

## Eigeninitiative...

## Kreativität...

## Teamfähigkeit...

## Physik macht Spaß...

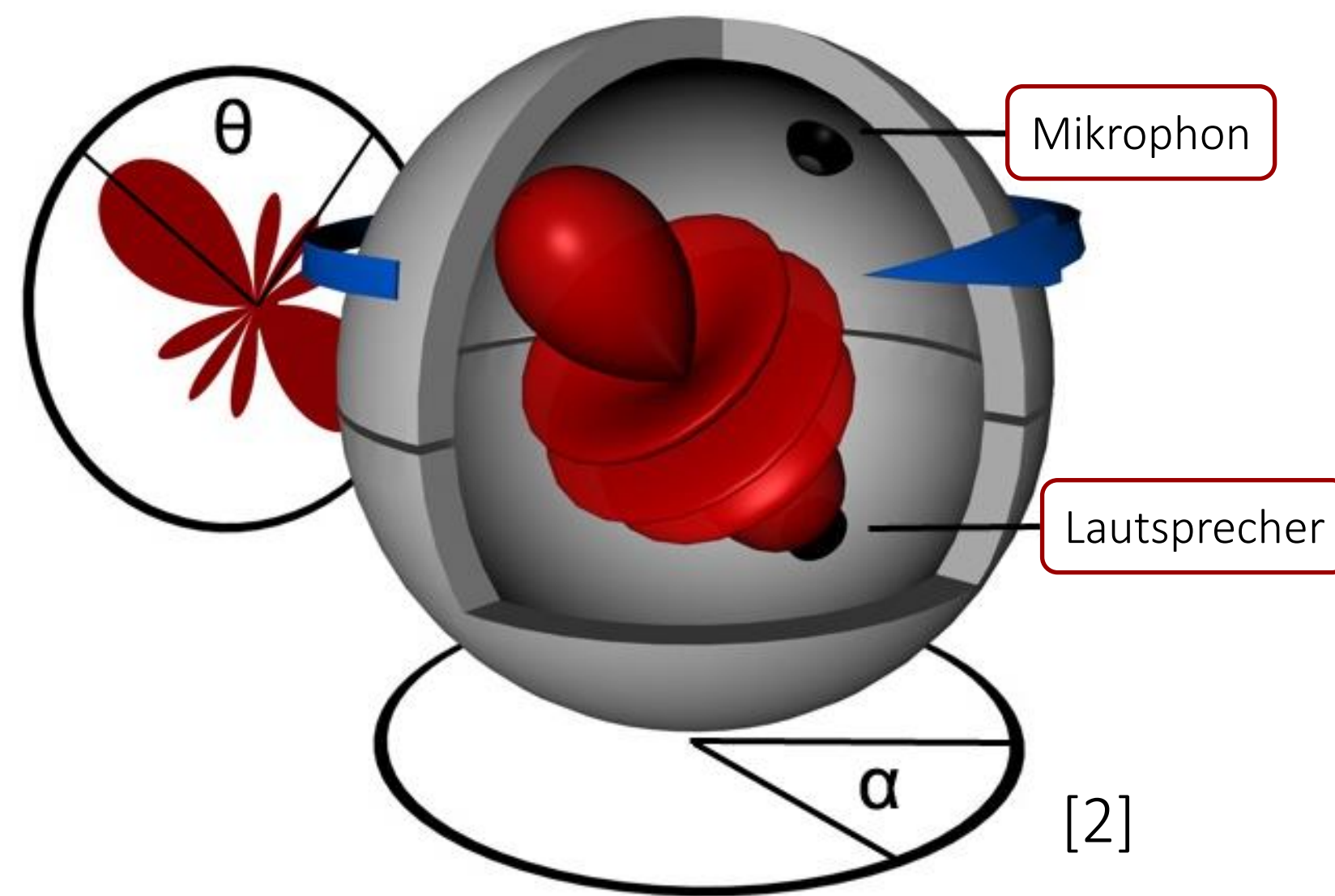
## 50 Jahre forschendes Lernen im Projektlabor Physik

- Studienreformprojekt aus den siebziger Jahren
- Selbständiges Arbeiten in dauerhaften Kleingruppen (max. 7 Studierende) ab dem 1. Fachsemester
- Motivation durch freie Themen- und Experimentwahl
- Freiraum für Eigeninitiative und kreatives Lernen
- Planung und Gestaltung der Experimente durch Studierende
- Engagement der Studierenden überdurchschnittlich hoch / Niedrige Abbruchquote

## Lernziele

- Bildliche Vorstellung der Orbitale eines Elektrons im Wasserstoffatom durch die Analogie zu stehenden Druckwellen im Kugelresonator
- Bestimmung der Resonanzfrequenzen im Kugelresonator und Ermittlung von Quantenzahlen
- Individuelle Entwicklung eines Messverlaufs
- Einstieg in die Programmiersprache Python

## Das akustische Quantenanalogue



## Theorie

- Stationäre Schrödinger-Gleichung

$$E\Psi(\vec{r}) = -\frac{\hbar^2}{2m}\Delta\Psi(\vec{r}) + V(\vec{r})\Psi(\vec{r})$$

- Helmholtz-Gleichung

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = \frac{1}{\rho c} \Delta p$$

Separation der Gleichungen in Kugelkoordinaten ergeben formgleiche, winkelabhängige Kugelflächenfunktionen [3] (Radialanteile sind unterschiedlich)

## Experimenteller Aufbau zur Fernsteuerung

### Vorgehensweise

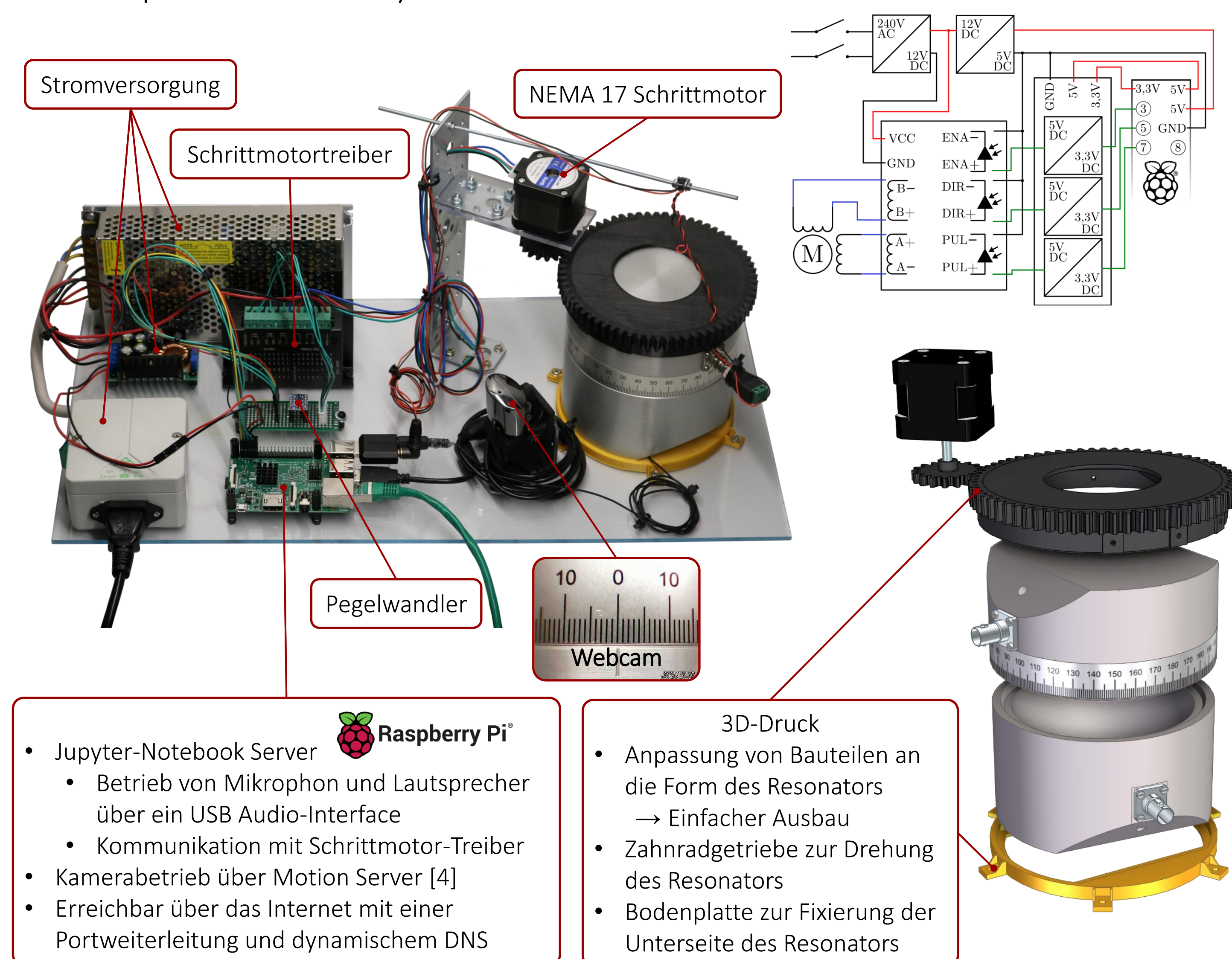
- Anregung von stehenden Wellen mit einem Lautsprecher
- Vermessung der Schallwellen mit einem Mikrophon
- Änderung des Winkels zwischen Lautsprecher und Mikrophon durch Verdrehung des Kugelresonators → Abfahren eines Winkels der Kugelflächenfunktion

### Labor

- Einstellen des Resonatorwinkels händisch
- Nutzung des Steuerprogramms vom Hersteller für Mikrophon und Lautsprecher

### Fernsteuerung

- Einstellen des Resonatorwinkels mit Schrittmotor und Kamera
- Generierung eines frei definierbaren Lautsprechersignals sowie Messung am Mikrophon direkt mit Python



- Jupyter-Notebook Server
  - Betrieb von Mikrophon und Lautsprecher über ein USB Audio-Interface
  - Kommunikation mit Schrittmotor-Treiber
  - Kamerabetrieb über Motion Server [4]
  - Erreichbar über das Internet mit einer Portweiterleitung und dynamischem DNS

- 3D-Druck
  - Anpassung von Bauteilen an die Form des Resonators → Einfacher Ausbau
  - Zahnradgetriebe zur Drehung des Resonators
  - Bodenplatte zur Fixierung der Unterseite des Resonators

## Steuerung & Auswertung

### Jupyter-Notebook Server [5]

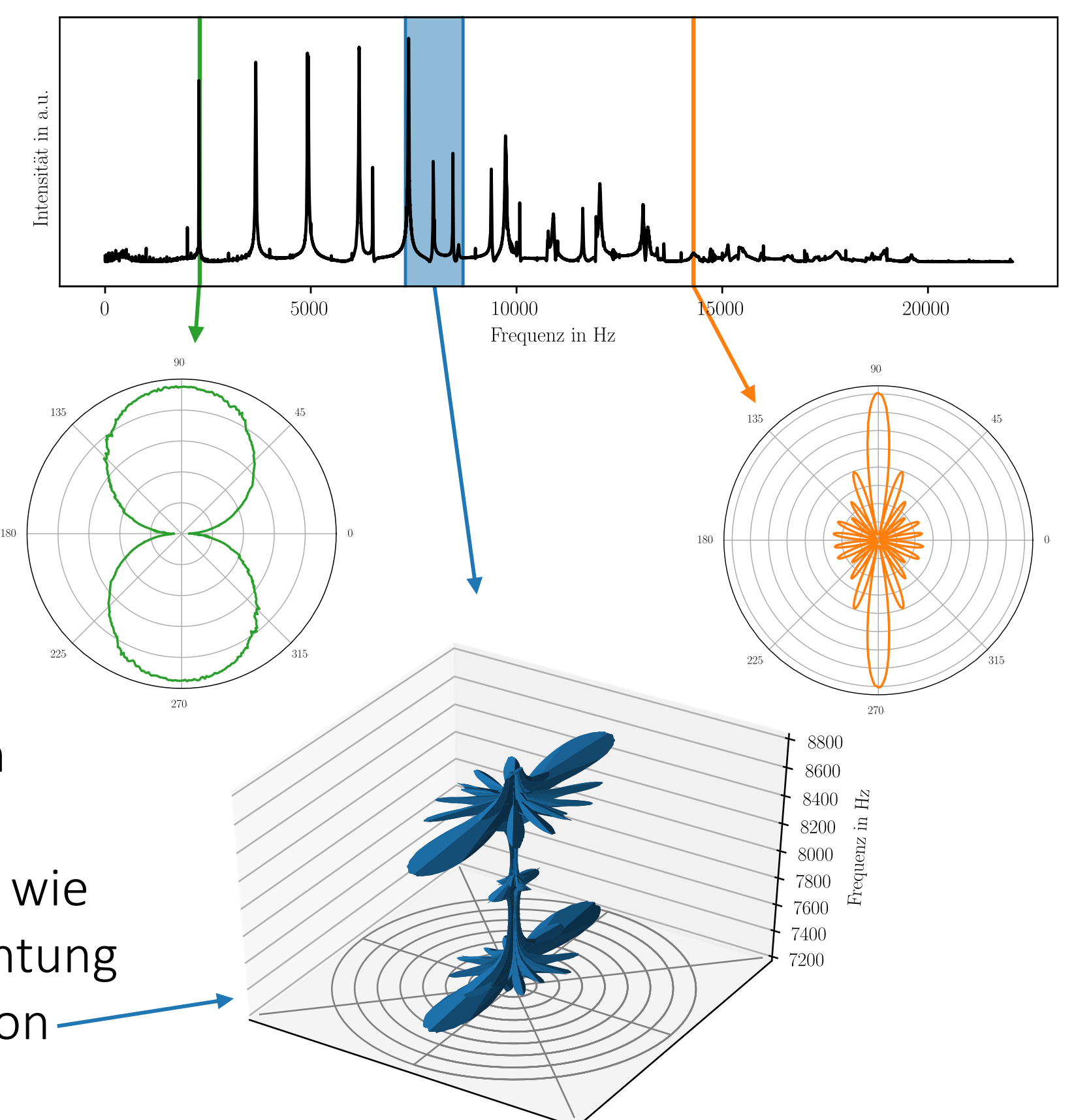
- Erreichbar über URL
- Geschützt mit Passwort
- Arbeiten im Browser
  - keine weitere Software notwendig
  - direktes Herunterladen der Ergebnisse

### Steuerung

- Grundlegende Funktionen werden zur Verfügung gestellt bspw.:
  - Drehung des Motors um Schrittzahl
  - Ausgabe eines Frequenz-Sweep
- Funktionen sind direkt durch die Studierenden einseh- und erweiterbar.
  - keine Black Box
- Entwicklung eigener Messroutinen
  - Beachtung von: Speichergröße, Messzeit, Speicherform, Signalform der Anregung, Schrittweite,...

### Auswertung

- Analyse im Jupyter-Notebook
- Frequenzanalyse auch mit Fouriertransformation möglich
- Bestimmung der Resonanzfrequenzen
  - Darstellung winkelabhängiger Amplituden im Resonanzfall
  - Zuordnung zu Kugelflächenfunktionen / Quantenzahlen
- Bsp.: → 2,3 kHz  $l=1, m=0$   
→ 14,3 kHz  $l=11, m=0$
- Kleinschrittige Messungen durch automatisierten Aufbau möglich
- Vielfältige Analysemöglichkeiten wie beispielsweise simultane Betrachtung der Amplitude in Abhängigkeit von Winkel und Frequenz



- Literatur:** [1] A. Merli, B. Kanngießer, T. Möller, *Kreatives forschendes Lernen im Projektlabor Physik fördern* in Labore in der Hochschullehre: Didaktik, Digitalisierung, Organisation, Wbv, ISBN: 978-3-7639-6216-7, (2020).  
[2] Niklas Affolter, Protokoll zum Quantenanalogue der PG 339, (2009).  
[3] R. Matzdorf / TEACHSPIN, *Quantum Analogs – Student Manual*  
[4] Motion, Programm zur Überwachung von Videosignalen, motion-project.github.io  
[5] Jupyter-Projekt, jupyter.org

**Kontakt:** robin.krueger@physik.tu-berlin.de  
andrea.merli@physik.tu-berlin.de  
www.pl-physik.tu-berlin.de



Danke an die PG 454