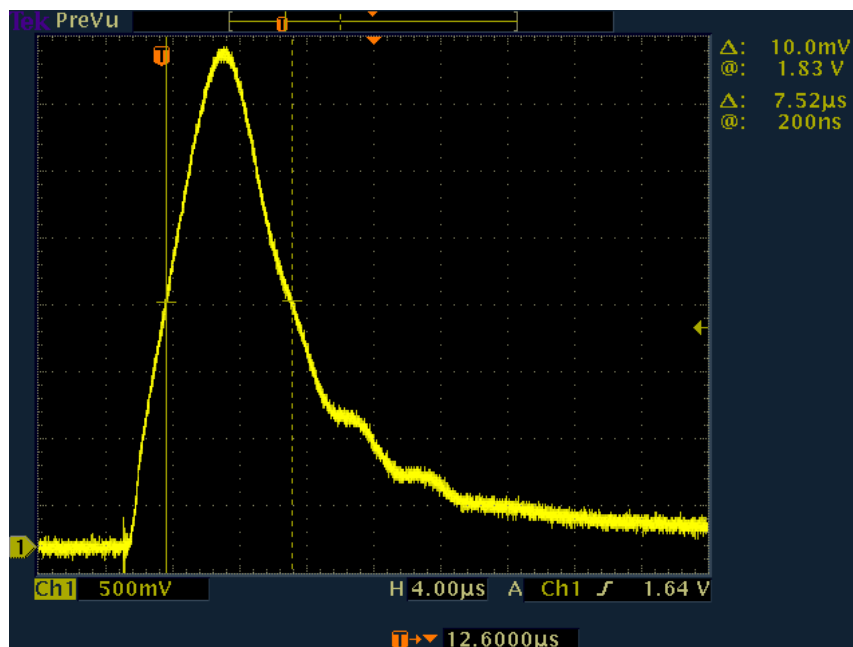
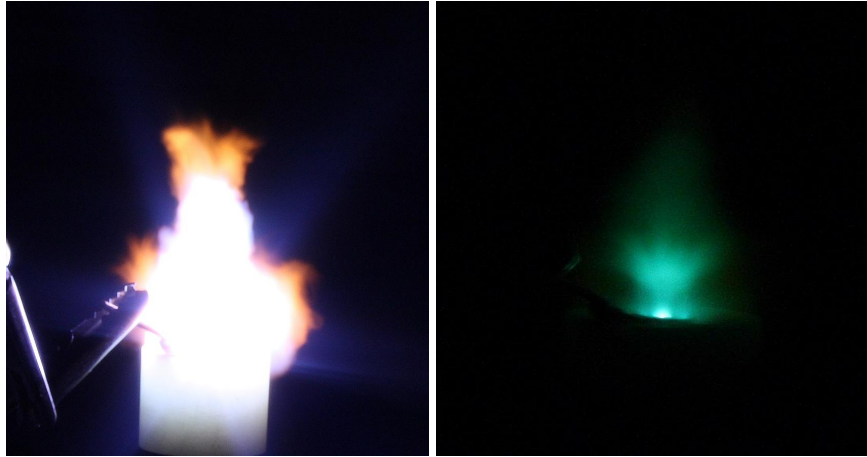


Abbildung 41: Lichtintensitätsverlauf einer Hohlkathodenblitzlampe bei 72J nicht induktionsarm temporär verkabelt daher verlängerte Entladedauer und leichte Oszillationen in der abfallenden Flanke

LWL-Lichtdetektor: BPW34 bei 15V mit 100R-Bürde und 5m-LWL-Kabel

Messungen an einem Prototypaufbau, der als Isolationsmaterial Speckstein aufweist, zeigten eine Aufweitung der 1mm-Bohrung auf circa 2mm nach circa 300 Entladungen mit einer Entladungsenergie von circa 72J. Würde der Speckstein durch thermisches Sintern gehärtet, wäre der Abtrag wesentlich geringer. Als Alternative könnten natürlich auch Glas oder Oxidkeramiken, wie beispielsweise

Aluminiumoxidkeramik verwendet werden, deren Bearbeitung jedoch wesentlich schwieriger ist.



*Abbildung 42: Hohlkathodenblitzlampe Seitenansicht einer Blitzentladung bei 72J
eine Entladung pro Foto*

Kamera-Hohlkatodenblitzlampe-Abstand: circa 2m

Foto links:

Blende: 36

ISO: 100

Filter: keiner

Foto rechts:

Blende: 16

ISO: 400

Filter: Schott Schweißglas Nr. 10

Abschwächung: >5000

Als wichtige Vorsichtsmaßnahme soll hierbei erwähnt werden, dass die Plasmafackel, die aus der der Hohlkathode herausschießt, eine Plasmatemperatur von mehreren tausend Kelvin aufweist. Dies kann zu Verbrennungen führen. Weiters reißt die Plasmafront Elektroden- und Isolationsmaterial mit sich, das mit mehrfacher Schallgeschwindigkeit von der Hohlkathode weg geschleudert wird. Diese Partikel können in Verbindung mit der Druckwelle der Plasmafront die Haut und das darunter liegende Gewebe zerreißen. Durch die extrem schnelle Volumenänderung des Plasmas breitet sich eine starke Druckwelle aus, die zu Gehörschäden führen kann. Durch die Einschnürung des Plasmas heizt sich dieses sehr stark auf und erzeugt hierdurch starke UVA-, UVB- und UVC-Strahlung. Diese kann zu Hautirritationen

beziehungsweise zu Hautbrand und seinen Spätfolgen sowie zu Augentzündungen führen. Sollte das aus der Hohlkathode austretende Licht direkt aus nächster Nähe oder unter Verwendung eines optischen Hilfsmittels betrachtet werden, kann es aufgrund der hohen Energiedichte zu Netzhautverbrennungen, die bis zur Erblindung führen können, kommen.

Das in den vorherigen Kapiteln beschriebene System erfüllt die im Kapitel Aufgabenstellung beschriebenen Anforderungen zur Gänze.

Darüber hinaus konnte festgestellt werden, dass sich das System wie geplant an die verschiedenen Aufgaben anpassen lässt. Die Anpassbarkeit an die verschiedenen Randbedingungen ist gegeben, insbesondere für verschiedene zeitliche Stromverläufe, was besonders für die Anpassung an das jeweilige zu pumpende Medium bei Einsatz als Laserpumpquelle von enormer Wichtigkeit ist.

Darüber hinaus bieten sich weitere mögliche Einsatzgebiete des Netzteils an:

- Wenn ein passender Farbstoff, beispielsweise Kresylviolett mit Hilfe der Blitzlampen gepumpt wird, kann dies zur Verstärkung von Licht einer Laserdiode (650nm) eingesetzt werden [20] [21].
- Durch Funkenüberschlag in Gasen oder Flüssigkeiten können aufgrund der Plasmakanalausdehnung Druckwellen erzeugt werden. Diese können als breitbandige Schall- beziehungsweise Ultraschallquellen bis in den MHz-Bereich eingesetzt werden.
- Bei Einsatz einer Hohlkathodenblitzlampe als schnelle sehr lichtstarke punktförmige Lichtquelle kann das Netzteil zum Sichtbarmachen von Brechzahlgradienten in Gasen oder Flüssigkeiten mit Hilfe der Schlierenfotografie eingesetzt werden. Hiermit ist es möglich, die Ultraschallausbreitung in Flüssigkeiten sichtbar zu machen.
- Als Impulsspannungsquelle kann das Netzteil zur Ansteuerung von Kerrzellen zum Einsatz als elektrooptischen Shutter vor Kameras eingesetzt werden.

Anhang

Wolfram elektrisch kontaktieren

Klemmverbindungen zwischen Wolfram und Messing weisen relativ hohe Übergangswiderstände auf, da Wolfram sich mit einer passivierenden Oxidschicht überzieht und Messing ebenfalls mit der Zeit oxidiert. Besser ist es, eine Verbindung durch Einschrumpfen oder Löten herzustellen. Einschrumpfen erfordert bei der mechanischen Fertigung eine hohe Präzision. Löten ist bezüglich der mechanischen Fertigungsgenauigkeit wesentlich toleranter. Aus diesem Grund wird hier die Lötmethod angewendet.

Da sich Wolfram nicht direkt löten lässt, muss zuerst eine lötbare Zwischenschicht auf das Wolfram aufgebracht werden. In der Elektronik ist Verkupfern eine übliche galvanische Methode und somit ist es naheliegend, Wolfram zu verkupfern.

Um eine auf Wolfram haftende Kupferschicht aufzutragen sind folgende Schritte nötig:

- mechanische Vorbehandlung
- Beizen
- Verkupfern

Im folgenden werden die einzelnen Arbeitsschritte im Detail erklärt:

Mechanische Vorbehandlung

Da Wolfram eine hohe mechanische Festigkeit aufweist lässt es sich nur mit Hartmetallwerkzeugen drehen oder fräsen. Die hier verwendeten Wolframstäbe werden, da sie schon maßhaltig sind, nur mehr mit einer Diamantnadelfeile angeschliffen. Dies geschieht, um die Oberfläche aufzurauen und somit die

Kontaktfläche Wolfram-Kupfer zu vergrößern. Weiters verkeilt sich das in den Riefen abgeschiedene Kupfer mit dem Wolfram und verhindert somit ein Ablösen der Kupferschicht.



Abbildung 43: Wolfram nach mechanischer Vorbehandlung mittels Diamantwerkzeug

Beizen

Durch das Schleifen wird die Wolframoxidschicht abgetragen. Das Beizen entfernt die letzten Oxidreste und entfettet.

Folgendes Beize-Rezept hat sich als effektiv erwiesen:

50g Natriumhydroxid (**NaOH**) werden in 100ml demineralisiertem Wasser eingerührt und die entstehende Natronlauge solange geschwenkt, bis sich die Natriumhydroxidkristalle vollständig aufgelöst haben. Sobald die Lösung klar geworden ist, kann sie verwendet werden.

Das zu verkupfernde, geschliffene Wolfram wird an den MINUS-Pol eines Netzgerätes angeschlossen und in die beschriebene Natronlauge eingetaucht. An den PLUS-Pol des Netzgerätes wird ebenfalls ein Stück Wolfram angeschlossen und dieses in die Natronlauge eingetaucht. Zwischen den beiden Wolframelektroden wird eine Spannung von circa 1,5V angelegt. Die Spannung sollte so eingestellt werden, dass sich um die Elektrode herum ein gleichmäßiger Blasenvorhang aus möglichst kleinen Blasen ausbildet. Die Verweildauer in diesem Bad beträgt circa 5-10 Minuten.

Besonders wichtig ist, dass beachtet wird, dass es zu Knallgasentwicklung kommt, weshalb unbedingt für ausreichende Raumlüftung zu sorgen ist!

Am MINUS-Pol bildet sich nun Wasserstoff, der als kleine Bläschen aufsteigt. Am PLUS-Pol bildet sich Sauerstoff, der das Wolfram zu Wolfram(VI)-oxid (WO_3) oxidiert. Dies ist als zitronengelber Niederschlag auf der Elektrode sichtbar (siehe Abb. 44).



Abbildung 44: Wolfram wird in Natronlauge geätzt

hintere Elektrode: Wasserstoffbläschen umspülen und reduzieren das Werkstück

*vordere Elektrode: Sauerstoffbläschen oxidieren Wolfram zu
zitronengelbem Wolfram(VI)-Oxid*

Verkupfern

Nach den Beizen wird das zu verkupfernde Wolfram-Werkstück gründlich mit Wasser gespült und getrocknet. Dabei ist darauf zu achten, die saubere fettfreie Oberfläche nicht zu verschmutzen. Dann wird das Werkstück in die Verkupferungslösung eingetaucht.

Die Verkupferungslösung wurde nach einem Standardrezept nach Arendt-Dörmer angesetzt [22].

12,5g Kupfer(II)-sulfat (CuSO_4) werden in 100ml demineralisiertes Wasser eingerührt. Weiters werden noch 5g konzentrierte Schwefelsäure (H_2SO_4) sowie 5g Ethanol

(C_2H_5OH) wie beispielsweise Brennspritus hinzugegeben. Diese Lösung wird solange geschwenkt, bis sich die Kupfer(II)-sulfatkristalle vollständig aufgelöst haben.

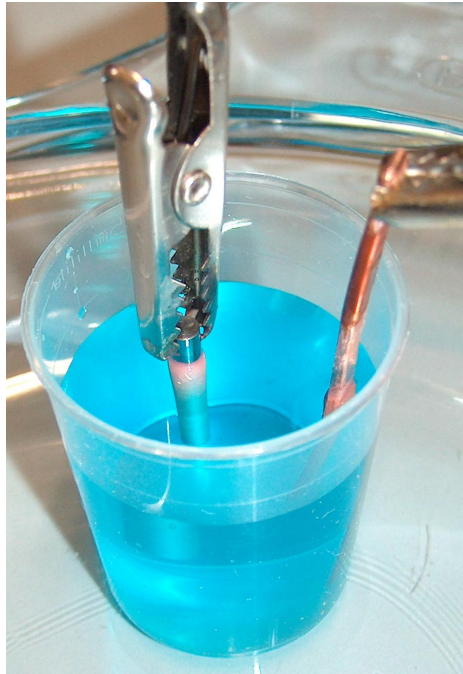


Abbildung 45: Wolfram verkupfern

An das zu verkupfernde Werkstück wird der MINUS-Pol eines Labornetzgerätes angeschlossen. An den PLUS-Pol des Netzgerätes wird ein Stück Galvanikkupfer, beispielsweise ein Stück Kupferdraht angeschlossen und in die Verkupferungslösung eingetaucht. Zwischen der Wolframelektrode und der Kupferelektrode wird eine Spannung von ca. 0,6V angelegt. Die Spannung sollte so eingestellt werden, dass sich um die Wolframelektrode herum keine Blasen bilden. Diese Blasenfreiheit bewirkt, dass eine gleichmäßige, glatte Kupferschicht abgeschieden wird. Die Verweildauer in diesem Bad beträgt circa 5-10 Minuten.

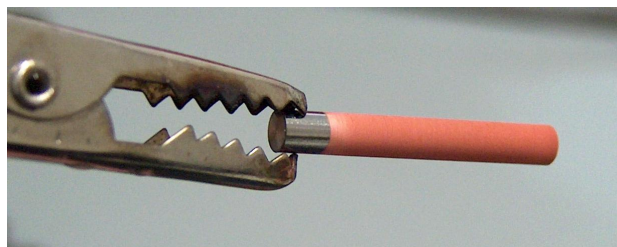


Abbildung 46: verkupferes Wolfram

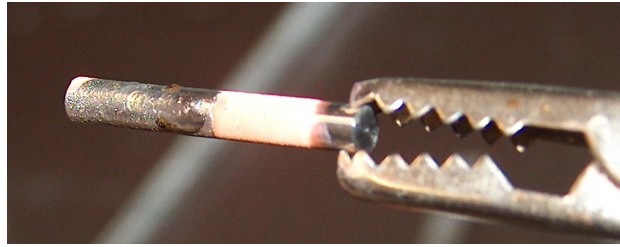


Abbildung 47: teilverzinnntes, verkupfertes Wolfram

Glas mit Messing verlöten

Übliche angewendete Weichlote können Glas nicht benetzen. Somit kann mit diesen keine gasdichte Glas-Metall-Verbindung hergestellt werden. Wird jedoch Ultraschall ausreichender Intensität in die Lötspitze eingekoppelt, kann die Oberflächenspannung des Lotes durchbrochen werden und das Lötzinn kann eine Verbindung mit dem Glas eingehen. Da es für diese sogenannten Ultraschalllötstation nur sehr wenige Hersteller gibt, bewegt sich der Preis um die 4000-6000 Euro pro Stück. Auf Grund dieser hohen Anschaffungskosten stand keine derartige Lötstation zur Verfügung. Es musste daher nach einer anderen Lösung gesucht werden.

Indium benetzt Glas und kann somit als Lot zum Herstellen einer gasdichten Glas-Metall-Verbindung eingesetzt werden. Da Indium jedoch bei $156,6^{\circ}\text{C}$ schmilzt und weich ist, sind mittels Indium hergestellte Verbindungen weder thermisch noch mechanisch belastbar.

Platin- und Goldpasten, die auf Glas oder Keramik aufgebracht werden, können nach dem Einbrennen weich und hart mit Metallen verlötet werden. Da jedoch kein Hochtemperaturofen zur Verfügung stand, konnte auch diese Methode nicht angewandt werden.

Als einfach durchzuführende Methode zur Herstellung von Glas-Metall-Verbindungen erwies sich daher, Glas chemisch zu versilbern und anschließend auf dem Silber

galvanisch Kupfer abzuscheiden. Diese Kupferschicht kann wie gewohnt verzinkt und mit Metall verlötet werden. Dieser Ablauf wird im folgenden dargestellt:

Glas versilbern

Die zu versilbernde Glasfläche wird mittels Diamantfräser aufgeraut. Anschließend wird das zu versilbernde Objekt in einem Gemisch aus 2/3 Spiritus und 1/3 Wasserstoffperoxid (Konzentration 30%) im Ultraschallreiniger gereinigt. (Sicherheitsdatenblatt [23] ist sinngemäß anzuwenden).

Erfahrungen aus dem Laboralltag haben gezeigt, dass auch wenn Aceton in dieser Anleitung nicht enthalten ist, es zum Entfetten von Werkstücken verwendet wird. Dabei ist besonders zu beachten, dass Wasserstoffperoxid nicht mit Aceton gemischt werden darf, da dadurch Acetonperoxid, ein sehr instabiler Initialsprengstoff entstehen kann [24].

Durch diese Reinigung werden mechanisch alle losen Partikel entfernt, sowie die Oberfläche entfettet.

Für den Versilberungsprozess selbst wurden 2 Lösungen nach [25] angesetzt:

Lösung 1:

In 20ml destilliertem Wasser wurde 1g Silbernitrat (**AgNO₃**) aufgelöst. Anschließend wurde tropfenweise unter Schwenken Ammoniakwasser (Konzentration 25%, Trivialname: Salmiakgeist) zugegeben. Die Lösung färbte sich bräunlich und schlug dann innerhalb von 1-2 Tropfen von braun nach weiß-transparent um. Es ist wichtig, mit der Zugabe bei Einsetzen dieser Umschlages sofort aufzuhören.

Lösung 2:

In 20ml destilliertem Wasser wurden 2g Traubenzucker (**C₆H₁₂O₆**) aufgelöst.

Die zu versilbernden Glasobjekte wurden mit einer Mischung von 1:1 der beiden Lösungen benetzt. Bei ausreichender Raumtemperatur startet der Versilberungsprozess innerhalb weniger Minuten von selbst und ist durch eine anfängliche Braun- und anschließende Blaufärbung des Glases gekennzeichnet. Ist die Temperatur des Gemisches zu gering, so muss durch Erwärmen der Lösung die erforderliche Reaktionsenergie aufgebracht werden.

Nach circa 30 Minuten ist die Versilberung abgeschlossen und die versilberten Glasobjekte können der Lösung entnommen werden und müssen mit Wasser gereinigt und getrocknet werden, wobei besonders auf vorsichtiges Behandeln zu achten ist, damit die Silberschicht nicht wieder entfernt wird.

Diese nun aufgebrachte Silberschicht kann nicht verlötet werden. Um das Material löten zu können, muss der Gegenstand zusätzlich verkupfert werden. Es ist ratsam, dies zeitnah durchzuführen, um ein zwischenzeitliches Anlaufen des Silbers zu vermeiden.

Kupfer auf Silber galvanisch abscheiden

Für die folgende Anleitung wurde die auf Seite 83 beschriebene Verkupferungslösung verwendet.

Die Besonderheit dabei ist, dass bei Verwendung einer Kupferkontaktierung am Anfang eine hohe Badspannung (circa 5V) angelegt werden muss, damit das Silber sich mit einer Kupferschicht überzieht. Sobald diese Kupferschicht durchgehend abgeschieden wurde, wird die Badspannung herunter geregelt, um eine glatte, dichte Kupferschicht zu erhalten. Zu hoher Strom beziehungsweise zu hohe Spannung würden zu einer porösen, schwammartigen Kupferabscheidung führen, die schlecht haftet. Legt man hingegen am Anfang keine hohe Badspannung an, so kann überhaupt kein Kupfer am Silber abgeschieden werden und es würde sich nur Kupfer an der Kupferklemme abscheiden. Der Zeitpunkt, bei dem die Spannung abgesenkt werden muss, ergibt sich durch den Farbumschlag am Objekt, das waren circa 30 Sekunden.



Abbildung 48: Glas-Messing-Lötverbindung

Speckstein als Werkstoff

Speckstein ist ein wasserhaltiges Magnesiumsilikat, das monoklin kristallisiert ist. Speckstein wird auch als Talk bezeichnet ($3\text{MgO} \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$). Die einzelnen Elementarschichten sind lediglich durch VAN DER WAALSche Kräfte verbunden, weshalb die Elementarschichten entlang dieser Schichtebene sehr gut spaltbar sind.

Speckstein hat eine Mohshärte von 1, ist also mit dem Fingernagel ritzbar, und lässt sich auf Werkzeugmaschinen ausgezeichnet bearbeiten, insbesondere drehen, fräsen, Gewinde schneiden und vieles mehr. Da es bei Silikatmineralien zu einem geringen Asbest-Anteil kommen kann, sollte nur Speckstein verwendet werden, bei dem feststeht, dass kein Asbest enthalten ist. Vorsichtshalber empfiehlt sich eine gute Lüftung der Arbeitsräume sowie die Verwendung von Atemschutzmasken.



Abbildung 49: Speckstein Drehling

Lochdurchmesser circa 4mm

Um die mechanische Belastbarkeit nach der Bearbeitung zu erhöhen, kann Speckstein in einem Ofen gebrannt werden. Ab 800°C beginnt die Wasserabspaltung, ab circa 1150°C setzen erste Sinterprozesse ein, ab 1200°C kommen erste kieselensäurehaltige Flüssigphasen hinzu. Ein optimaler Brennprozess sollte also circa $1200 - 1300^\circ\text{C}$ über mehrere Stunden mit langsamer Abkühlphase aufweisen. Hierdurch sind Härtegrade wie bei Industriesteatit beziehungsweise Magnesiumoxidkeramik erreichbar. Es muss mit 1 – 2 % Schrumpfung gerechnet werden [26].

Vermessung der Hochspannungskondensatoren

Da für den Aufbau der Hochspannungskondensatorbänke aus budgetären Gründen Mikrowellenausschlachtware verwendet wurde, mussten für jeden der 128 Kondensatoren folgende Parameter ermittelt werden:

- Kapazität
- Parallelwiderstand
- Spannungsfestigkeit
- Serieninduktivität

Kapazität

Die Kapazität wurde mit einem Handmultimeter auf 5 % genau ermittelt. Dies diente als erstes Auswahlkriterium um Fehler, beispielsweise intern abgebrannte Kontaktflächen oder Ölverlust zu erkennen.

Parallelwiderstand

Dieser wurde ebenfalls mit einem Handmultimeter ermittelt. Als Auswahlkriterium galt hier, wenn die Werte extrem von den Typenschildangaben abwichen, so ein Typenschild vorhanden war. Bei den Kondensatoren ohne Typenschild wurde der hier gemessene Widerstandswert mit jenem Widerstandswert bei Hochspannung verglichen. Gab es gravierende Abweichungen, wurde der Kondensator ausgeschieden.

Spannungsfestigkeit

An den Kondensator wurde die gleichgerichtete Spannung eines Mikrowellentransformators (2800 – 3200V) angelegt und der Strom durch den Kondensator sowie die Kondensatorspannung ermittelt. Diese Spannung wurde für eine Minute angelegt, um die Spannungsfestigkeit zu überprüfen. Aus der so

ermittelten Kondensatorspannung sowie dem Kondensatorstrom konnte der Parallelwiderstand bei Hochspannungsmessung errechnet werden.

War ein „Knattern“ hörbar oder fing der Transformator zu brummen an, konnte man davon ausgehen, dass der Kondensator bei Hochspannung einen Kurzschluss erleidet und daher zu verwerfen ist.

Serieninduktivität

Ein Kondensator weist immer parasitäre Serieninduktivitäten beziehungsweise parasitäre Parallel- und Serienwiderstände auf (siehe Abb. 50). Der Parallelwiderstand wurde in den vorigen Schritten ermittelt, ebenso die Kapazität. Der Serienwiderstand wird nicht berücksichtigt, da er verschwindend gering ist (Metall-Ölpapier-Kondensator).

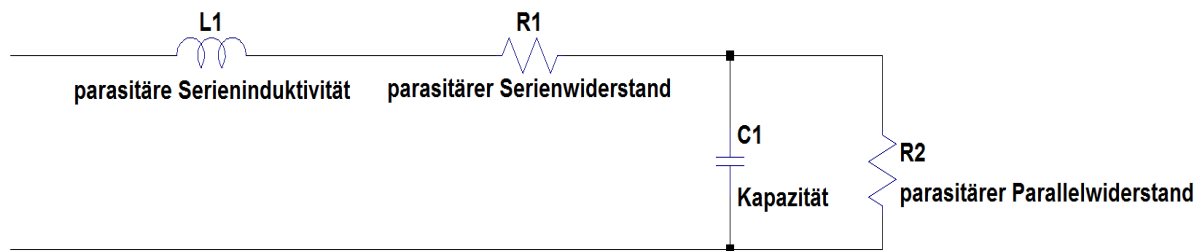


Abbildung 50: Ersatzschaltbild eines realen Kondensators

Um eine schnelle Entladung der Kondensatorbank sicherzustellen, ist eine kleine Serieninduktivität von besonderer Wichtigkeit. Die einfachste Methode, die Serieninduktivität zu ermitteln, ist die Ermittlung der Serienresonanzfrequenz des Serienschwingkreises der Kapazität des Kondensators mit dessen parasitärer Serieninduktivität (siehe Schaltplan unten Abb. 51).

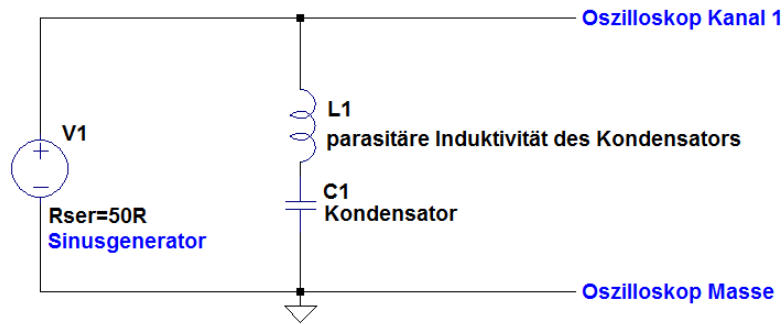


Abbildung 51: Schaltplan zur Messung der Resonanzfrequenz

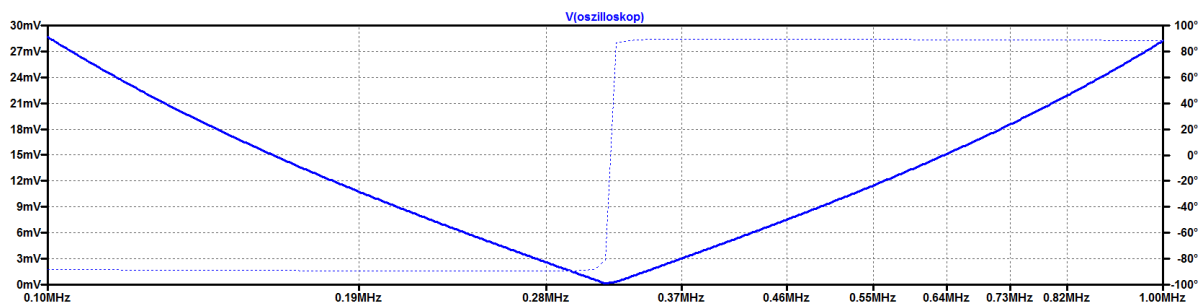


Abbildung 52: frequenzabhängige Oszilloskop-Eingangsspannung

Hierzu wird die Frequenz der von Sinusgenerators ausgegebenen Spannung so lange variiert, bis das Minimum der am Kondensator anliegenden Spannung gefunden ist (siehe Abb. 52). Die Frequenz, bei der die Ausgangsspannung ein Minimum ist, ist die Serienresonanzfrequenz der parasitären Induktivität des Kondensators mit dessen Kapazität. Beim Messaufbau ist darauf zu achten, dass dieser möglichst kompakt (hieraus resultieren möglichst kleine zusätzliche Induktivitäten) aufgebaut wird.

Aus dieser Serienresonanzfrequenz und der zuvor ermittelten Kapazität kann über folgende Formel die parasitäre Serieninduktivität ermittelt werden:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad L = \frac{\left(\frac{1}{2\pi f}\right)^2}{C} \quad [3]$$

Folgende Tabelle ist eine Übersicht über die in acht Hochspannungsbänken verbauten Kondensatoren, deren elektrischen Eigenschaften sowie deren mechanischen Zustand:

Kondensator- Nummer	C [µF]	R [MΩ]	Besonderheiten, optischer Zustand	f _{resonanz} [MHz]	L [nH]
001	0,92	9,95		0,33	253,66
002	0,93	9,98		0,33	249,84
003	0,95	10,02	"Gehäuse verbeult"	0,33	245,36
004	0,91	10,00	"Gehäuse verbeult"	0,33	255,05
005	0,94	10,00	"Anschlüsse verbogen, Gehäuse verbeult"	0,33	247,98
006	0,92	9,98	"Anschlüsse verbogen, Isolation abgebrochen, rostig"	0,33	252,55
007	0,96	9,07	"rostig"	0,34	227,54
008	0,96	10,55	"Anschlussisolation abgebrochen"	0,34	227,30
009	0,92	9,95		0,34	239,21
010	0,96	9,98		0,33	243,05
011	0,93	9,96		0,34	235,36
012	1,10	8,88		1,10	19,05
013	1,12	9,27		0,30	250,40
014	1,12	9,11	"Anschlussisolation abgebrochen"	0,33	208,61
015	1,18	9,05		0,30	239,33
016	1,17	8,93	"Gehäuse verbeult"	0,32	211,79
017	1,16	9,20	"rostig"	0,31	226,84
018	0,99	9,92		0,33	236,14
019	0,98	9,82	"Gehäuse verbeult"	0,33	236,38
020	1,12	9,24		0,31	235,97
021	1,12	8,52		0,87	29,88
022	1,11	9,02	"Gehäuse verbeult"	0,39	149,50
023	1,12	8,69	"rostig"	0,39	148,83
024	0,94	9,37	"Gehäuse verbeult"	0,34	232,61
025	0,95	10,56		0,34	230,65

026	0,94	0,00	"Gehäuse verbeult, Anschlussisolation abgebrochen"	0,35	220,68
027	1,06	9,89		0,32	233,81
028	1,04	10,29		0,33	223,44
029	0,77	10,07	"Gehäuse verbeult, rostig"	1,66	12,02
030	0,91	9,49		0,33	255,05
031	1,04	9,13		0,32	238,54
032	0,91	10,83		0,32	272,73
033	0,89	21,09		0,34	246,20
034	0,83	0,00		0,36	236,34
035	0,89	0,00	"rostig"	0,34	246,76
036	0,91	0,00	"rostig"	0,34	240,79
037	0,91	0,00	"rostig"	0,34	241,86
038	0,90	0,00	"rostig"	0,33	257,30
039	0,73	10,36		0,38	239,97
040	0,93	10,07	"Gehäuse verbeult"	0,34	235,61
041	0,81	9,68		0,87	41,37
042	0,94	9,35		0,35	220,68
043	0,87	10,59		0,36	224,66
044	0,89	9,34		1,55	11,90
045	0,93	9,75		0,34	236,12
046	0,93	10,46		0,34	235,36
047	0,95	9,07	"Gehäuse verbeult"	1,07	23,29
048	0,90	10,06		0,36	216,69
049	0,99	11,41	"rostig"	0,33	234,71
050	1,11	10,58		0,32	222,45
051	0,93	10,80		0,33	249,84
052	0,93	10,02		0,58	80,88
053	0,88	10,78		0,37	210,26
054	0,91	9,70		0,36	214,78
055	0,91	9,94	"rostig"	0,93	32,36
056	0,93	9,85	"rostig"	0,35	223,30
057	0,93	10,23		0,35	222,10
058	0,92	9,68		0,79	44,16

059	0,88	9,13		0,34	248,15
060	0,93	9,78	"Gehäuse verbeult"	2,36	4,88
061	1,01	8,82		0,45	123,61
062	0,98	9,40		0,33	236,87
063	0,99	9,51		0,48	111,50
064	1,00	8,93		0,46	119,71
065	1,00	8,27		0,33	232,14
066	0,99	9,49		0,35	208,66
067	1,00	9,41		0,34	219,78
068	0,99	9,13		0,34	220,44
069	0,90	9,11	"rostig"	0,35	230,01
070	0,90	8,45		0,57	86,63
071	1,09	9,09		0,34	200,66
072	0,95	8,71		0,47	120,70
073	0,86	9,27		0,35	239,33
074	0,93	9,34		0,34	235,61
075	0,93	0,00		0,34	236,89
076	0,93	0,00		0,34	234,60
077	0,76	9,39		0,38	231,73
078	0,84	10,19	"Anschlussisolation abgebrochen"	0,38	210,08
079	0,83	10,27		0,43	165,25
080	0,82	10,00	"Anschlussisolation abgebrochen"	0,38	214,97
081	0,85	10,09		1,09	25,02
082	0,86	10,34		0,36	227,27
083	0,89	0,00		0,34	246,48
084	0,89	0,00		0,34	245,65
085	0,90	0,00		0,34	242,93
086	0,88	0,00		0,34	248,15
087	0,89	0,00	"Anschlüsse verbogen, rostig"	0,34	245,65
088	0,92	10,64		0,34	238,69
089	0,89	0,00		0,35	232,07
090	0,90	9,64		0,33	259,31
091	0,90	10,02		0,33	258,45
092	1,07	9,89	"Gehäuse verbeult"	0,33	216,58

093	0,98	9,95		1,44	12,52
094	1,00	10,09		0,33	233,77
095	0,98	10,00		0,33	238,08
096	1,00	10,00		0,32	248,36
097	0,97	10,14	"Gehäuse verbeult, Anschlussisolation abgebrochen"	0,33	238,81
098	0,98	10,15		0,33	236,62
099	0,76	9,82		0,40	209,69
100	1,00	10,15		0,34	218,25
101	0,98	0,00		0,32	252,41
102	0,97	9,24		0,88	33,58
103	1,11	10,50		0,31	238,32
104	1,09	10,94	"Gehäuse verbeult"	0,31	242,49
105	1,09	10,13		0,31	242,26
106	1,07	10,27	"Gehäuse verbeult, Anschlussisolation abgebrochen"	0,31	246,34
107	1,07	9,58		0,31	245,65
108	1,08	10,78	"Gehäuse verbeult"	0,32	228,41
109	1,17	9,36		0,29	257,43
110	1,18	10,10	"Gehäuse verbeult"	0,29	254,82
111	0,91	0,00		0,32	272,73
112	1,03	8,37	"Diode"	0,32	240,63
113	0,98	9,78		1,60	10,10
114	0,89	9,06	"Gehäuse verbeult"	0,34	245,10
115	1,00	0,00		0,32	248,11
116	0,90	10,15	"Diode, rostig"	2,76	3,68
117	1,06	0,00		0,31	249,84
118	1,02	0,00	"Anschlüsse verbogen"	0,31	257,41
119	1,06	10,09		0,31	249,84
201	0,85	9,33		0,36	230,21
202	0,85	9,09	"rostig"	0,37	217,94
203	0,86	8,88		0,39	194,78
204	0,73	9,95		1,39	17,91
205	0,93	9,57		0,34	235,87

206	0,85	10,68	"Diode"	1,42	14,74
207	0,89	9,28	"Diode, rostig"	0,35	232,60
208	0,90	9,43	"Diode"	0,37	205,13
209	0,90	10,18	"Diode, Gehäuse verbeult, rostig"	0,36	217,65
210	0,75	9,28	"Diode"	0,35	276,44
211	0,74	10,00	"Diode, Gehäuse verbeult, rostig"	0,00	
212	0,71	0,00	"Diode, rostig"	0,00	
213	0,91	9,97	"Diode"	0,00	
214	0,88	11,07	"Diode, rostig"	0,87	37,99

Literaturverzeichnis

- [1] Freiburger M, Egger H, Scharfetter H: *Nonlinear Inversion in Fluorescence Optical Tomography*. SFB-Report 2009-078
- [2] Schulz R: *Development of a Non-Contact Fluorescence Tomography System with Appropriate Reconstruction Techniques*. Thesis, Combined Faculties for the Natural Sciences and for Mathematics of the Ruperto-Carola-University of Heidelberg, 2006, 62
- [3] Schulz R: *Development of a Non-Contact Fluorescence Tomography System with Appropriate Reconstruction Techniques*. Thesis, Combined Faculties for the Natural Sciences and for Mathematics of the Ruperto-Carola-University of Heidelberg, 2006, 111
- [4] Kalis M: *Spektralkamera und Beleuchtungseinrichtung für diffuse Fluoreszenztomographie*. Diplomarbeit in Arbeit, Institut für Medizintechnik Technische Universität Graz, 2010
- [5] PerkinElmer Optoelectronics: *High Performance Flash and Arc Lamps*. http://optoelectronics.perkinelmer.com/content/RelatedLinks/CAT_flash.pdf, 12
- [6] Snively B: *Flashlamp-Excited Organic Dye Lasers*. Proceedings of the IEEE, Edition 57, 1969, 1374ff
- [7] Blit S, Fisher A, Ganiel U: *Early Termination of Flashlamp Pumped Dye Laser Pulses by Shock Wave Formation*. APPLIED OPTICS, Volume 13, No. 2, 1974, 335
- [8] PerkinElmer Optoelectronics: *High Performance Flash and Arc Lamps*. http://optoelectronics.perkinelmer.com/content/RelatedLinks/CAT_flash.pdf, 13
- [9] Argüello C, Marotta A: *A simmered pre-pulsed flashlamp dye laser*. Journal of Physics E: Scientific Instruments, Edition 9, 1976, 478
- [10] Früngel F: *High Speed Pulse Technology Volume II*. ACADEMIC PRESS New York and London, 1965, 118
- [11] PerkinElmer Optoelectronics: *Application Notes – Discharge Circuits*. http://optoelectronics.perkinelmer.com/content/applicationnotes/app_pfl.pdf, 10f
- [12] Ebert H (Hrsg.) *Physikalisches Taschenbuch*. Friedr. Vieweg & Sohn, Braunschweig, 1962, 487

- [13] MUEGGE ELECTRONIC GmbH: *Magnetron TYPE: 2M167B-M12 (Panasonic)*.
http://www.muegge.de/data_sheets_magnetrons/ds_2M167B-M12.pdf,2
- [14] Früangel F: *Impulstechnik - Erzeugung und Anwendung von Kondensatorladungen*.
 Technisch-physikalische Monographien (R. Sewing), Akademische Verlagsgesellschaft
 Geest & amp; Portig K.-G., Leipzig, 1960, 63
- [15] Vollrath K: *Funkenlichtquellen und Hochfrequenz-Funkenkinematographie, in
 Kurzzeitphysik Vollrath K, Thomer G (Hrsg)*. Springer-Verlag Wien - New York, 1967,
 87
- [16] Früangel F: *Impulstechnik - Erzeugung und Anwendung von Kondensatorladungen*.
 Technisch-physikalische Monographien (R. Sewing), Akademische Verlagsgesellschaft
 Geest & amp; Portig K.-G., Leipzig, 1960, 69
- [17] Lide D: *CRC Handbook of Chemistry and Physics*. CRC Press, 2010, 15-43
- [18] Früangel F: *Impulstechnik - Erzeugung und Anwendung von Kondensatorladungen*.
 Technisch-physikalische Monographien (R. Sewing), Akademische Verlagsgesellschaft
 Geest & amp; Portig K.-G., Leipzig, 1960, 74
- [19] e2v technologies: *Three-Electrode Spark Gap Preamble*.
[http://www.e2v.com/assets/media/files/documents/sparkgaps/three_electrode_spark_ga
 p_preamble.pdf](http://www.e2v.com/assets/media/files/documents/sparkgaps/three_electrode_spark_gap_preamble.pdf)
- [20] Brackmann U: *Lamdachrome Laser Dyes 3rd Edition*.
http://bcp.phys.strath.ac.uk/ultrafast/Blue_book/Lamdachrome-laser-dyes.pdf,192f
- [21] Hänsch T: *Applications of Dye Lasers, in Dye Lasers Schäfer F (Hrsg)*. Springer-Verlag
 Berlin · Heidelberg · New York, 1973,252ff
- [22] Koch K: *Galvanisieren - Metallbeschichtung durch Elektrolyse*.
http://www.educ.ethz.ch/unt/um/che/rr/galvanisieren_prakt/galvanisieren.pdf
- [23] Shield Medicare - A Division of Ecolab: *Sicherheitsdatenblatt für Klercide-125
 vergälltes Ethanol mit 0,125 % Wasserstoffperoxid*.
[http://www.shieldmedicare.com/german/tech_info/msds/Klercide-125%20verga
 %C3%A4lltes%20Ethanol%20mit%20H2O2.pdf](http://www.shieldmedicare.com/german/tech_info/msds/Klercide-125%20verga%20lltes%20Ethanol%20mit%20H2O2.pdf)
- [24] Niedersächsisches Kultusministerium: *Unfälle durch Peroxide bildende Substanzen*.
[http://nibis.ni.schule.de/~auge/seiten/allgembild/chemie_ti/doc/peroxidbildende_subst_
 bgchemie.pdf](http://nibis.ni.schule.de/~auge/seiten/allgembild/chemie_ti/doc/peroxidbildende_subst_bgchemie.pdf)

- [25] Blume R: *Prof. Blumes Tipp des Monats Dezember 2000 (Tipp-Nr. 42)*.
http://www.chemieunterricht.de/dc2/tip/12_00.htm
- [26] Harders F, Kienow S: *Feuerfestkunde - Herstellung, Eigenschaften und Verwendung feuerfester Baustoffe*. Springer-Verlag Berlin · Heidelberg · New York, 1960, 683f

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Ursprünglicher geplanter Aufbau	8
Abbildung 2: Skizze Hohlkathodenblitzlampe	15
Abbildung 3: Blockschaltbild Gesamtsystem.....	18
Abbildung 4: Gesamtschaltplan Hochspannungsteil.....	21
Abbildung 5: Gesamtansicht Wechselspannungsnetzteil.....	23
Abbildung 6: Streufeld-Trenntransformator.....	26
Abbildung 7: Magnetischer Nebenschluss Mikrowellentransformator.....	27
Abbildung 8: Modifizierter Mikrowellentransformator in Paraffinöl.....	28
Abbildung 9: Schaltplan Wechselspannungsnetzteil.....	29
Abbildung 10: Schaltplan Sicherheitseinrichtungen.....	33
Abbildung 11: Hochspannungsgleichrichterschaltplan.....	36
Abbildung 12: Montage Hochspannungsdiode.....	39
Abbildung 13: Hochspannungsgleichrichterelemente.....	39
Abbildung 14: Innerer Aufbau des Hochspannungsgleichrichters.....	40
Abbildung 15: Hochspannungsgleichrichterbox Innenansicht.....	41
Abbildung 16: Hochspannungsdurchführung.....	42
Abbildung 17: 1µF-Kondensatorbank mit Isolationsspacer.....	43
Abbildung 18: Simulation der Schaltfunkenstrecke mit realen Bauteilwerten.....	47
Abbildung 19: Gasdichte Elektrodendurchführung.....	49
Abbildung 20: Gasdichte Metall-Glas-Verbindung.....	49
Abbildung 21: Gesamtansicht Schaltfunkenstrecke.....	50
Abbildung 22: Detailansicht Haupt- und Triggerelektrode.....	51
Abbildung 23: Hochspannungswiderstand.....	52
Abbildung 24: Schaltfunkenstrecke schematisch.....	54
Abbildung 25: Hilfsfunkenstrecken	55
Abbildung 26: Hochspannungsisolierter Bit-Halter.....	56
Abbildung 27: Wickelkörper Zündtransformator.....	58
Abbildung 28: Primärwicklung Zündtransformator.....	58
Abbildung 29: Sekundärwicklung Zündtransformator.....	59

Abbildung 30: Komplettansicht Zündtransformator.....	60
Abbildung 31: Hochspannungsdurchführung Zündtransformator.....	60
Abbildung 32: Zündtransformator komplettiert.....	61
Abbildung 33: Spannungsanstieg am Zündtransformator bis zum Zünden.....	62
Abbildung 34: Zündschaltung Schaltplan.....	63
Abbildung 35: Konstantstromquelle Schaltplan.....	65
Abbildung 36: Impulsformerplatine Schaltplan.....	67
Abbildung 37: Neon-Spektrallampe, durch optisches Gitter mit 600 Linien/mm betrachtet...	73
Abbildung 38: Blitzlampe Simmerbetrieb.....	74
Abbildung 39: Lichtintensitätsverlauf einer Blitzlampenentladung bei 72J.....	75
Abbildung 40: Hohlkathodenblitzlampe Frontansicht ohne/mit Simmerbetrieb.....	76
Abbildung 41: Lichtintensitätsverlauf einer Hohlkathodenblitzlampe bei 72J.....	77
Abbildung 42: Hohlkathodenblitzlampe Seitenansicht einer Blitzentladung bei 72J.....	78
Abbildung 43: Wolfram nach mechanischer Vorbehandlung mittels Diamantwerkzeug.....	81
Abbildung 44: Wolfram wird in Natronlauge gebeizt.....	82
Abbildung 45: Wolfram verkupfern.....	83
Abbildung 46: verkupfertes Wolfram.....	83
Abbildung 47: teilverzinnertes, verkupfertes Wolfram.....	84
Abbildung 48: Glas-Messing-Lötverbindung.....	87
Abbildung 49: Speckstein Drehling.....	88
Abbildung 50: Ersatzschaltbild eines realen Kondensators.....	90
Abbildung 51: Schaltplan zur Messung der Resonanzfrequenz.....	91
Abbildung 52: frequenzabhängige Oszilloskop-Eingangsspannung.....	91