

# 2008

## Konzeption, Aufbau und Inbetriebnahme eines dreistufigen Marx-Generators



Dipl.-Ing. Christian Staubach  
Fachhochschule Gelsenkirchen  
18.11.2008



**Fachhochschule  
Gelsenkirchen**

Labor für Hochspannungs- und  
Hochleistungspulstechnik  
Prof. Dr.-Ing. Markus J. Löffler

## Bericht zur Schülerakademie 2008

# Konzeption, Aufbau und Inbetriebnahme eines dreistufigen Marx-Generators

Dipl.-Ing. Christian Staubach  
17.11.2008

FH Gelsenkirchen  
Labor für Hochspannungs- und Hochleistungspulstechnik  
Prof. Dr.-Ing. Markus J. Löffler  
Neidenburger Straße 10  
D-45877 Gelsenkirchen  
Telefon: 0209/9596-220 oder -234  
Fax: 0209/9596-829  
E-Mail: [markus.loeffler@fh-gelsenkirchen.de](mailto:markus.loeffler@fh-gelsenkirchen.de)  
URL: <http://hochspannungstechnik.fh-gelsenkirchen.de>

## **Inhaltsverzeichnis**

Einleitung .....	4
Funktionsweise eines Marx-Generators .....	5
Dimensionierung der Komponenten des Marx-Generators .....	7
Auslegung der Bauteile des Hochspannungsbaukastens .....	9
Design&Herstellung der Bauteile .....	11
Aufbau des Marx-Generators .....	14
Auswertung des Stoßspannungssignals.....	17

## **Einleitung**

Im Rahmen einer Zusammenarbeit zwischen der Fachhochschule Gelsenkirchen und den Duisburger Gymnasien Max-Planck-Gymnasium, Franz-Haniel-Gymnasium, Steinbart-Gymnasium sollten mit finanzieller Unterstützung der Telekom-Stiftung und unter Anleitung von Dipl.- Ing. C. Staubach 15 Schüler einen Hochspannungsbaukasten nach Vorgabe eines fiktiven Auftragsgebers dimensionieren, entwickeln und konstruieren. Anschließend sollte dieser in der Ausbildungswerkstatt der Siemens Power Generation in Mülheim an der Ruhr in Kleinserie hergestellt werden.

Danach stand der Zusammenbau der einzelnen Bauteile, bzw. Komponenten des Baukastens in drei Arbeitseinheiten von je drei Stunden an. In einem letzten Schritt folgte die Inbetriebnahme eines aus dem Hochspannungsbaukasten zusammengesetzten Marx-Generators mit Aufnahme des erzeugten Spannungssignals an. Dieses wurde mit der Vorgabe laut Auftraggeber verglichen und entstehende Abweichungen analysiert bzw. diskutiert.

## Funktionsweise eines Marx-Generators

Marx-Generatoren dienen zur Erzeugung von Spannungsimpulsen sehr kurzer Zeitdauer und hoher Amplitude. Solche Impulse werden für Prüfzwecke und Versuche in der Hochspannungstechnik und zum Nachweis der Störfestigkeit in der elektromagnetischen Verträglichkeit benötigt. So kann durch einen Marx-Generator Blitze und deren Auswirkungen auf elektronische Geräte simuliert werden.

Die grundlegende Funktionsweise besteht darin, mehrere Kondensatoren parallel mit einer Versorgungsspannung auf die Stufenspannung aufzuladen und diese Kondensatoren dann schlagartig in Reihe zu schalten. Bei dieser Reihenschaltung addieren sich die Stufenspannungen zur resultierenden Stoßspannung.

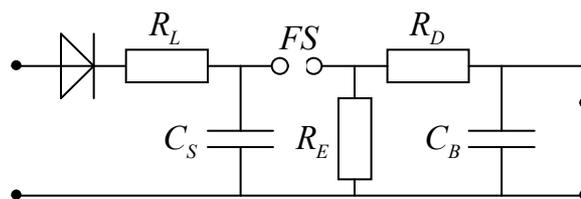


Abb.1: Grundschialtung

In Abbildung 1 ist der grundlegende Aufbau eines einstufigen Stoßgenerators dargestellt. Über einen nicht dargestellten Hochspannungstransformator wird die Stoßkapazität  $C_S$  aufgeladen. Dieses geschieht mit Hilfe der Diode und einen geeignet dimensionierten Ladewiderstand  $R_L$ . Hat der Stoßkondensator seine Stufenspannung erreicht, wird die Funkenstrecke FS geschaltet.

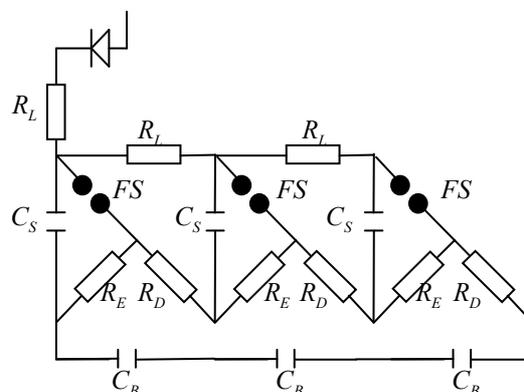


Abb.2: Schaltbild 3-stufiger Stoßspannungsgenerator

Die aufgeladene Kapazität entlädt sich schlagartig über die Kombination aus den Widerständen  $R_D$  und  $R_E$  sowie der Belastungskapazität  $C_B$ , an der die gewünschte Stoßspannung anliegt. Die Widerstände  $R_D$  und  $R_E$  haben die Aufgabe, das resultierende Spannungssignal zu formen.

Werden mehrere auf die Versorgungsspannung  $U_l$  aufgeladene Kapazitäten so verschaltet, dass sie sich seriell auf einen Prüfling entladen, addieren sich die Stufenspannungen zu einer Vervielfachungsspannung. Idealerweise addieren sich die Einzelspannungen bei  $n$  Stufen zu einer resultierenden Spannung, die betragsmäßig den  $n$ -fachen Wert der Einzelspannung hat. Diese Kaskadierung ist für einen 3-stufigen Marx-Generator in der Abbildung 2 abgebildet.

## Dimensionierung der Komponenten des Marx-Generators

Für die Auslegung des Marx-Generators wurden mehrere Vorgaben seitens des fiktiven Auftraggebers festgesetzt. Die Prüfspannung sollte ca. 31 kV (Amplitudenwert) betragen. Weiterhin waren die Werte  $T_{cr}$  (Scheitelzeit) mit 2.1  $\mu$ s, bzw. die Rückenhalbwertzeit  $T_2$  mit 250  $\mu$ s vorgegeben (siehe Abbildung 3).

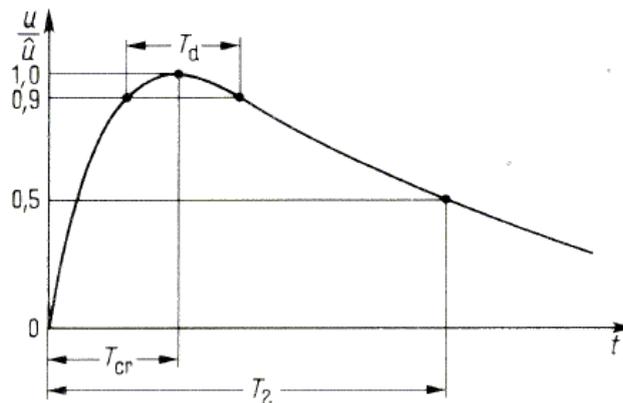


Abb.3: Verlauf Blitzstoßspannung

Der Entladewiderstand  $R_E$  wurde mit 24 k $\Omega$  dimensioniert. In einem ersten Arbeitsschritt galt es, für die Schüler die geeigneten Komponenten zu berechnen, um die Vorgaben zur Gestalt der Blitzstoßspannung zu erfüllen. Als Energieversorgung stand ein Neon-Transformator zur Verfügung, wie er in Leuchtreklamen eingesetzt wird. Dieser erzeugt eine sekundärseitig eine Ausgangsspannung von  $U_L = 8$  kV (effektiv). Um die geforderte Prüfspannung zu erhalten, muss mindestens ein dreistufiger Marx-Generator aufgebaut werden. Im Folgenden sind die einzelnen Berechnungsschritte zur Auslegung der Bauteile aufgeführt. Auf die Herleitung der Formeln soll nicht näher eingegangen werden.

Anzahl der Stufen:	$n = 3$
Ausnutzungsgrad:	$\eta = \hat{u} / (n \cdot \hat{u}_L) = 0.91$
Bestimmung von $\tau_1$ :	$\tau_1 = T_2 \cdot T_{cr} / [(T_2 + T_{cr}) \cdot \ln(T_2 / T_{cr} + 1)] \approx 4.27 \cdot 10^{-7} s$
Bestimmung von $\tau_2$ :	$\tau_2 = T_2 / \ln(T_2 / T_{cr} + 1) \approx 5.18 \cdot 10^{-5} s$
Bestimmung von $C_S$ :	$C_S / n = \tau_2 / [n \cdot R_E \cdot ((1 - \eta) / \eta + 1)] \Rightarrow C_S \approx 1.96 nF$
Bestimmung von $C_B$ :	$C_B = C_S (1 - \eta) / \eta \approx 196 pF$
Bestimmung von $R_D$ :	$R_D = \tau_1 \cdot (C_S + C_B) / (C_S \cdot C_B) \approx 2,41 k\Omega$

Da die handelsüblich zu kaufenden elektronischen Bauteile eine Spannung von maximal 500 V aushalten und diese in dem Versuchsaufbau mit ca. 12kV belastet werden sollten, mussten 24 Bauteile jeweils seriell verschaltet werden. So ergaben sich folgende zu bestellenden Bauteile:

$$\text{Widerstand } R_D = 100\Omega \cdot 24 = 2,4k\Omega$$

$$\text{Widerstand } R_E = 1000\Omega \cdot 24 = 24k\Omega$$

$$\text{Widerstand } R_L = 100k\Omega \cdot 24 = 2,4M\Omega$$

$$\text{Kapazität } C_S = 47000pF : 24 = 1,98nF$$

$$\text{Kapazität } C_B = 4700pF : 24 = 198pF$$

Die Halbleiterdiode muss aufgrund des Aufbaus die doppelte Versorgungsspannung sperren (24kV), da diese aber eine Sperrspannung von 1kV aushalten, werden ebenfalls 24 Dioden benötigt. Die Ladewiderstände wurden mit  $R_L = 2,4M\Omega$  dimensioniert. Damit lässt sich die Ladezeit für die Kapazitäten abschätzen:

$$t_{Lade} \approx 5 \cdot \tau = 5 \cdot 3 \cdot 2,4M\Omega \cdot 1,98nF \approx 0,07s$$

Jeder Marx- Generator besteht aus 3 Widerständen  $R_L$ ,  $R_D$  und  $R_E$ , sowie 3 Kapazitäten  $C_S$  und  $C_B$ . Dazu kommt noch eine Diodenschaltung. Die Bestellmenge und Kosten für drei Marx-Generatoren wurde von den Schülern somit bei einer Beschaffung über das Geschäft Conrad überschlägig nach nachfolgender Tabelle abgeschätzt.

elektr. Bauteil	Bestellnummer	Anzahl	Preis
1000-V-Diode	160152-15	72	11€
4.7-nF-Kapazität	451843-15	216	36€
47.-nF-Kapazität	451886-15	216	61€
100-Ω-Widerstand	419443-15	216	17€
1-kΩ-Widerstand	419567-15	216	17€
100-kΩ-Widerstand	419753-15	216	17€

Abb.4: Tabelle Bestellmengen und Kostenabschätzung

Somit ergaben sich Kosten für die elektronischen Bauteile von ca. 53€ pro Generator.

## Auslegung der Bauteile des Hochspannungsbauskastens

In einem ersten Schritt seitens der Schüler ging es darum sich zu überlegen, mit wie vielen Bauteilen ein fester und sicherer Aufbau des Marx-Generators gewährleistet werden kann.

Neben den bereits vorher angegebenen elektronischen Bauteilen besteht der Generator auch aus isolierenden, bzw. leitenden Komponenten, kurz Isolator (IS) und Verbinder (V). Zuerst wurden Skizzen von der Vorder- und Seitenansicht des Aufbaus angefertigt um die Anzahl der einzelnen Teile für eine Fertigung abschätzen zu können.

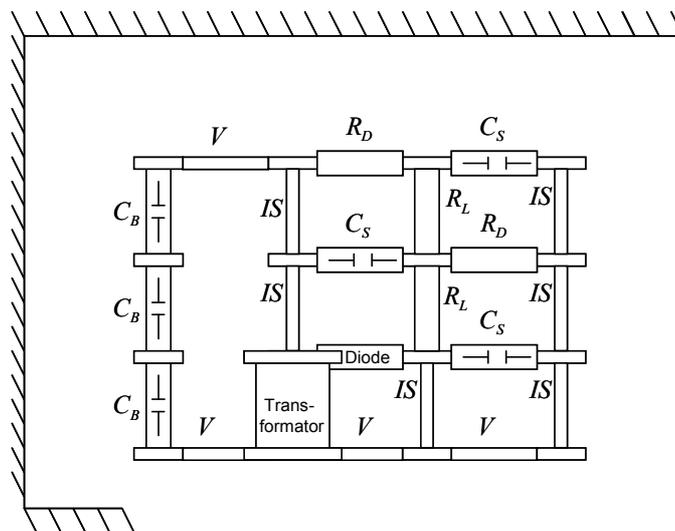


Abb.5: Vorderansicht Marx- Generator

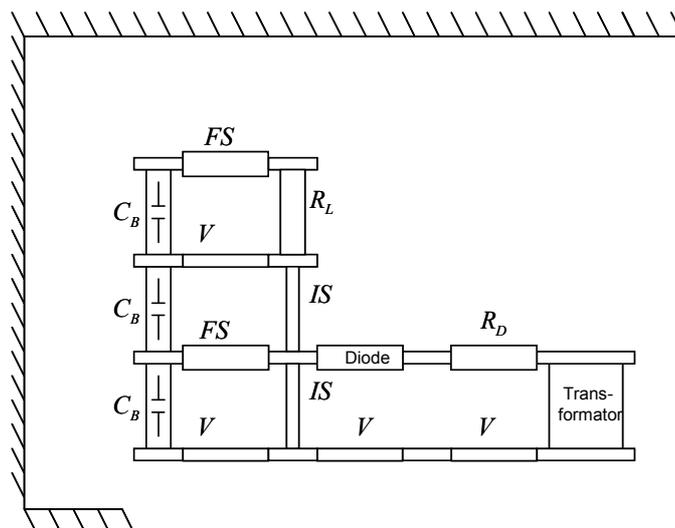


Abb.6: Seitenansicht Marx- Generator

Anhand der Vorder- und Seitenansicht (Abbildung 5 und 6) ergab sich folgende Anzahl der

herzustellende Baugruppen. Es werden pro Marx-Generator 27 Kupplungsköpfe benötigt. Diese stellen eine kraftschlüssige Verbindung zwischen den einzelnen Bauteilen, wie Widerstand, Isolator und Kapazität dar. Außerdem werden insgesamt 46 zylindrische Röhrenkörper benötigt, in dem sich zum Beispiel die elektronischen Bauteile befinden oder eine Funkenstrecke installiert ist. In einem nächsten Schritt galt es nun für die Schüler, ein möglichst leicht herzustellendes und dennoch effektives Design für die leitende Verbindung zwischen den Kupplungsköpfen und den zylinderförmigen Bauteilen zu realisieren.

## Design&Herstellung der Bauteile

Im Folgenden sind die von den Schülern entworfenen und durch die Ausbildungswerkstatt der Siemens Power Generation, Mülheim/Rh., hergestellten Komponenten dargestellt.



Abb.7: gefertigte Einzelteile (Abschlussköpfe)

Die zylinderförmigen Bauteile, indem sich die verschiedenen elektrischen Komponenten befinden, bestehen zu je aus einem Kunststoffrohr, 2 Anschlussköpfen und zwei Passbolzen. Das Kunststoffrohr hat die Länge von 200 mm und einen Außendurchmesser von 40 mm; das Rohr besteht aus Polyethylen. Die zwei Anschlussköpfe sind aus vollem Aluminiumrohr gedreht und haben eine Höhe von 45 mm. Diese dienen als Elektroden für dieses Bauteil. Ein sicherer Kraftschluss zwischen dem Kunststoffrohr und den Elektroden wird durch die Passbolzen gewährleistet.

Zwischen den Abschlussköpfen werden je nach Typ verschiedene elektronische Teile installiert. Handelt es sich dabei um einen Verbinder, wird ein Kabel zwischen die Abschlussköpfe gelötet. Bei einem Widerstand die Reihenschaltung von 24 Einzelwiderständen und bei Kapazitäten eine serielle Verschaltung von 24 Einzelkapazitäten. Bei einem Isolator befindet sich keine leitende Verbindung zwischen den Elektroden. Wie vorangegangen bereits erklärt müssen aufgrund der geforderten Spannungsfestigkeit mehrere elektronische Bauteile verlötet werden.



Abb.8: Reihenschaltung von Kapazitäten

In Abbildung 8 ist dieses exemplarisch für die Ladekapazität  $C_s$  dargestellt. Jede Kapazität besitzt eine maximale Spannungsfestigkeit von 500 V und hat einen Wert von 47 nF. Durch die Verlötung entsteht somit eine resultierende Kapazität von 1.96nF. In Abbildung 9 ist die Kapazitätskette bereits zwischen den Elektroden verlötet.

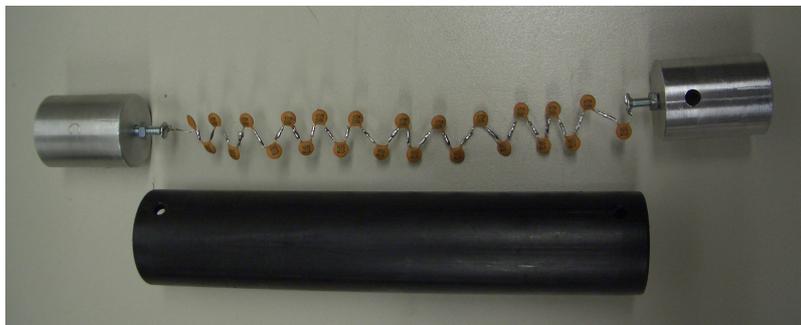


Abb.9: Kondensator vor der Montage

In einen letzten Schritt werden die Abschlussköpfe und das Kunststoffrohr mit Hilfe der Passstifte zusammengesetzt. In der folgenden Abbildung ist die fertiggestellte Kapazität dargestellt. Zur Überprüfung werden die fertigen Bauteile mit einem Multimeter vermessen um sicherzustellen, dass die geforderten Werte gewährleistet sind. Somit können Kurzschlüsse oder andere Fehler ausgeschlossen werden.



Abb.10: Fertig montiertes Bauteil

Eine besondere Rolle spielen die Funkenstrecken. Sie sind eine Art Schalter, die ab einer bestimmten anliegenden Spannung durchschlagen und somit einen Kurzschluss darstellen. Über

die Veränderung des Abstandes zwischen den beiden Kugelelektroden, lässt sich die Durchschlagsspannung justieren (siehe Abbildung 11).



Abb.11: Funkenstrecke mit Kugelelektroden

Die Kupplungsköpfe stellen eine kraftschlüssige und zugleich leitende Verbindung zwischen den einzelnen Bauteilen her. Das Design für diese Teile wurde ebenfalls von den Schülern selbst gewählt. Gefordert war, dass die Kupplungsköpfe einerseits eine sichere kraftschlüssige Verbindung zwischen den verschiedenen Bauteilen gewährleisten sollten, zum anderen in der Praxis - es werden pro Baukasten 27 Köpfe benötigt- relativ einfach herzustellen seien.

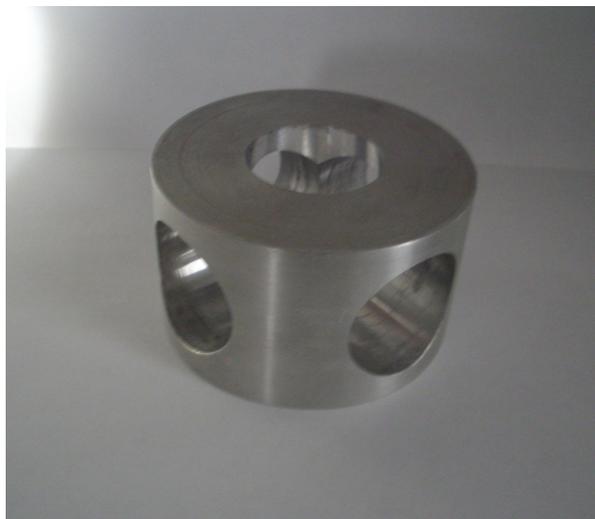


Abb.12: Selbst konzipierter Kupplungskopf

Die Köpfe sind ebenfalls aus Aluminium hergestellt und haben einen Durchmesser von 75 mm. und eine Höhe von 45 mm. In die kreisförmigen Aussparungen werden die Abschlussköpfe der einzelnen elektrischen Bauteile, wie Widerstand, Diode, Kapazität oder Funkenstrecke, hineingesteckt.

## Aufbau des Marx-Generators

Auf den folgenden Abbildungen ist der fertig aufgebaute Marx-Generator zu sehen.



Abb.13: Frontansicht Marx-Generator

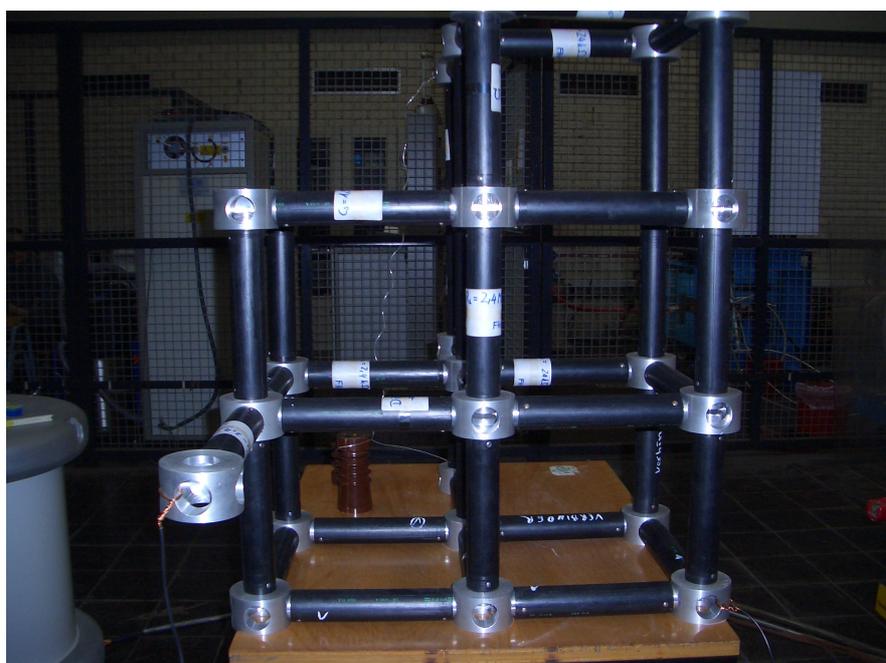


Abb.14: Seitenansicht rechts Marx-Generator

In der folgenden Abbildung ist der komplette Marx-Generator von einer schrägen Perspektive aufgenommen.



Abb.15: Marx-Generator mit Spitze-Spitze Anordnung

Neben der Messung des von dem Marx-Generator erzeugten Stoßspannungssignals mit Hilfe eines Oszilloskop wurde zusätzlich ein Blitz über eine Spitze-Spitze Anordnung erzeugt, um den Schülern einen kleinen Eindruck über die Leistungsfähigkeit des von Ihnen konzipierten Generators zu vermitteln.

Dazu wurde ein dünner Metalldraht an dem Hochspannungspotential des Generators befestigt und dem an das Erdpotential befestigten Metalldraht über zwei Isolatorstützen gegenüber aufgestellt (siehe Abbildungen 16 und 17).

Schrittweise wurde der Abstand zwischen den beiden Drahtspitzen vergrößert und der Generator in Betrieb genommen. Wird eine kritische Feldstärke überschritten kommt es zum Luftdurchschlag und ein Blitz entsteht. Mit dem vorliegenden Marx-Generator konnte ein maximaler Abstand von ca. 26 mm zwischen der Elektrodenanordnung mit Hilfe eines Lichtblitzes überwunden werden.



Abb.16: Spitze- Spitz Anordnung vor Funkenschlag



Abb.17: Spitze- Spitz Anordnung bei Funkenschlag (25mm)

## Auswertung des Stoßspannungssignals

In den folgenden Abbildungen ist der Verlauf des von dem Marx-Generator erzeugten Spannungssignals aufgezeichnet.

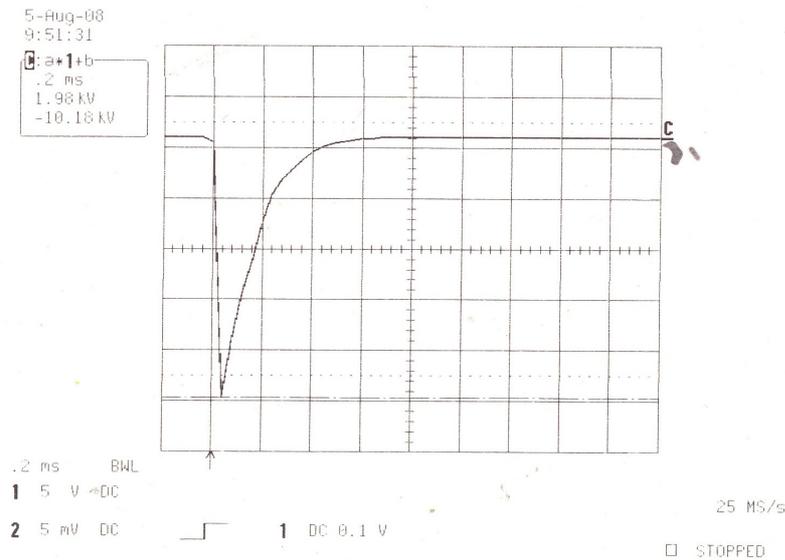


Abb.18: Verlauf des Stoßspannungssignals (Gesamtdauer 2ms)

In der Abbildung 19 ist eine vergrößerte Darstellung des Spannungssignals für eine Aufnahmedauer von 0.5 ms dargestellt.

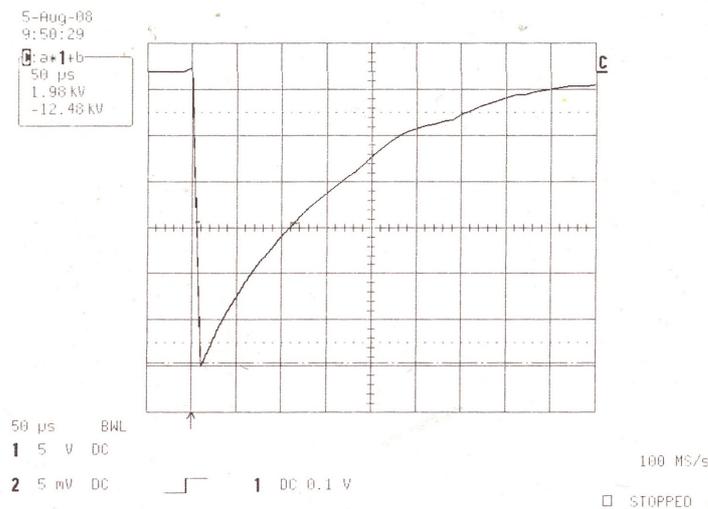


Abb.19: Verlauf des Stoßspannungssignals (Gesamtdauer 500 $\mu$ s)

Um zu überprüfen, in wie weit die Vorgaben für die Charakteristik erfüllt worden sind (siehe Kapitel „Dimensionierung der Komponenten des Marx-Generators“), wird erneut ein vergrößerter Ausschnitt des Signalverlaufs in Abbildung 20 betrachtet. In dieser Darstellung kann man sehr gut den typischen Verlauf eines Stoßspannungsverlaufs sehen, wie er bereits in Abbildung 3 theoretisch erläutert wurde.

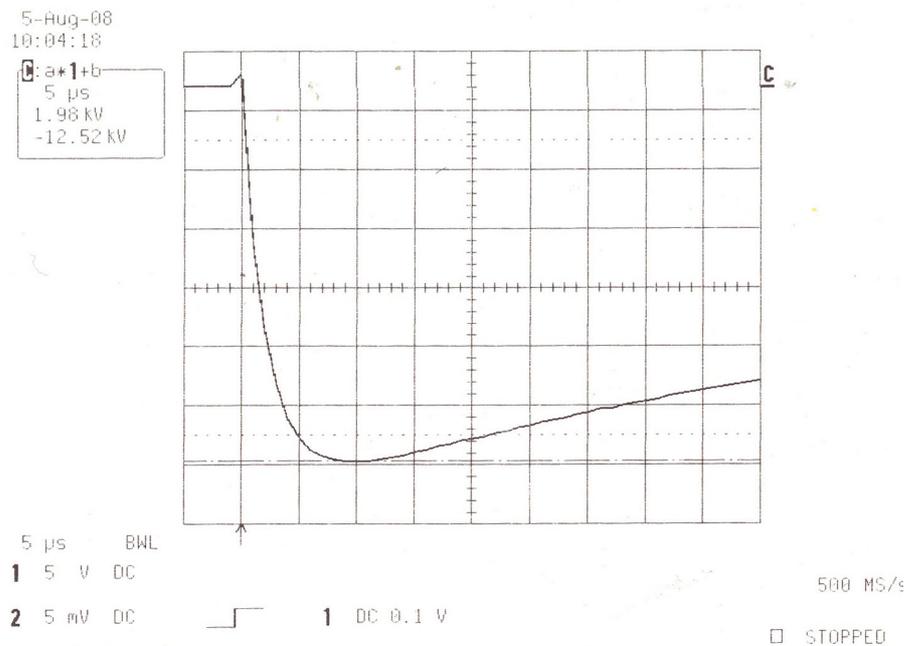


Abb.20: Verlauf des Stoßspannungssignals (Gesamtdauer 50μs)

Die resultierende Spannungsamplitude des gemessenen Signals wird bereits durch das Oszilloskop berechnet. Sie beträgt im maximalen Fall ca. 12.5 kV. Laut Vorgabe sollte die Amplitude bei ca. 31 kV für eine anliegende effektive Spannung am Transformator von 8 kV liegen. Aufgrund der im Vergleich zum Marx-Generator relativ hohen Messkapazität von 1.2 nF war dies allerdings nicht möglich. Für den Ausnutzungsgrad des Generators gilt ja

$$\eta = \frac{C_S/3}{C_S/3 + C_B/3 + C_M} = \frac{1,98nF/3}{1,98nF/3 + 198pF/3 + 1200pF} \approx 0,33$$

Somit ergibt sich eine berechnete Prüfspannung von

$$\hat{u}_p = n \cdot \hat{u}_L \cdot \eta = 3 \cdot 8kV \cdot \sqrt{2} \cdot 0,33 \approx 11,3kV$$

Die gemessene Spannung liegt sogar über den theoretisch berechneten Wert. Dieses dürfte daran liegen, dass der Transformator nicht genau 8 kV Effektivwert liefert, sondern der wahre Wert noch ein wenig darüber liegt.

Zur Bestimmung der Zeitkonstanten, Scheitelzeit und Rückhalbwertszeit werden die charakteristischen Geraden in den Spannungsverlauf aus Abbildung 20 eingezeichnet.

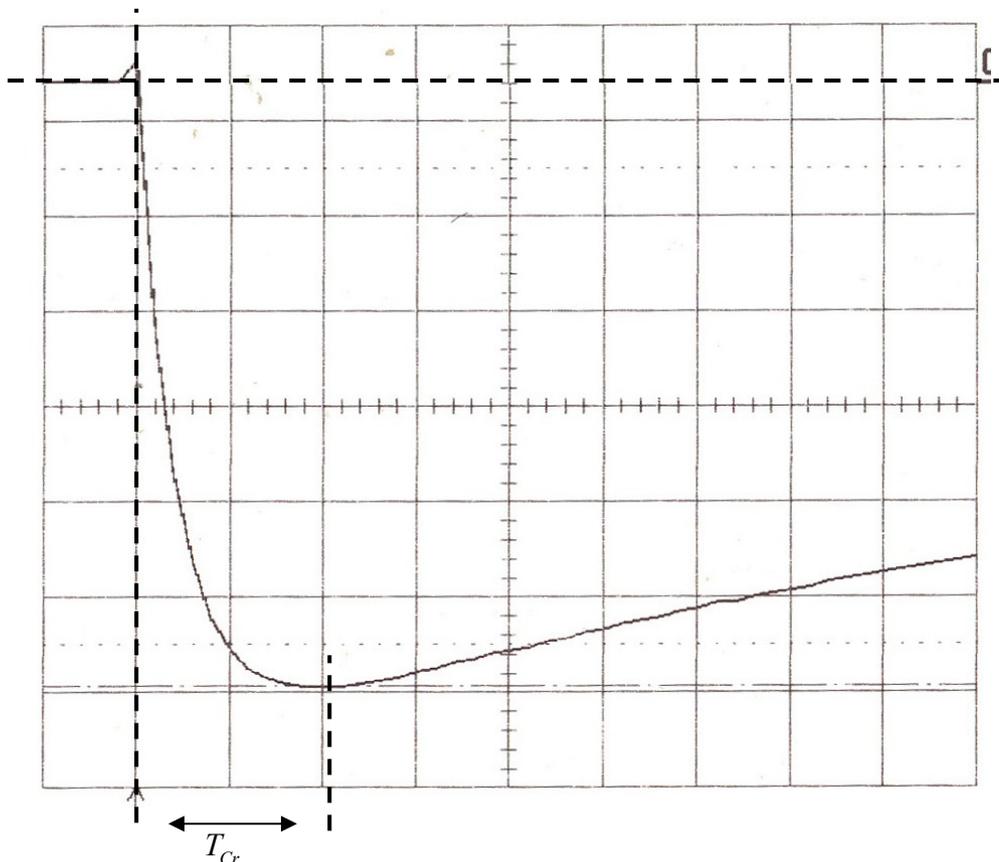


Abbildung 21: Graphische Bestimmung der Scheitelzeit

Anhand Abbildung 21 wird graphisch eine Scheitelzeit  $T_{cr}$  von ca.  $10 \mu s$  ermittelt. Der vorgegebene Wert bei der Dimensionierung des Marx-Generators wurde mit  $2.1 \mu s$  festgelegt. Es zeigt sich hierbei eine sehr große Abweichung (Faktor 5) des realen Wertes zum Gemessenen. Dies lässt sich durch die sehr großen Toleranzen bei den eingesetzten Kapazitäten (50%) erklären. Dadurch wird die Scheitelspannung verfälscht.

Die Bestimmung der Rückhalbwertszeit  $T_2$  ist graphisch in Abbildung 22 gezeigt. Auch hier zeigen sich erhebliche Unterschiede zwischen vorgegebenen ( $250 \mu s$ ) zu tatsächlich gemessenen Wert ( $120 \mu s$ ). Dies dürfte sich ebenfalls durch die großen Toleranzen der einzelnen elektronischen Bauteile, besonders bei den Kapazitäten, erklären.

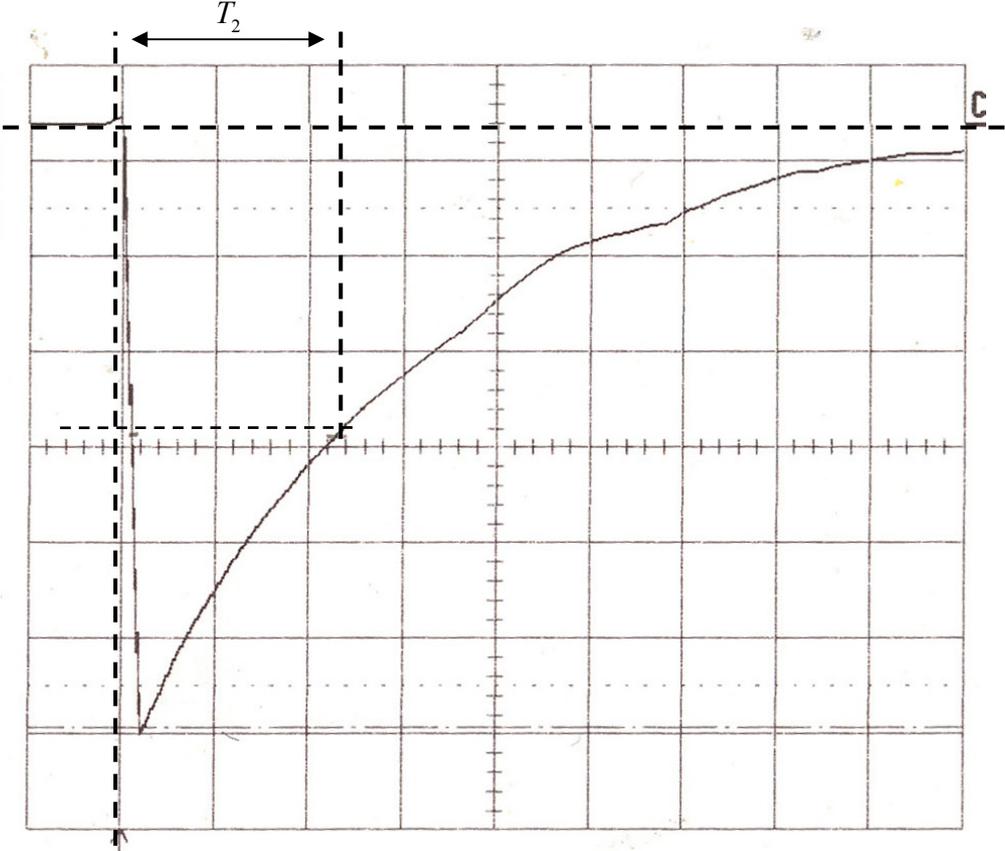


Abbildung 22: Graphische Bestimmung der Rückhalbwertszeit