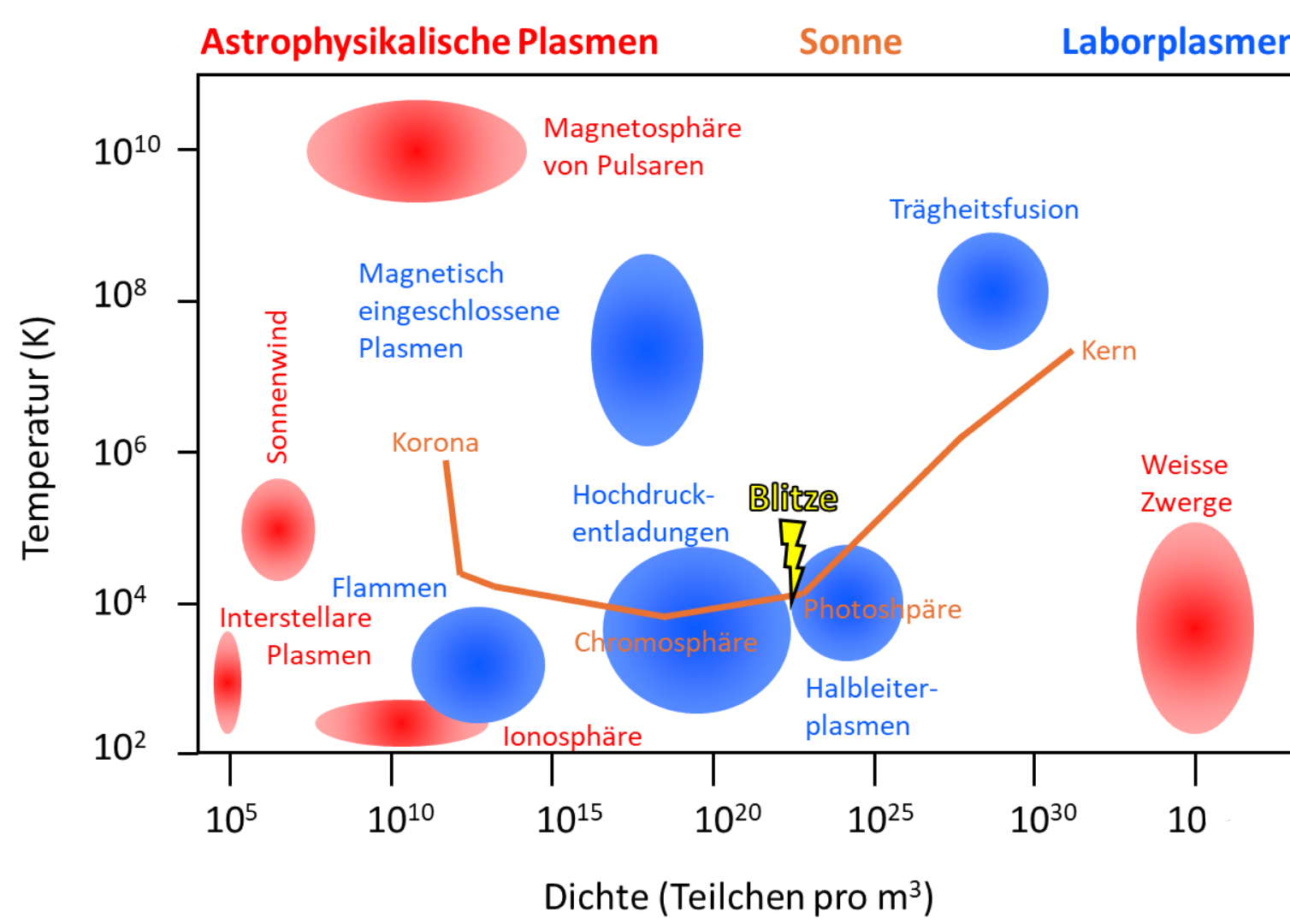


## Motivation



- **Begeisterung für Plasmen** seit Tag der offenen Tür am Max-Planck-Institut für Plasmaphysik (Okt. 2024)
- **99 %** der sichtbaren Materie im **Universum** ist **Plasma** (ionisiertes Gas)
- Interesse an Blitzen seit Besuch der **Experimenta Blitzshow** (Sommer 2025)
- **Fragestellung:**
  - Wie kann man **Blitze erzeugen**?
  - Wie kann man ihre **Temperatur messen**?

## Geplantes Vorgehen

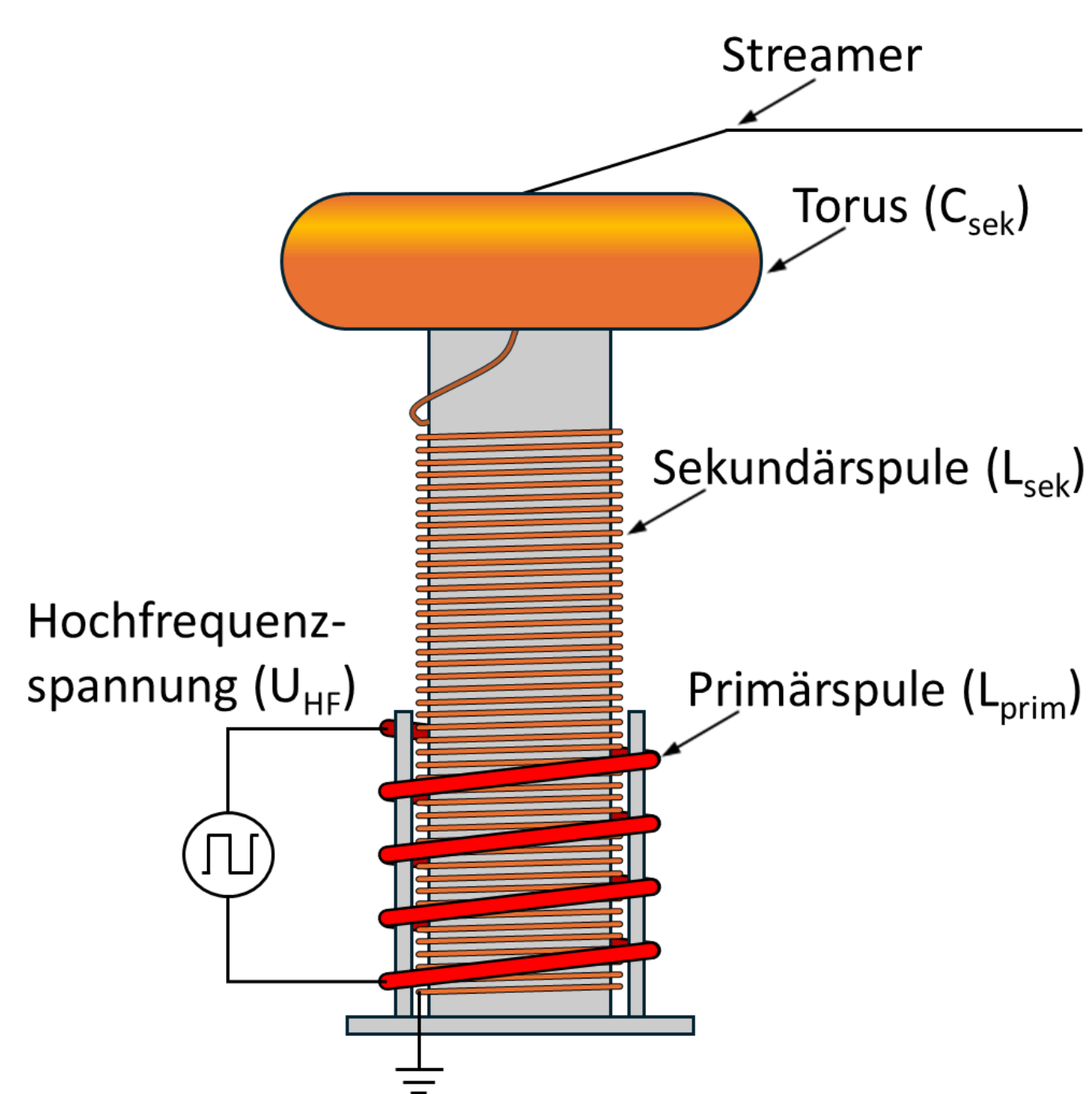


- Bau Blitz-generator**
- Spektroskopie**
- Ermittlung Temperatur**

- **Grundlage: Teslaspule**
- Professionell entwickelte Elektronik (um **Gefahr gering** zu halten)
- Steuerung über **Raspberry Pi und Touchscreen**
- Messung des **Spektrums** meiner Blitze mit einem Spektrometer
- **Identifizierung der Linien** im Spektrum
- **Bestimmung der Intensität** von **zwei Linien** derselben Teilchensorte
- Suche der **benötigten Parameter** (NIST Datenbank)
- **Berechnung der Temperatur**

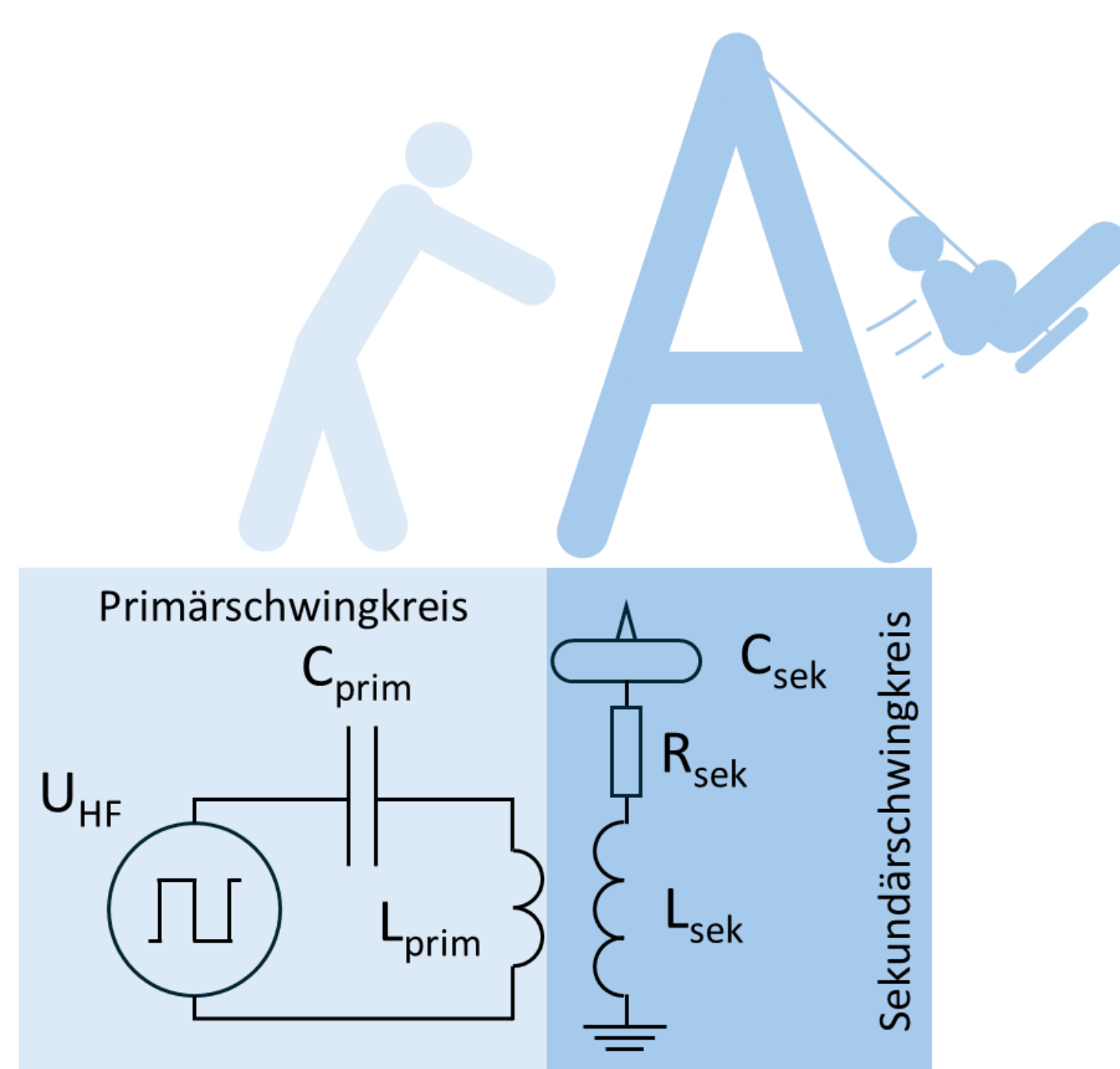
## Teslaspule

### Aufbau



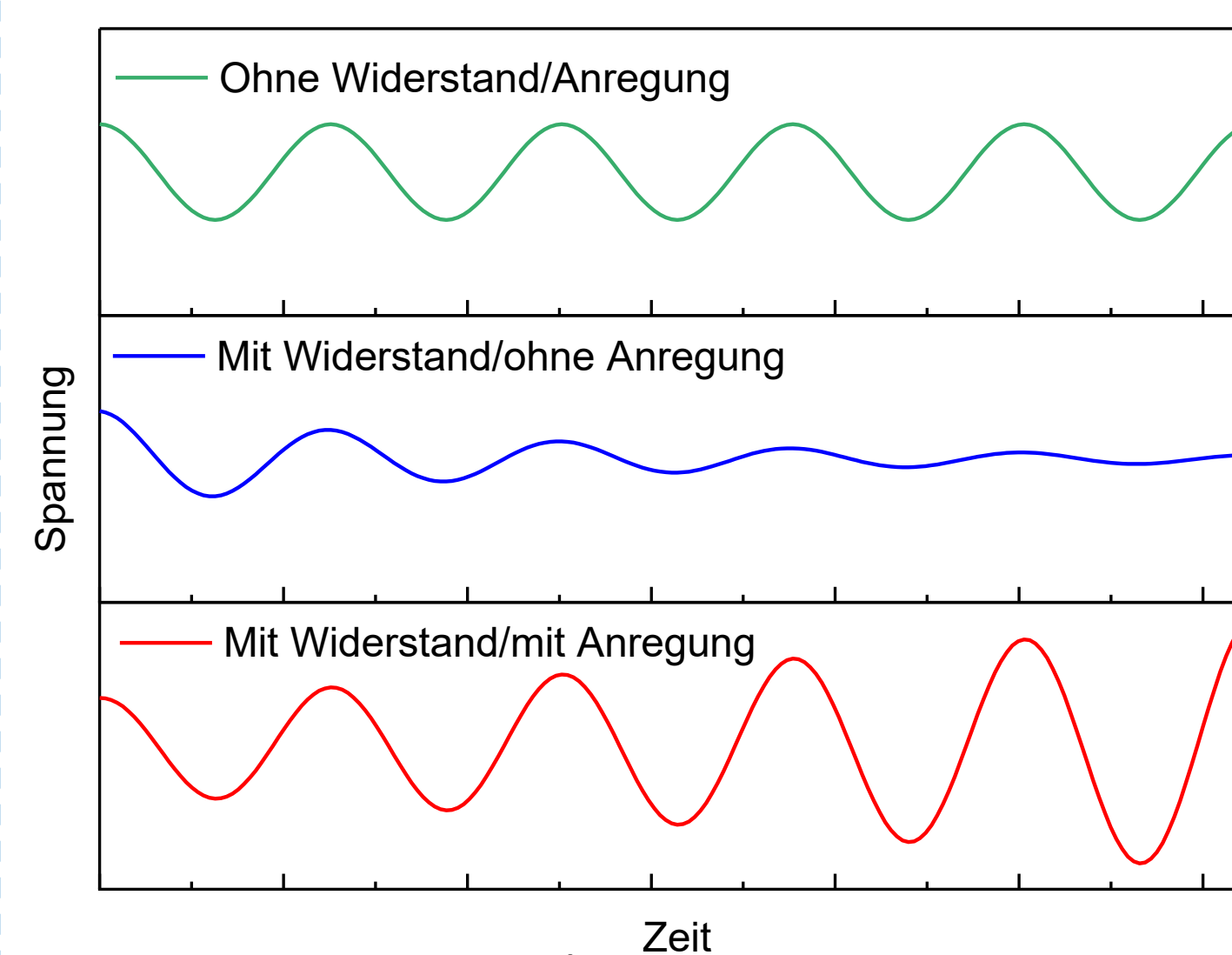
- Relativ **gefährlose Hochspannungsquelle**
- Wird häufig für **Schauexperimente** benutzt
- Hochspannung erzeugt am Streamer durch **Ionisation der Luftmoleküle Plasma**
- Plasma **strahlt Licht (Emissionslinien)** ab

### Funktionsweise



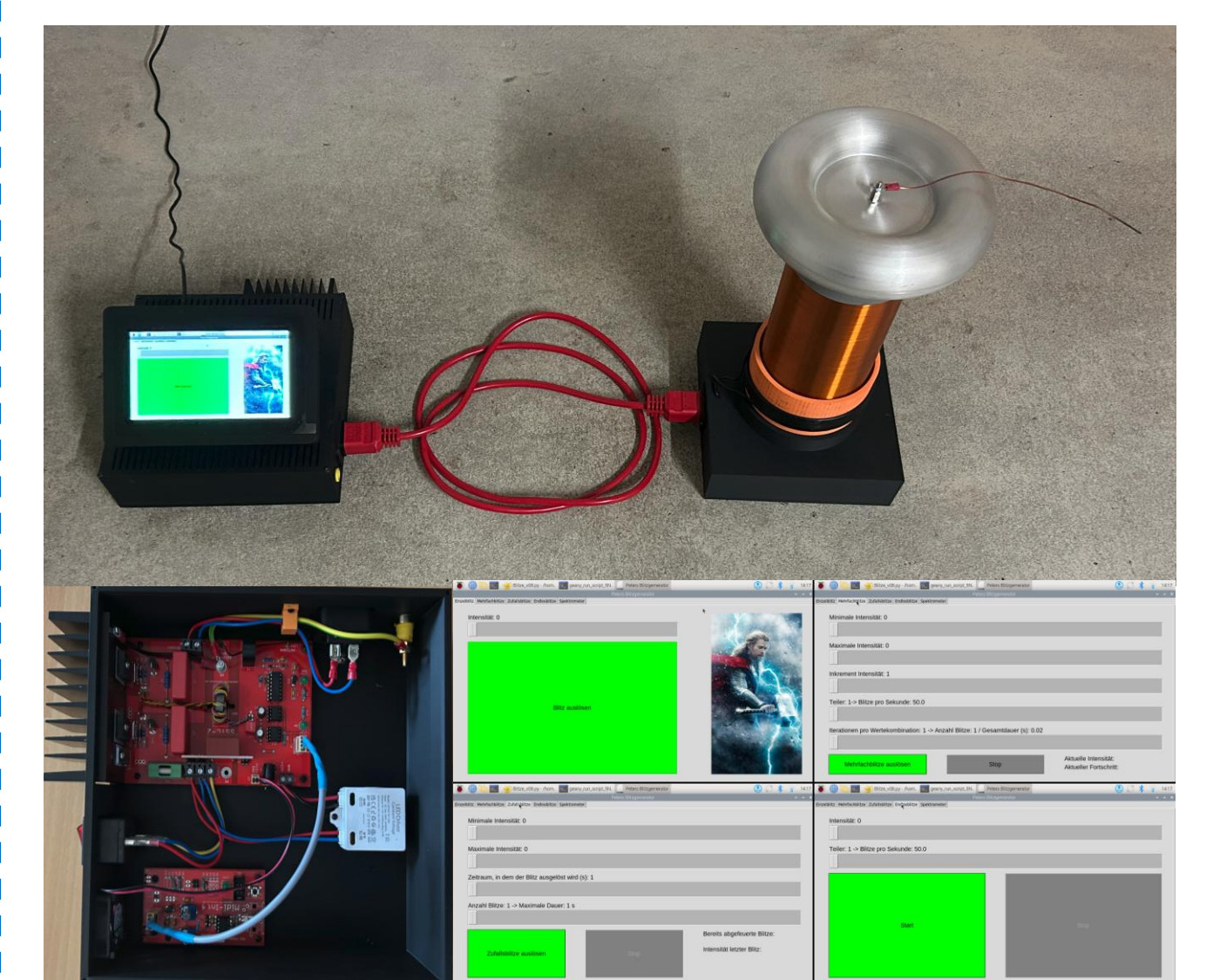
- **Zwei** sehr unterschiedliche **Schwingkreise gleicher Resonanzfrequenz** lose **magnetisch gekoppelt** (=> Transformator)
- **Hochspannung** an der Sekundärspule durch **Resonanzüberhöhung** (wenn Primär- und Sekundärkreis in Resonanz sind)

### Resonanzüberhöhung



- Ohne Widerstand / Anregung: **Sinusschwingungen** für Spannung
- Mit Widerstand wird die Schwingung aufgrund **Ohm'scher Verluste gedämpft**
- Eine genügend starke Anregung kann die Ohm'schen Verluste überkompensieren => **Spannung erhöht sich** von Schwingung zu Schwingung
- Überschreitet Spannung **Grenzwert** entsteht ein **Blitz**

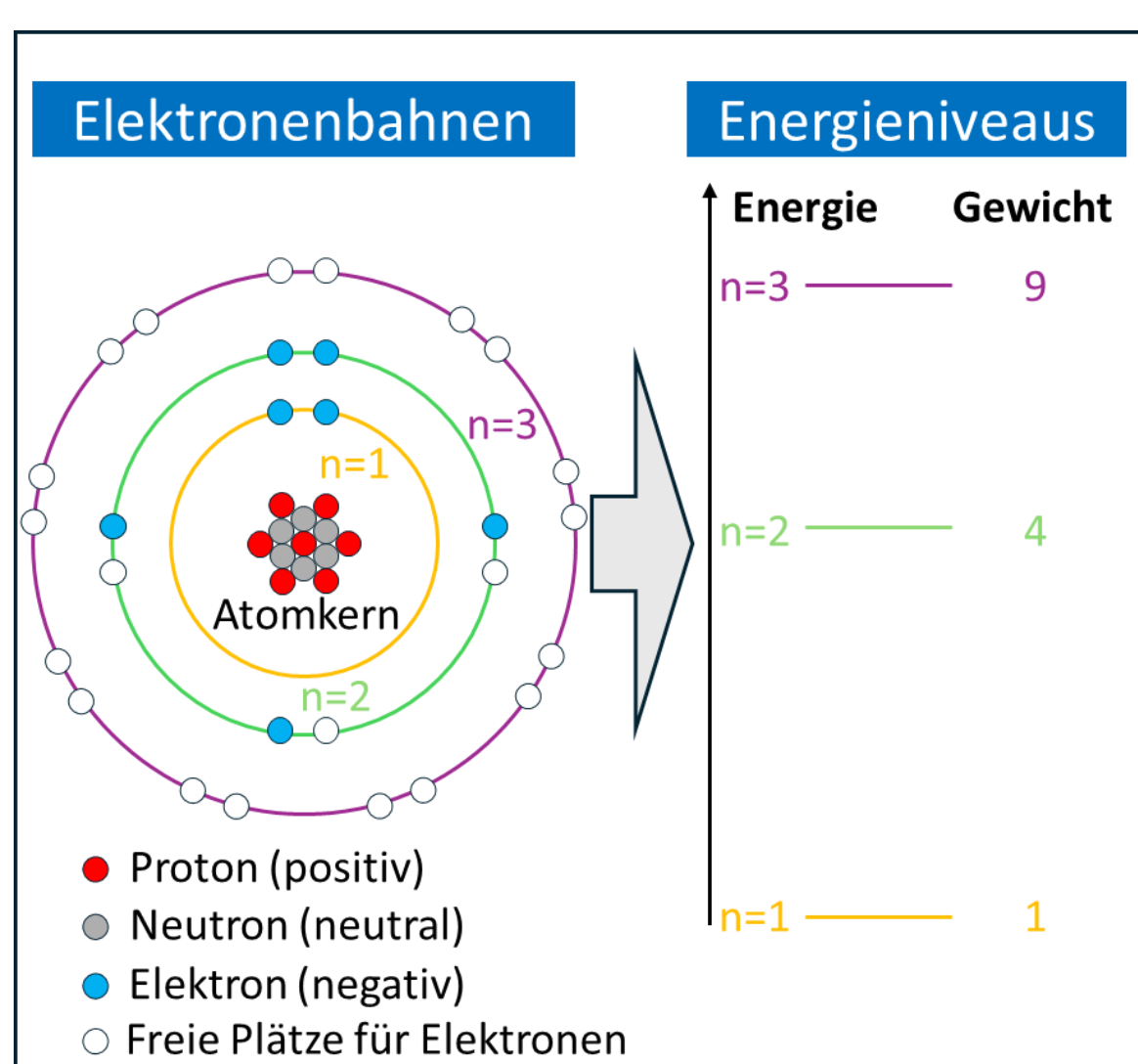
### Technische Umsetzung



- Gehäuse/Halterungen **3D gedruckt**
- Hr. Bohnen hat **Elektronik angepasst:**
  - **Raspberry Pi triggert Blitz** über UART
  - Senden eines **Werts** (0-255) erzeugt Blitz mit entsprechender **Intensität**
- **Touchscreen** für schnellen Aufbau und leichte Bedienung
- **Software** in **Python** geschrieben

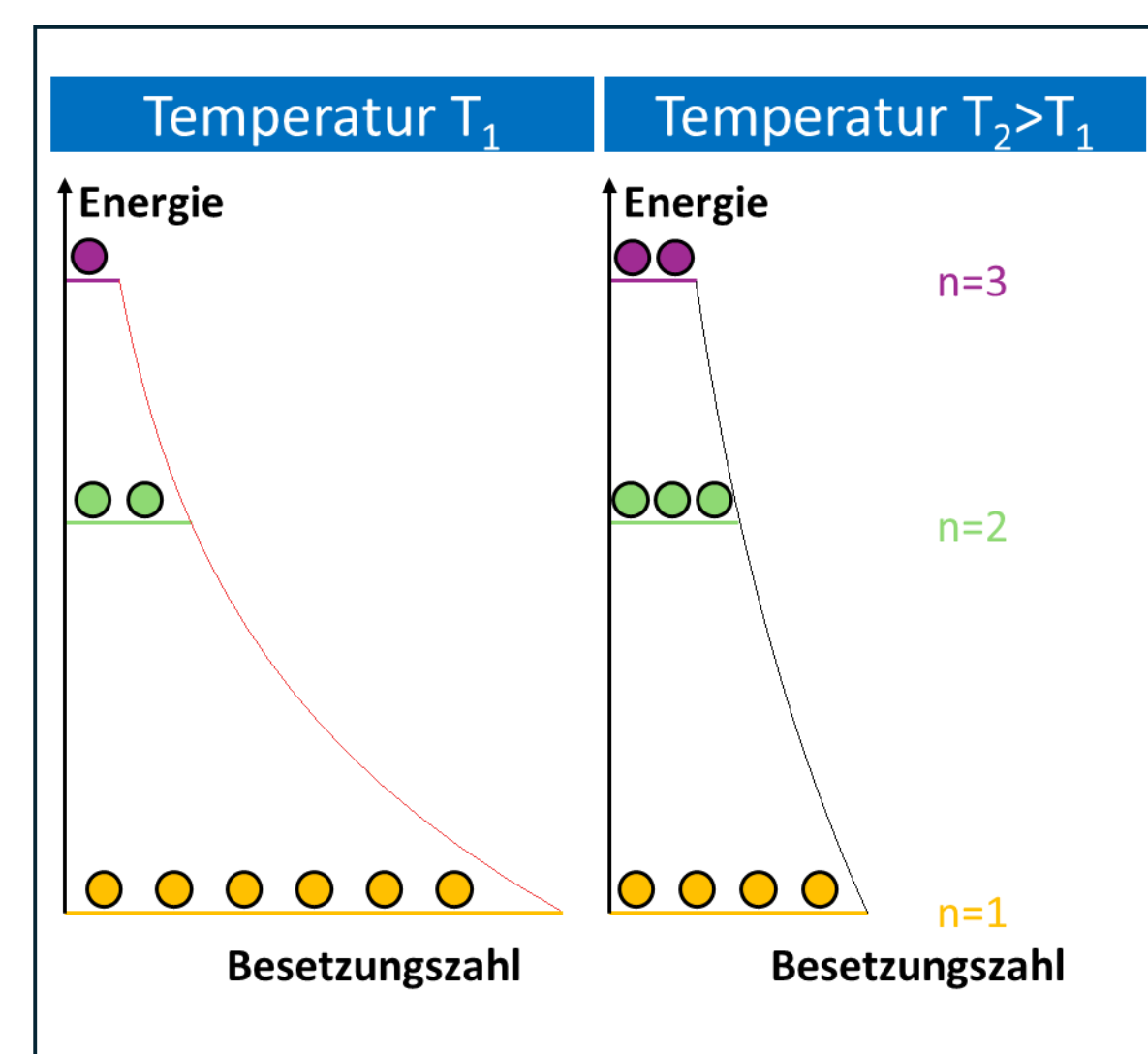
## Spektroskopie

### Atomaufbau



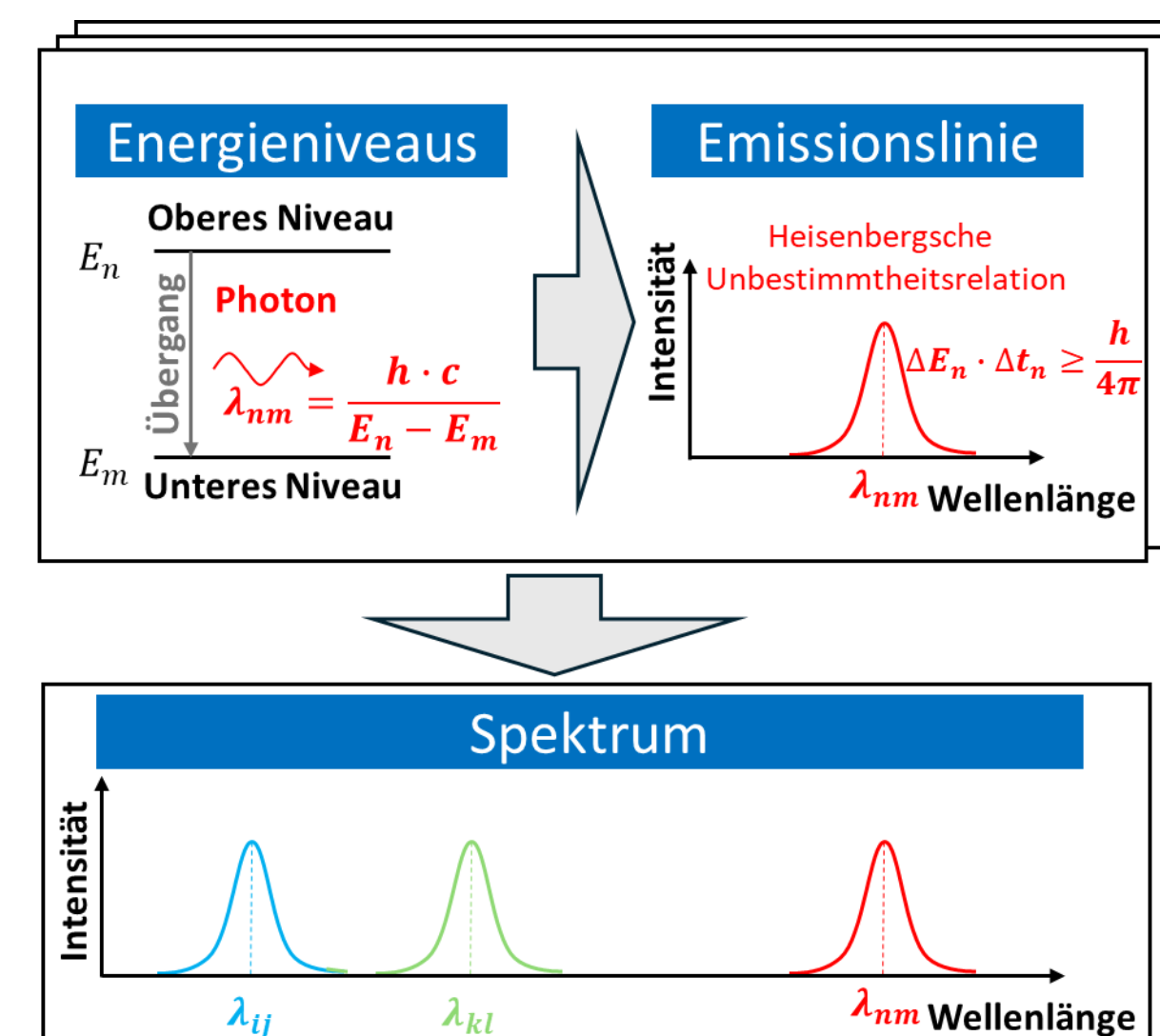
- **Atomkern** besteht aus positiv geladenen **Protonen** und ungeladenen **Neutronen**
- Negativ geladene Elektronen befinden sich in der (viel größeren) **Elektronenhülle**
- Bei neutralem Atom: **gleich viele Elektronen** in der Hülle wie **Protonen** im Kern
- **Elektronen** bewegen sich auf **Bahnen** um Kern (wie Planeten um Sonne – Kraft ist aber nicht Gravitation, sondern Coulomb-Kraft)
- Elektronen dürfen sich **nur auf bestimmten Bahnen** bewegen (wg. Quantenmechanik)
- Zu den erlaubten Bahnen gehören **bestimmte Energien** – daher können die Elektronen nur bestimmte Energien haben
- Für **jede Bahn** gibt es eine **maximale Anzahl** von **Elektronen**, die sich auf ihr bewegen dürfen (erste Bahn: 2, zweite Bahn: 8, dritte Bahn: 18) -> **statistische Gewichte**

### Besetzungszahlen<sup>1</sup>



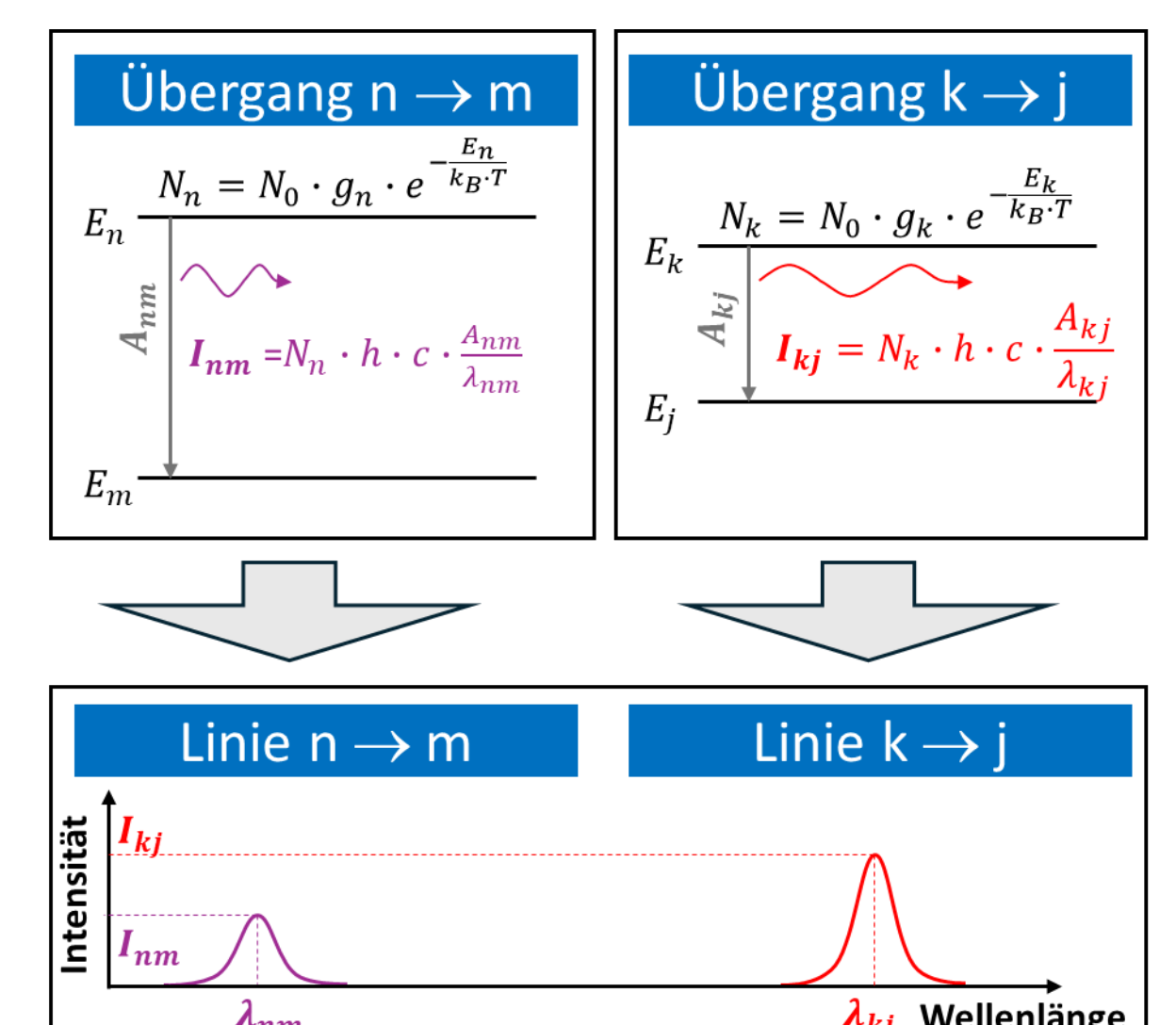
- **Temperatur** ist ein Maß für die **Energie** von **Teilchen** (Atomen, Molekülen und Ionen)
  - **Bewegungsenergie** der Atome
  - **Anregungsenergie** (der Elektronen)
- Im **thermischen Gleichgewicht** verteilen sich Energiewerte gemäß einer **temperaturabhängigen Häufigkeitsverteilung**:
  - Bei **höheren Temperaturen** befinden sich **mehr Teilchen** auf **höheren** und weniger auf niedrigeren Niveaus
  - Die Häufigkeitsverteilung wird **Boltzmann Statistik genannt**:
 
$$N_n = N_0 \cdot e^{-\frac{E_n}{k_B \cdot T}}$$
- Zusätzlich müssen **statistische Gewichte** der Energieniveaus berücksichtigt werden:
 
$$N_n = N_0 \cdot g_n \cdot e^{-\frac{E_n}{k_B \cdot T}}$$

### Spektrallinien<sup>2</sup>



- **Emissionslinie** entsteht, wenn **Elektron** von energiereicherer zu energieärmerer **Bahn „springt“ (Übergang)**
- **Übergänge** für Atome, Moleküle und Ionen
- **Energiedifferenz** zwischen oberem und unterem Niveau wird als **Photon** (Lichtteilchen) **emittiert** (ausgesendet)
- **Wellenlänge** des **Photons** hängt von **Energiedifferenz** der beteiligten Niveaus ab:
 
$$\lambda_{nm} = \frac{h \cdot c}{E_n - E_m}$$
- Emissionslinien sind wegen **Heisenbergscher Unbestimmtheitsrelation** „verschmiert“:
  - **Energie und Zeit** können nie gleichzeitig exakt gemessen werden
  - Aus **Lebensdauer des oberen Niveaus** folgt Energieunbestimmtheit und daraus **Wellenlängenunbestimmtheit**

### Temperaturbestimmung<sup>3</sup>



- **Intensitäten** von Spektrallinien hängen von **Besetzungszahlen** der oberen Niveaus ab:
 
$$I_{nm} = N_n \cdot h \cdot c \cdot \frac{A_{nm}}{\lambda_{nm}}$$
- **Besetzungszahlen** sind **abhängig** von **Temperatur** (Boltzmann Statistik):
 
$$N_n = N_0 \cdot g_n \cdot e^{-\frac{E_n}{k_B \cdot T}}$$
- **N<sub>0</sub> unbekannt** => Temperatur nicht aus einer Linie bestimmbar
- **Temperatur** kann über Intensitäten von **zwei Spektrallinien** bestimmt werden
 
$$T = \frac{1}{k_B \ln \left( \frac{I_{nm}}{I_{kj}} \right) - \ln \left( \frac{A_{nm} \cdot g_n \cdot \lambda_{kj}}{A_{kj} \cdot g_k \cdot \lambda_{nm}} \right)}$$
- Für **Parameter** gibt es **NIST Datenbank**
- Voraussetzungen:
  - **gleiche Teilchensorte**
  - **unterschiedliche obere Niveaus**

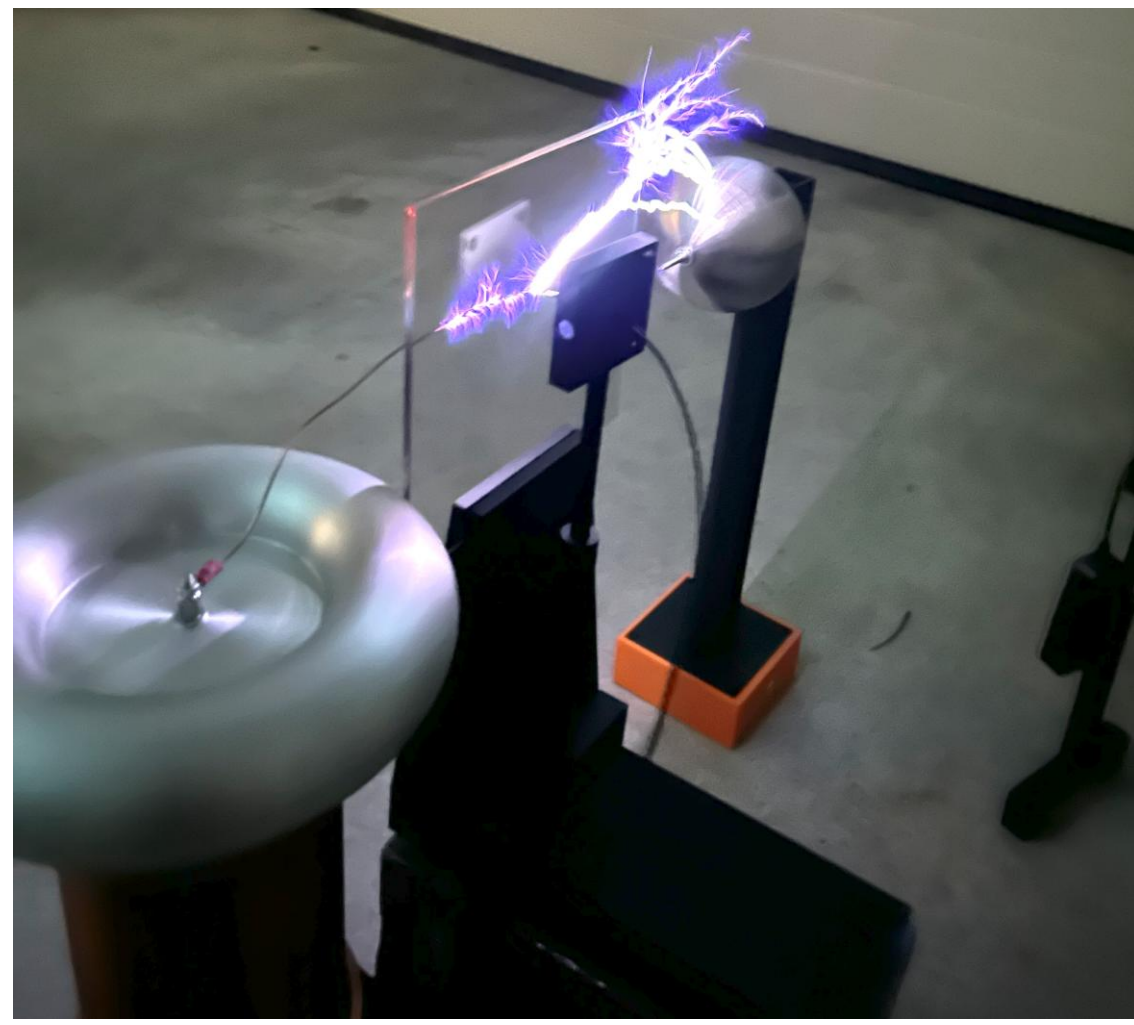
<sup>1</sup> N<sub>n</sub>: Besetzungszahl des oberen Niveaus, N<sub>0</sub>: Anzahl der Teilchen im Grundzustand, E<sub>n</sub> Energie des oberen Niveaus, k<sub>B</sub>: Boltzmannkonstante, T: Temperatur

<sup>2</sup> λ<sub>nm</sub>: Wellenlänge, c: Lichtgeschwindigkeit, h: Planck'sches Wirkungsquantum, E<sub>n</sub>: Energie des oberen Niveaus, E<sub>m</sub>: Energie des unteren Niveaus

<sup>3</sup> N<sub>n</sub> und N<sub>k</sub>: Besetzungszahlen der oberen Niveaus, N<sub>0</sub>: Anzahl der Teilchen im Grundzustand, g<sub>n</sub> und g<sub>k</sub>: Statistische Gewichte der oberen Niveaus, E<sub>n</sub> und E<sub>k</sub>: Energien der oberen Niveaus, k<sub>B</sub>: Boltzmannkonstante, I<sub>nm</sub> und I<sub>kj</sub>: Intensitäten der Spektrallinien, A<sub>nm</sub> und A<sub>kj</sub>: Einsteinkoeffizienten (Übergangswahrscheinlichkeiten), λ<sub>nm</sub> und λ<sub>kj</sub>: Wellenlängen der Spektrallinien, T: Temperatur

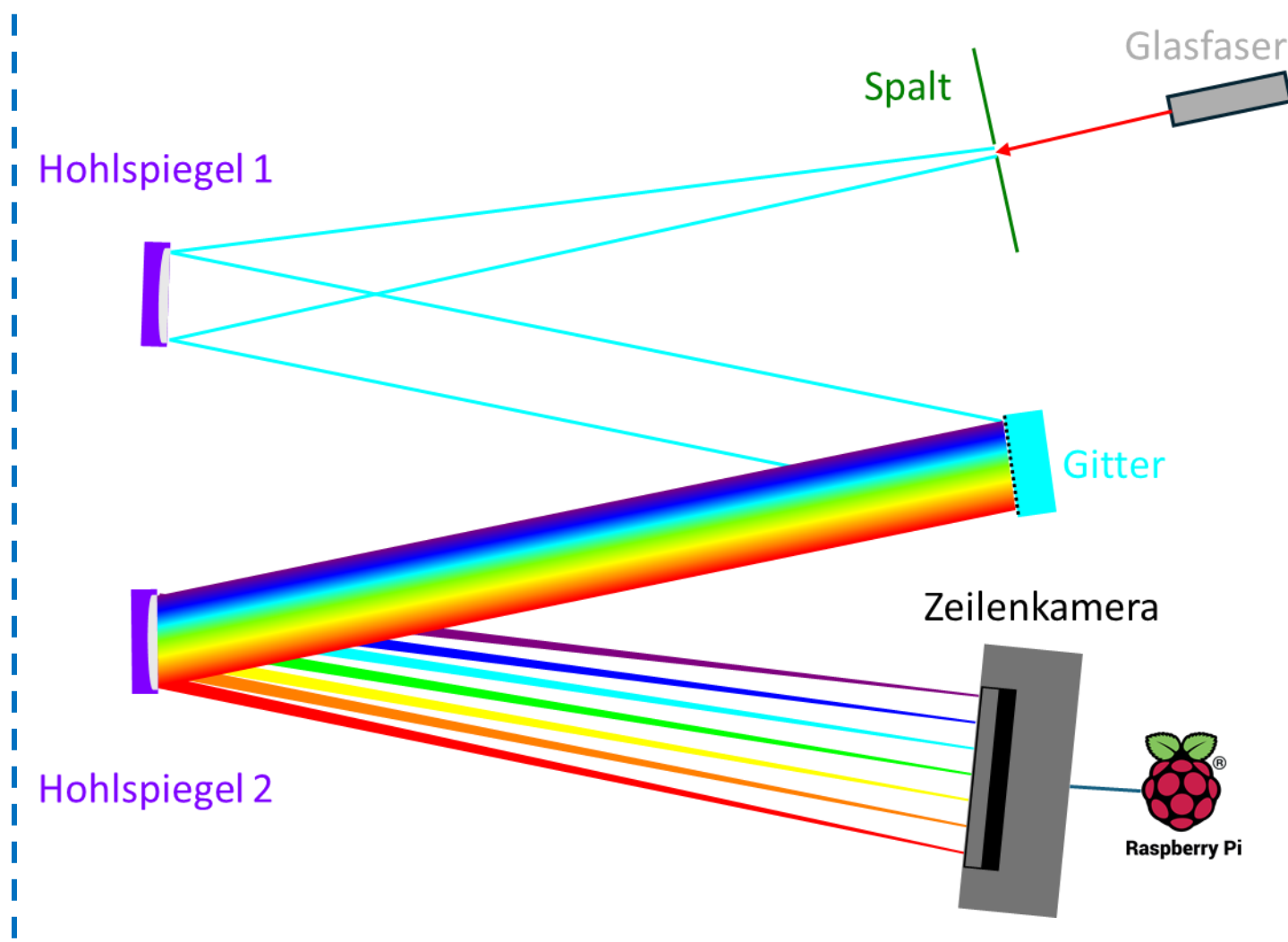
## Experimente

### Herausforderungen



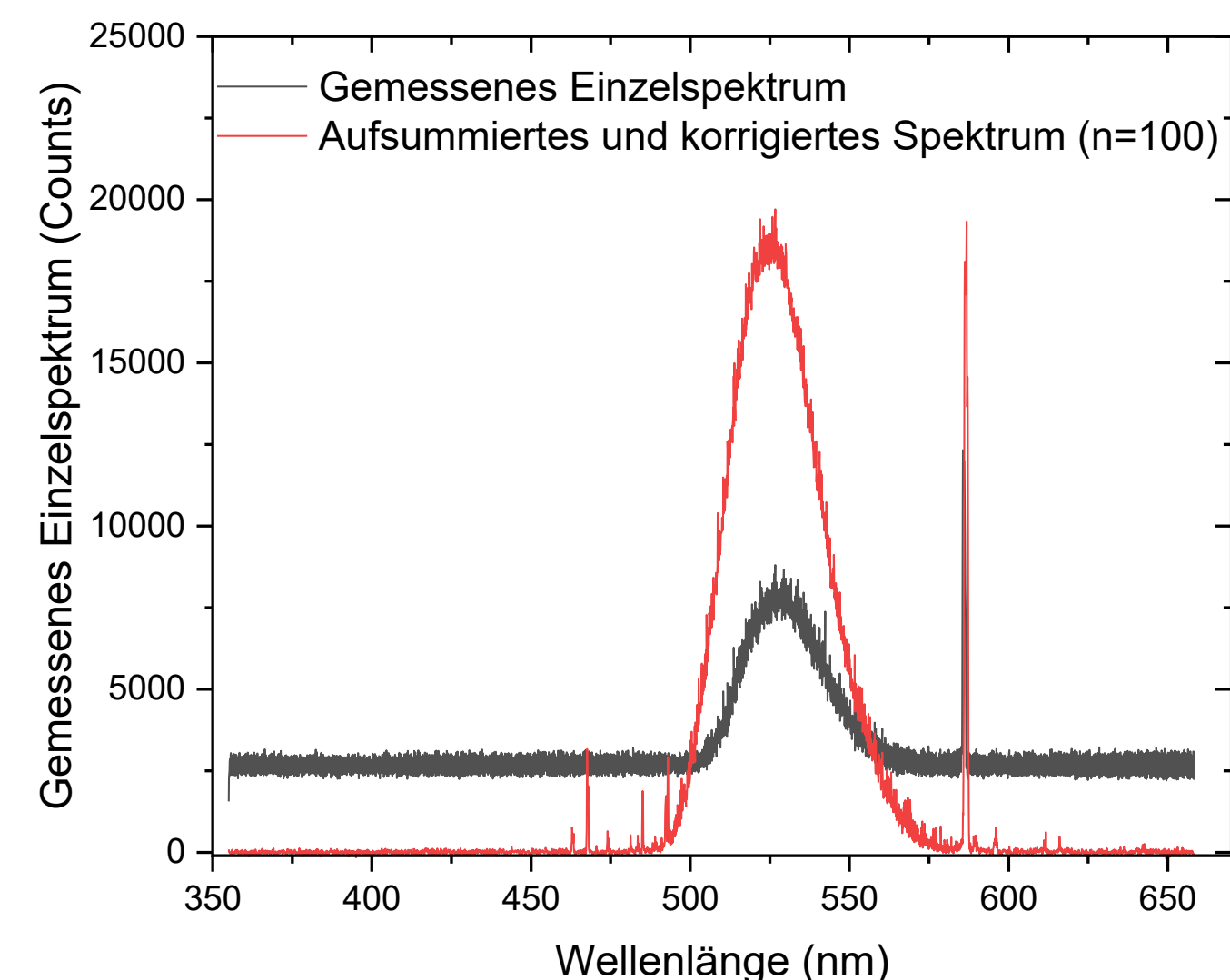
- Entstehung von **Ozon** -> Versuche im Freien oder in geöffneter Garage
- Geringe **Empfindlichkeit Spektrometer**
  - Glasfaser nahe an Blitzen -> Einschlag -> **Zerstörung**
  - Glasscheibe** (hitzebeständig) zum Schutz der Glasfaser
- Elektromagnetische Störstrahlung**
  - Raspberry Pi: 2m Abstand (rotes Kabel)
  - Spektrometer: 5m Abstand (Glasfaser)

### Spektrometer



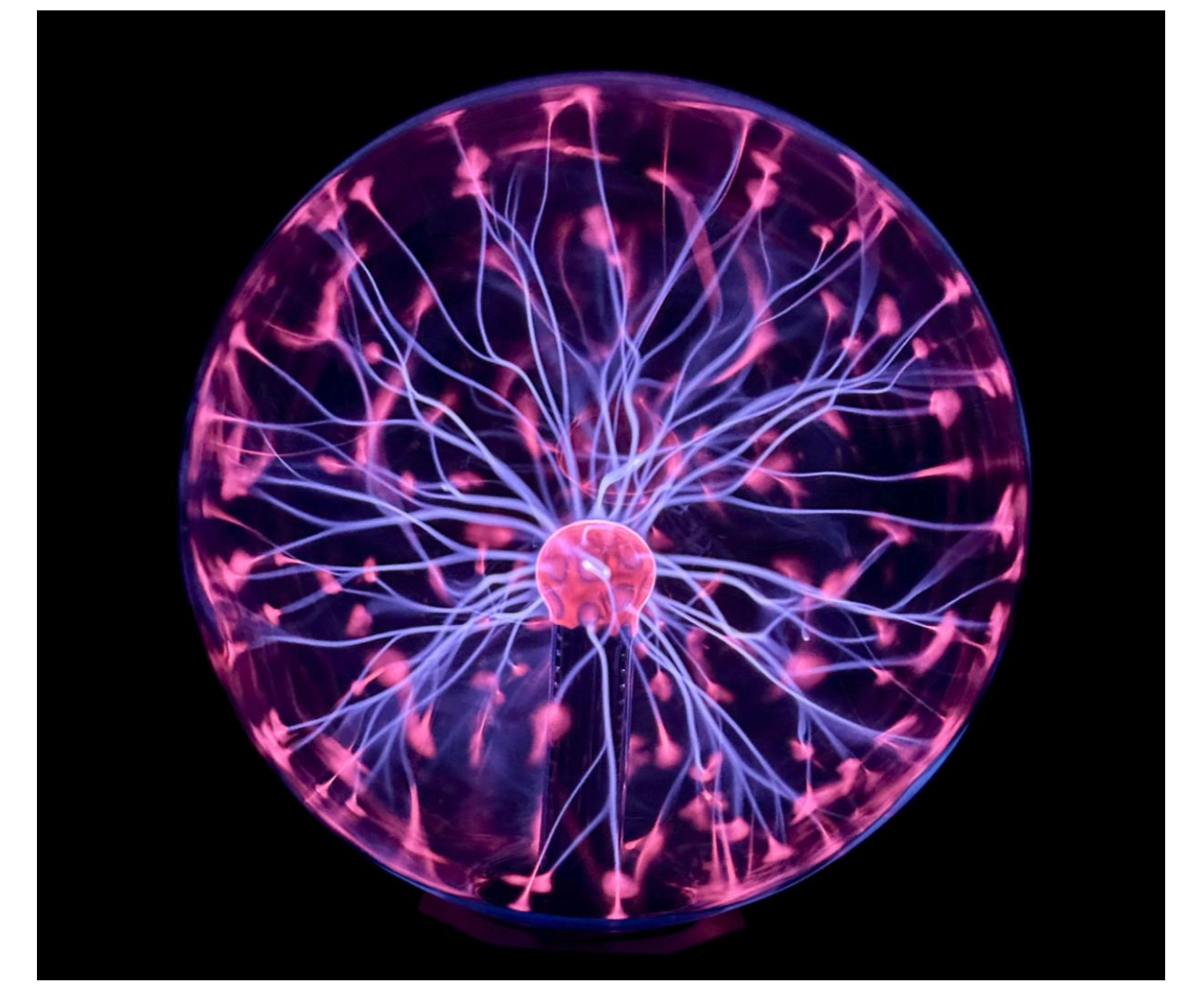
- Licht** wird über **Glasfaser** eingekoppelt und trifft auf **Spalt** (10µm Breite)
- Hohlspiegel 1** (15cm Brennweite) parallelisiert Licht
- Lichtbündel trifft auf **Gitter** (600 Linienpaare pro mm) und wird spektral aufgespalten
- Hohlspiegel 2** (15cm Brennweite) fokussiert Licht auf **Zeilenkamera** (3648 Pixel)
- Spektrum (Intensitätsverteilung) wird von **Raspberry Pi** über **USB** ausgelesen

### Aufnahme von Spektren



- DIY Czerney-Turner **Spektrometer** von Eureka Messtechnik GmbH **geliehen**
  - Hohes Dunkelrauschen**
    - Korrektur** von Spektren mit **Dunkelaufnahmen**
  - Geringe Empfindlichkeit**
    - Aufsummieren** vieler Spektren und **Korrektur** Dunkelrauschen
- An Blitzen der **Teslaspule** konnten **keine Spektren** gemessen werden

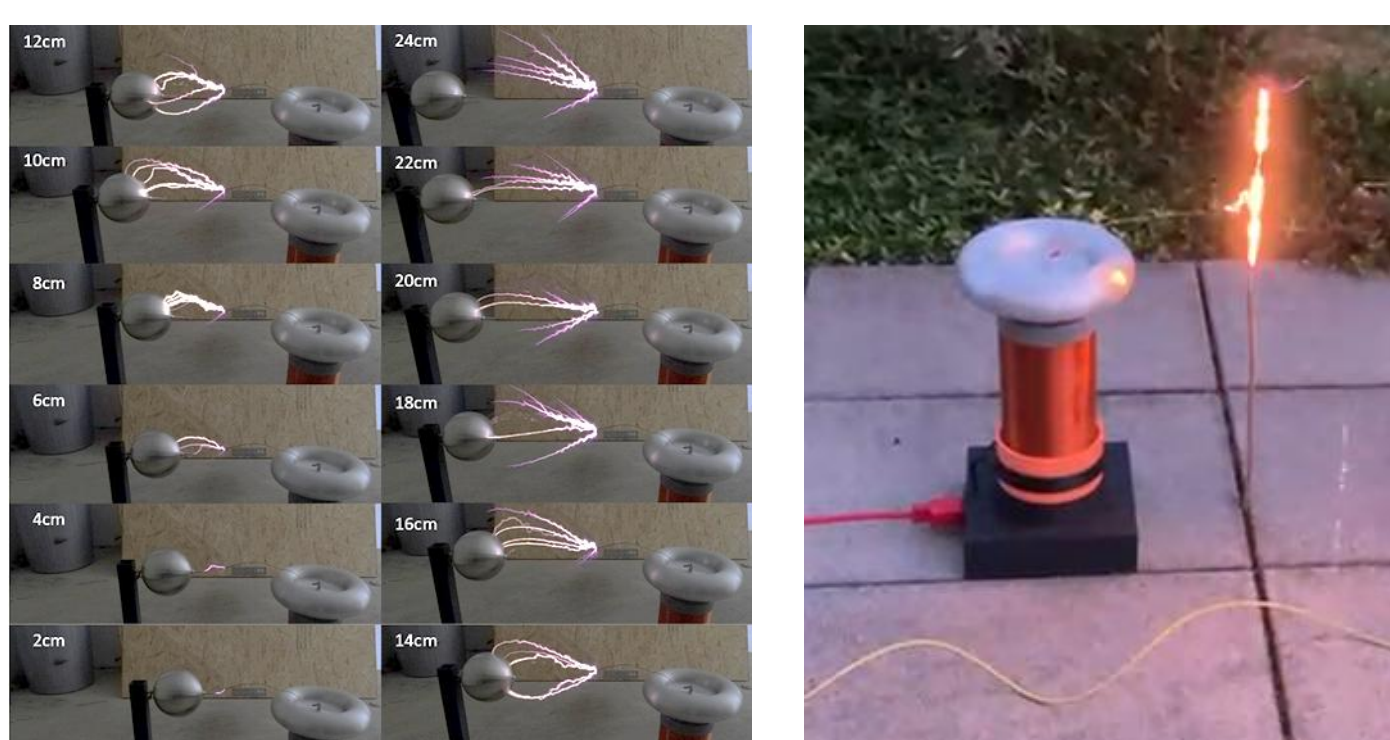
### Plasmakugel



- Aufbau**
  - Glaskugel**, die mit **Edelgasen** bei **geringem Druck** gefüllt ist
  - Trafo erzeugt **hochfrequente Hochspannung** an kleiner Kugel im Inneren
- Vorgehen**
  - Glasfaser direkt an Kugelglas
  - Geerdete Metallöse kurz hinter Kugelglas, um Blitze „anzuziehen“
- Spektrum** konnte gemessen werden

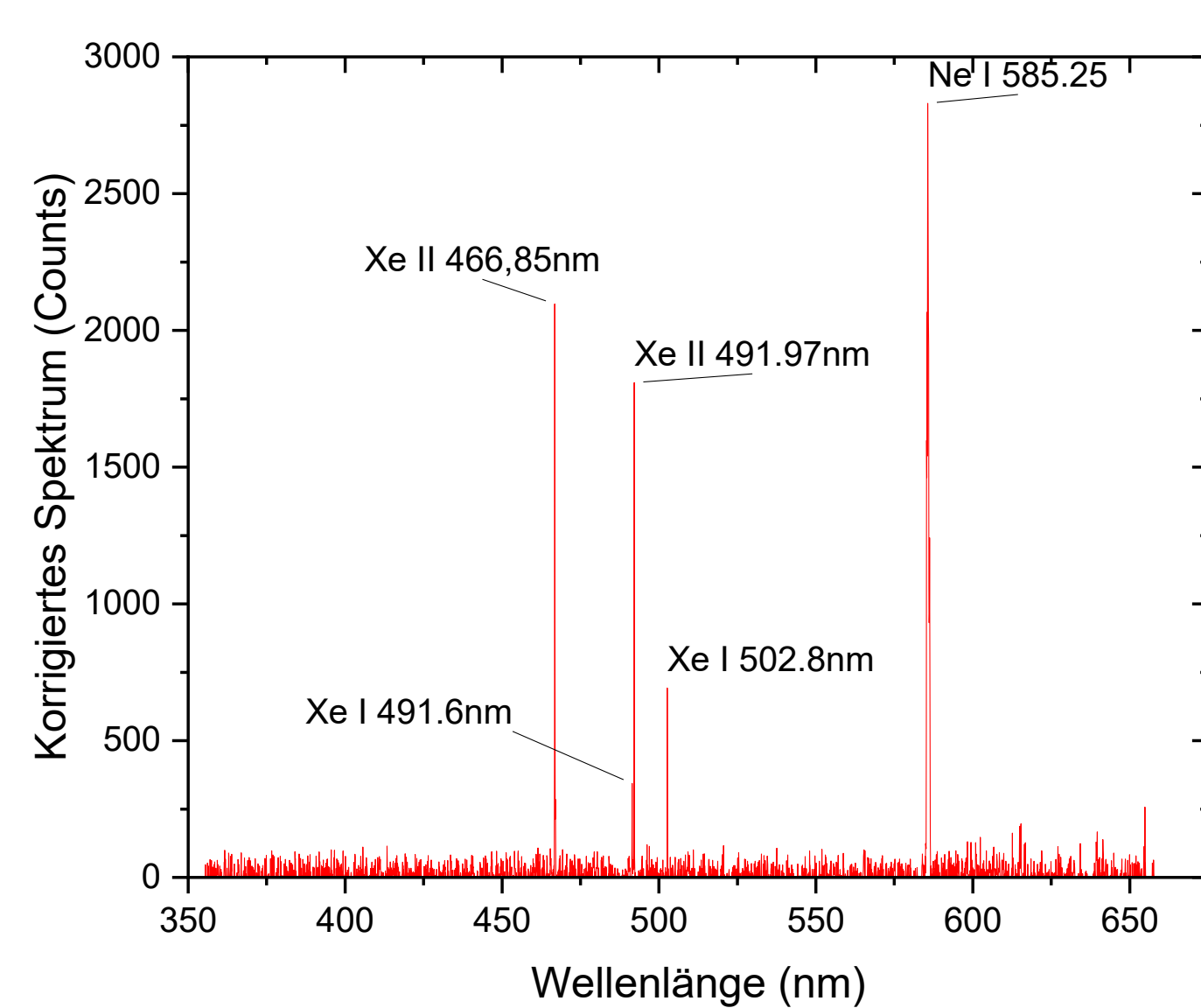
## Ergebnisse

### Erzeugte Blitze



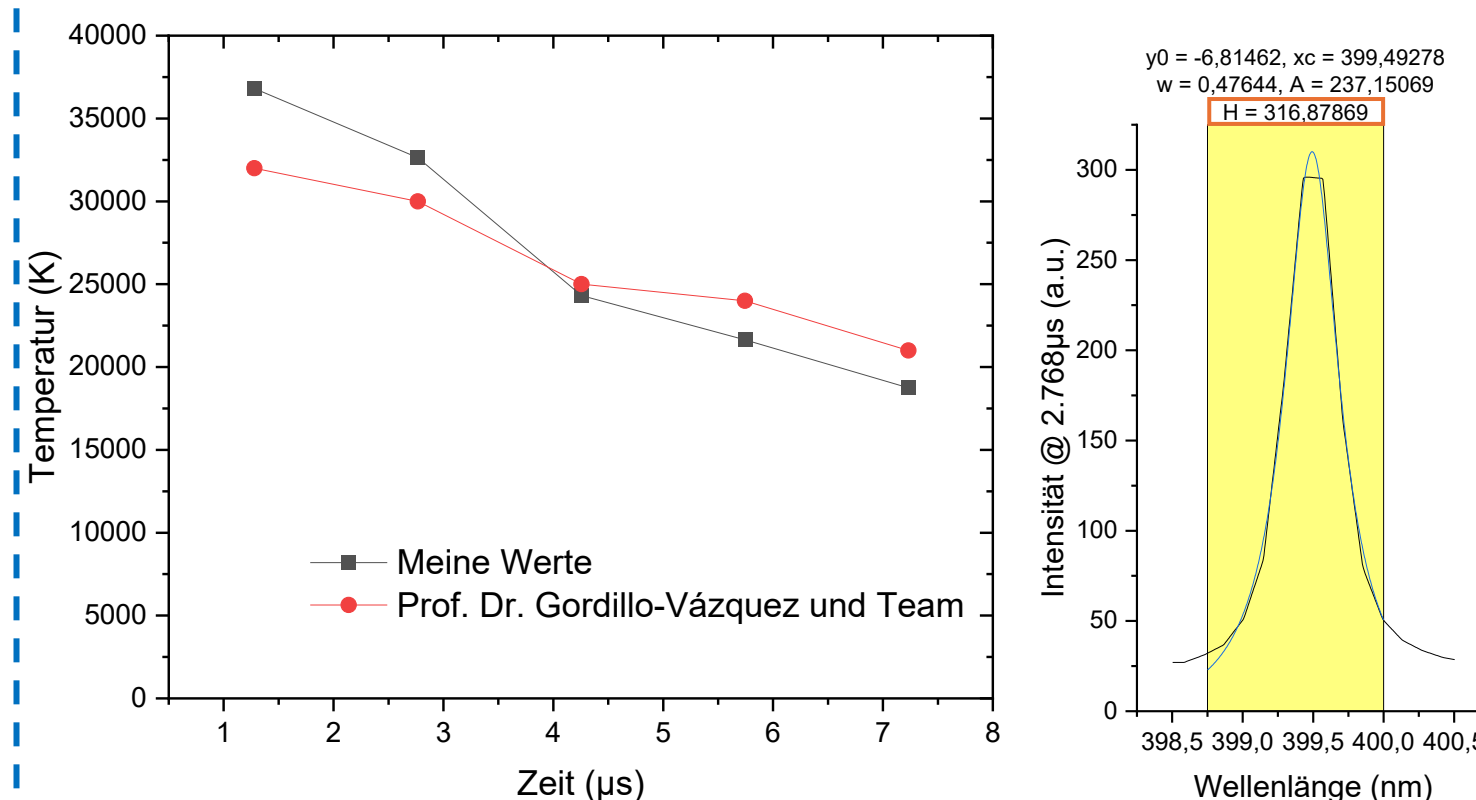
- Teslaspule erzeugt **Blitze (Plasma)** => **Temperatur über 4000°C**
- Explosionsartige Ausdehnung der Luft **deutlich hörbar** („Donner“)
- Maximale **Länge** der Blitze: **22cm** => **Spannung ca. 220.000V**
- Blitze **spalten Luftmoleküle** (Ozon)
- Blitze entzünden **Holz** und zerstören **Glasfaser**
- Teslaspule erzeugt **elektromagnetische Störstrahlung** – stört elektronische Komponenten (s.o.)

### Plasmakugel



- Identifikation der Linien**
  - Suche in **NIST Datenbank**
  - Einschränkung durch Wissen, dass sich **Neon und Xenon** in der Kugel befinden
- Temperaturbestimmung nicht möglich:**
  - Ne I: nur **eine Linie**
  - Xe I: selbes **oberes Niveau**
  - Xe II: **keine Einsteinkoeffizienten** in NIST

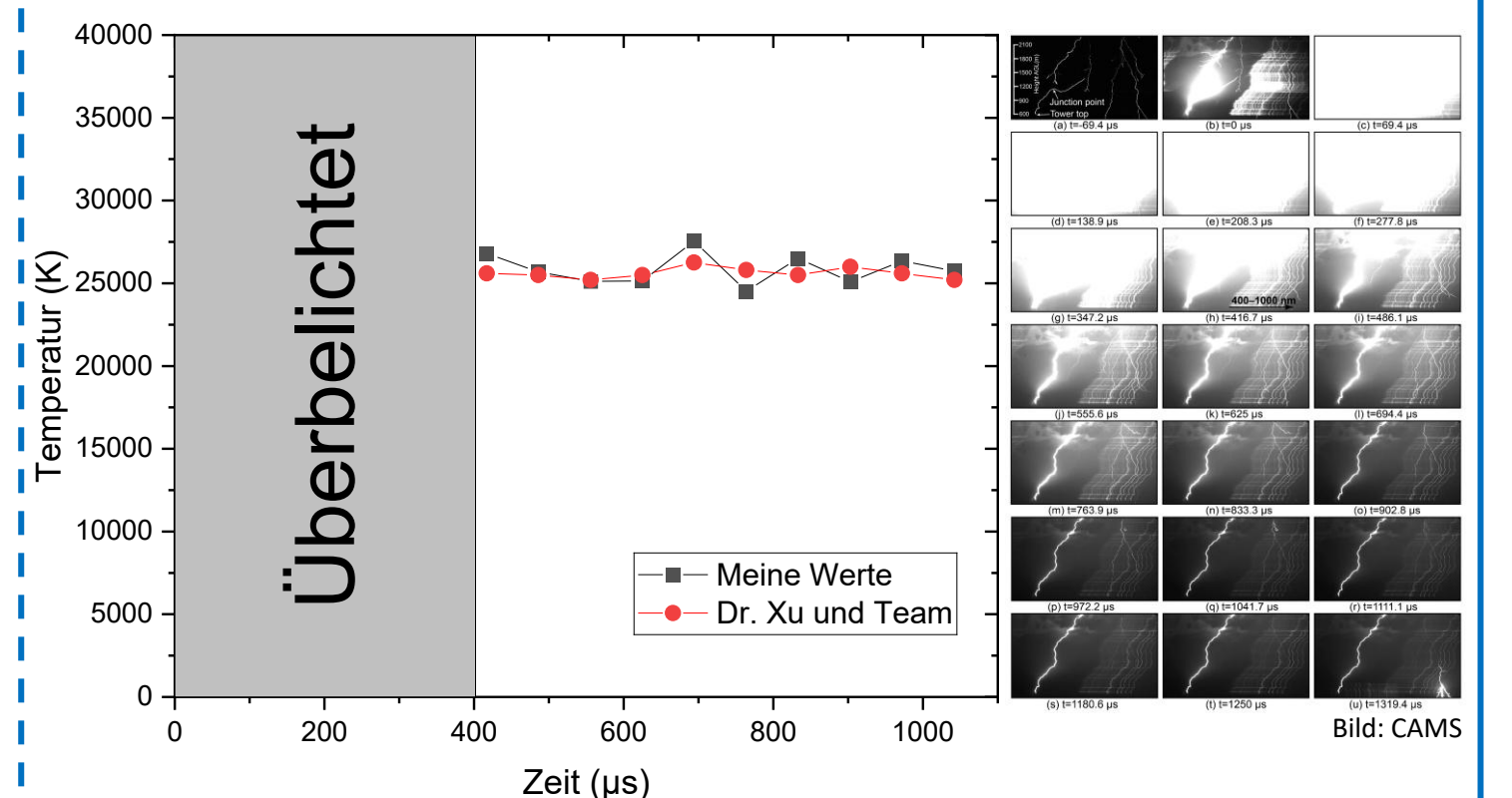
### Künstlicher Blitz (Spanien)



- „**Profidaten**“ für **Temperaturbestimmung**
- Spektren eines **künstlichen Blitzes** (800kV/1m) vom Instituto de Astrofísica de Andalucía
- Lorentz Kurve** musste mit Origin an Messdaten „gefittet“ werden
- Temperaturbestimmung funktionierte**

Vorgehen und Ergebnisse von Prof. Dr. Gordillo-Vázquez bestätigt

### Gewitterblitz (China)



- Gewitterblitz-Spektren** von der Chinesischen Akademie der Meteorologischen Wissenschaften
- Einschlag** am 22. Juni 2021 in den **600m hohen Canton Tower** in Guangzhou (China)
- Temperaturen** konnten **bestimmt** werden

Vorgehen und Ergebnisse von Dr. Xu bestätigt

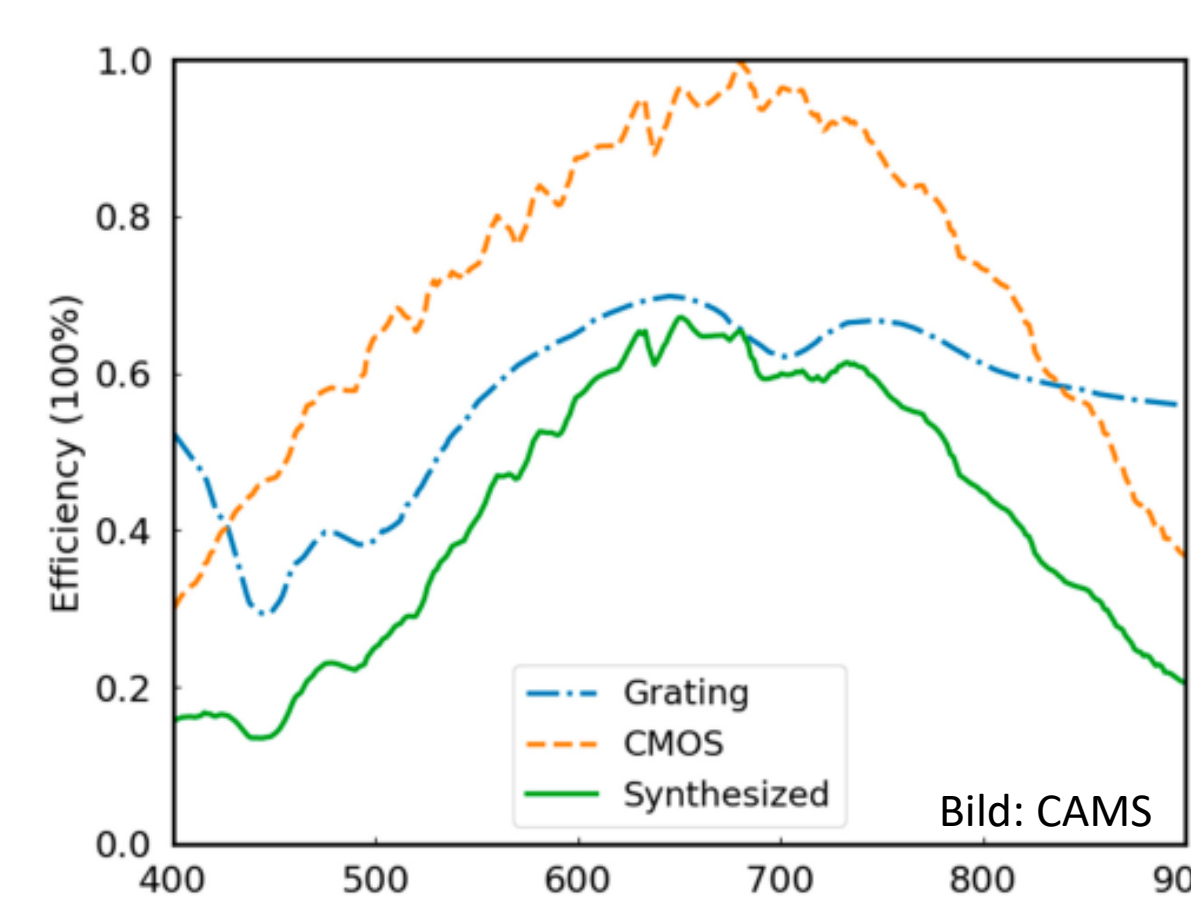
## Fazit



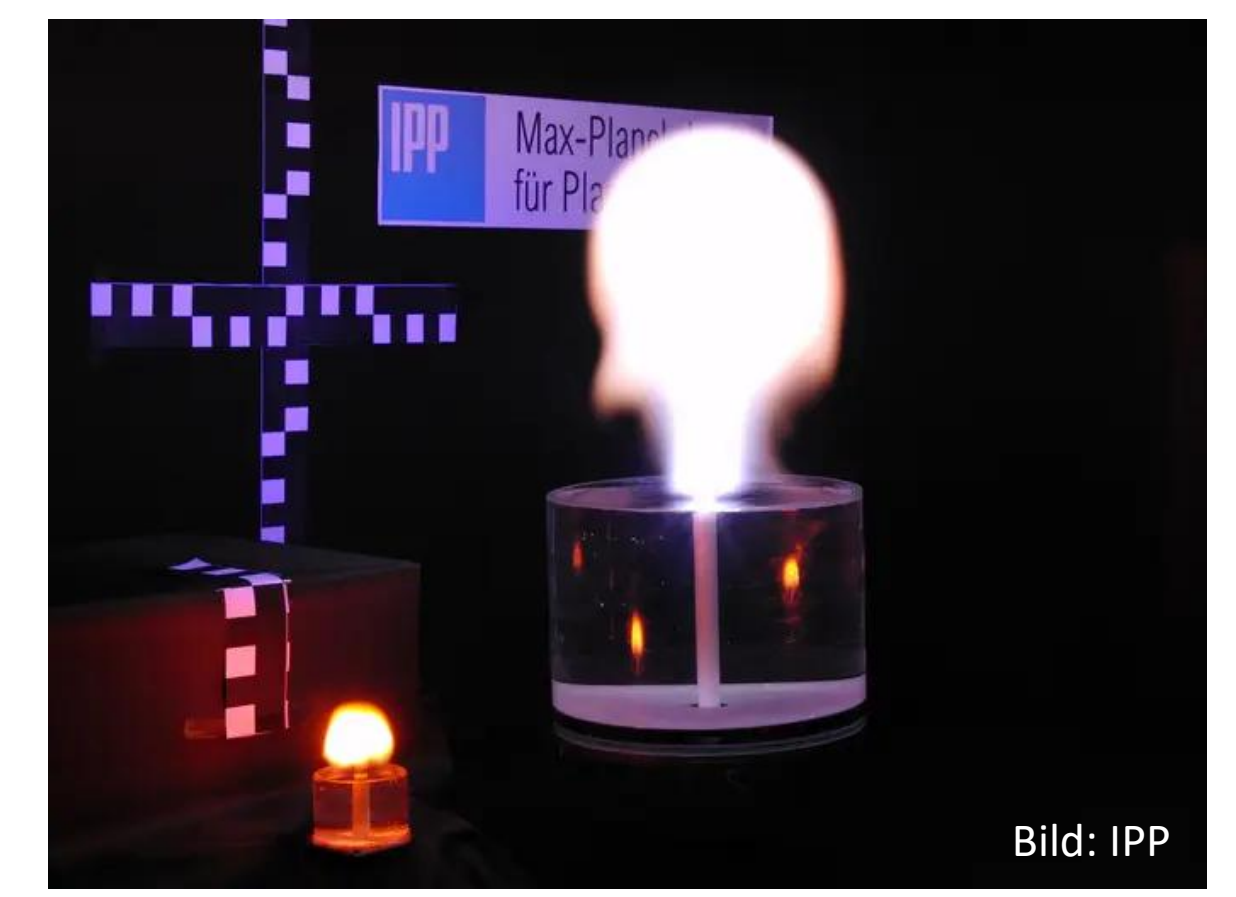
- Teslaspule** erzeugt **beeindruckende Blitze**
  - Empfindlichkeit des Spektrometers** ist **zu gering**, um Spektren zu messen
    - => **Temperatur nicht bestimmbar**
- An **Plasmakugel** konnte **Spektrum** gemessen werden
  - Nur eine Linie (Ne I)
  - Gleiche obere Niveaus der Linien (Xe I)
  - Fehlende Daten in NIST (Xe II)
  - => **Temperatur nicht bestimmbar**

- Mit **Daten** von echten **Wissenschaftlern** konnten Temperaturen eines **künstlichen** und eines **Gewitterblitzes** zu verschiedenen Zeitpunkten bestimmt werden
- Wissenschaftler haben bestätigt, dass **Vorgehen** und **Ergebnisse korrekt** sind:
  - Prof. Dr. Gordillo-Vázquez** (Instituto de Astrofísica de Andalucía)
  - Dr. Xu** (Chinese Academy of Meteorological Sciences)

## Ausblick



- Temperaturbestimmung an eigenen Daten**
- Empfindlicheres Spektrometer**
  - Zusammenarbeit mit Uni oder Forschungsinstitut (wg. Kosten)
  - Effizienz des Gesamtsystems (Gitter/Sensor) muss bekannt sein
- Stärkere Blitze** erzeugen
  - Z.B. mit Marx Generator (wie in Spanien, nur kleiner)



- Einladung ans **Max-Planck-Institut für Plasmaphysik** von Frau Prof. Dr. Fantz
- Teilnahme an nächster Messkampagne am **Kugelblitz**
  - Aufnahme von Spektren mit **professionellem Spektrometer**
  - Hoffentlich **Temperaturbestimmung**