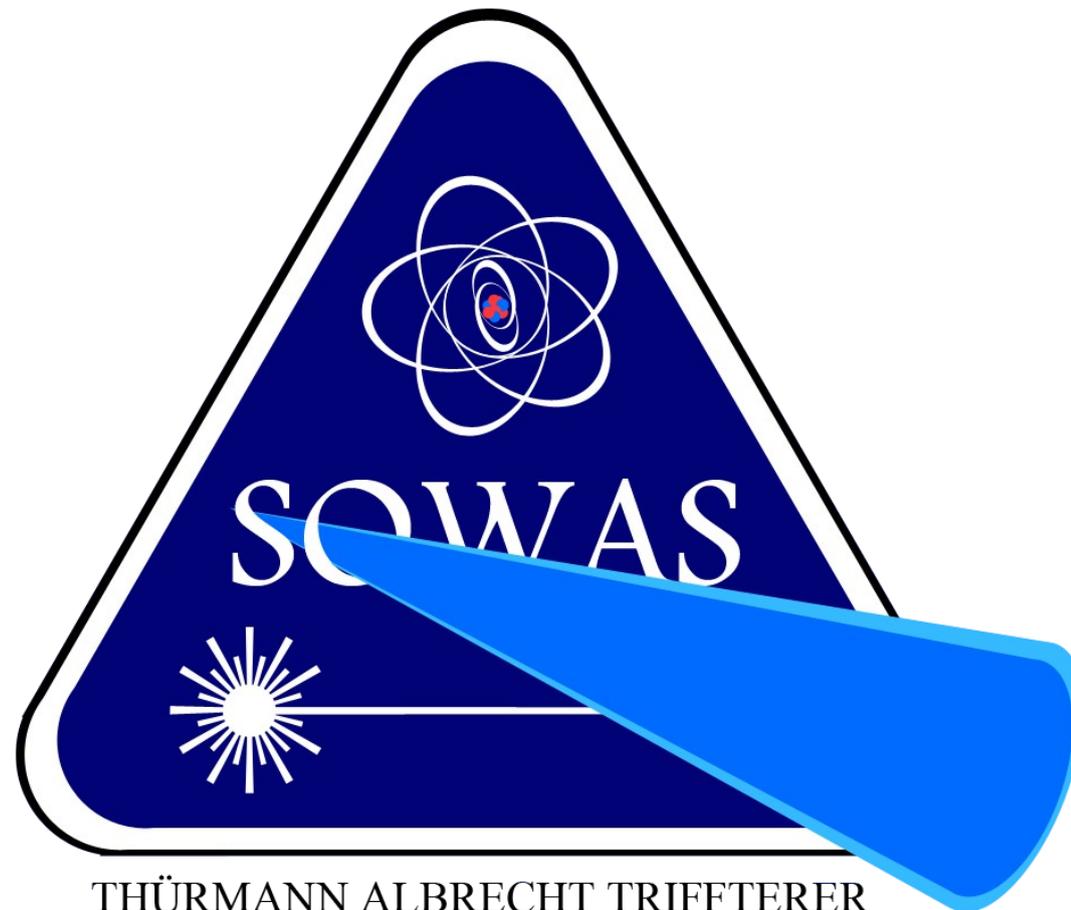


S.O.W.A.S. Projekt Stickstofflaser



THÜRMAN ALBRECHT TRIFFTERER

RUHR-UNIVERSITÄT BOCHUM

- Projektziel:
„Selbstbau eines atmosphärischen Low-Cost-N₂-Lasers
als Table-Top-Aufbau“
- Konkret:
 - Mechanischer Aufbau
 - Elektrischer Aufbau
 - Inbetriebnahme
 - Nachweis des Laser-Übergangs

Theorie 1 - Vorüberlegungen



- Grundsätzlicher Ablauf zur Erzeugung eines Laserpulses:
 1. Anregung des Lasermediums
 2. Zufällige Abregung → Emission eines Photons
 3. Photon stimuliert weitere Emissionen
 4. „Photonenlawine“ entsteht → Laserpuls
- Die Verstärkung (3.) macht den Laser aus, denn
LASER = „light amplification by stimulated emission of radiation“

Theorie 2 - Lasermedium



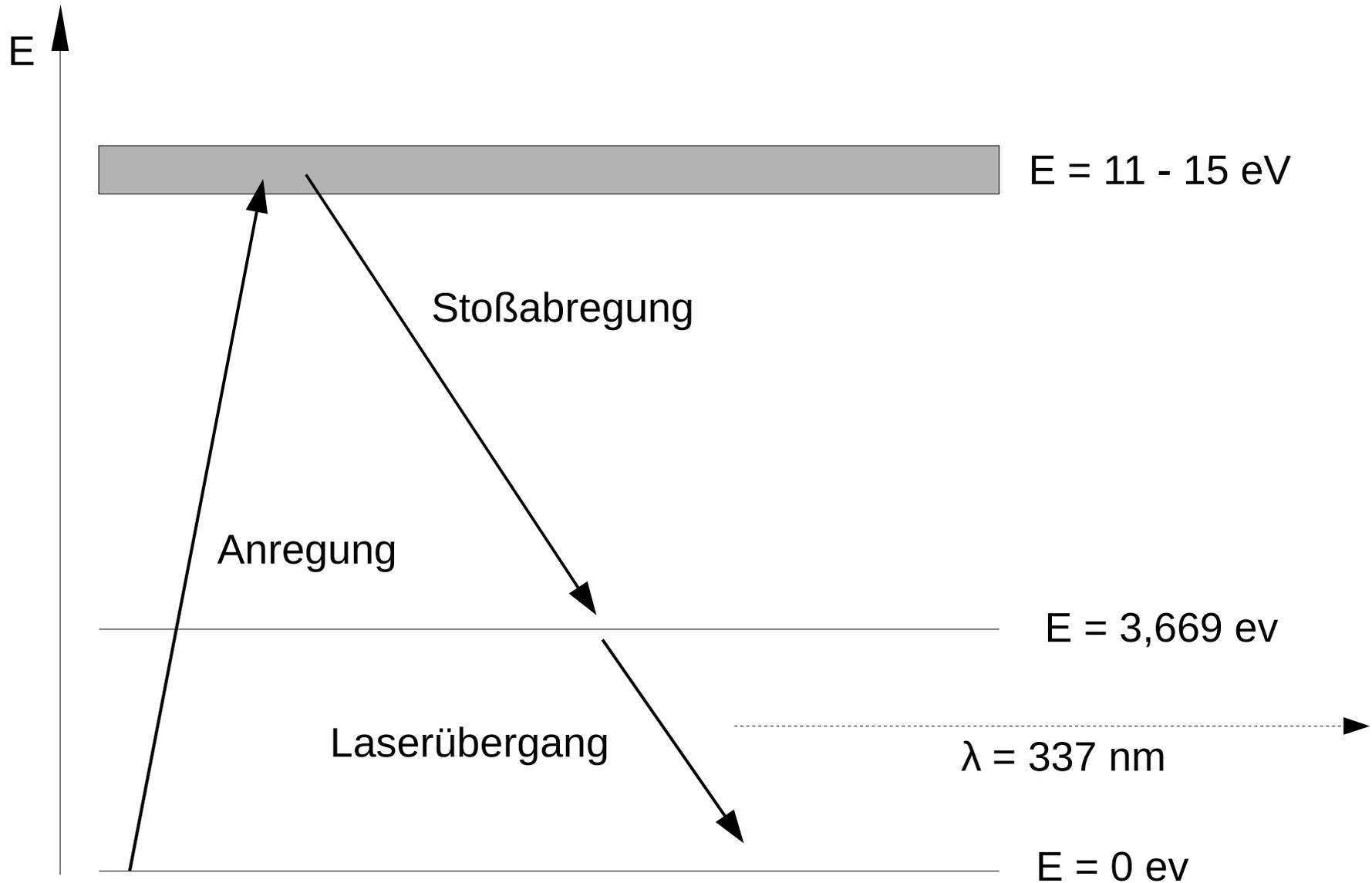
- Ausgangsstoff für den Laser sind die N_2 -Moleküle aus der Luft (78 Volumenprozent, 75 Massenprozent)
- Reiner Stickstoff würde bessere Ergebnisse liefern, ist aber (für dieses Projekt) zu aufwendig zu realisieren
- Der Betrieb erfolgt bei Atmosphärendruck
- Ein geringerer Druck würde die Ergebnisse ebenfalls verbessern, würde jedoch wiederum einen deutlich höheren Aufwand erfordern.

Theorie 3 - Stoßanregung



- Die Luft im Laserspalt wird mit Elektronen ($E_{\text{kin}} \approx 4 \text{ eV}$) beschossen
- Die Elektronen stoßen mit den N_2 -Molekülen und können bei ausreichender Energie die Hüllenelektronen auf ein höheres Energieniveau bringen (vgl. Franck-Hertz-Versuch)
- Von den verschiedenen Energieniveaus, die dabei angeregt werden können, interessiert hier nur das Niveau mit $\Delta E = 3,669 \text{ eV}$ beim N_2 -Molekül

Theorie 4 - Energieniveaus



Theorie 5 – Spontane Emission



- In dem betrachteten Volumen gibt es nun also angeregte N_2 -Moleküle
- Allgemein haben angeregte Zustände in Atomen eine mittlere Lebensdauer, das einzelne Abregungsereignis ist allerdings zufällig und nicht vorhersagbar (ähnlich verhält es sich beim Zerfall von Radionukliden mit der Halbwertszeit)
- Der betrachtete Zustand hat eine mittlere Lebensdauer von etwa 20 ns
- Der Einstein-Koeffizient der spontanen Emission ist A_{ik}

Theorie 6 - Stimulierte Emission



- Trifft ein Photon ein angeregtes Molekül, so emittiert es Atom sofort ein Photon, die beiden Photonen stimmen in Wellenlänge, Richtung und Phasenlage überein
- Der Einstein-Koeffizient der stimulierten Emission ist B_{ik}
- Das Produkt aus den Einstein-Koeffizienten und der spektralen Energiedichte und der Besetzungszahl ergibt die Wahrscheinlichkeit des Ereignisses
- Ein Molekül kann auch ein Photon absorbieren und in den oberen Zustand übergehen. Der zugeh. Einstein-Koeffizient ist B_{ki}

Theorie 7 - Thermodyn. Gleichgewicht



- Im thermodynamischen Gleichgewicht muss also gelten:

$$A_{ik} N_i + B_{ik} \omega_\nu(\nu) N_i = B_{ki} \omega_\nu(\nu) N_k$$

- Für das Verhältnis der Besetzungszustände gilt:

$$\frac{N_i}{N_k} = \frac{g_i}{g_k} e^{\frac{-E_i - E_k}{k_B T}}$$

- In diesem Zustand befinden sich zu viele Atome in niedrigen Energiezuständen – eine Lasertätigkeit ist nicht möglich.

Theorie 8 - Besetzungsinversion



- Um einen Laserpuls zu erzeugen, muss das Besetzungsverhältnis aus dem Gleichgewicht umgekehrt werden → Besetzungsinversion
- Diese Besetzungsinversion wird durch die bereits beschriebene Elektronenstoßanregung erzeugt
- Sobald genug Moleküle im angeregten Zustand sind, kann eine einzelne zufällige Emission die Photonenlawine auslösen

Theorie 9 - Laserverstärkung



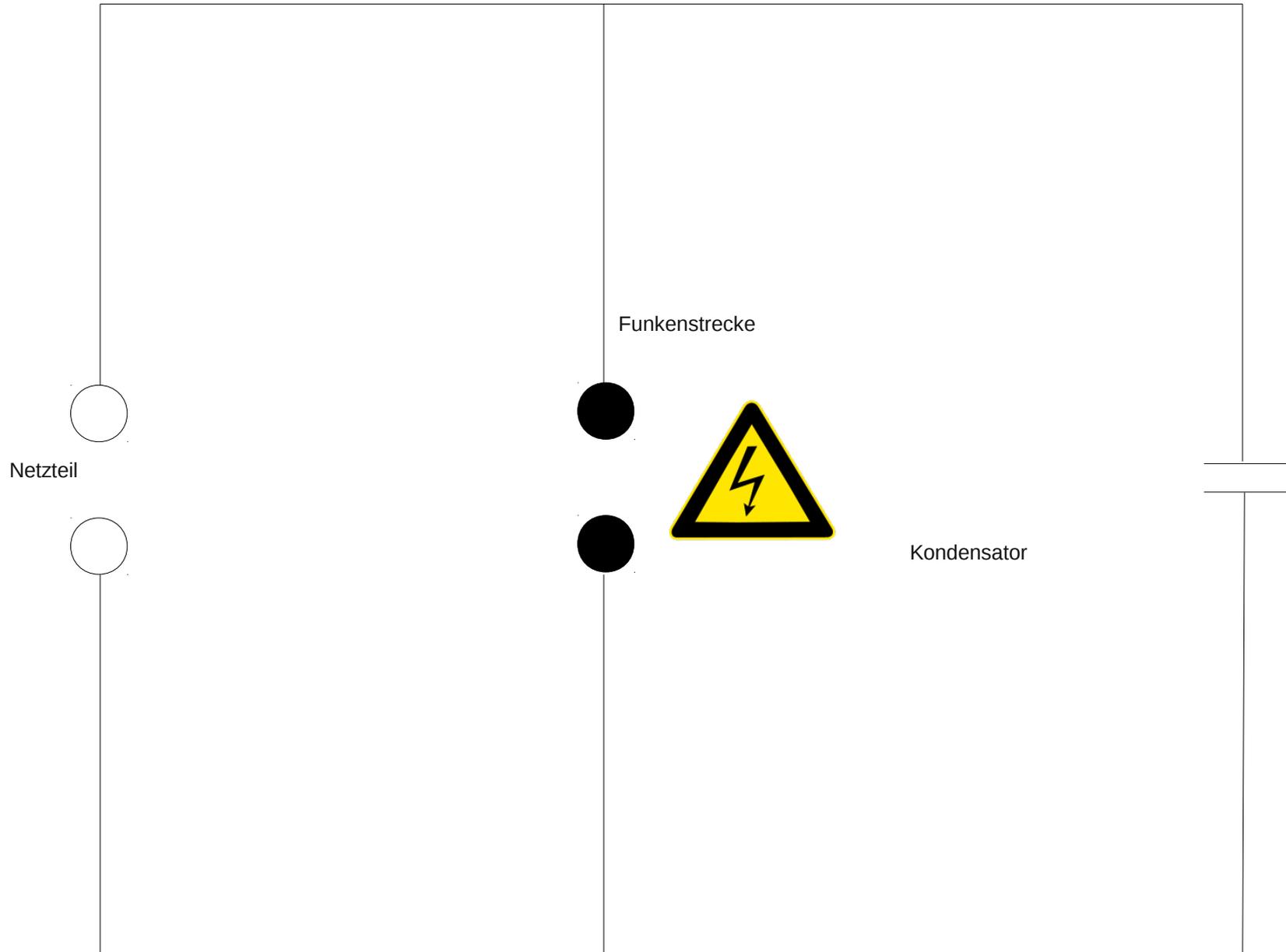
- Fliegt ein zufällig emittiertes Photon entlang der Achse des Laserspalt es wird es wahrscheinlich ein weiteres angeregtes Molekül treffen
- Dieses emittiert in die selbe Richtung ein weiteres Photon → stimulierte Emission
- Diese Verstärkung wiederholt sich millionenfach und es entsteht eine Photonenlawine – der Laserpuls

Theorie 10 - Superstrahler Stickstoff

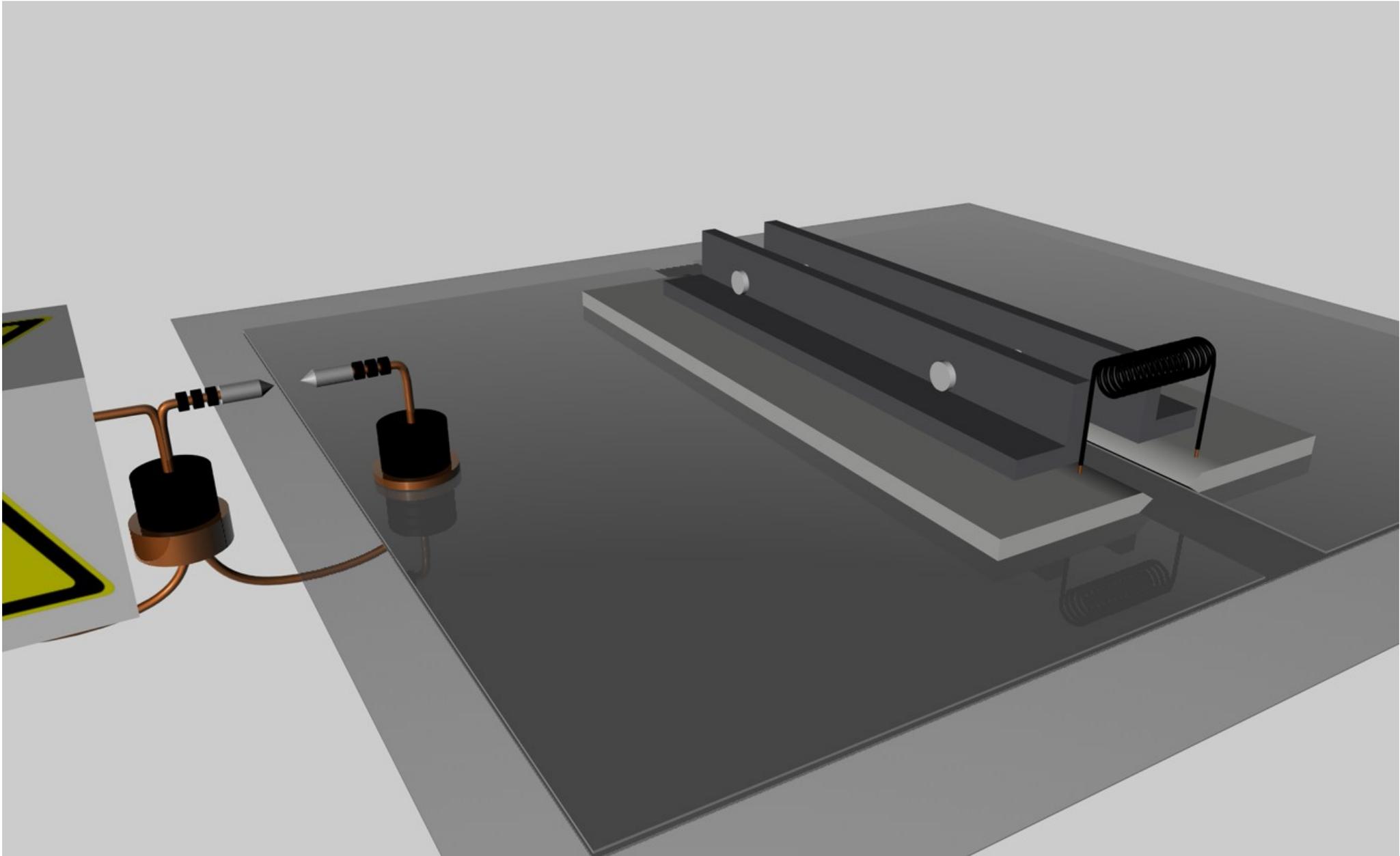


- Bei den meisten Lasern verwendet man Resonatoren, um die Photonen mehrmals durch die Laserröhre laufen zu lassen und das Laserniveau „abzumelken“.
- Stickstoff hingegen ist ein Superstrahler: Das angeregte Niveau baut sich so schnell ab, dass beim zweiten Durchlauf der Photonen die Abregung abgeschlossen ist.
- Beim einmaligen Durchgang der Photonen muss also genug Energie für den Laserpuls gesammelt werden.

Aufbau 0 – Schematischer Aufbau



Aufbau 0 – Schematischer Aufbau



Theorie 11 - Elektronenlawine



- Die Elektronenlawine zur Anregung des Stickstoffs entsteht durch Hochspannungsüberschläge zwischen den Schneiden
- Taktgebendes Element des Lasers ist die Funkenstrecke.
- Solange die Spannung nicht zum Zünden der Funkenstrecke ausreicht, ist ihr Widerstand im Prinzip unendlich.
- Zündet die Funkenstrecke, so wird ihr Widerstand sehr klein – die Pole des Netzteils und die an die Funkenstrecke angeschlossenen Kondensatorteile werden kurzgeschlossen

Theorie 12 - Aufladen des Kondensators



- Das Aufladen geschieht vergleichsweise langsam.
- Der Widerstand der Spule ist klein.
- Beide Hälften der oberen Kondensatorplatte werden gleichmäßig aufgeladen
- Im elektrischen Feld des Kondensators steckt die Energie, die zum Anregen des Stickstoffs verwendet werden soll.
- Das Netzteil baut eine immer höhere Spannung auf, bis die Funkenstrecke zündet...

Theorie 13 - Die Funkenstrecke zündet



- Zündet die Funkenstrecke, wird die angeschlossene Hälfte der oberen Platte schlagartig entladen.
- Durch die Potentialdifferenz fließt über die Spule Ladung von der anderen Hälfte nach
- Da die Stromstärke in der Spule dadurch in kurzer Zeit sehr stark ansteigt, wird ein Magnetfeld induziert, das eine Gegenspannung aufbaut (Lenzsche Regel)
- Via Spule kann kein Potentialausgleich mehr erfolgen
- Stattdessen entlädt sich die Spannung durch Überschläge zwischen den Schneiden → Elektronenlawine

Theorie 14 - Spule als „Schaltwiderstand“



- Der Widerstand der Spule variiert offensichtlich in Sekundenbruchteilen – schneller als jedes Potentiometer
- Der springende Punkt der Schaltung ist, dass der Spulenwiderstand immer zur Erfordernis in der entsprechenden Situation passt.
- Die Aufladung und Entladung des Kondensators kann als Teil eines Wechselstromverlaufs mit hoher bzw. niedriger Frequenz interpretiert werden. Das Verhalten der Spule kann man dann am Wechselstromwiderstand ablesen:

$$Z = R + i\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) \rightarrow |Z| = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}$$

Theorie 15 - Abschätzung Stickstoff



- Um eine Obergrenze für die Leistung des Lasers zu erhalten, nehmen wir an, die angeregte Luft sei in einen Zylinder mit 0,5 mm Durchmesser und 20 cm Höhe eingeschlossen. Ferner sei jedes N_2 -Molekül angeregt.
- Luft hat bei Raumtemperatur eine durchschnittl. Dichte von $1,293 \text{ kg m}^{-3}$.
- Stickstoff hat in Luft einen Massenanteil von 75,518%
- Ein Photon mit $\lambda = 337,1 \text{ nm}$ hat die Energie $0,5892 \text{ aJ}$

Theorie 15 – Abschätzung - Rechnung



$$V = \pi \frac{d^2}{4} h = 3,92 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3$$

$$m_{N_2} = 0,75518 m_{Luft} = 0,75518 \rho_{Luft} \cdot V = 3,83 \cdot 10^{-8} \text{ kg}$$

$$N_{N_2} = \frac{m_{N_2}}{M_{N_2}} = 8,23 \cdot 10^{17} \text{ Moleküle}$$

$$E_{Puls} = N_{N_2} E_\gamma = 485 \text{ mJ}$$

Theorie 16 - Abschätzung Kondensator



- Eine weitere Möglichkeit zur Leistungsabschätzung bietet der Kondensator.
- Eine Messung mit dem Multimeter ergab $C \approx 4 \text{ nF}$
- Für den Energiegehalt des Kondensators erhält man
$$E = \frac{1}{2} C U^2 = 450 \text{ mJ}$$
- Die beiden Werte für die Energie stimmen erstaunlich gut überein.
- Die Energie des realen Pulses ist trotzdem weit geringer, da der überwiegende Teil durch die Funkenstrecke verloren geht

Aufbau 1 – Ursprüngliche Materialliste



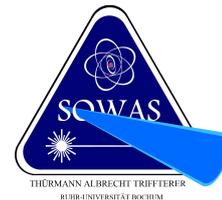
Nr.	Anzahl/Menge	Bezeichnung
1.	2	Aluminiumschneiden gem. Skizze
2.	2	Kunststoff-Winkelprofile (ca. 35x35x190)
3.	ca. 1,6 dm ²	Unbeschichtete Aluminiumfolie
4.	ca. 0,8 dm ²	Polyethylenfolie, z. B. Overhead-Folie (Dielektrikum)
5.	1	Konstantandraht (Querschnitt ca. 2 mm, Länge ca. 10 cm)
6.	2	(Teflon-) Schrauben mit möglichst feinem Gewinde
7.	2	Gegenmutter und Rückhaltering zu den Schrauben (Pos. 6)
8.	2	Kunststoff-Federn
9.	1	Spiegel mit möglichst hohem Reflexionsvermögen (Zielwellenlänge: 337,1 nm)
10.	1	Befestigungsmöglichkeit (Reiter) des Spiegels auf opt. Bank
11.	ca. 2 m	Normales, isoliertes Kupferkabel (Verbindung der Komponenten)
12.	1	Netzgerät 20 kV (wie besprochen)
13.	2	Geeignete Stecker als Verbindung zwischen Pos. 11 und 12
14.	1	Funkenstrecke mit variablem Abstand (i. d. Größenordnung mm)

Aufbau 1 – Neue Materialliste



Nr.	Anzahl/Menge	Bezeichnung
1.	2	Aluminiumschneiden gem. Skizze ✓
2.	2	Kunststoff-Winkelprofile (ca. 35x35x190)
3.	ca. 1,6 dm ²	Unbeschichtete Aluminiumfolie
4.	ca. 0,8 dm ²	Polyethylenfolie, z. B. Overhead-Folie (Dielektrikum)
5.	1	Konstantandraht (Querschnitt ca. 2 mm, Länge ca. 10 cm)
6.	2	(Teflon-) Schrauben mit möglichst feinem Gewinde
7.	2	Gegenmutter und Rückhaltering zu den Schrauben (Pos. 6)
8.	2	Kunststoff-Federn
9.	1	Spiegel mit möglichst hohem Reflexionsvermögen (Zielwellenlänge: 337,1 nm)
10.	1	Befestigungsmöglichkeit (Reiter) des Spiegels auf opt. Bank
11.	ca. 2 m	Normales, isoliertes Kupferkabel (Verbindung der Komponenten)
12.	1	Netzgerät 20 kV (wie besprochen)
13.	2	Geeignete Stecker als Verbindung zwischen Pos. 11 und 12
14.	1	Funkenstrecke mit variablem Abstand (i. d. Größenordnung mm)

Aufbau 1 – Neue Materialliste



Nr.	Anzahl/Menge	Bezeichnung
1.	2	Aluminiumschneiden gem. Skizze ✓
2.	2	PVC – Leisten (180x20x40 mm)
3.	ca. 1,6 dm ²	Unbeschichtete Aluminiumfolie
4.	ca. 0,8 dm ²	Polyethylenfolie, z. B. Overhead-Folie (Dielektrikum)
5.	1	Konstantandraht (Querschnitt ca. 2 mm, Länge ca. 10 cm)
6.	2	(Teflon-) Schrauben mit möglichst feinem Gewinde
7.	2	Gegenmutter und Rückhaltering zu den Schrauben (Pos. 6)
8.	2	Kunststoff-Federn
9.	1	Spiegel mit möglichst hohem Reflexionsvermögen (Zielwellenlänge: 337,1 nm)
10.	1	Befestigungsmöglichkeit (Reiter) des Spiegels auf opt. Bank
11.	ca. 2 m	Normales, isoliertes Kupferkabel (Verbindung der Komponenten)
12.	1	Netzgerät 20 kV (wie besprochen)
13.	2	Geeignete Stecker als Verbindung zwischen Pos. 11 und 12
14.	1	Funkenstrecke mit variablem Abstand (i. d. Größenordnung mm)

Aufbau 1 – Neue Materialliste



Nr.	Anzahl/Menge	Bezeichnung	
1.	2	Aluminiumschneiden gem. Skizze	✓
2.	2	PVC – Leisten (180x20x40 mm)	
3.	ca. 1,6 dm ²	Unbeschichtete Aluminiumfolie	✓
4.	ca. 0,8 dm ²	Polyethylenfolie, z. B. Overhead-Folie (Dielektrikum)	
5.	1	Konstantandraht (Querschnitt ca. 2 mm, Länge ca. 10 cm)	
6.	2	(Teflon-) Schrauben mit möglichst feinem Gewinde	
7.	2	Gegenmutter und Rückhaltering zu den Schrauben (Pos. 6)	
8.	2	Kunststoff-Federn	
9.	1	Spiegel mit möglichst hohem Reflexionsvermögen (Zielwellenlänge: 337,1 nm)	
10.	1	Befestigungsmöglichkeit (Reiter) des Spiegels auf opt. Bank	
11.	ca. 2 m	Normales, isoliertes Kupferkabel (Verbindung der Komponenten)	
12.	1	Netzgerät 20 kV (wie besprochen)	
13.	2	Geeignete Stecker als Verbindung zwischen Pos. 11 und 12	
14.	1	Funkenstrecke mit variablem Abstand (i. d. Größenordnung mm)	

Aufbau 1 – Neue Materialliste



Nr.	Anzahl/Menge	Bezeichnung	
1.	2	Aluminiumschneiden gem. Skizze	✓
2.	2	PVC – Leisten (180x20x40 mm)	
3.	ca. 1,6 dm ²	Unbeschichtete Aluminiumfolie	✓
4.	ca. 0,8 dm ²	Polypropylenfolie („Laminiertasche“)	
5.	1	Konstantandraht (Querschnitt ca. 2 mm, Länge ca. 10 cm)	
6.	2	(Teflon-) Schrauben mit möglichst feinem Gewinde	
7.	2	Gegenmutter und Rückhaltering zu den Schrauben (Pos. 6)	
8.	2	Kunststoff-Federn	
9.	1	Spiegel mit möglichst hohem Reflexionsvermögen (Zielwellenlänge: 337,1 nm)	
10.	1	Befestigungsmöglichkeit (Reiter) des Spiegels auf opt. Bank	
11.	ca. 2 m	Normales, isoliertes Kupferkabel (Verbindung der Komponenten)	
12.	1	Netzgerät 20 kV (wie besprochen)	
13.	2	Geeignete Stecker als Verbindung zwischen Pos. 11 und 12	
14.	1	Funkenstrecke mit variablem Abstand (i. d. Größenordnung mm)	

Aufbau 1 – Neue Materialliste



Nr.	Anzahl/Menge	Bezeichnung	
1.	2	Aluminiumschneiden gem. Skizze	✓
2.	2	PVC – Leisten (180x20x40 mm)	
3.	ca. 1,6 dm ²	Unbeschichtete Aluminiumfolie	✓
4.	ca. 0,8 dm ²	Polypropylenfolie („Laminiertasche“)	
5.	1	Kupferdraht (Querschnitt ca. 2 mm, Länge ca. 100 cm)	
6.	2	(Teflon-) Schrauben mit möglichst feinem Gewinde	
7.	2	Gegenmutter und Rückhaltering zu den Schrauben (Pos. 6)	
8.	2	Kunststoff-Federn	
9.	1	Spiegel mit möglichst hohem Reflexionsvermögen (Zielwellenlänge: 337,1 nm)	
10.	1	Befestigungsmöglichkeit (Reiter) des Spiegels auf opt. Bank	
11.	ca. 2 m	Normales, isoliertes Kupferkabel (Verbindung der Komponenten)	
12.	1	Netzgerät 20 kV (wie besprochen)	
13.	2	Geeignete Stecker als Verbindung zwischen Pos. 11 und 12	
14.	1	Funkenstrecke mit variablem Abstand (i. d. Größenordnung mm)	

Aufbau 1 – Neue Materialliste



Nr.	Anzahl/Menge	Bezeichnung	
1.	2	Aluminiumschneiden gem. Skizze	✓
2.	2	PVC – Leisten (180x20x40 mm)	
3.	ca. 1,6 dm ²	Unbeschichtete Aluminiumfolie	✓
4.	ca. 0,8 dm ²	Polypropylenfolie („Laminiertasche“)	
5.	1	Kupferdraht (Querschnitt ca. 2 mm, Länge ca. 100 cm)	
6.	2	(Teflon-) Schrauben mit möglichst feinem Gewinde	✓
7.	2	Gegenmutter und Rückhaltering zu den Schrauben (Pos. 6)	
8.	2	Kunststoff-Federn	
9.	1	Spiegel mit möglichst hohem Reflexionsvermögen (Zielwellenlänge: 337,1 nm)	
10.	1	Befestigungsmöglichkeit (Reiter) des Spiegels auf opt. Bank	
11.	ca. 2 m	Normales, isoliertes Kupferkabel (Verbindung der Komponenten)	
12.	1	Netzgerät 20 kV (wie besprochen)	
13.	2	Geeignete Stecker als Verbindung zwischen Pos. 11 und 12	
14.	1	Funkenstrecke mit variablem Abstand (i. d. Größenordnung mm)	

Aufbau 1 – Neue Materialliste



Nr.	Anzahl/Menge	Bezeichnung	
1.	2	Aluminiumschneiden gem. Skizze	✓
2.	2	PVC – Leisten (180x20x40 mm)	
3.	ca. 1,6 dm ²	Unbeschichtete Aluminiumfolie	✓
4.	ca. 0,8 dm ²	Polypropylenfolie („Laminiertasche“)	
5.	1	Kupferdraht (Querschnitt ca. 2 mm, Länge ca. 100 cm)	
6.	2	(Teflon-) Schrauben mit möglichst feinem Gewinde	✓
7.	2	PVC - Feststellschrauben (M5) (Pos. 6)	
8.	2	Kunststoff-Federn	
9.	1	Spiegel mit möglichst hohem Reflexionsvermögen (Zielwellenlänge: 337,1 nm)	
10.	1	Befestigungsmöglichkeit (Reiter) des Spiegels auf opt. Bank	
11.	ca. 2 m	Normales, isoliertes Kupferkabel (Verbindung der Komponenten)	
12.	1	Netzgerät 20 kV (wie besprochen)	
13.	2	Geeignete Stecker als Verbindung zwischen Pos. 11 und 12	
14.	1	Funkenstrecke mit variablem Abstand (i. d. Größenordnung mm)	

Aufbau 1 – Neue Materialliste



Nr.	Anzahl/Menge	Bezeichnung	
1.	2	Aluminiumschneiden gem. Skizze	✓
2.	2	PVC – Leisten (180x20x40 mm)	
3.	ca. 1,6 dm ²	Unbeschichtete Aluminiumfolie	✓
4.	ca. 0,8 dm ²	Polypropylenfolie („Laminiertasche“)	
5.	1	Kupferdraht (Querschnitt ca. 2 mm, Länge ca. 100 cm)	
6.	2	(Teflon-) Schrauben mit möglichst feinem Gewinde	✓
7.	2	PVC - Feststellschrauben (M5) (Pos. 6)	
8.	2	Kunststoff-Federn	
9.	1	Spiegel mit möglichst hohem Reflexionsvermögen (Zielwellenlänge: 337,1 nm)	
10.	1	Befestigungsmöglichkeit (Reiter) des Spiegels auf opt. Bank	
11.	ca. 2 m	Normales, isoliertes Kupferkabel (Verbindung der Komponenten)	
12.	1	Netzgerät 20 kV (wie besprochen)	
13.	2	Geeignete Stecker als Verbindung zwischen Pos. 11 und 12	
14.	1	Funkenstrecke mit variablem Abstand (i. d. Größenordnung mm)	

Aufbau 1 – Neue Materialliste



Nr.	Anzahl/Menge	Bezeichnung	
1.	2	Aluminiumschneiden gem. Skizze	✓
2.	2	PVC – Leisten (180x20x40 mm)	
3.	ca. 1,6 dm ²	Unbeschichtete Aluminiumfolie	✓
4.	ca. 0,8 dm ²	Polypropylenfolie („Laminiertasche“)	
5.	1	Kupferdraht (Querschnitt ca. 2 mm, Länge ca. 100 cm)	
6.	2	(Teflon-) Schrauben mit möglichst feinem Gewinde	✓
7.	2	PVC - Feststellschrauben (M5) (Pos. 6)	
8.	2	Kunststoff-Federn	
9.	1	Spiegel mit möglichst hohem Reflexionsvermögen (Zielwellenlänge: 337,1 nm)	
10.	1	Befestigungsmöglichkeit (Reiter) des Spiegels auf opt. Bank	
11.	ca. 2 m	Normales, isoliertes Kupferkabel (Verbindung der Komponenten)	
12.	1	Netzgerät 20 kV (wie besprochen)	
13.	2	Geeignete Stecker als Verbindung zwischen Pos. 11 und 12	
14.	1	Funkenstrecke mit variablem Abstand (i. d. Größenordnung mm)	

Aufbau 1 – Neue Materialliste



Nr.	Anzahl/Menge	Bezeichnung	
1.	2	Aluminiumschneiden gem. Skizze	✓
2.	2	PVC – Leisten (180x20x40 mm)	
3.	ca. 1,6 dm ²	Unbeschichtete Aluminiumfolie	✓
4.	ca. 0,8 dm ²	Polypropylenfolie („Laminiertasche“)	
5.	1	Kupferdraht (Querschnitt ca. 2 mm, Länge ca. 100 cm)	
6.	2	(Teflon-) Schrauben mit möglichst feinem Gewinde	✓
7.	2	PVC - Feststellschrauben (M5) (Pos. 6)	
8.	2	Kunststoff-Federn	
9.	1	Spiegel mit möglichst hohem Reflexionsvermögen (Zielwellenlänge: 337,1 nm)	
10.	1	Befestigungsmöglichkeit (Reiter) des Spiegels auf opt. Bank	
11.	ca. 2 m	Normales, isoliertes Kupferkabel (Verbindung der Komponenten)	
12.	1	Netzgerät 20 kV (wie besprochen)	
13.	2	Geeignete Stecker als Verbindung zwischen Pos. 11 und 12	
14.	1	Funkenstrecke mit variablem Abstand (i. d. Größenordnung mm)	

Aufbau 1 – Neue Materialliste



Nr.	Anzahl/Menge	Bezeichnung	
1.	2	Aluminiumschneiden gem. Skizze	✓
2.	2	PVC – Leisten (180x20x40 mm)	
3.	ca. 1,6 dm ²	Unbeschichtete Aluminiumfolie	✓
4.	ca. 0,8 dm ²	Polypropylenfolie („Laminiertasche“)	
5.	1	Kupferdraht (Querschnitt ca. 2 mm, Länge ca. 100 cm)	
6.	2	(Teflon-) Schrauben mit möglichst feinem Gewinde	✓
7.	2	PVC - Feststellschrauben (M5) (Pos. 6)	
8.	2	Kunststoff-Federn	
9.	1	Spiegel mit möglichst hohem Reflexionsvermögen (Zielwellenlänge: 337,1 nm)	
10.	1	Befestigungsmöglichkeit (Reiter) des Spiegels auf opt. Bank	
11.	ca. 2 m	Normales, isoliertes Kupferkabel (Verbindung der Komponenten)	✓
12.	1	Netzgerät 20 kV (wie besprochen)	
13.	2	Geeignete Stecker als Verbindung zwischen Pos. 11 und 12	
14.	1	Funkenstrecke mit variablem Abstand (i. d. Größenordnung mm)	

Aufbau 1 – Neue Materialliste



Nr.	Anzahl/Menge	Bezeichnung	
1.	2	Aluminiumschneiden gem. Skizze	✓
2.	2	PVC – Leisten (180x20x40 mm)	
3.	ca. 1,6 dm ²	Unbeschichtete Aluminiumfolie	✓
4.	ca. 0,8 dm ²	Polypropylenfolie („Laminiertasche“)	
5.	1	Kupferdraht (Querschnitt ca. 2 mm, Länge ca. 100 cm)	
6.	2	(Teflon-) Schrauben mit möglichst feinem Gewinde	✓
7.	2	PVC - Feststellschrauben (M5) (Pos. 6)	
8.	2	Kunststoff-Federn	
9.	1	Spiegel mit möglichst hohem Reflexionsvermögen (Zielwellenlänge: 337,1 nm)	
10.	1	Befestigungsmöglichkeit (Reiter) des Spiegels auf opt. Bank	
11.	ca. 2 m	Normales, isoliertes Kupferkabel (Verbindung der Komponenten)	✓
12.	1	Netzgerät 10 kV (Phywe)	
13.	2	Geeignete Stecker als Verbindung zwischen Pos. 11 und 12	
14.	1	Funkenstrecke mit variablem Abstand (i. d. Größenordnung mm)	

Aufbau 1 – Neue Materialliste



Nr.	Anzahl/Menge	Bezeichnung	
1.	2	Aluminiumschneiden gem. Skizze	✓
2.	2	PVC – Leisten (180x20x40 mm)	
3.	ca. 1,6 dm ²	Unbeschichtete Aluminiumfolie	✓
4.	ca. 0,8 dm ²	Polypropylenfolie („Laminiertasche“)	
5.	1	Kupferdraht (Querschnitt ca. 2 mm, Länge ca. 100 cm)	
6.	2	(Teflon-) Schrauben mit möglichst feinem Gewinde	✓
7.	2	PVC - Feststellschrauben (M5) (Pos. 6)	
8.	2	Kunststoff-Federn	
9.	1	Spiegel mit möglichst hohem Reflexionsvermögen (Zielwellenlänge: 337,1 nm)	
10.	1	Befestigungsmöglichkeit (Reiter) des Spiegels auf opt. Bank	
11.	ca. 2 m	Normales, isoliertes Kupferkabel (Verbindung der Komponenten)	✓
12.	1	Netzgerät 10 kV (Phywe)	
13.	2	Geeignete Stecker als Verbindung zwischen Pos. 11 und 12	✓
14.	1	Funkenstrecke mit variablem Abstand (i. d. Größenordnung mm)	

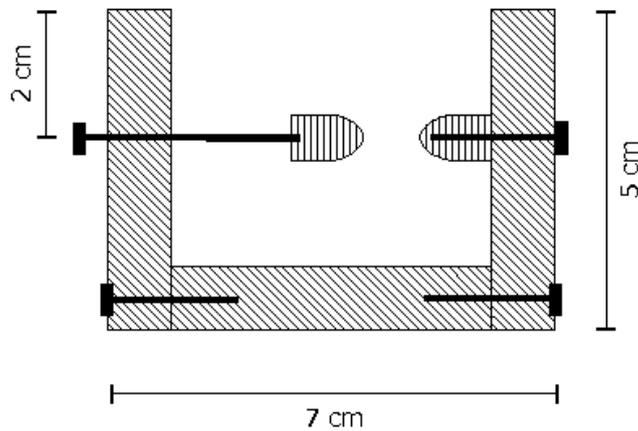
Aufbau 1 – Neue Materialliste



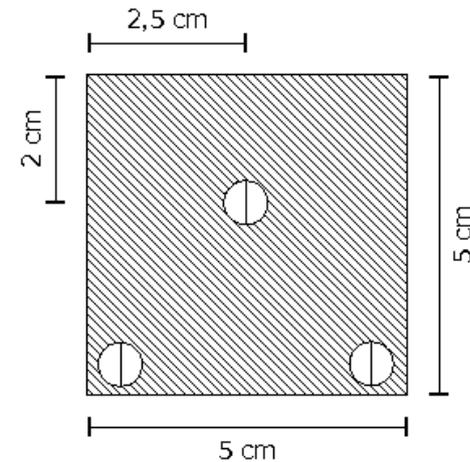
Nr.	Anzahl/Menge	Bezeichnung	
1.	2	Aluminiumschneiden gem. Skizze	✓
2.	2	PVC – Leisten (180x20x40 mm)	
3.	ca. 1,6 dm ²	Unbeschichtete Aluminiumfolie	✓
4.	ca. 0,8 dm ²	Polypropylenfolie („Laminiertasche“)	
5.	1	Kupferdraht (Querschnitt ca. 2 mm, Länge ca. 100 cm)	
6.	2	(Teflon-) Schrauben mit möglichst feinem Gewinde	✓
7.	2	PVC - Feststellschrauben (M5) (Pos. 6)	
8.	2	Kunststoff-Federn	
9.	1	Spiegel mit möglichst hohem Reflexionsvermögen (Zielwellenlänge: 337,1 nm)	
10.	1	Befestigungsmöglichkeit (Reiter) des Spiegels auf opt. Bank	
11.	ca. 2 m	Normales, isoliertes Kupferkabel (Verbindung der Komponenten)	✓
12.	1	Netzgerät 10 kV (Phywe)	
13.	2	Geeignete Stecker als Verbindung zwischen Pos. 11 und 12	✓
14.	1	Funkenstrecke mit variablem Abstand (i. d. Größenordnung mm)	✓

Aufbau 2 - Funkenstrecke

Seitenansicht:



Vorderansicht:



Legende:

-  Schraube (Seitenansicht)
-  Schraubenkopf
-  Nutmutter
-  Kunststoff (Materialstärke: 10 mm)



SOWAS-Projekt Stickstofflaser

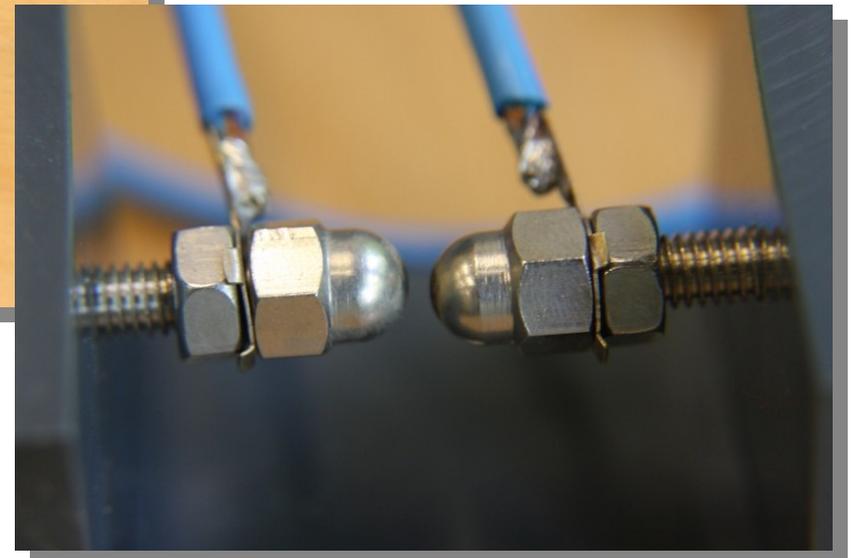
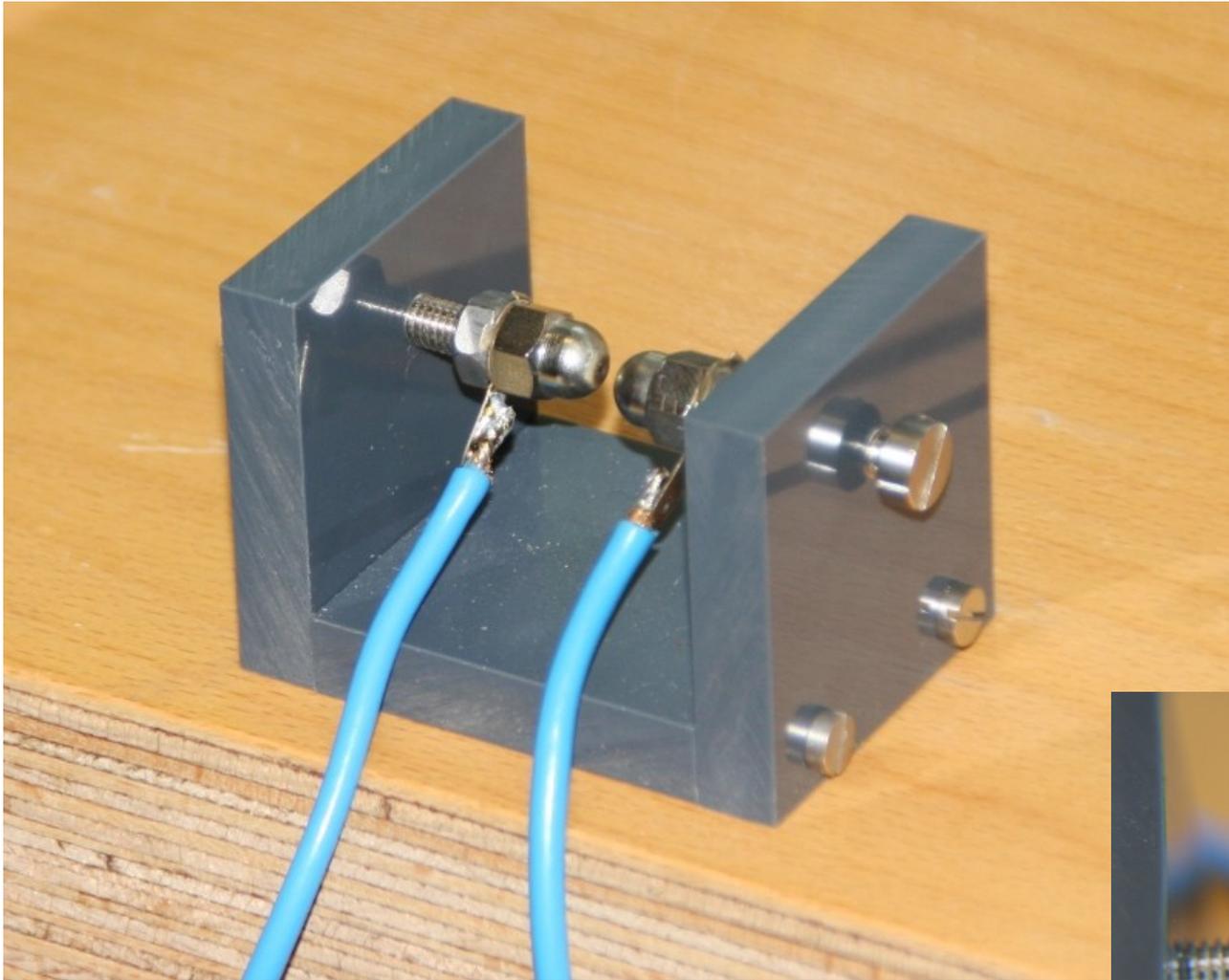
- Bauteil: Funkenstrecke
- Material: Kunststoff, Nutmuttern, Schrauben
- Maßstab: 1:1
- Anzahl: 1
- Datum: 16.03.2009

Aufbau 2 - Funkenstrecke



- Kunststoffplatten entgraten
- Anreißen und Bohren der PVC-Leisten gemäß Skizze
- Gewinde schneiden
- Gewindelöcher entgraten
- Komponenten verschrauben
- Lötfahnen zum Anschluss der Zuleitung anbringen

Aufbau 2 - Funkenstrecke

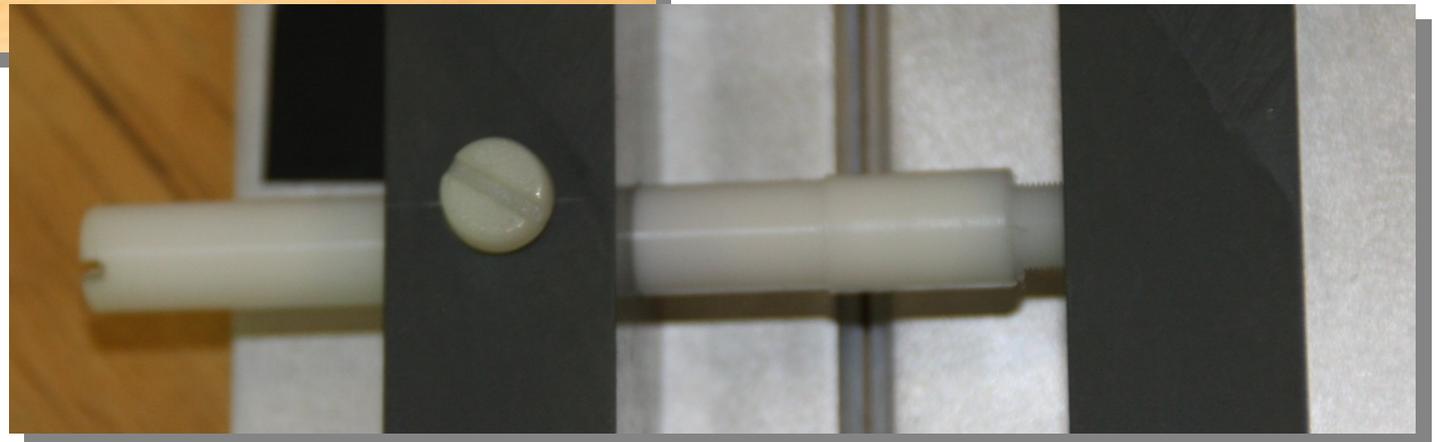
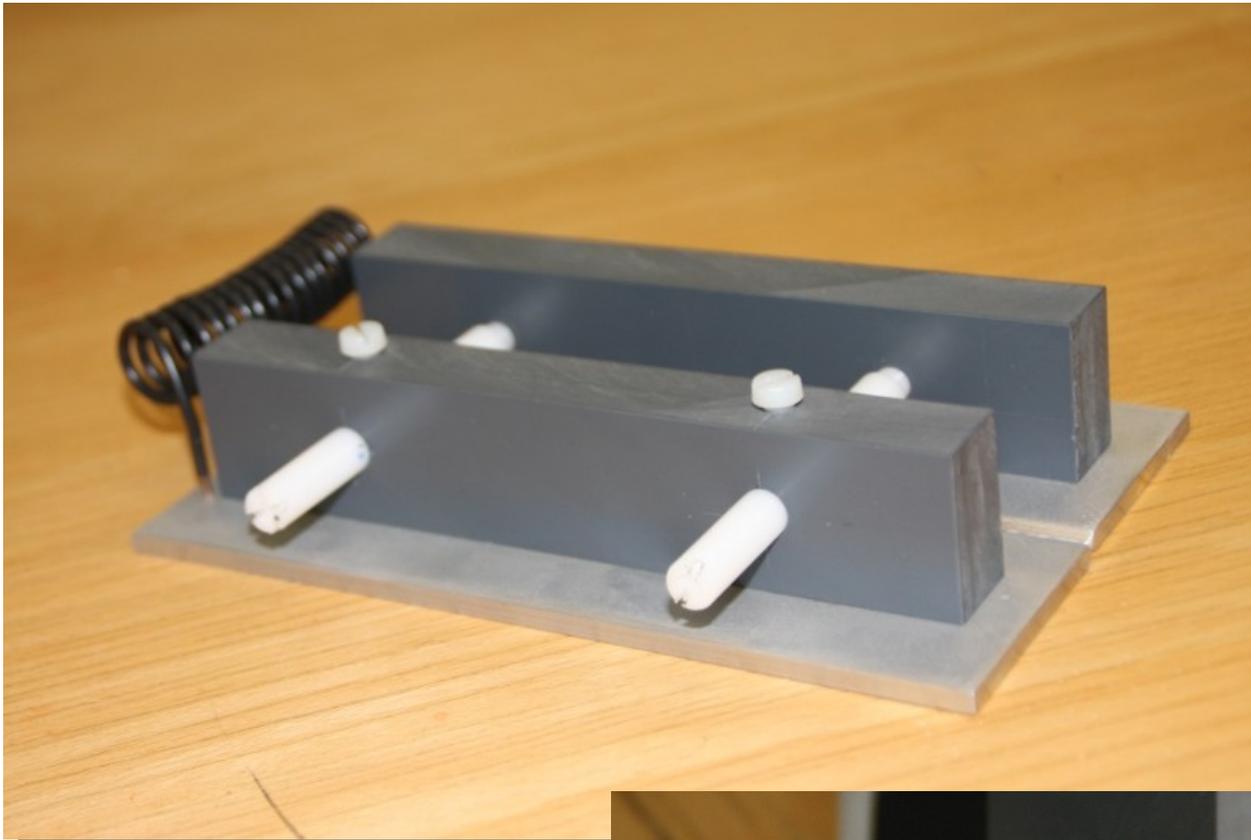


Aufbau 3 - Justageeinrichtung

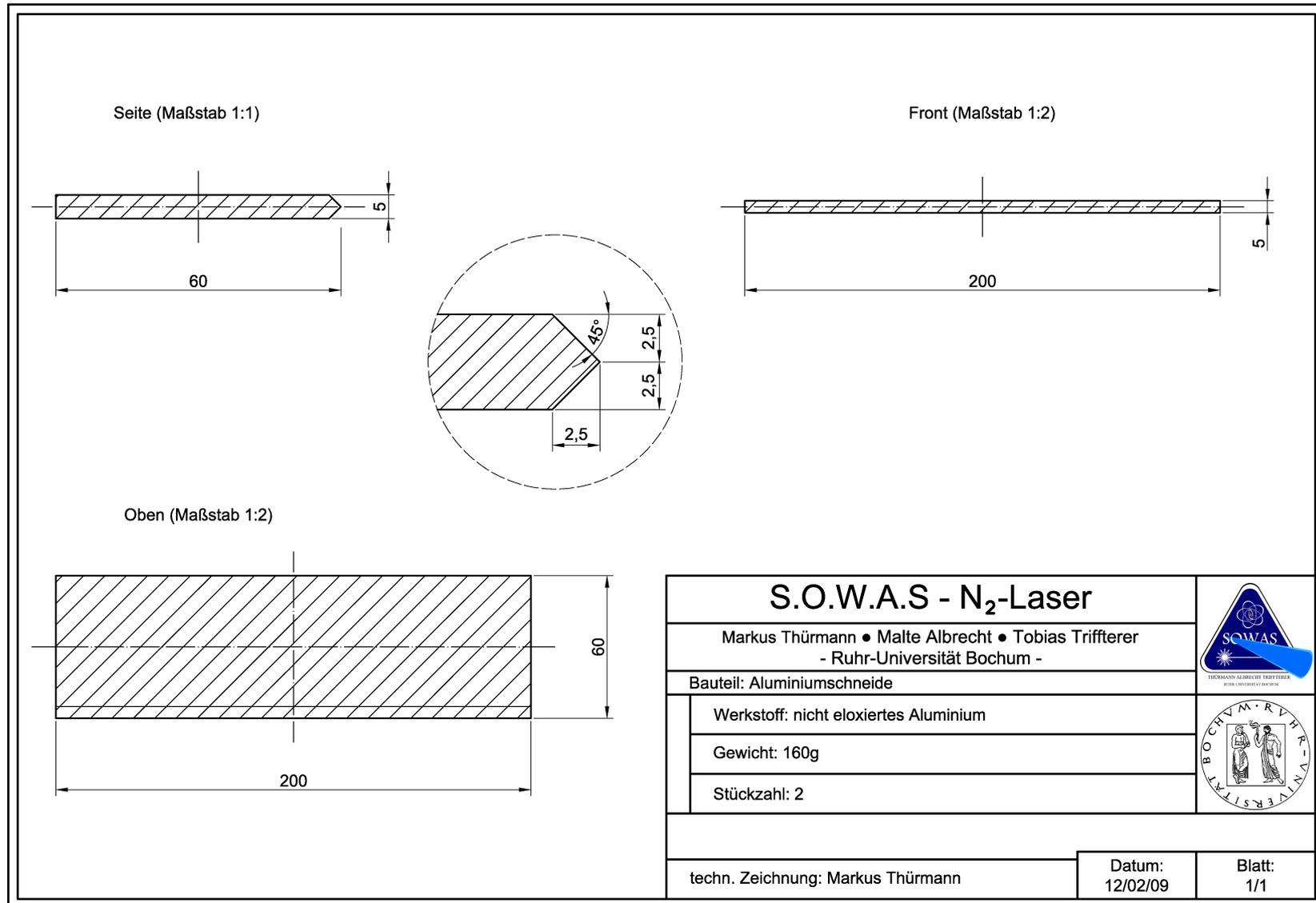


- Erste Idee mit Rückhaltefedern wurde verworfen
- Neuer Aufbau:
 - 2 Teflonschrauben zur Justage (wie gehabt)
 - PVC-Schraube greift von oben in eine Nut in der Teflonschraube (Rückhaltevorrichtung und Fixierungsmöglichkeit)
 - Feinstes verfügbares Gewinde: M8x0,5
 - 0,5mm / Umdrehung

Aufbau 3 - Justageeinrichtung



Aufbau 4 - Aluminiumschneiden

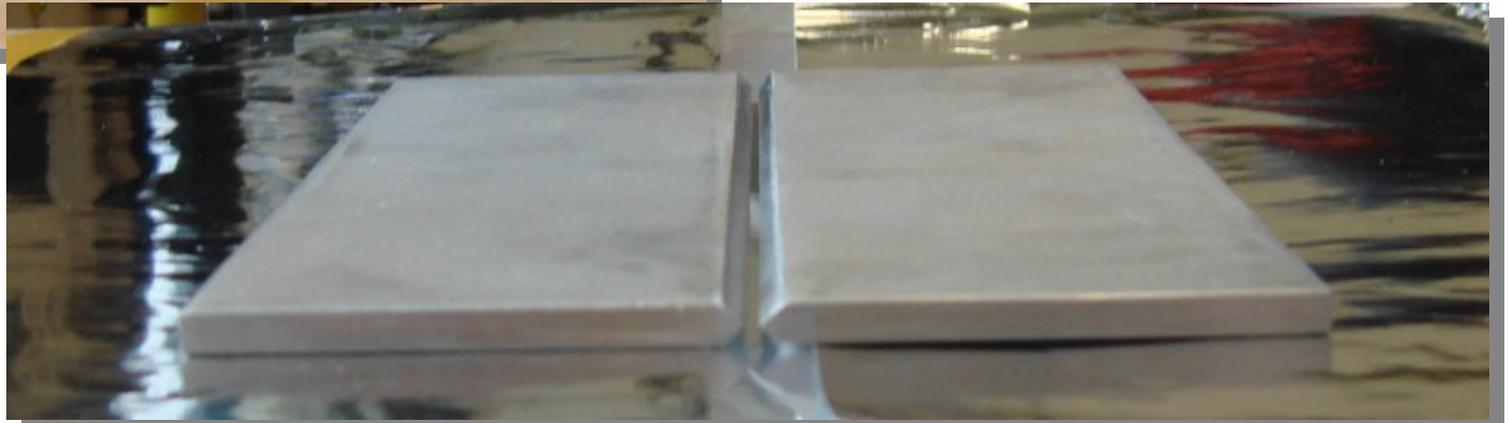
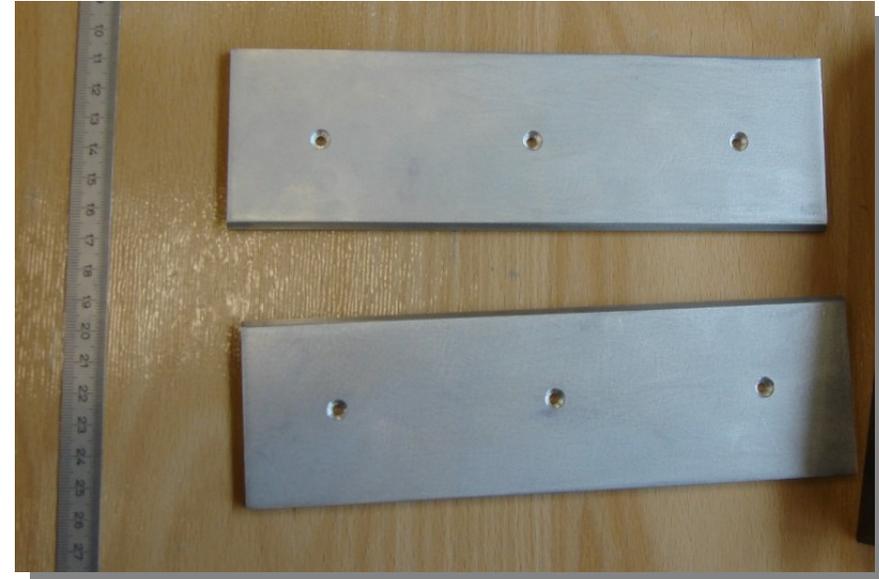
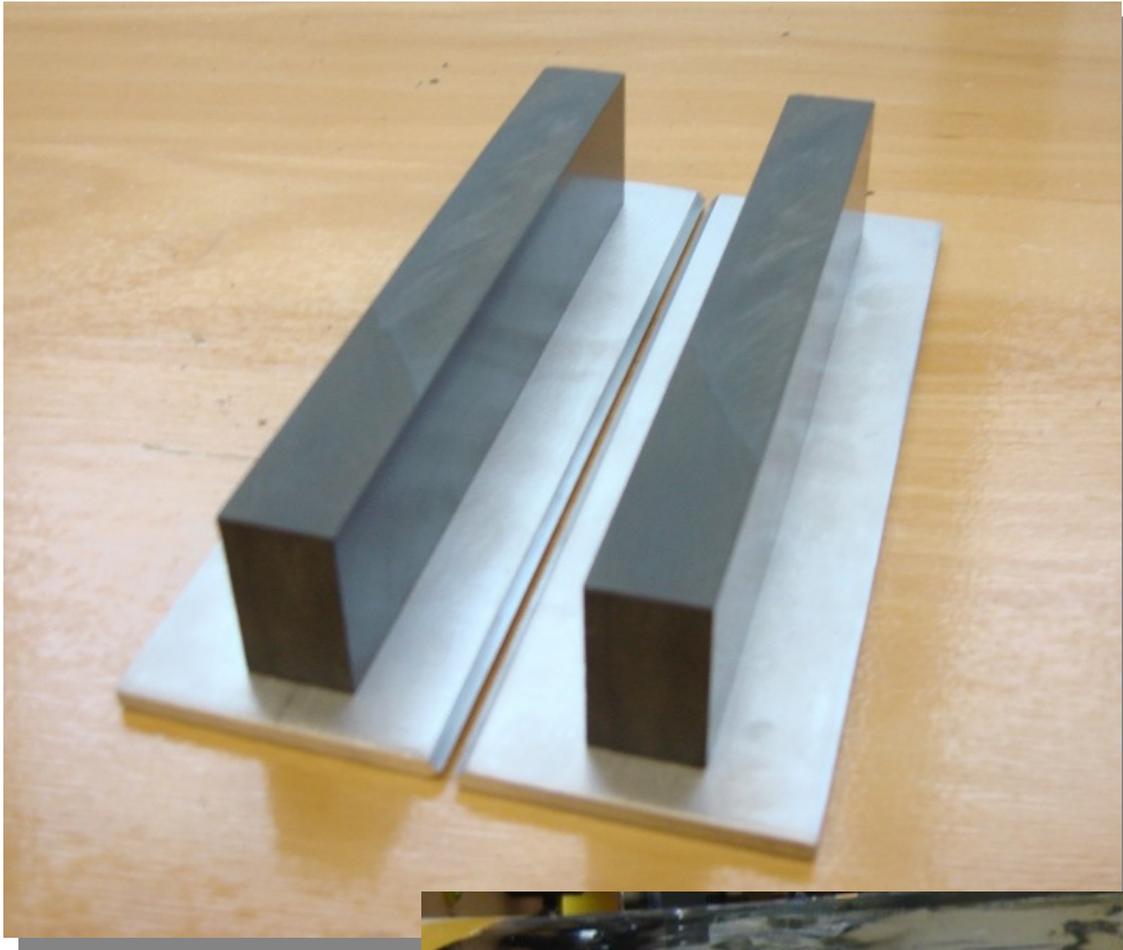


Aufbau 4 - Aluminiumschneiden



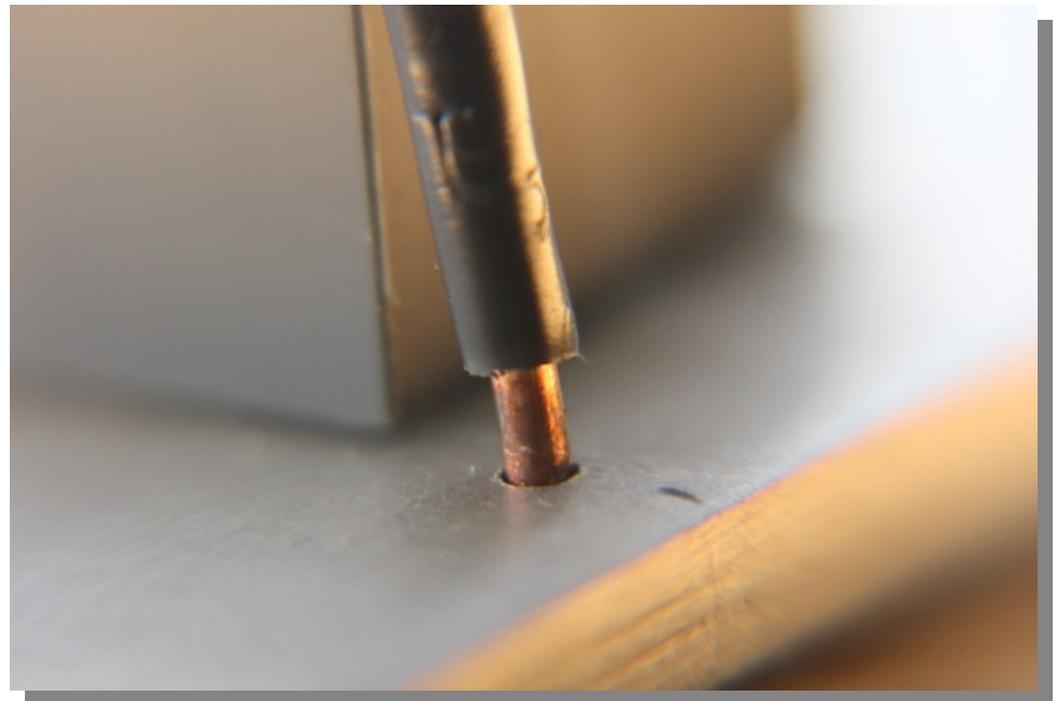
- Anfertigung erfolgte durch die feinmechanische Werkstatt gemäß Skizze (2 Paar Schneiden)
- Bohrungen für die PVC – Leisten wurden gesetzt
- Die Bohrlöcher wurden zusätzlich (zylindrisch) gesenkt, sodass die M4 Schraubenköpfe nicht überstehen

Aufbau 4 - Aluminiumschneiden



Aufbau 5 - Spule

- Wicklung einer Spule aus starrer Kupferlitze (Durchmesser ca. 1,5mm)
- 15 Windungen
- Nötige Bohrungen in die Aluminiumschneiden gesetzt

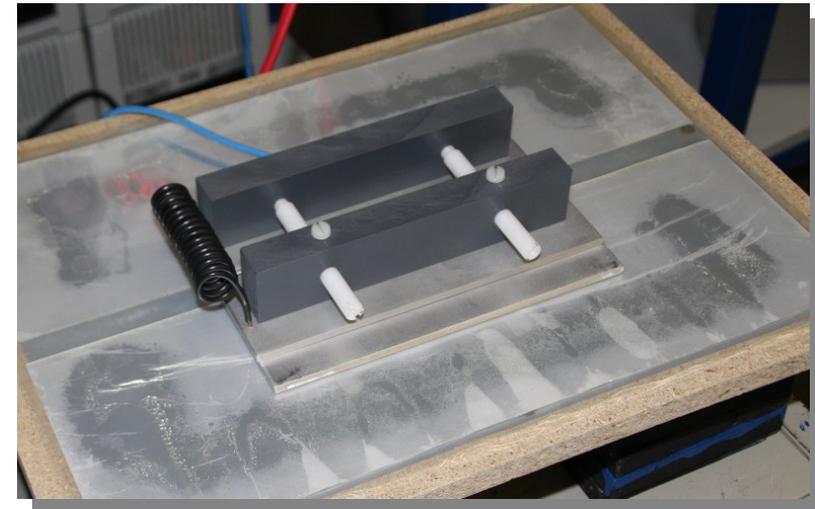


Aufbau 6 - Grundplatte



- Befestigung des gesamten Aufbaus auf einer Spanholzplatte
- Anbringung der unteren Kondensatorplatte mit Heftzwecken
- Befestigung der oberen Kondensatorplatten auf einer PVC-Folie (einfacher Austausch möglich)
- Dielektrikum wurde ebenfalls austauschbar befestigt

Aufbau 6 - Grundplatte

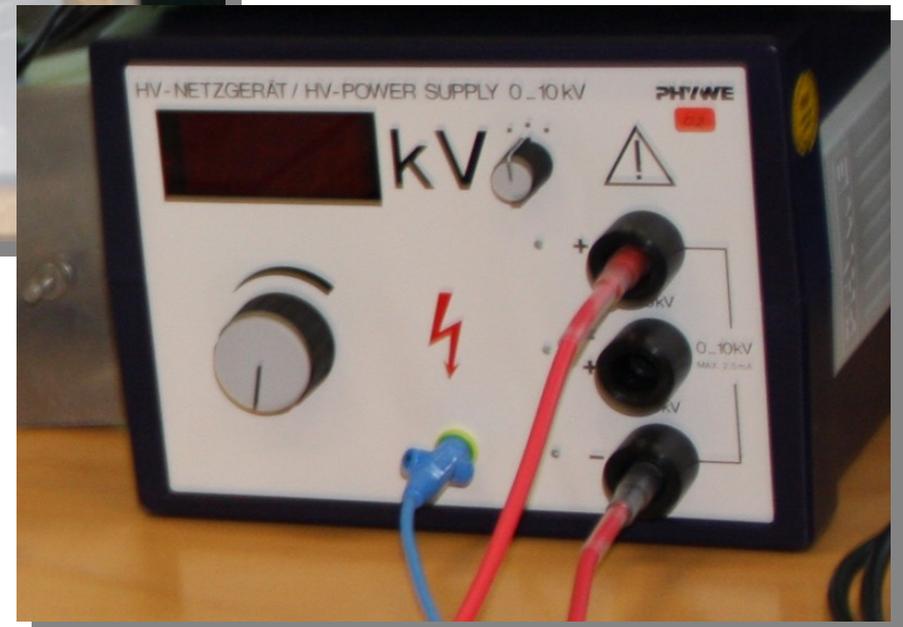
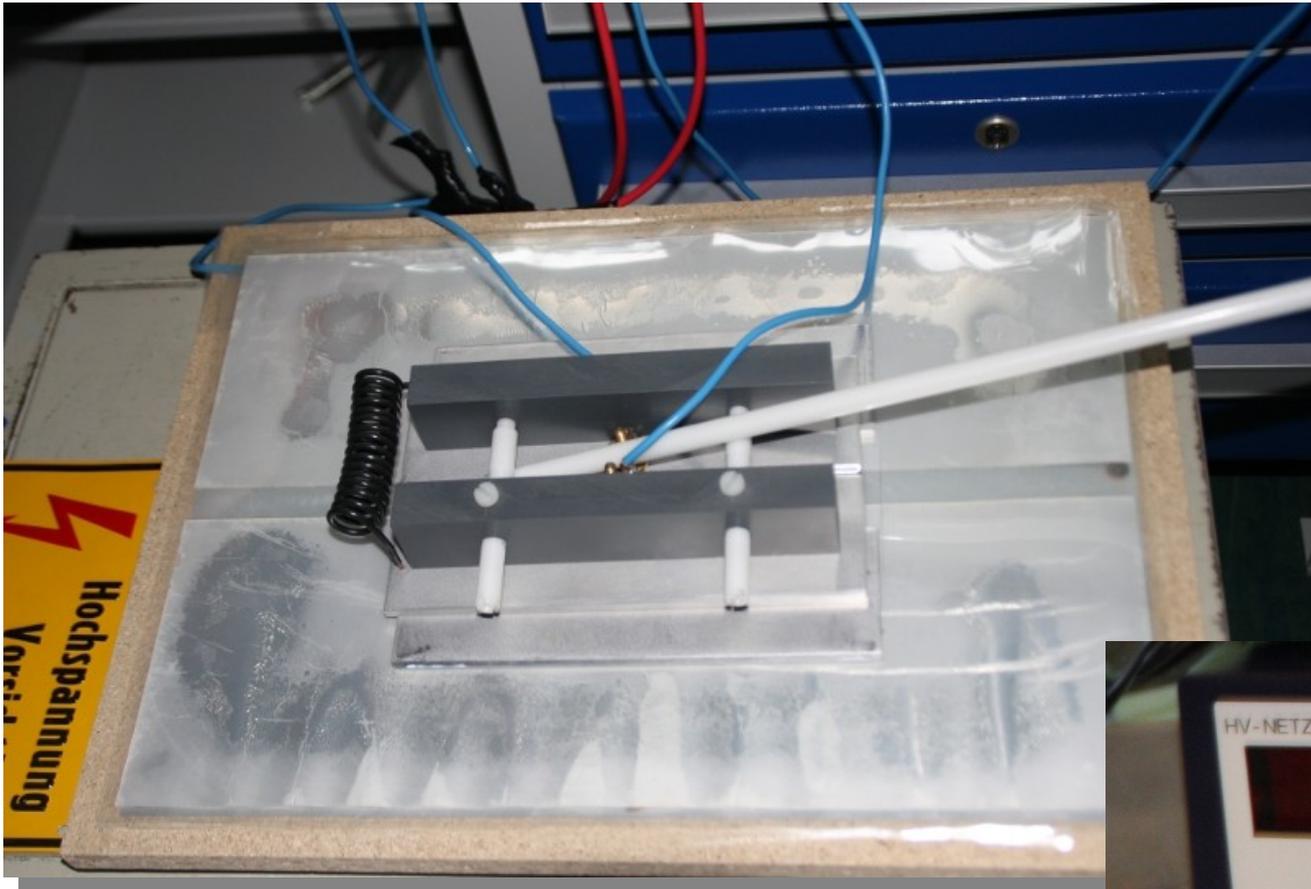


Aufbau 7 – Kabel und Erdung



- Verkabelung
 - Zuleitungen zum Netzteil aus Hochspannungskabel, versehen mit isolierten Sicherheitssteckern
- Erdung des Aufbaus
 - Erdstab zur Überbrückung der Funkenstrecke
 - Zweiter Erdstab zur Brückung der beiden Aluminiumschneiden
- Beide Stäbe wurden aus Teflon gefertigt

Aufbau 7 – Kabel und Erdung



Experiment 0 – Sicherheitsmaßnahmen



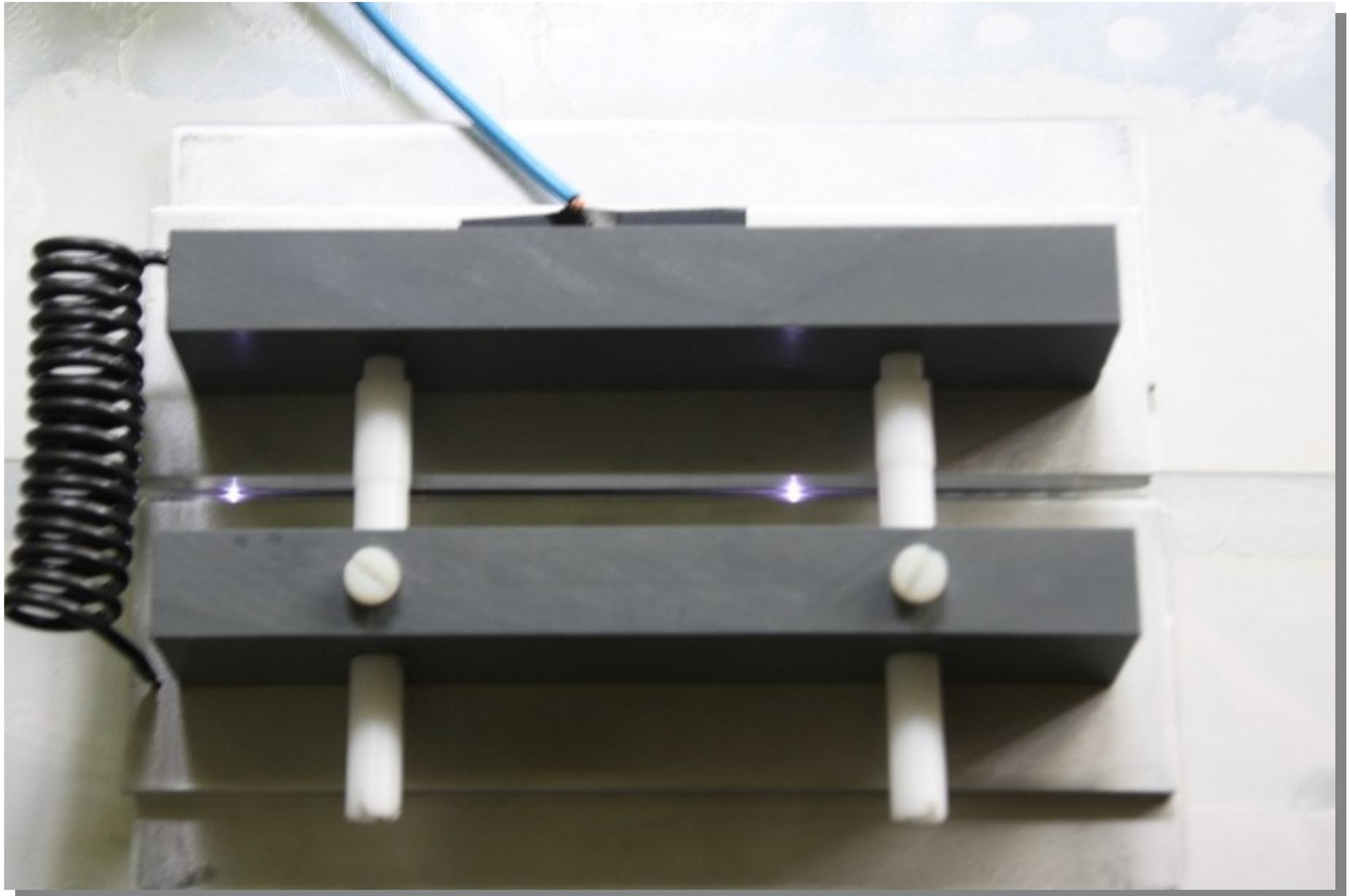
- Hochspannung (10kV)
 - Erdung
 - Abstand der Versuchsteilnehmer
- UV-Strahlung durch den Laser
 - UV-undurchlässige Brille
- Eventuell starkes Licht durch Funkenentladungen
 - Konstruktion einer Abdeckung
- Hohe Produktion von Ozon in der Funkenstrecke und zwischen den Schneiden
 - Ausreichende Belüftung

Experiment 1 – „First Light“



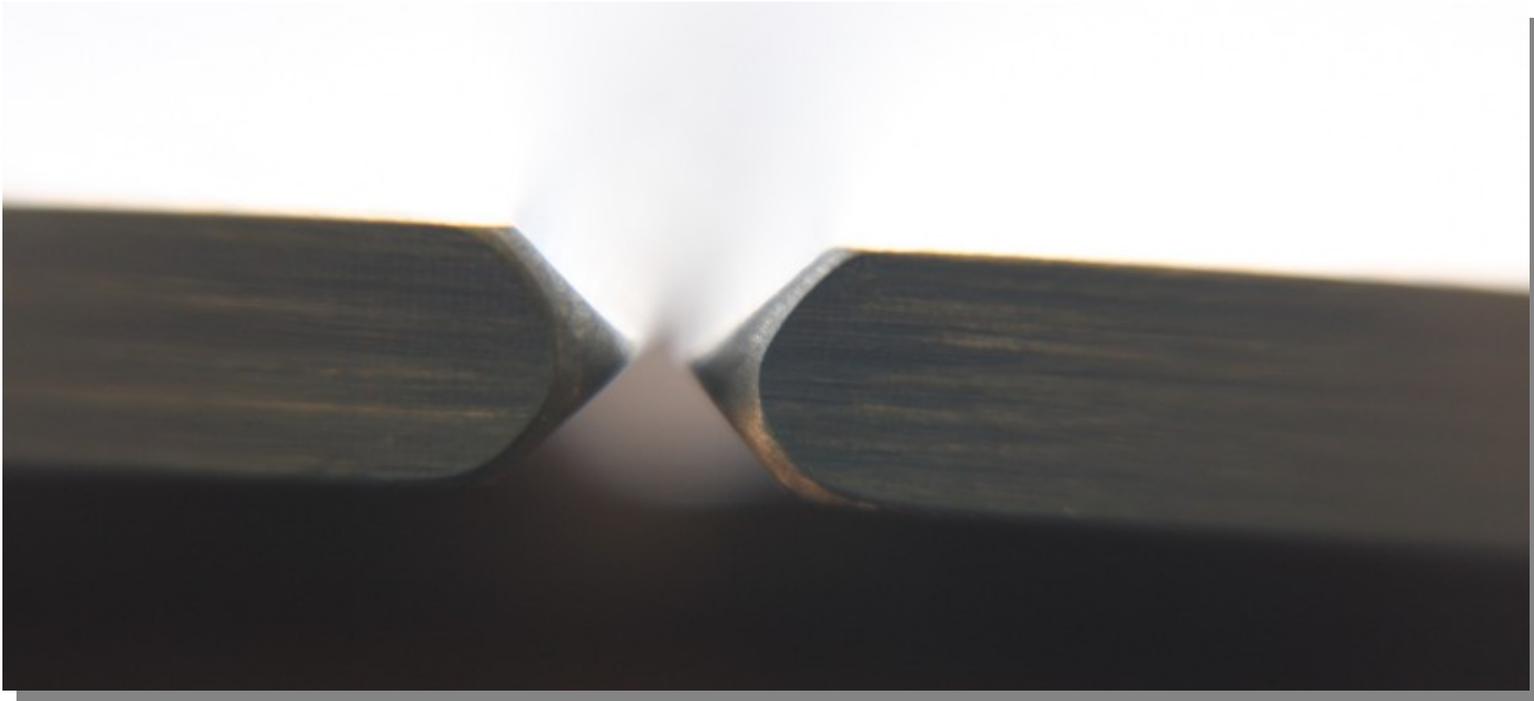
- Erster Testdurchlauf
 - Abstand der Funkenstrecke: ca. 2cm
 - Schneidenabstand: ca 2mm
 - Keine Entladungen sichtbar
 - Abstand der Funkenstrecke und Schneiden sukzessive verkleinert bis Entladungen stattfanden

Experiment 1 – „First Light“



Experiment 2 – Erste Ergebnisse

- Überschläge quasi nur an den Enden der Schneiden sichtbar
- Lösung: Abrundung der Ecken um den Gradienten des \vec{E} -Feldes zu verringern



Experiment 2 – Erste Ergebnisse



- Trotz abgerundeter Ecken nur inhomogene Funkenbildung (kaum Funken im mittleren Teil der Schneiden)
- Feststellung mit Messlupe: Schneiden sind nicht exakt planparallel, sondern leicht gekrümmt
 - Bearbeitung (Bohren, Abrunden der Ecken) und Verwendung des zweiten Paares Schneiden

Experiment 3 - Optikkammer



- Erster längerer Test
 - Ozonentwicklung nicht zu vernachlässigen
 - Helligkeit der Funken auf akzeptablen Niveau
- Justage der Funkenstrecke und des Abstandes der Schneiden (Ziel: homogene Funkenverteilung)
- Versuch der Fokussierung des gesuchten Laserimpulses durch Linsen
 - Verwendung von weißem Papier (Fluoreszenzpunkt)
 - kein optisch erkennbarer Punkt

Experiment 4 – Erste Probleme



- Probleme mit der Justage
 - Thermische Ausdehnung des Aluminiums
 - Transport des Aufbaus beeinflusst die mechanischen Komponenten
- Kein Laserpunkt sichtbar
 - Wird kein Laserübergang angeregt?
 - Ist die Intensität des Übergangs zu schwach?
 - Reicht Papier als Fluoreszenzmaterial für den Nachweis aus?

Aufbau 8 – modifiziertes Dielektrikum



- Verwendung eines neuen Dielektrikums
 - „Hostaphan“-Folie (Durchschlagsfestigkeit: ca 30kV / Lage)
 - eventuell bessere Materialeigenschaften

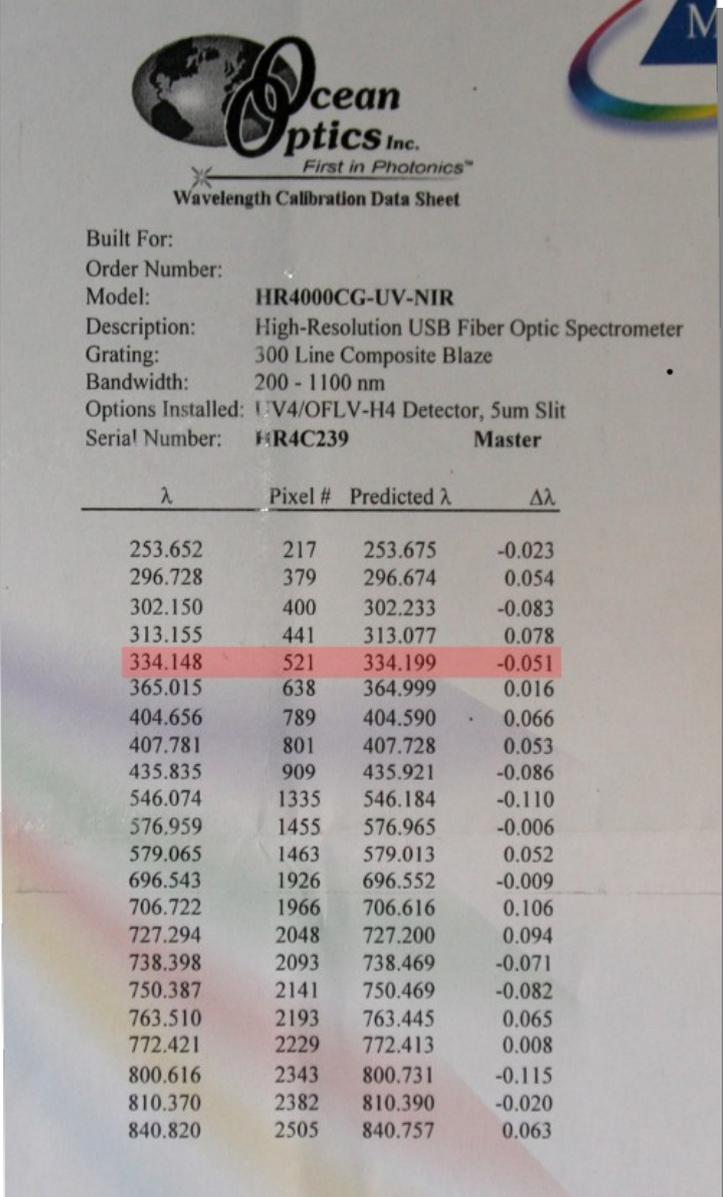
Experiment 5 – Spektrometer

- Versuch des Nachweises des Laserübergangs durch ein Spektrometer
 - OceanOptics HR4000CG-UV-NIR



Experiment 5 – Spektrometer

- Zulässiger Wellenlängenbereich
→ 200 – 1100nm
- Ansprechwahrscheinlichkeit im zu betrachtenden Wellenlängenbereich ist > 98%



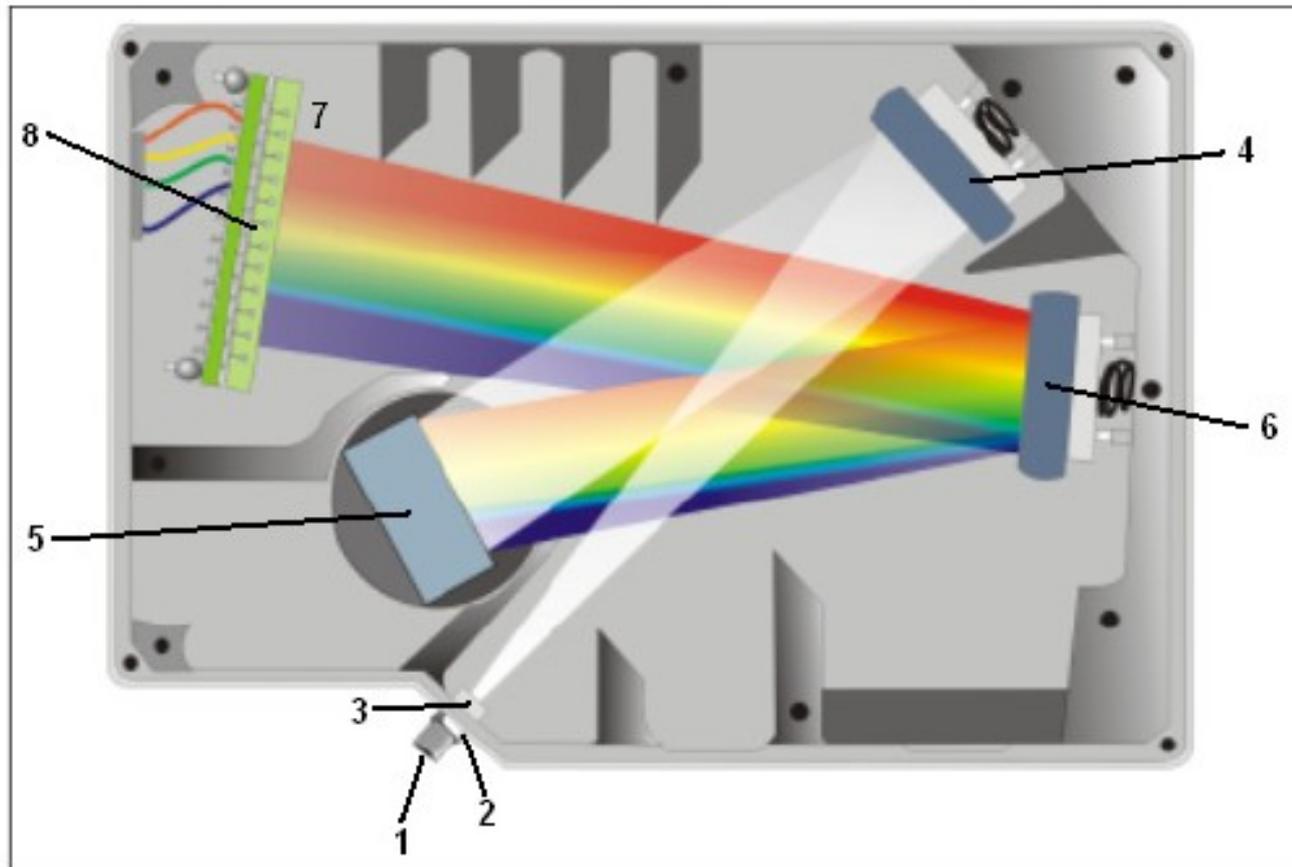
Ocean Optics Inc.
First in Photonics™
Wavelength Calibration Data Sheet

Built For:
Order Number:
Model: HR4000CG-UV-NIR
Description: High-Resolution USB Fiber Optic Spectrometer
Grating: 300 Line Composite Blaze
Bandwidth: 200 - 1100 nm
Options Installed: UV4/OFLV-H4 Detector, 5um Slit
Serial Number: #R4C239 Master

λ	Pixel #	Predicted λ	$\Delta\lambda$
253.652	217	253.675	-0.023
296.728	379	296.674	0.054
302.150	400	302.233	-0.083
313.155	441	313.077	0.078
334.148	521	334.199	-0.051
365.015	638	364.999	0.016
404.656	789	404.590	0.066
407.781	801	407.728	0.053
435.835	909	435.921	-0.086
546.074	1335	546.184	-0.110
576.959	1455	576.965	-0.006
579.065	1463	579.013	0.052
696.543	1926	696.552	-0.009
706.722	1966	706.616	0.106
727.294	2048	727.200	0.094
738.398	2093	738.469	-0.071
750.387	2141	750.469	-0.082
763.510	2193	763.445	0.065
772.421	2229	772.413	0.008
800.616	2343	800.731	-0.115
810.370	2382	810.390	-0.020
840.820	2505	840.757	0.063

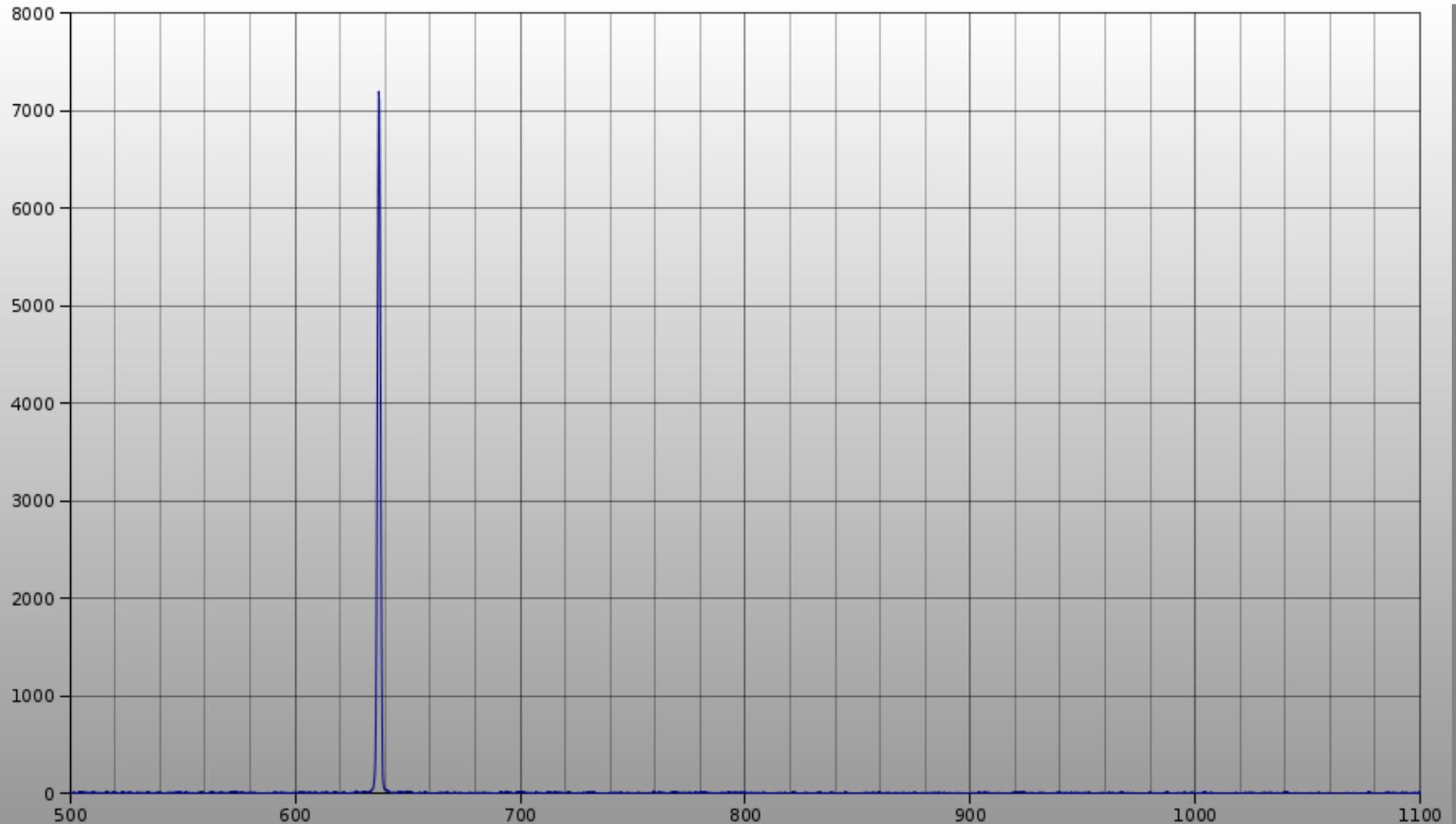
Aufbau 9 – Spektrometer

- 3648 Pixel (1 Pixel = 8x200nm) / SNR 300 : 1
- Spalt → Filter → Sammelspiegel → Gitter →
Fokusspiegel → Sammellinse → CCD



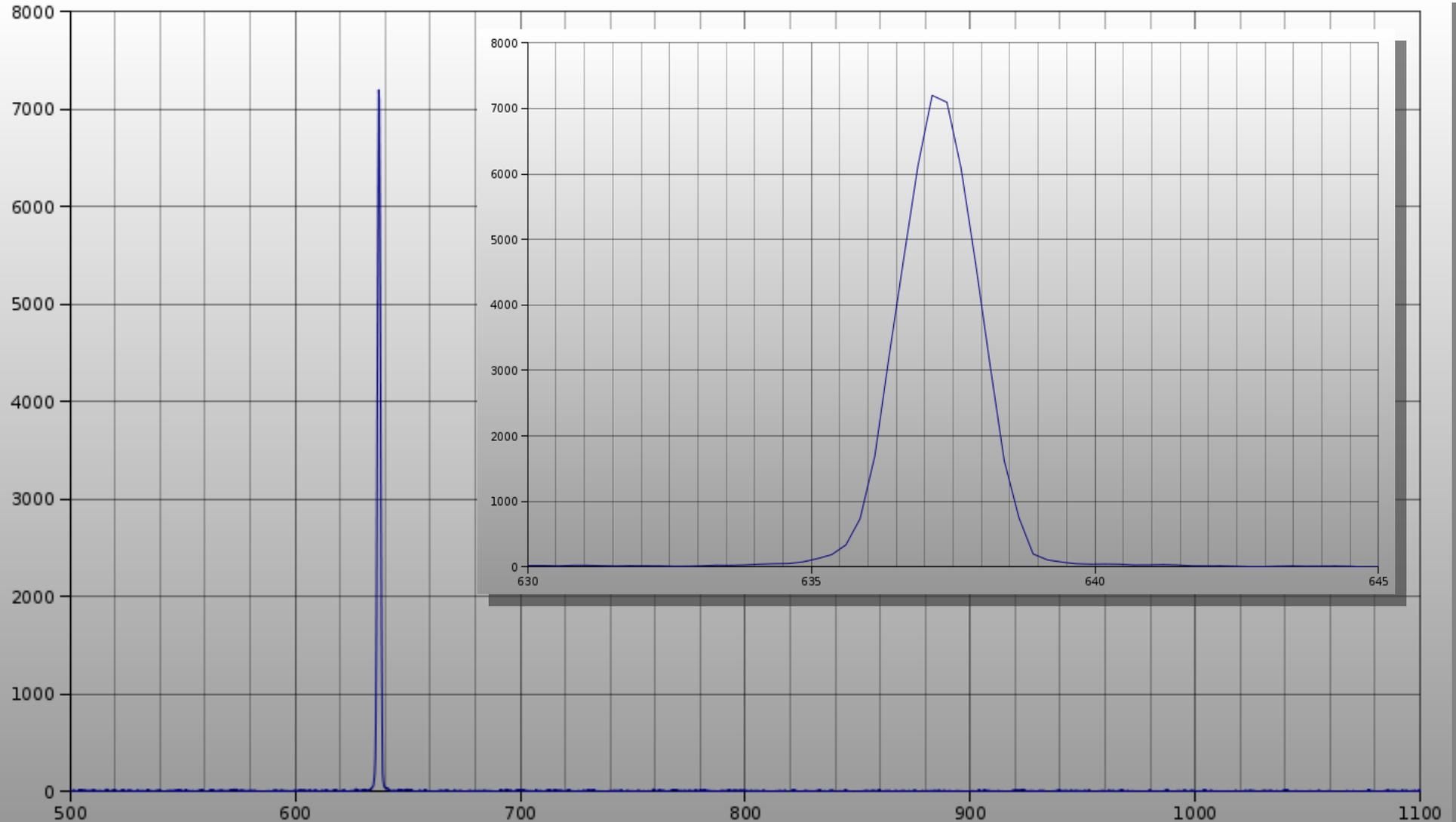
Experiment 6 – Referenzspektren

- Roter Laserpointer theoretisch 637,58nm



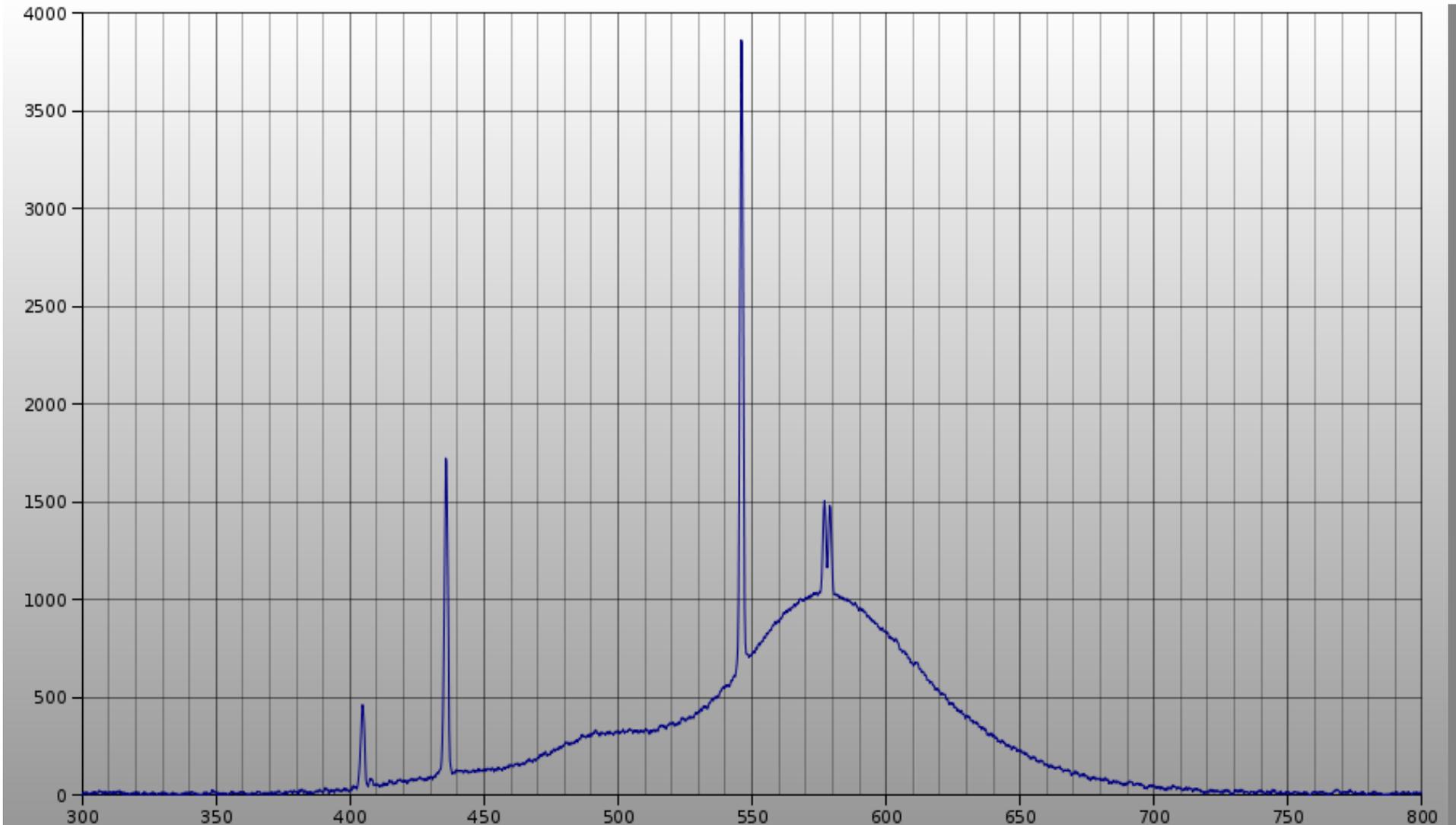
Experiment 6 – Referenzspektren

- Roter Laserpointer theoretisch 637,58nm → 637,14nm



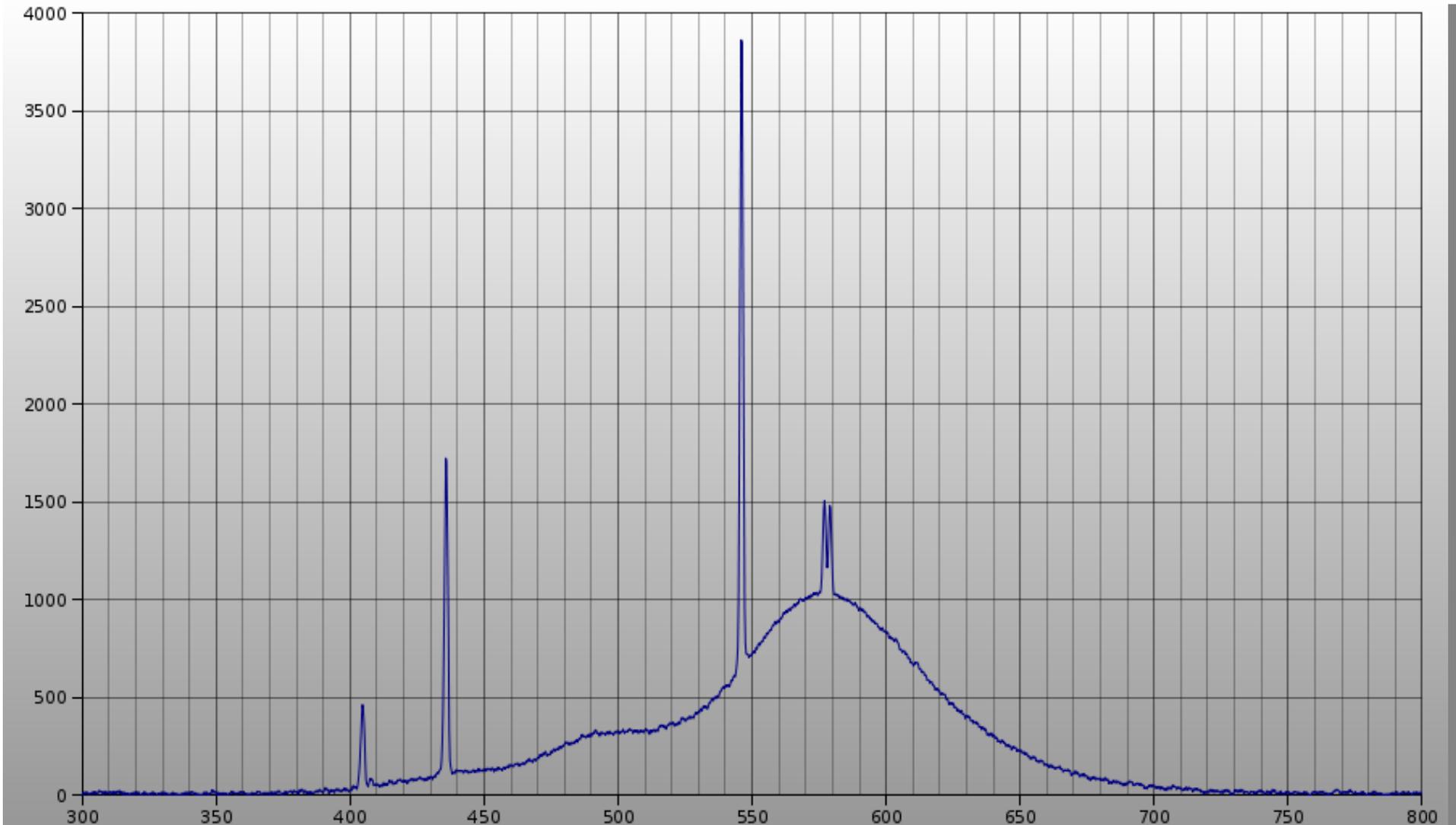
Experiment 6 – Referenzspektren

- Leuchtstoffröhre



Experiment 6 – Referenzspektren

- Leuchtstoffröhre

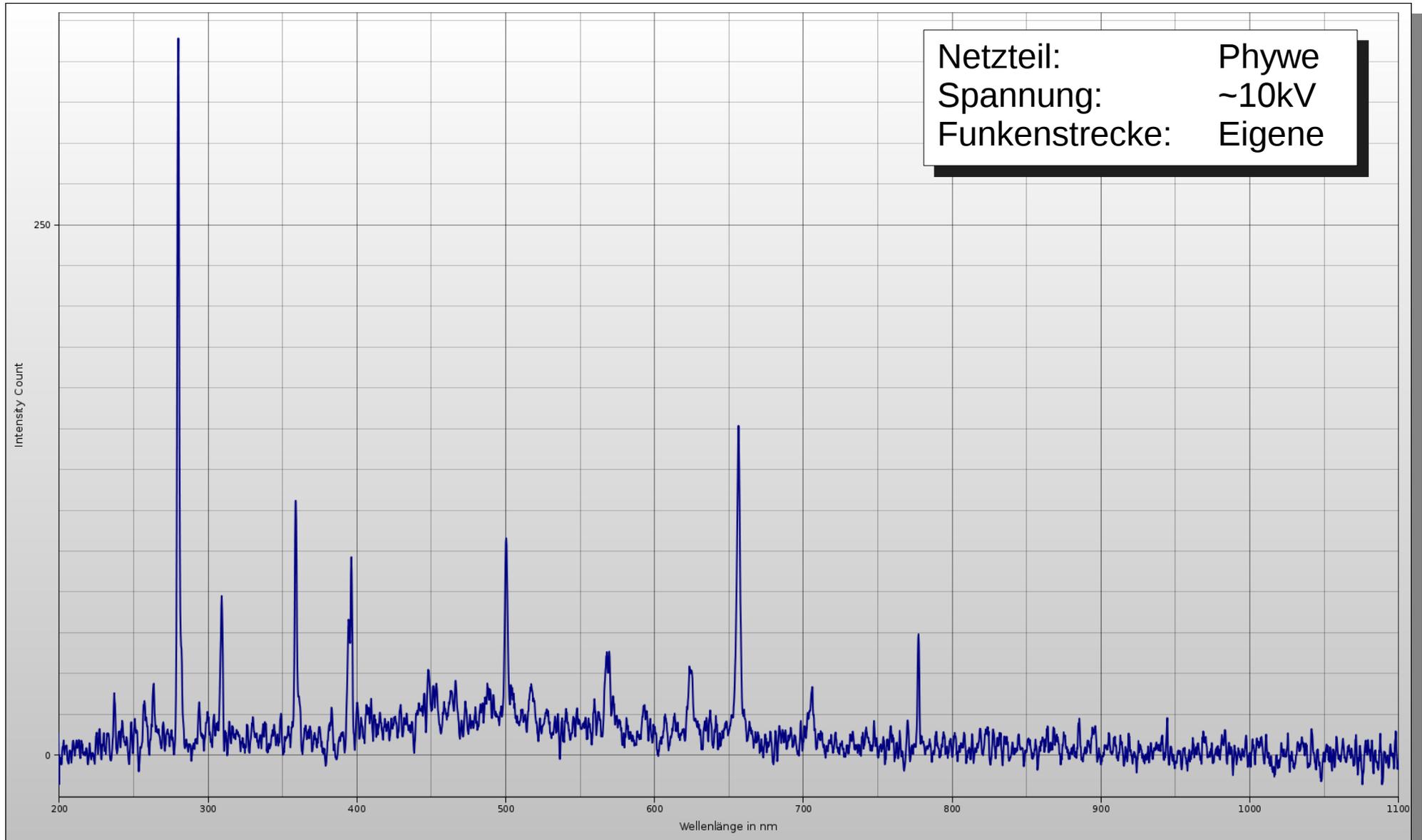


Experiment 7 – Spektrum des N₂ - Lasers

- Aufbau der Linse vor dem Laser



Experiment 7 – Spektrum des N₂ - Lasers



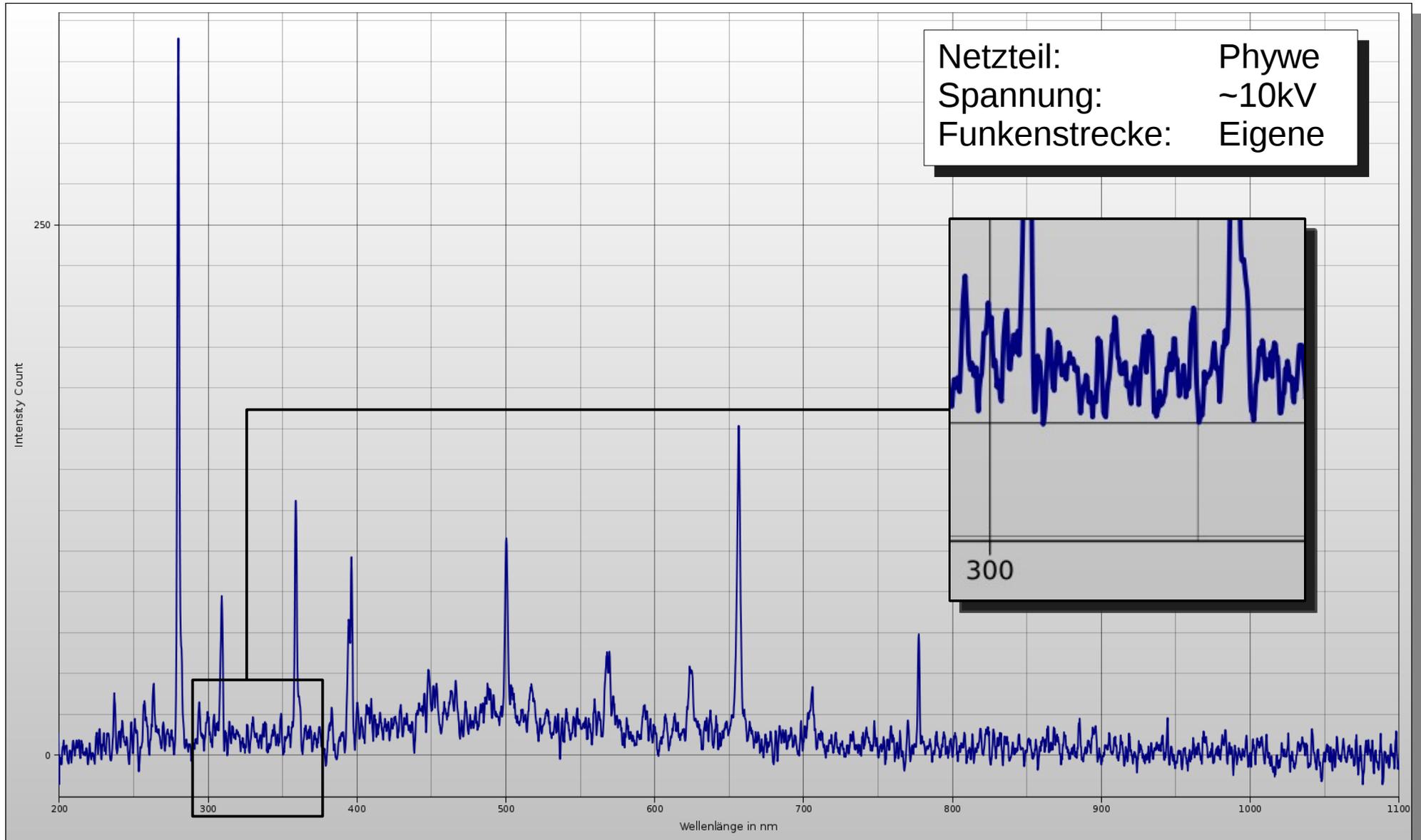
Experiment 7 – Spektrum des N₂ - Lasers



- Kein optischer Fluoreszenzpeak
- Kein Peak im Spektrum

- Vermutung: Die Angelegte Spannung war zu gering
→ Verwendung eines stärkeren Netzteils

Experiment 7 – Spektrum des N₂ - Lasers



Theorie 17 – Kondensatorenergie



- Schätzwert für die effektive Fläche des Kondensators:
 $A \approx 6,5 \text{ dm}^2$
- Dicke der Hostaphan-Folie: $d \approx 0,5 \text{ mm}$
- Permittivitätszahl der Folie: $\epsilon_r = 3,2$
- Für die Kondensatorkapazität gilt:

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d} = 3,68 \text{ nF}$$

- Multimeter-Messwert: $C \approx 4 \text{ nF}$

Aufbau 10 – Neues Netzteil



- Hörsaalnetzteil (25kV)
- „Kurzschlussstrom“ → Netzteil schaltet sich aus
 - Einbau eines Lastwiderstandes in den Ladekreis
- Dimensionierung:
 - Hochspannungsfest bis min. 25kV
 - Leistungsaufnahme ~200W (kurzzeitig)
 - $> 0,1\text{M } \Omega$

Experiment 8 – Neues Netzteil

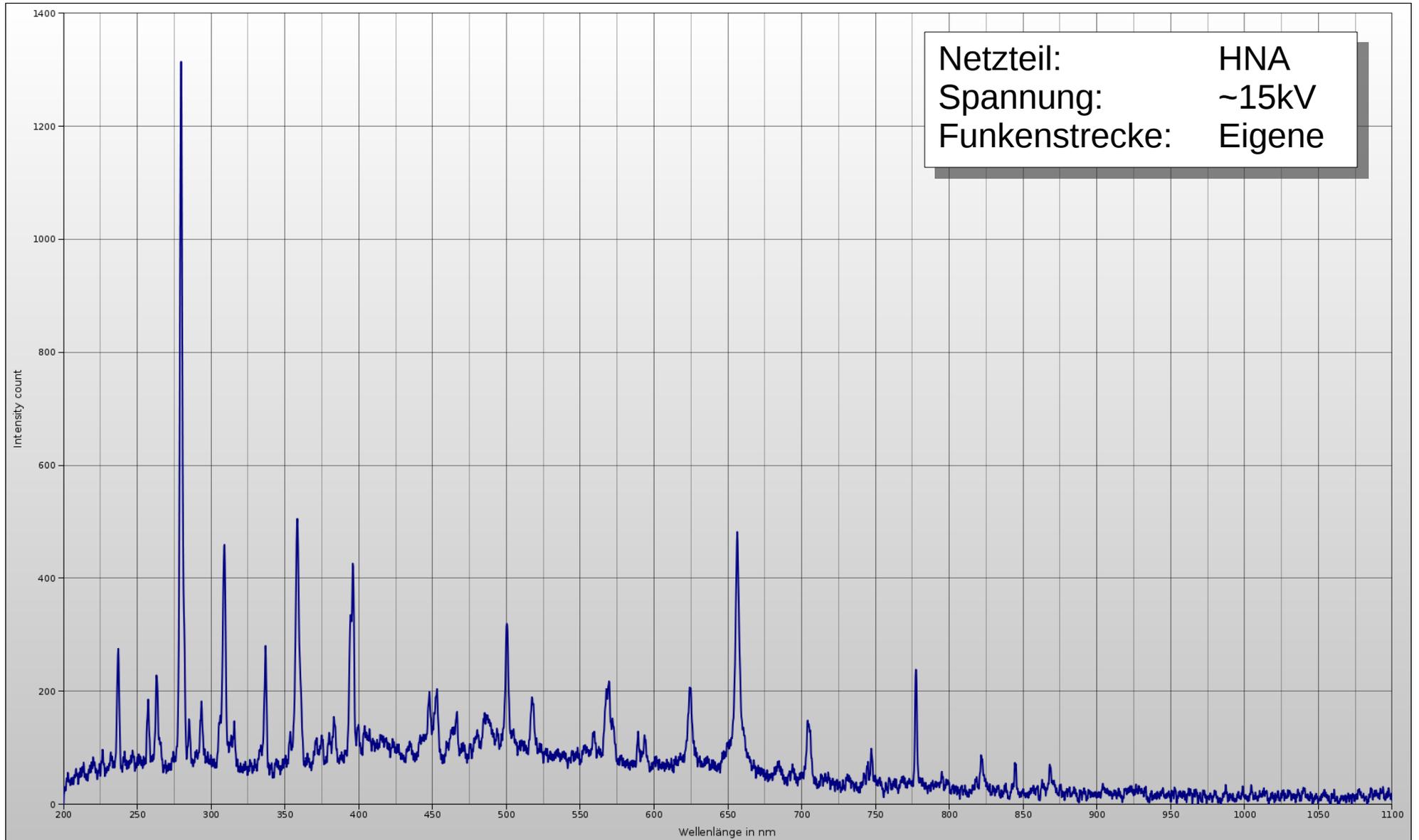


Experiment 9 – Spektrum des N₂ - Lasers

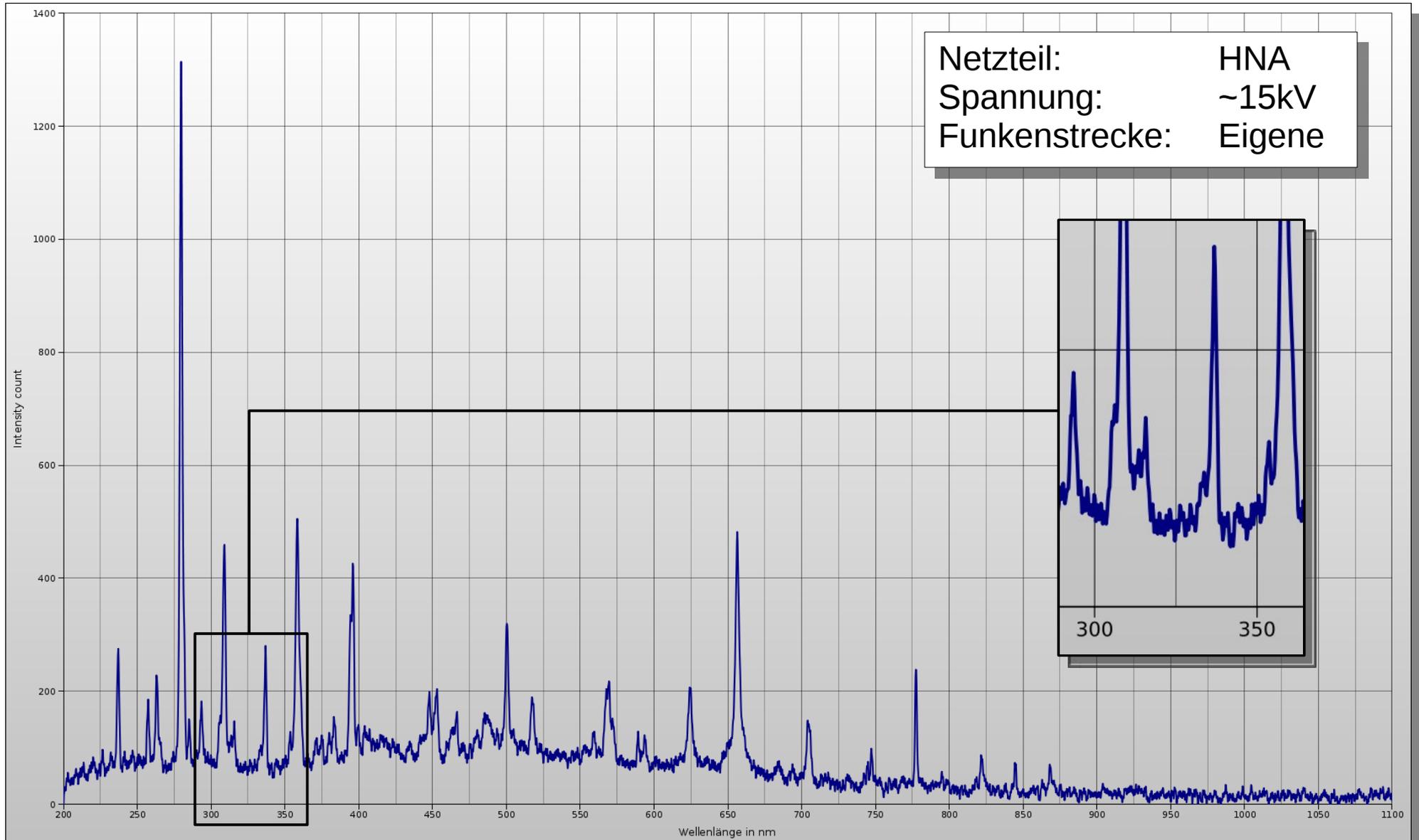


- Neue Linie bei 337nm
 - genug Energie zur Anregung des Laserübergangs
- Außerdem sehr starke Linie bei 280nm
 - Möglicherweise des Aluminiums

Experiment 9 – Spektrum des N₂ - Lasers



Experiment 9 – Spektrum des N₂ - Lasers

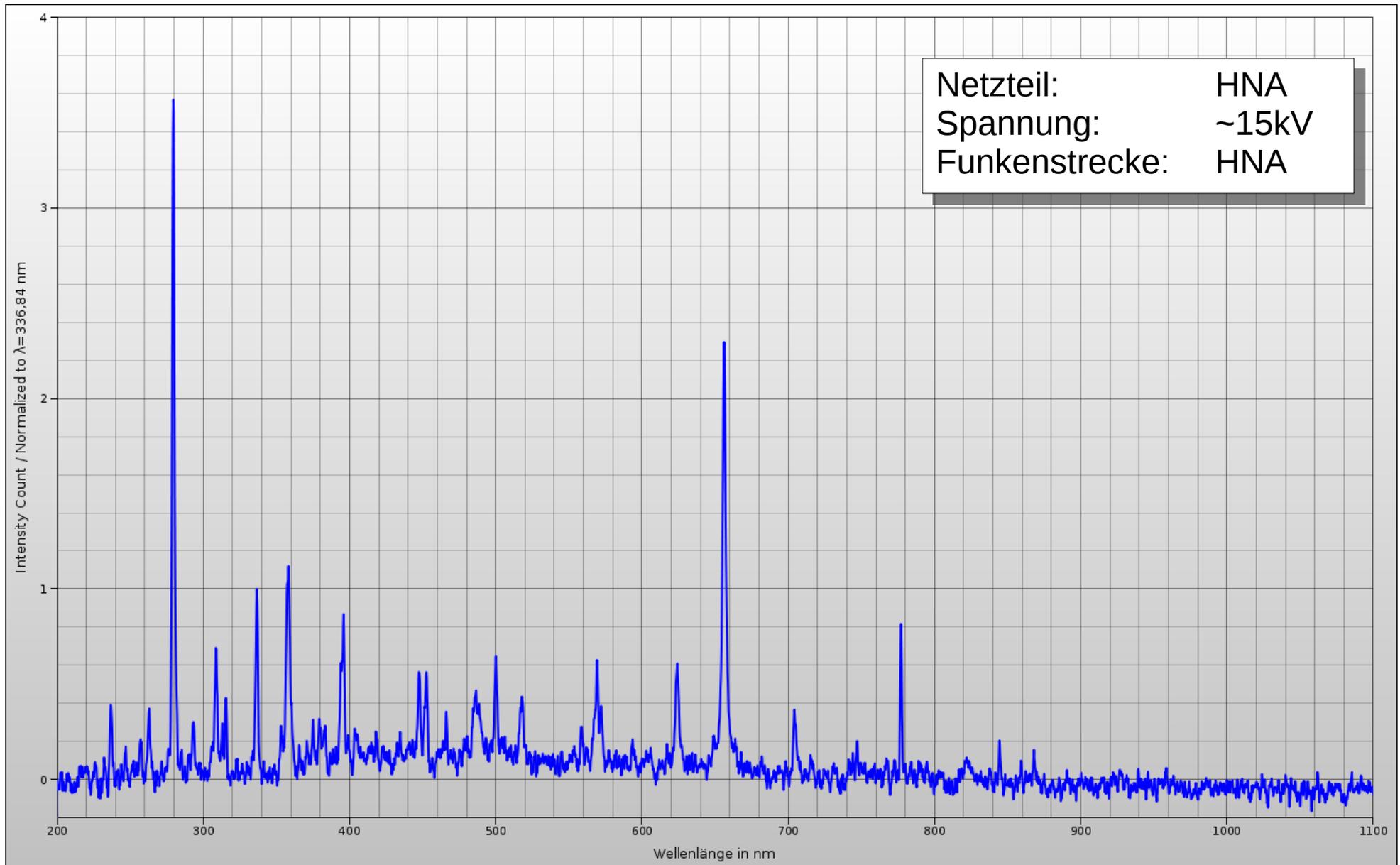


Experiment 9 – Spektrum des N₂ - Lasers

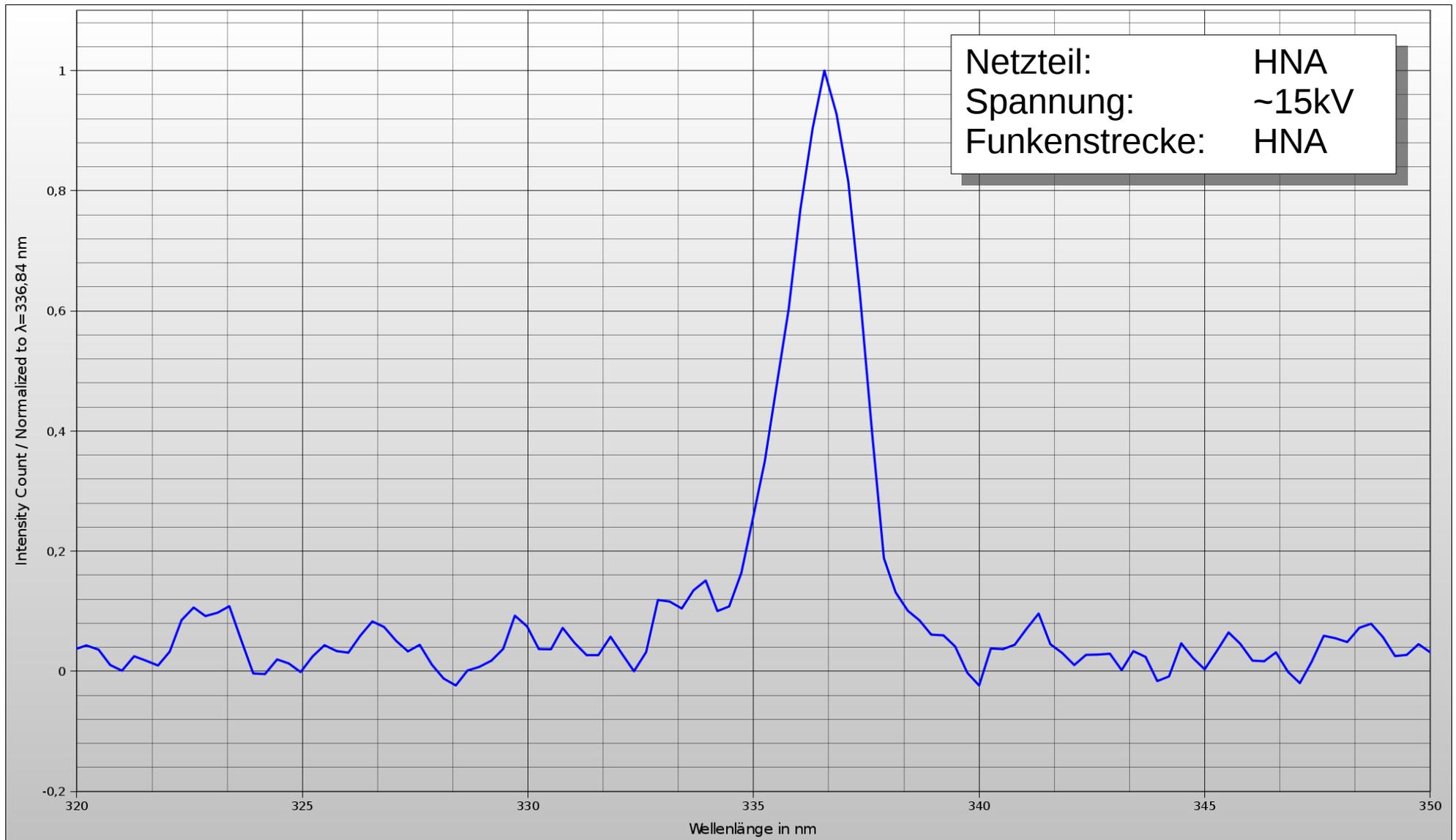
- Noch immer Probleme mit sehr geringer Intensität
 - neue Funkenstrecke
 - höhere Entladungsfrequenz



Experiment 10 – Finales Spektrum



Experiment 10 – Ausschnitt des Peaks



Experiment 11 - Fazit



- Der Laserübergang wurde nachgewiesen
- Das Ziel der Konstruktion eines molekularen TEA-Stickstofflasers wurde erreicht, auch wenn die gewünschte Intensität nicht erreicht wurde, sodass es eindeutig optisch durch Fluoreszenz gesehen werden kann