

Optisches Pumpen

Fortgeschrittenen-Praktikum II

Moritz Bitterling Benjamin Rottler

Universität Freiburg

18.05.2015

Inhalt

Allgemeine Grundlagen

Hyperfeinstrukturspektrum

Doppelresonanz

Spinpräzession

Bestimmung der Relaxationszeit nach Dehmelt

Bestimmung der Relaxationszeit nach Franzen

Allgemeine Grundlagen

Die Hyperfeinstruktur

Die Laserdiode

Hyperfeinstrukturspektrum

Doppelresonanz

Spinpräzession

Bestimmung der Relaxationszeit nach Dehmelt

Bestimmung der Relaxationszeit nach Franzen

Hyperfeinstruktur-Aufspaltung

- Kopplung von Kernspin \vec{I} und elektronischem Gesamtdrehimpuls \vec{J}

$$\vec{F} = \vec{I} + \vec{J} \quad |I - J| \leq F \leq |I + J|$$

- Energieaufspaltung

$$\Delta E_{\text{HFS}} = -\vec{\mu}_I \cdot \vec{B}_J$$

- Für benachbarte Energieniveaus

$$\Delta E_{\Delta F=1}(F) = A(F+1)$$

Intervallkonstante A

Hyperfeinstruktur-Aufspaltung

- Kopplung von Kernspin \vec{I} und elektronischem Gesamtdrehimpuls \vec{J}

$$\vec{F} = \vec{I} + \vec{J} \quad |I - J| \leq F \leq |I + J|$$

- Energieaufspaltung

$$\Delta E_{\text{HFS}} = -\vec{\mu}_I \cdot \vec{B}_J$$

- Für benachbarte Energieniveaus

$$\Delta E_{\Delta F=1}(F) = A(F+1)$$

Intervallkonstante A

Hyperfeinstruktur-Aufspaltung

- Kopplung von Kernspin \vec{I} und elektronischem Gesamtdrehimpuls \vec{J}

$$\vec{F} = \vec{I} + \vec{J} \quad |I - J| \leq F \leq |I + J|$$

- Energieaufspaltung

$$\Delta E_{\text{HFS}} = -\vec{\mu}_I \cdot \vec{B}_J$$

- Für benachbarte Energieniveaus

$$\Delta E_{\Delta F=1}(F) = A(F+1)$$

Intervallkonstante A

Hyperfeinstruktur-Aufspaltung von Rubidium

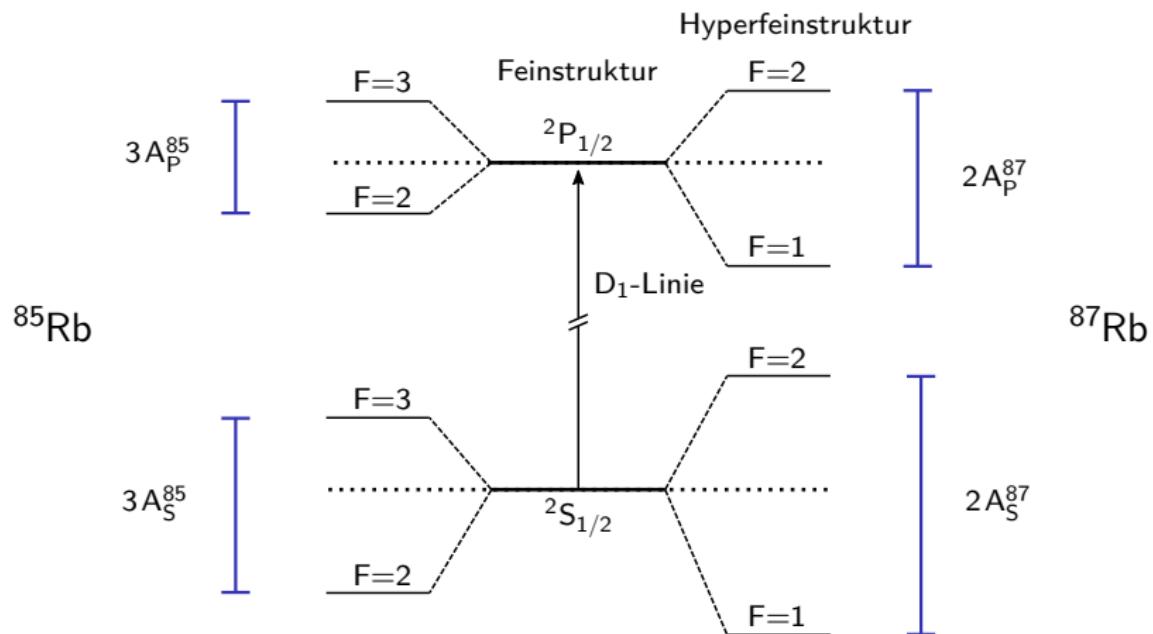


Abbildung 1: Hyperfeinstrukturaufspaltung der D_1 -Linie von ${}^{85}\text{Rb}$ und ${}^{87}\text{Rb}$.

Hyperfeinstruktur-Aufspaltung - Übergänge

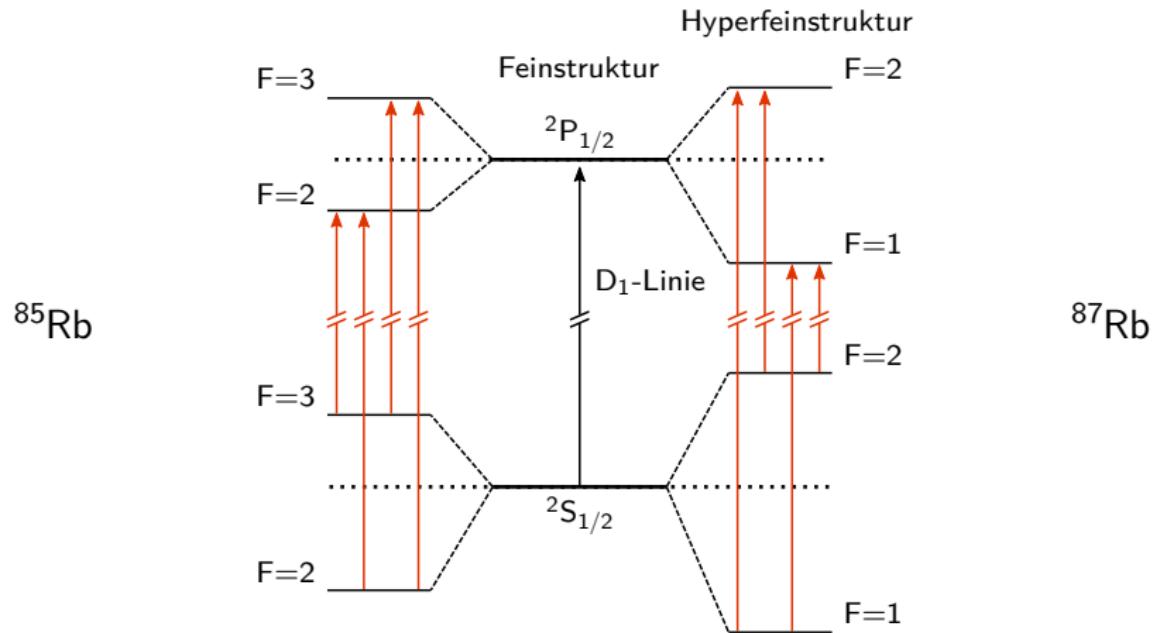


Abbildung 2: Hyperfeinstrukturaufspaltung der D₁-Linie von ^{85}Rb und ^{87}Rb .

Hyperfeinstruktur-Aufspaltung - Spektrallinien

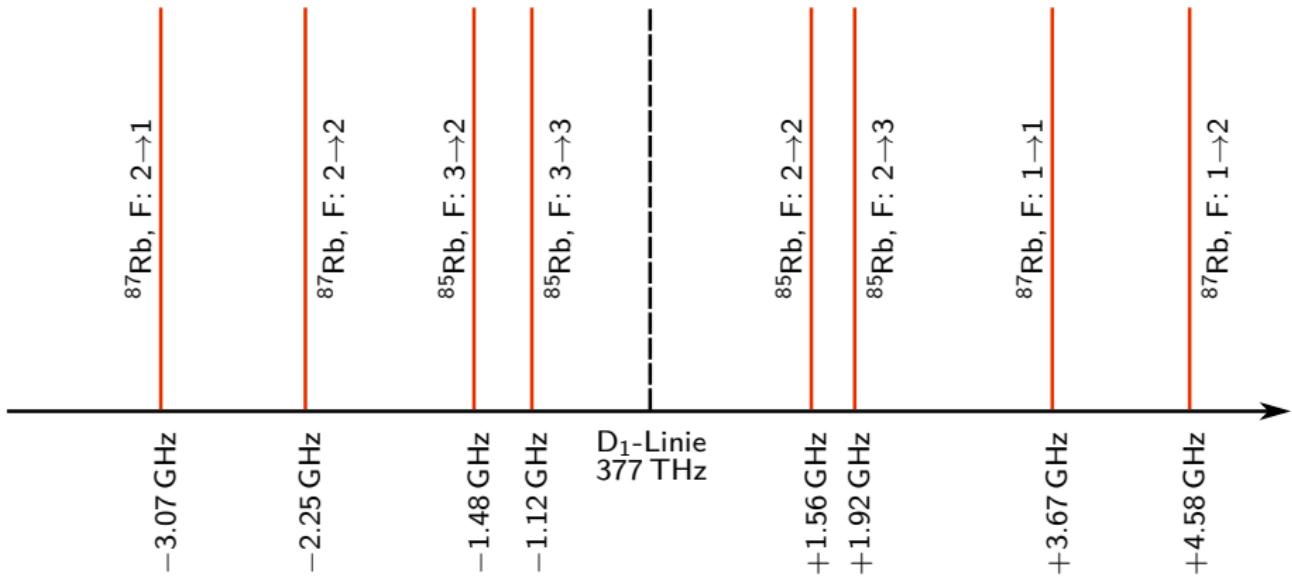


Abbildung 3: Spektrallinien der Hyperfeinstruktur von ^{85}Rb und ^{87}Rb .

Zeeman-Aufspaltung der Hyperfeinstruktur

- ohne Magnetfeld: Niveau ist $(2F + 1)$ -fach entartet

$$F_z = m_F \hbar \quad -F \leq m_F \leq F$$

- mit äußerem Magnetfeld \vec{B}_0 : Zeeman-Aufspaltung
- Für benachbarte Energieniveaus

$$\Delta E_{\text{HFS}}^{\text{Zeeman}}(\Delta m_F = 1) = \frac{g_J \mu_B}{2(I + \frac{1}{2})} B_0$$

Bohrsches Magneton μ_B , Landé-Faktor g_J

Zeeman-Aufspaltung der Hyperfeinstruktur

- ohne Magnetfeld: Niveau ist $(2F + 1)$ -fach entartet

$$F_z = m_F \hbar \quad -F \leq m_F \leq F$$

- mit äußerem Magnetfeld \vec{B}_0 : Zeeman-Aufspaltung
- Für benachbarte Energieniveaus

$$\Delta E_{\text{HFS}}^{\text{Zeeman}}(\Delta m_F = 1) = \frac{g_J \mu_B}{2(I + \frac{1}{2})} B_0$$

Bohrsches Magneton μ_B , Landé-Faktor g_J

Zeeman-Aufspaltung der Hyperfeinstruktur

- ohne Magnetfeld: Niveau ist $(2F + 1)$ -fach entartet

$$F_z = m_F \hbar \quad -F \leq m_F \leq F$$

- mit äußerem Magnetfeld \vec{B}_0 : Zeeman-Aufspaltung
- Für benachbarte Energieniveaus

$$\Delta E_{\text{HFS}}^{\text{Zeeman}}(\Delta m_F = 1) = \frac{g_J \mu_B}{2(I + \frac{1}{2})} B_0$$

Bohrsches Magneton μ_B , Landé-Faktor g_J

Zeeman-Aufspaltung der Hyperfeinstruktur

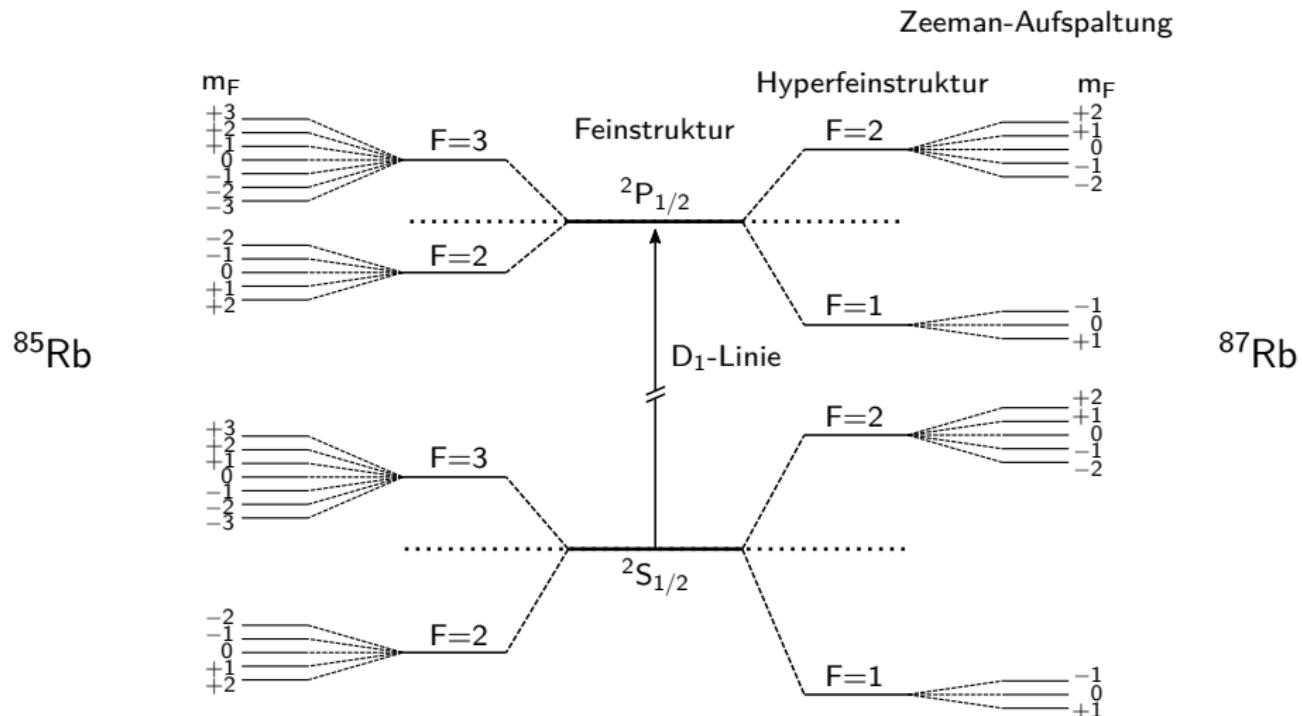


Abbildung 4: Zeeman-Aufspaltung der Hyperfeinstruktur von ^{85}Rb und ^{87}Rb .

Laserdiode - Aufbau zur Charakterisierung

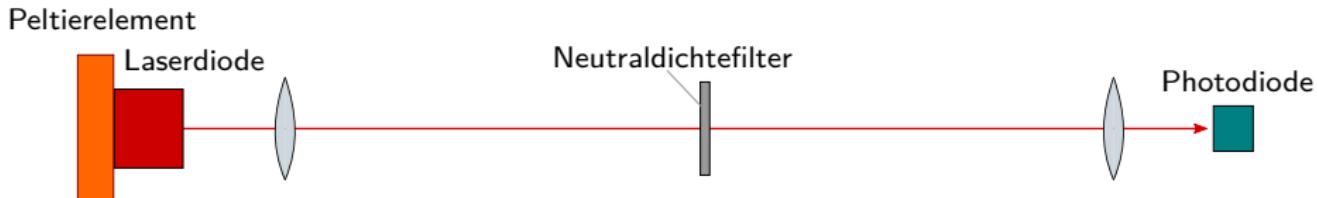


Abbildung 5: Aufbau zur Messung der P - I -Kennlinie der Laserdiode.

- **Peltierelement:** Temperaturstabilisierung der Laserdiode
- **Laserdiode:** Erzeugung von linear polarisiertem kohärenten Licht mit $\lambda = 795 \text{ nm}$
- **Neutraldichtefilter:** Abschwächung der Laserintensität
- **Photodiode:** Messung der Laserintensität

Laserdiode - P - I -Kennlinie

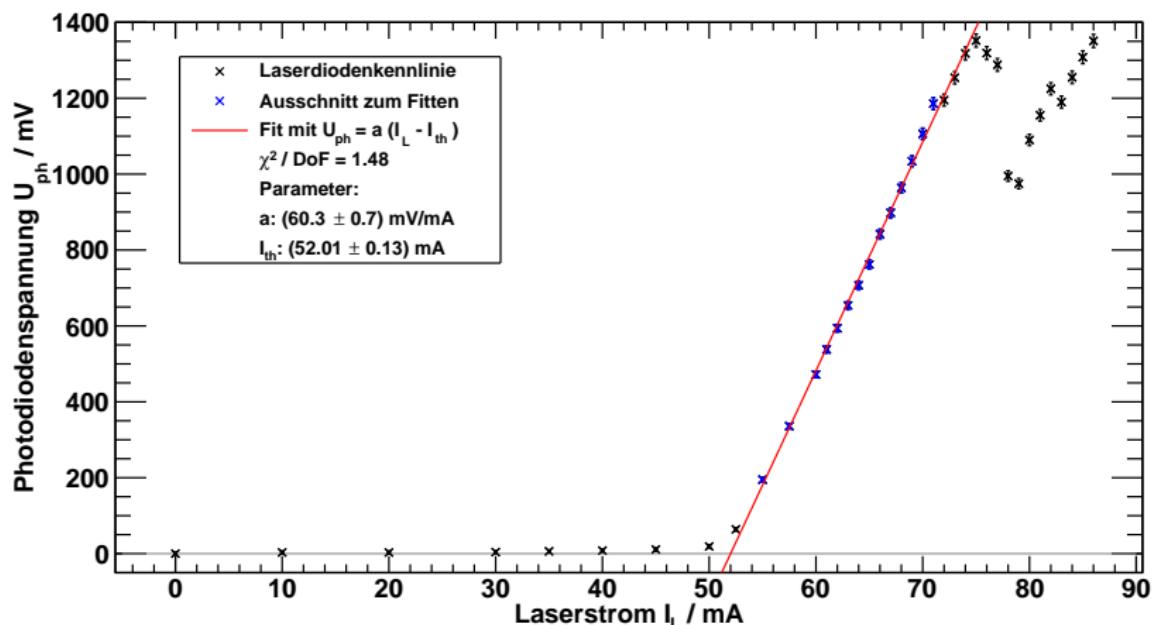


Abbildung 6: P - I -Kennlinie der im Versuch verwendeten Laserdiode.

Laserdiode - Aufbau zur Charakterisierung



Abbildung 7: Aufbau zur Identifikation von Modensprüngen der Laserdiode.

- **Etalon:** Transmissionsmaxima mit bekanntem Abstand

Laserdiode - Frequenzmodulation

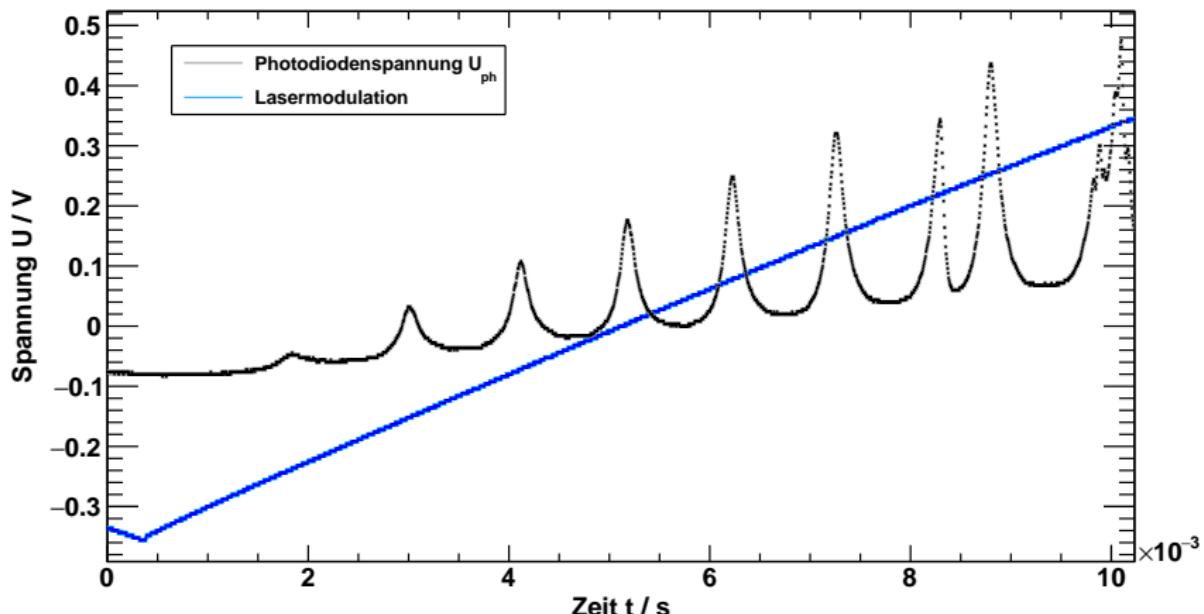


Abbildung 8: Frequenzabhängige Transmission des Laserlichts durch das Etalon.

Laserdiode - Frequenzmodulation

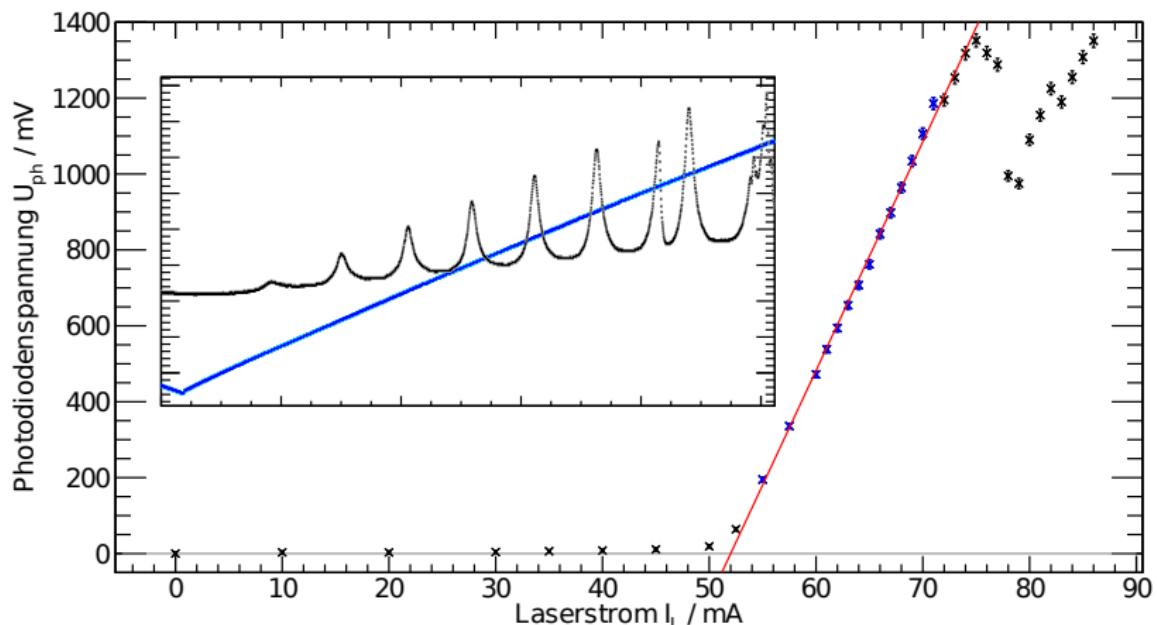


Abbildung 9: Vergleich von Frequenz und Leistung der Laserdiode.

Allgemeine Grundlagen

Hyperfeinstrukturspektrum

Scanrate des Lasers

Hyperfeinstruktur

Intervallkonstante A

Doppelresonanz

Spinpräzession

Bestimmung der Relaxationszeit nach Dehmelt

Bestimmung der Relaxationszeit nach Franzen

Aufbau: Bestimmung der Scanrate des Lasers



Abbildung 10: Aufbau zur Bestimmung der Scanrate des Lasers mit Etalon.

Auswertung: Bestimmung der Scanrate des Lasers

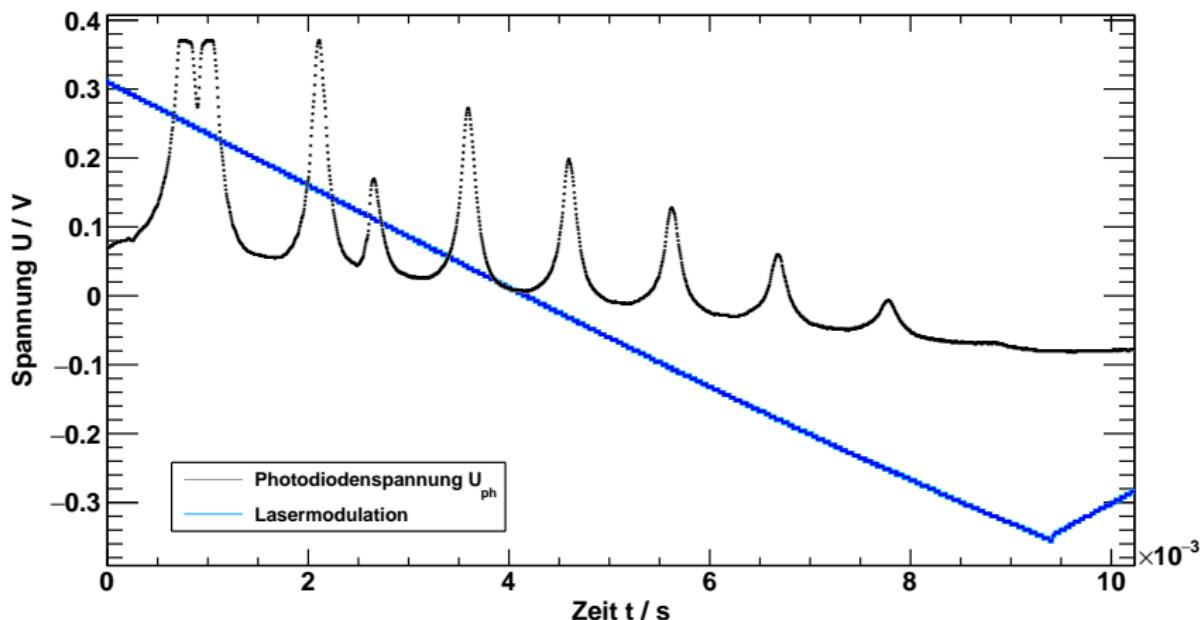


Abbildung 11: Peaks des Etalonspektrums auf fallender Flanke.

Auswertung: Bestimmung der Scanrate des Lasers

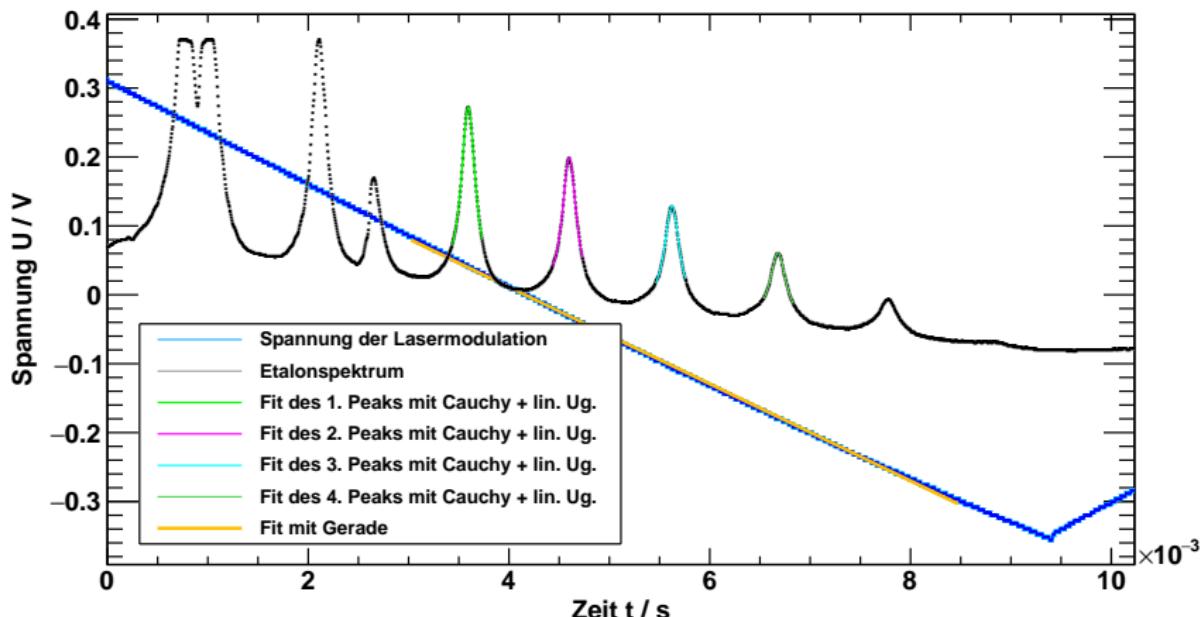


Abbildung 12: Fit mit Breit-Wigner-Kurven.

Auswertung: Bestimmung der Scanrate des Lasers

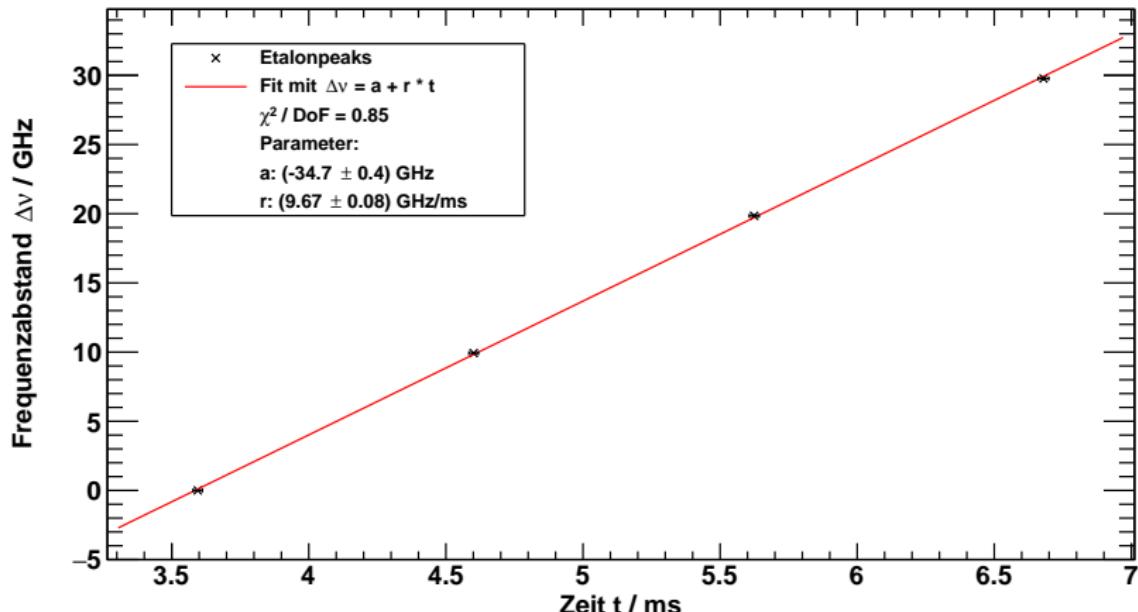


Abbildung 13: Frequenzdifferenz der Etalonpeaks und ihre Positionen.

Auswertung: Bestimmung der Scanrate des Lasers

Fit mit

$$\Delta v(t) = a + r \cdot t$$

Scanrate r des Lasers

$$r = (9.47 \pm 0.08) \frac{\text{GHz}}{\text{ms}}$$

Auswertung: Bestimmung der Scanrate des Lasers

Fit mit

$$\Delta v(t) = a + r \cdot t$$

Scanrate r des Lasers

$$r = (9.47 \pm 0.08) \frac{\text{GHz}}{\text{ms}}$$

Aufbau: Hyperfeinstrukturspektrum



Abbildung 14: Aufbau zur Messung des Hyperfeinstrukturspektrums.

- **Rubidiumzelle:** Füllung mit ^{85}Rb und ^{87}Rb ($T_m = 39^\circ\text{C}$) und Puffergas Krypton ($p = 1.5 \text{ mbar}$)

Aufbau: Strahlengang

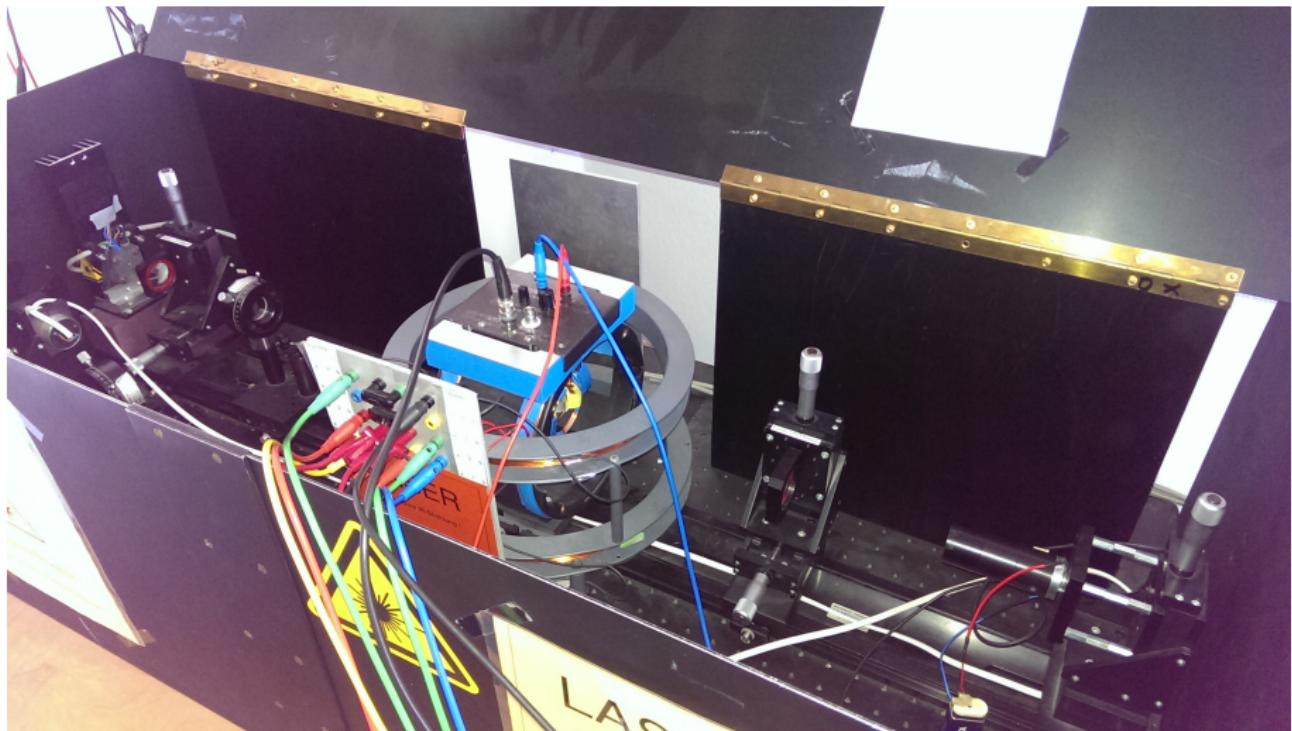


Abbildung 15: Strahlengang.

Aufbau: Rubidiumzelle

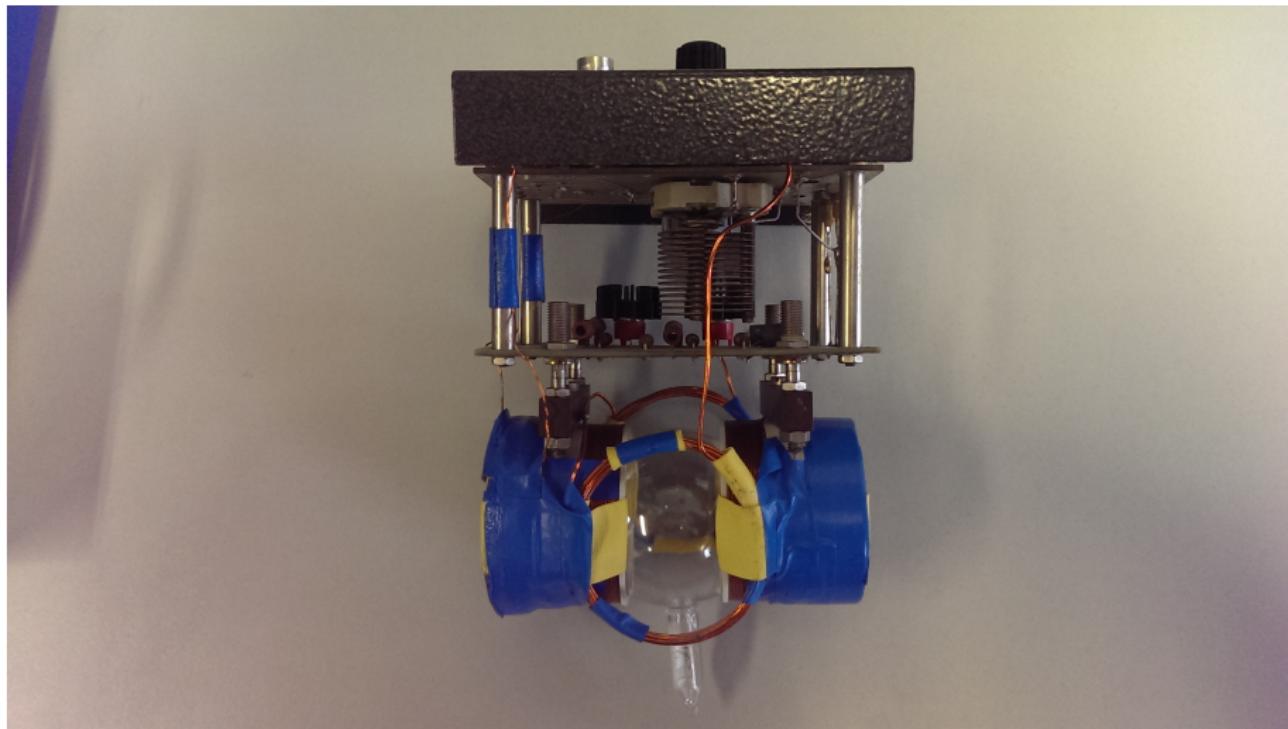


Abbildung 16: Rubidiumzelle.

Auswertung: Hyperfeinstruktur-Übergänge

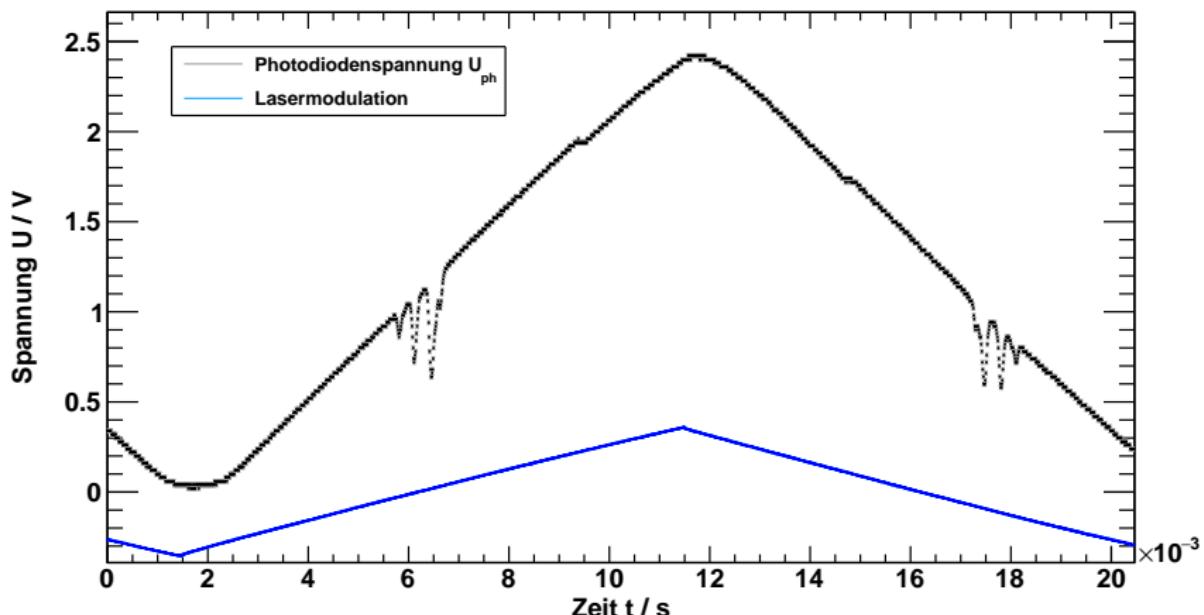


Abbildung 17: Hyperfeinstrukturspektrum von Rubidium.

Auswertung: Hyperfeinstruktur-Übergänge

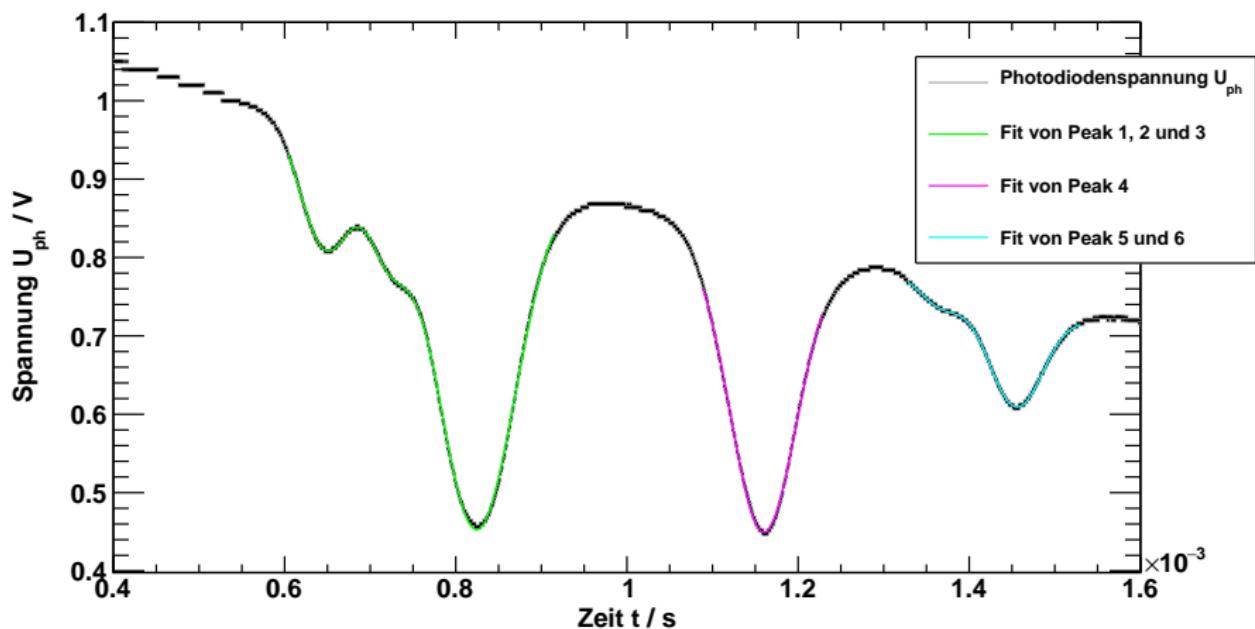


Abbildung 18: Fit mit überlagerten Gauß-Kurven.

Auswertung: Berechnung der Frequenzdifferenz

- Festlegung eines Referenzpeaks (Peak 3)
- Berechnung mit

$$\Delta v_i = r \cdot (\mu_i - \mu_3)$$

Auswertung: Berechnung der Frequenzdifferenz

- Festlegung eines Referenzpeaks (Peak 3)
- Berechnung mit

$$\Delta \nu_i = r \cdot (\mu_i - \mu_3)$$

Auswertung: Vergleich mit theoretischen Werten

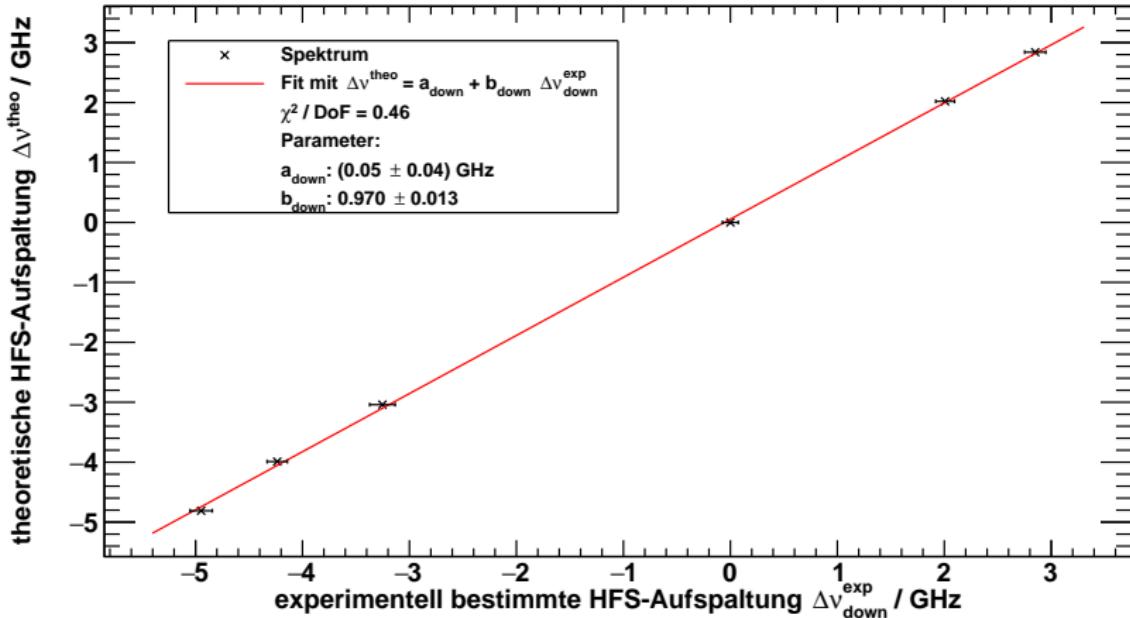


Abbildung 19: Vergleich der Messwerte mit den theoretischen Werten.

Auswertung: Vergleich mit theoretischen Werten

- Fit mit

$$\Delta\nu^{\text{theo}} = a + b \cdot \Delta\nu^{\text{exp}}$$

- Ergebnis

$$\begin{aligned}a_{\text{up}} &= (-0.01 \pm 0.04) \text{ GHz} & a_{\text{down}} &= (0.05 \pm 0.04) \text{ GHz} \\b_{\text{up}} &= 0.973 \pm 0.013 & b_{\text{down}} &= 0.970 \pm 0.013\end{aligned}$$

- Mögliche Fehler:

- Laserfrequenz steigt nicht linear mit Strom
- Etalon im Strahlengang verkippt

Auswertung: Vergleich mit theoretischen Werten

- Fit mit

$$\Delta\nu^{\text{theo}} = a + b \cdot \Delta\nu^{\text{exp}}$$

- Ergebnis

$$\begin{aligned}a_{\text{up}} &= (-0.01 \pm 0.04) \text{ GHz} & a_{\text{down}} &= (0.05 \pm 0.04) \text{ GHz} \\b_{\text{up}} &= 0.973 \pm 0.013 & b_{\text{down}} &= 0.970 \pm 0.013\end{aligned}$$

- Mögliche Fehler:

- Laserfrequenz steigt nicht linear mit Strom
 - Etalon im Strahlengang verkippt

Auswertung: Vergleich mit theoretischen Werten

- Fit mit

$$\Delta\nu^{\text{theo}} = a + b \cdot \Delta\nu^{\text{exp}}$$

- Ergebnis

$$\begin{aligned}a_{\text{up}} &= (-0.01 \pm 0.04) \text{ GHz} & a_{\text{down}} &= (0.05 \pm 0.04) \text{ GHz} \\b_{\text{up}} &= 0.973 \pm 0.013 & b_{\text{down}} &= 0.970 \pm 0.013\end{aligned}$$

- Mögliche Fehler:

- Laserfrequenz steigt nicht linear mit Strom
- Etalon im Strahlengang verkippt

Auswertung: Vergleich mit theoretischen Werten

- Fit mit

$$\Delta\nu^{\text{theo}} = a + b \cdot \Delta\nu^{\text{exp}}$$

- Ergebnis

$$\begin{aligned}a_{\text{up}} &= (-0.01 \pm 0.04) \text{ GHz} & a_{\text{down}} &= (0.05 \pm 0.04) \text{ GHz} \\b_{\text{up}} &= 0.973 \pm 0.013 & b_{\text{down}} &= 0.970 \pm 0.013\end{aligned}$$

- Mögliche Fehler:

- Laserfrequenz steigt nicht linear mit Strom
- Etalon im Strahlengang verkippt

Auswertung: Vergleich mit theoretischen Werten

- Fit mit

$$\Delta\nu^{\text{theo}} = a + b \cdot \Delta\nu^{\text{exp}}$$

- Ergebnis

$$\begin{aligned}a_{\text{up}} &= (-0.01 \pm 0.04) \text{ GHz} & a_{\text{down}} &= (0.05 \pm 0.04) \text{ GHz} \\b_{\text{up}} &= 0.973 \pm 0.013 & b_{\text{down}} &= 0.970 \pm 0.013\end{aligned}$$

- Mögliche Fehler:

- Laserfrequenz steigt nicht linear mit Strom
- Etalon im Strahlengang verkippt

Auswertung: Berechnung der Intervallkonstanten A

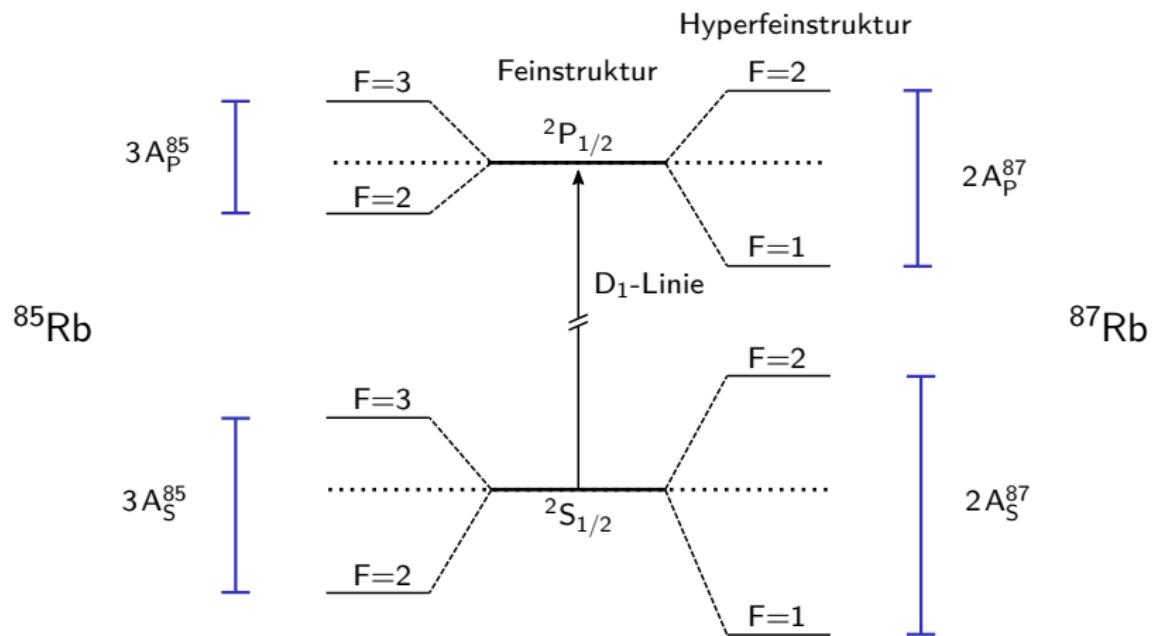


Abbildung 20: Hyperfeinstrukturaufspaltung der D_1 -Linie von ^{85}Rb und ^{87}Rb .

Auswertung: Berechnung der Intervallkonstanten A

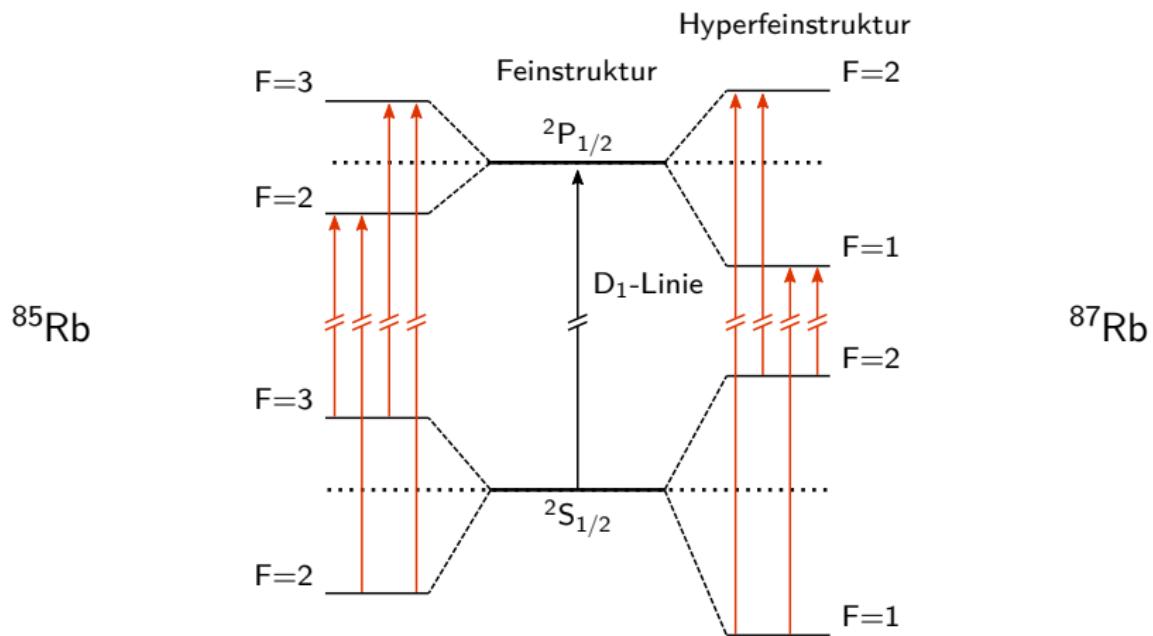


Abbildung 21: Hyperfeinstrukturaufspaltung der D_1 -Linie von ^{85}Rb und ^{87}Rb .

Auswertung: Berechnung der Intervallkonstanten A

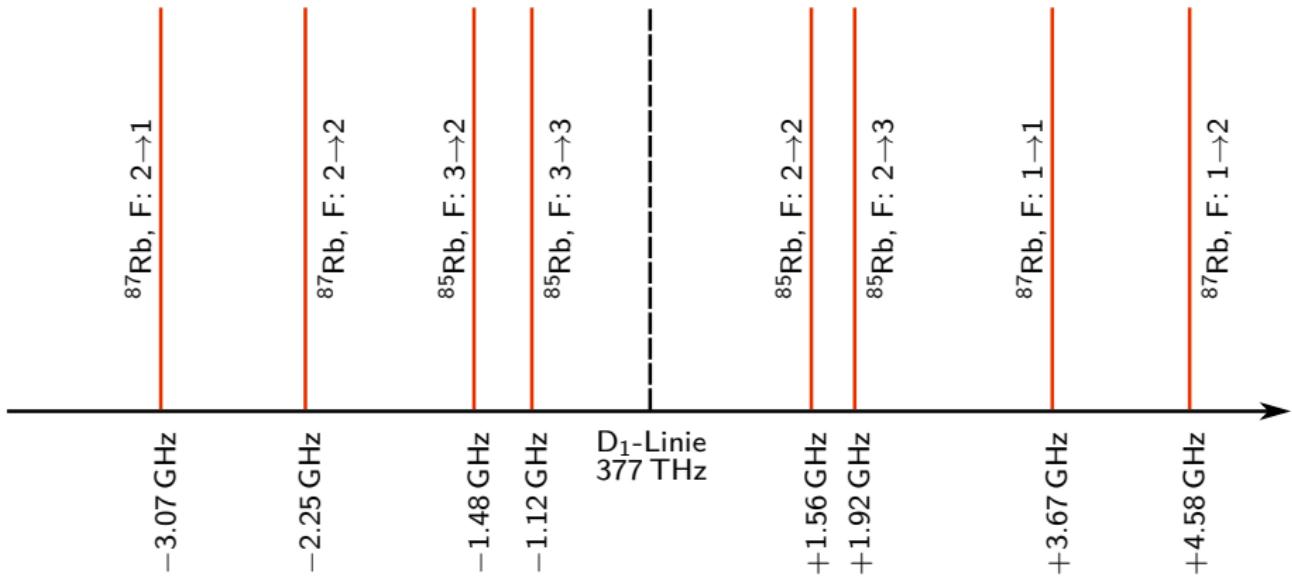


Abbildung 22: Spektrallinien der Hyperfeinstruktur von ^{85}Rb und ^{87}Rb .

Auswertung: Berechnung der Intervallkonstanten A

$$\begin{aligned}\Delta E &= \Delta v \cdot h = A(F+1) \\ \Rightarrow A &= \frac{\Delta v \cdot h}{F+1}\end{aligned}$$

Tabelle 1: Errechnete HFS-Intervallkonstanten A und Literaturwerte.

Isotop / Feinstruktur	$A^{\text{Lit.}} / \mu\text{eV}$	$A^{\text{exp}} / \mu\text{eV}$
$^{85}\text{Rb}: {}^2\text{S}_{1/2}$	4.185	4.47 ± 0.14
$^{87}\text{Rb}: {}^2\text{S}_{1/2}$	14.13	14.49 ± 0.14
$^{87}\text{Rb}: {}^2\text{P}_{1/2}$	1.692	1.61 ± 0.14

Allgemeine Grundlagen

Hyperfeinstrukturspektrum

Doppelresonanz

Grundlagen: Optisches Pumpen

Aufbau

Messung

Auswertung

Spinpräzession

Bestimmung der Relaxationszeit nach Dehmelt

Bestimmung der Relaxationszeit nach Franzen

Zeeman-Aufspaltung der Hyperfeinstruktur

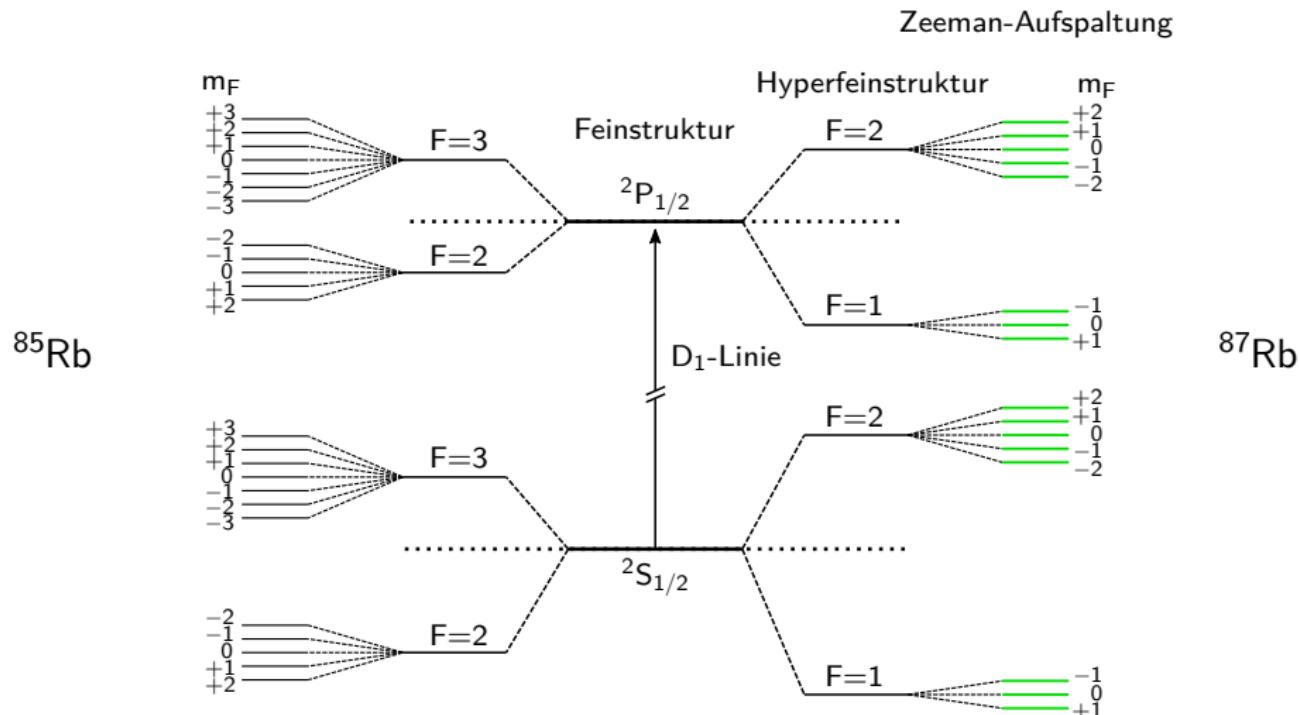


Abbildung 23: Zeeman-Aufspaltung der Hyperfeinstruktur von ^{85}Rb und ^{87}Rb .

Optisches Pumpen

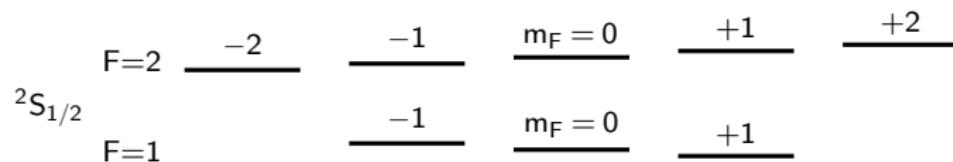
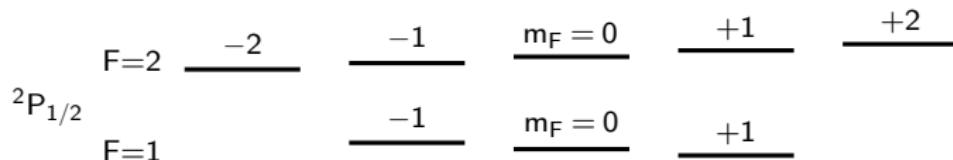


Abbildung 24: Zeeman-Pumpen von ^{87}Rb mit σ^+ -Licht.

Optisches Pumpen

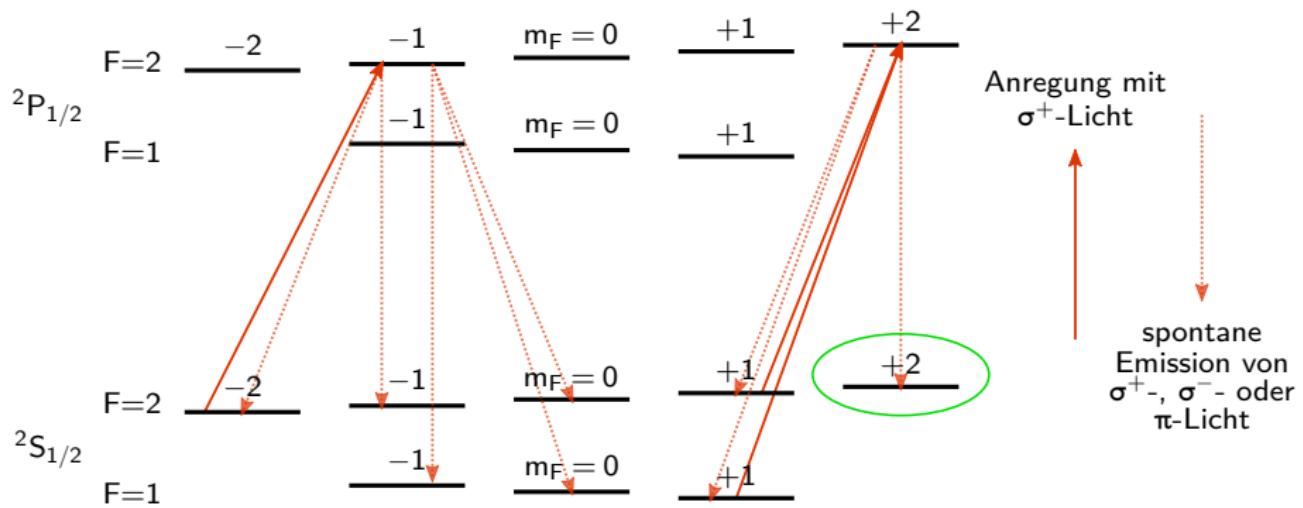


Abbildung 24: Zeeman-Pumpen von ^{87}Rb mit σ^+ -Licht.

Aufbau: Doppelresonanz

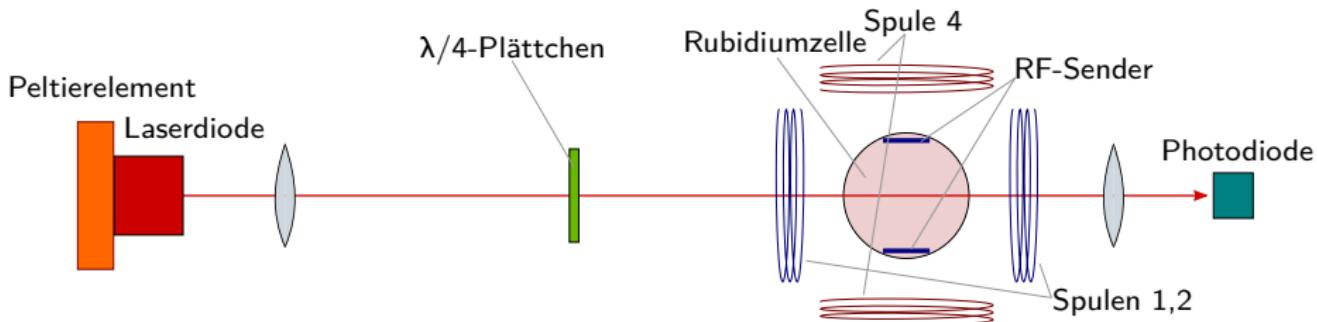


Abbildung 25: Aufbau zur Messung der Doppelresonanz.

- **$\lambda/4$ -Plättchen:** Erzeugung von zirkular polarisiertem Licht
- **Spule 1:** Einstellbarer Gleichstrom
- **Spule 2:** Sinusförmiger Strom
- **Spule 4:** Kompensation von vertikalem Erdmagnetfeld
- **RF-Sender:** Einstrahlung von elmag. Wechselfeld in die Messzelle

Messung: Doppelresonanz

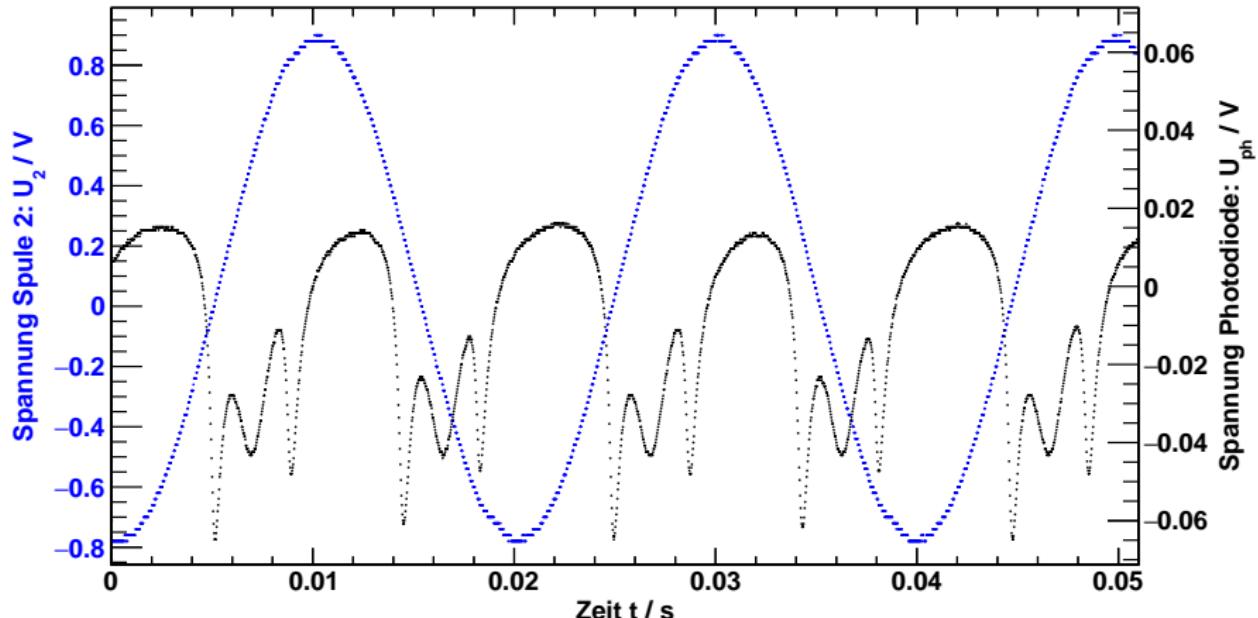


Abbildung 26: Doppelresonanz mit zusätzlichen Peaks.

Messung: Doppelresonanz

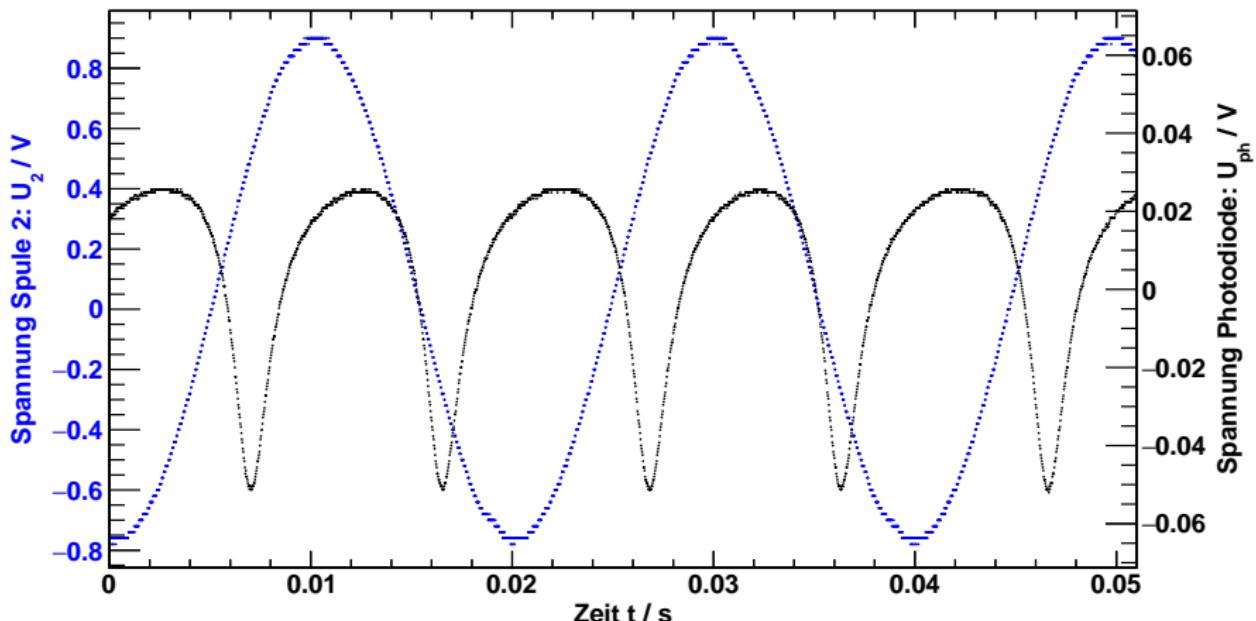


Abbildung 27: Peaks bei Messung ohne RF-Signal.

Messung: Doppelresonanz

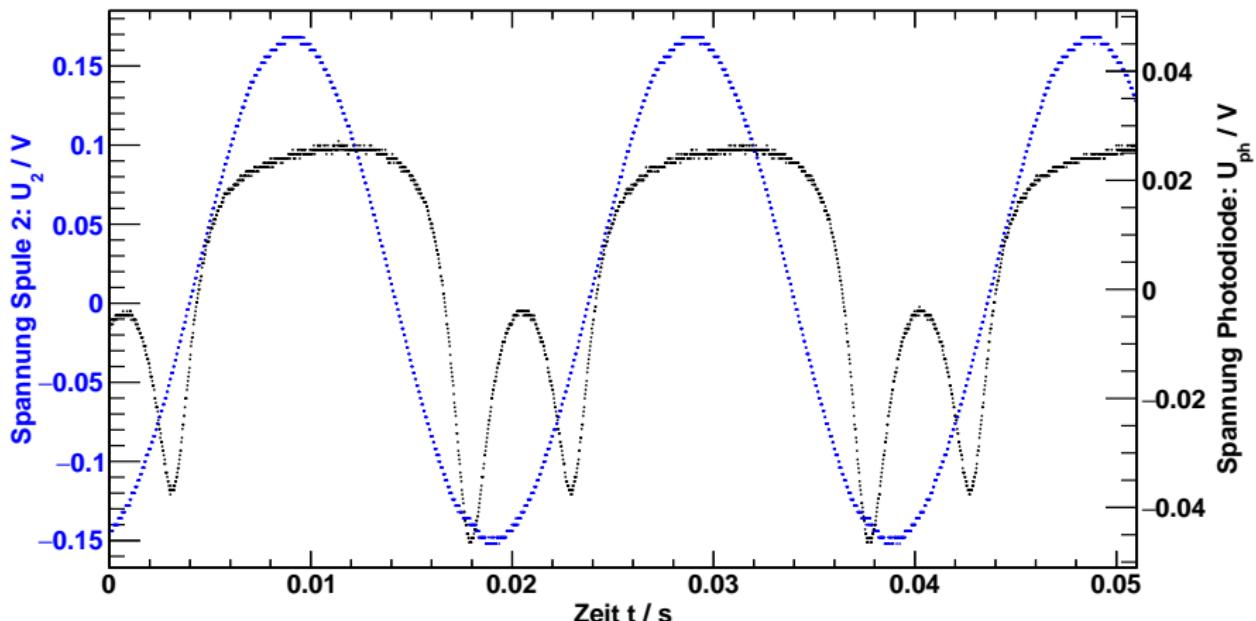


Abbildung 28: Asymmetrische Absorptionspeaks.

Messung: Doppelresonanz

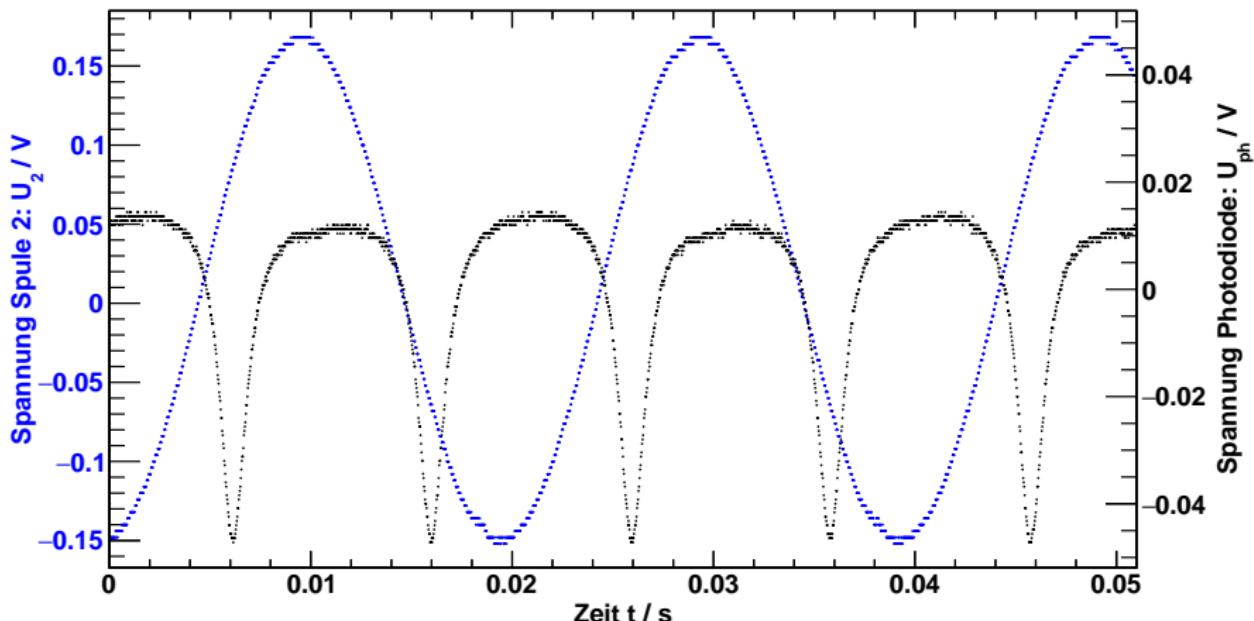


Abbildung 29: Passende Magnetfeldstärke: Symmetrische Absorptionspeaks.

Auswertung: Erdmagnetfeld und Kernspin

- Umrechnung Spulenstrom \leftrightarrow Magnetfeld
- Horizontales Magnetfeld

$$B_{\text{hor}} = \frac{1}{2} |B_1 - B'_1|$$

- Vertikales Magnetfeld

$$B_{\text{ver}} = B_4$$

- Magnetfeld zur Berechnung des Kernspins I

$$\begin{aligned} B_I &= \frac{B_1 + B'_1}{2} \\ \Rightarrow I &= \frac{\mu_B \cdot B_I}{h \cdot v} - \frac{1}{2} \end{aligned}$$

Auswertung: Erdmagnetfeld und Kernspin

- Umrechnung Spulenstrom \leftrightarrow Magnetfeld
- Horizontales Magnetfeld

$$B_{\text{hor}} = \frac{1}{2} |B_1 - B'_1|$$

- Vertikales Magnetfeld

$$B_{\text{ver}} = B_4$$

- Magnetfeld zur Berechnung des Kernspins I

$$\begin{aligned} B_I &= \frac{B_1 + B'_1}{2} \\ \Rightarrow I &= \frac{\mu_B \cdot B_I}{h \cdot v} - \frac{1}{2} \end{aligned}$$

Auswertung: Erdmagnetfeld und Kernspin

- Umrechnung Spulenstrom \leftrightarrow Magnetfeld
- Horizontales Magnetfeld

$$B_{\text{hor}} = \frac{1}{2} |B_1 - B'_1|$$

- Vertikales Magnetfeld

$$B_{\text{ver}} = B_4$$

- Magnetfeld zur Berechnung des Kernspins I

$$\begin{aligned} B_I &= \frac{B_1 + B'_1}{2} \\ \Rightarrow I &= \frac{\mu_B \cdot B_I}{h \cdot v} - \frac{1}{2} \end{aligned}$$

Auswertung: Erdmagnetfeld und Kernspin

- Umrechnung Spulenstrom \leftrightarrow Magnetfeld
- Horizontales Magnetfeld

$$B_{\text{hor}} = \frac{1}{2} |B_1 - B'_1|$$

- Vertikales Magnetfeld

$$B_{\text{ver}} = B_4$$

- Magnetfeld zur Berechnung des Kernspins I

$$\begin{aligned} B_I &= \frac{B_1 + B'_1}{2} \\ \Rightarrow I &= \frac{\mu_B \cdot B_I}{h \cdot v} - \frac{1}{2} \end{aligned}$$

Ergebnisse: Erdmagnetfeld und Kernspin

Tabelle 2: Doppelresonanz - Ergebnisse und Literaturwerte.

I_L / mA	ν / kHz	B_{hor} / μT	I
gew. Mittel ^{85}Rb	12.3 \pm 0.6	2.51 \pm 0.02	
gew. Mittel ^{87}Rb			1.527 \pm 0.016
Lit./theo. Wert ^{85}Rb	20.9	2.5	
Lit./theo. Wert ^{87}Rb			1.5

$$B_{\text{ver}} = (40.94 \pm 1.43) \mu\text{T}$$

$$B_{\text{ver}}^{\text{Lit.}} = 42.9 \mu\text{T}$$

Allgemeine Grundlagen

Hyperfeinstrukturspektrum

Doppelresonanz

Spinpräzession

Grundlagen

Aufbau

Auswertung

Bestimmung der Relaxationszeit nach Dehmelt

Bestimmung der Relaxationszeit nach Franzen

Grundlagen: Spinpräzession

- Polarisation von Atomen in Strahlrichtung durch optisches Pumpen in starkem Magnetfeld
- Nach Abschalten des Magnetfelds in Horizontalrichtung:
Kreiselbewegung der Spins um das Vertikalfeld B mit Frequenz f

$$f = \frac{g_F \cdot \mu_B}{h} \cdot B = \alpha \cdot B$$

$$\alpha = 4.665 \text{ kHz } \mu\text{T}^{-1}$$

Aufbau: Spinpräzession

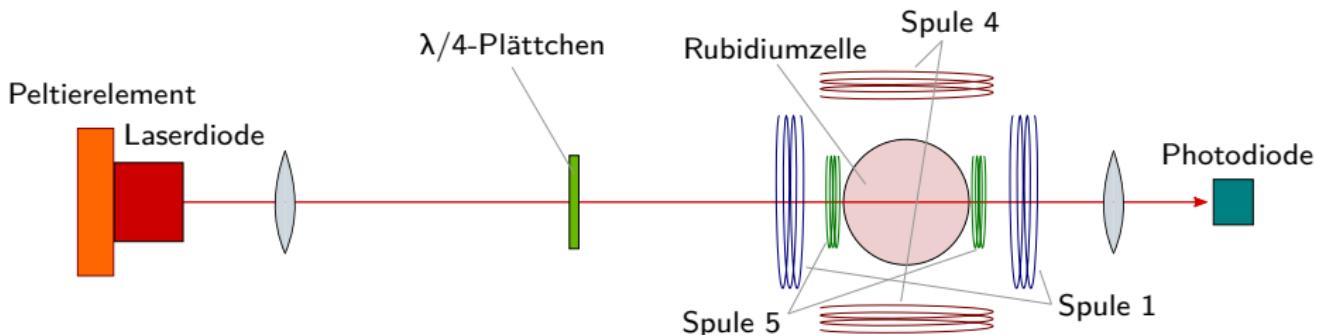


Abbildung 30: Aufbau zur Messung der Spinpräzession.

- **Spule 1:** Kompensation von horizontalem Erdmagnetfeld
- **Spule 4:** Teilweise Kompensation von vertikalem Erdmagnetfeld
- **Spule 5:** Ein- und Ausschalten von horizontalem Magnetfeld

Auswertung: Spinpräzession

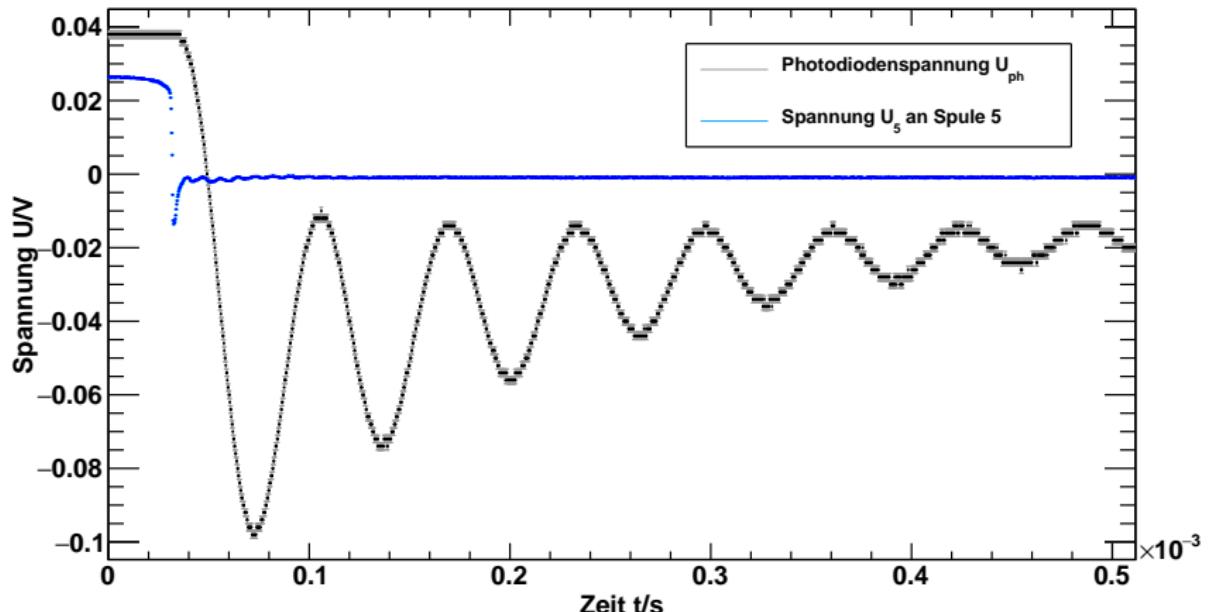


Abbildung 31: Spinpräzession im schwachen Magnetfeld.

Auswertung: Spinpräzession

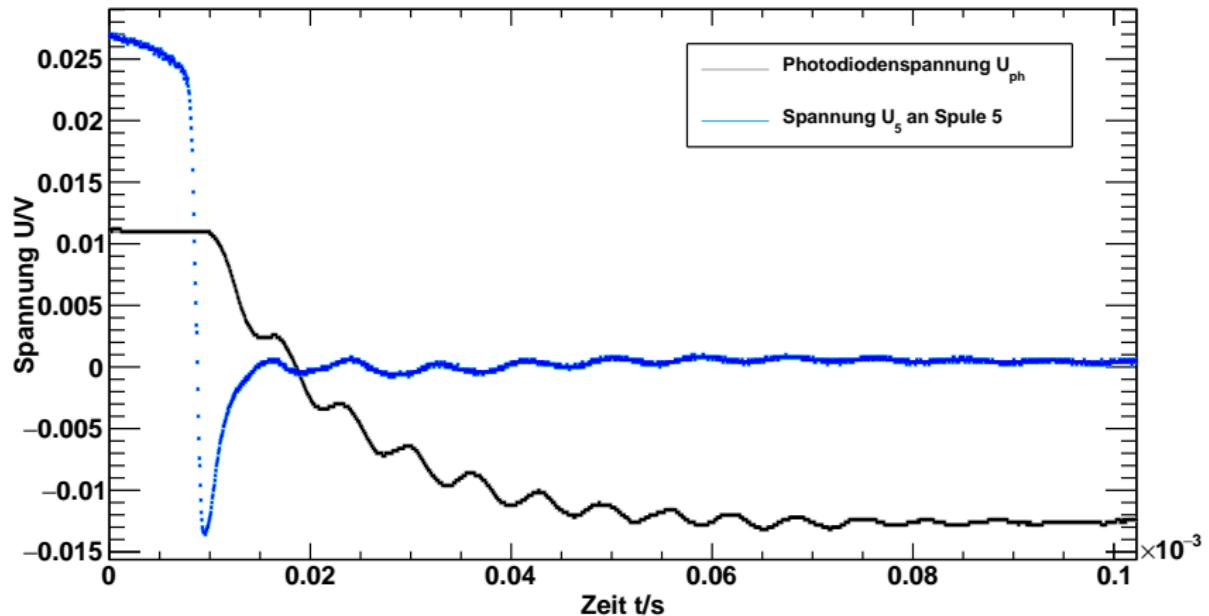


Abbildung 32: Spinpräzession im starken Magnetfeld.

Auswertung: Spinpräzession

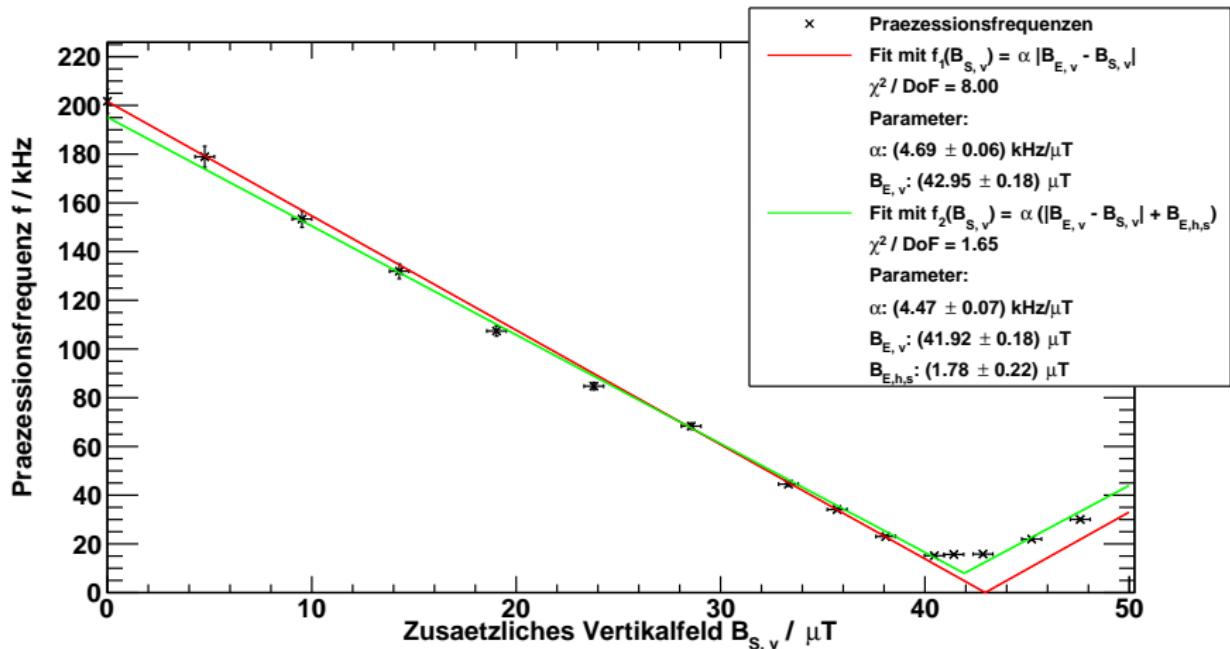


Abbildung 33: Magnetfeldabhängigkeit der Spinpräzessionsfrequenz.

Auswertung: Spinpräzession

Horizontalkomponente des Erdmagnetfelds war nicht vollständig kompensierbar → Berechnung der Winkelabweichung des Messaufbaus von der Nordrichtung

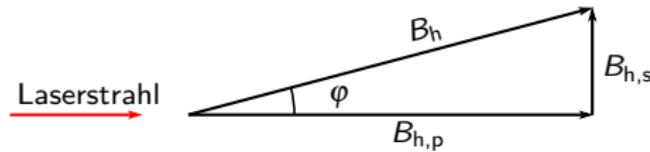


Abbildung 34: Horizontalkomponenten des Erdmagnetfelds senkrecht und parallel zur Strahlrichtung.

$$\varphi = \arctan \left(\frac{B_{h,s}}{B_{h,p}} \right) = (8.3 \pm 1.0)^\circ$$

Auswertung: Spinpräzession

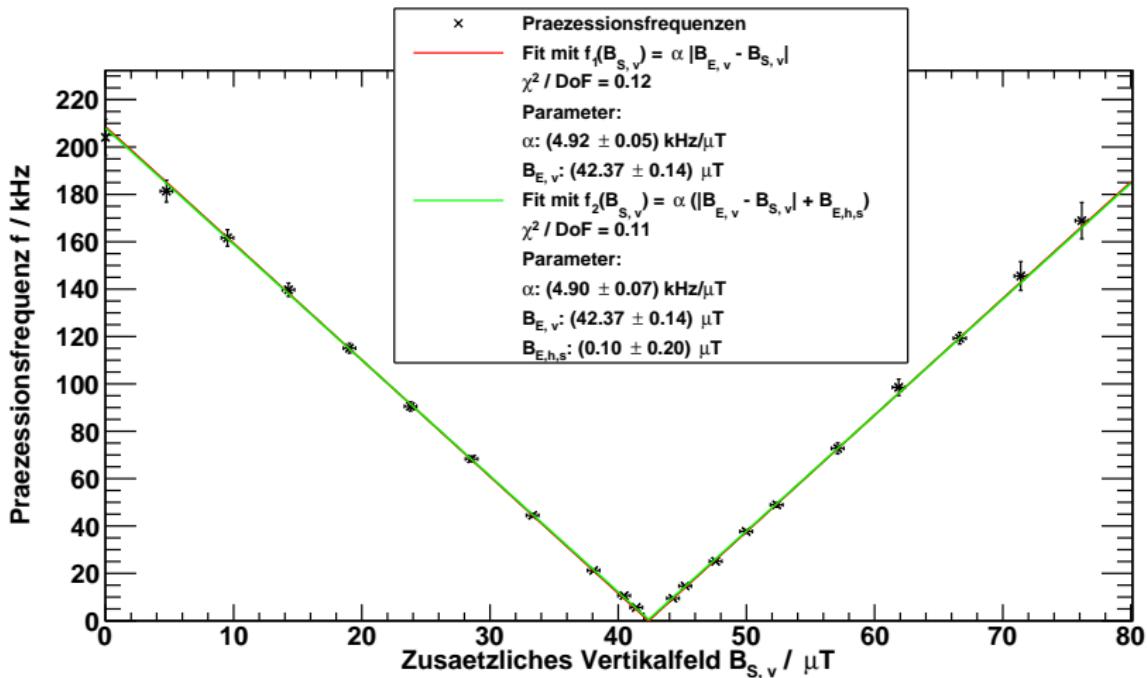


Abbildung 35: Magnetfeldabhängigkeit der Spinpräzessionsfrequenz nach Ausrichtung des Versuchsaufbaus nach Norden.

Auswertung: Spinpräzession

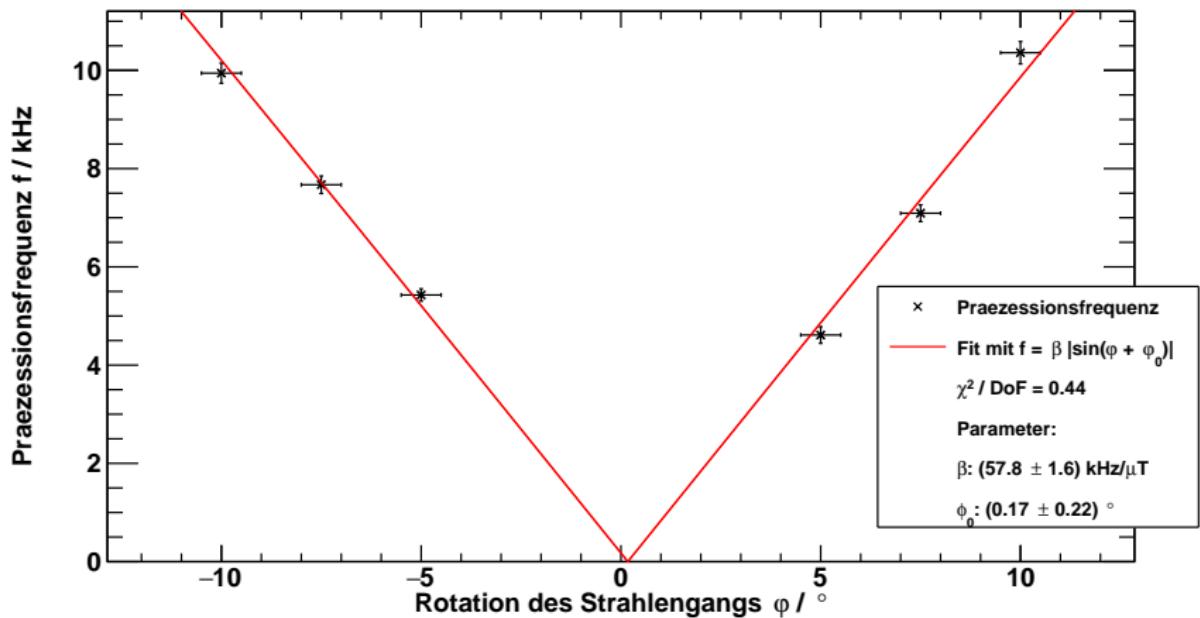


Abbildung 36: Winkelabhängigkeit der Spinpräzessionsfrequenz.

Ergebnis: Spinpräzession

- Zusammenhang zwischen Magnetfeld und Frequenz

$$\alpha^{\text{exp}} = 4.92 \pm 0.05 \text{ kHz } \mu\text{T}^{-1}$$

- Literaturwert

$$\alpha^{\text{theo}} = 4.665 \text{ kHz } \mu\text{T}^{-1}$$

- Abweichung durch Umrechnung von Spulenstrom in Magnetfeldstärke?

Allgemeine Grundlagen

Hyperfeinstrukturspektrum

Doppelresonanz

Spinpräzession

Bestimmung der Relaxationszeit nach Dehmelt

Grundlagen: Relaxationsprozesse

Aufbau

Auswertung

Bestimmung der Relaxationszeit nach Franzen

Grundlagen: Relaxationsprozesse beim optischen Pumpen

- Pumpzeit T_P

$$\left(\frac{dn}{dt} \right)_{\text{Pump}} = \frac{N - n}{T_P}$$

N : Anzahl der Atome in Ensemble, n : Differenz der Besetzungszahlen

- Relaxation durch
 - Wechselwirkung mit Wand der Messzelle
 - Stöße mit dem Puffergas
 - Spinaustausch zwischen Rubidiumatomen
- Relaxationszeit T_R

$$\left(\frac{dn}{dt} \right)_{\text{Relax}} = -\frac{n}{T_R}$$

Grundlagen: Relaxationsprozesse beim optischen Pumpen

- Pumpzeit T_P

$$\left(\frac{dn}{dt} \right)_{\text{Pump}} = \frac{N - n}{T_P}$$

N : Anzahl der Atome in Ensemble, n : Differenz der Besetzungszahlen

- Relaxation durch

- Wechselwirkung mit Wand der Messzelle
- Stöße mit dem Puffergas
- Spinaustausch zwischen Rubidiumatomen

- Relaxationszeit T_R

$$\left(\frac{dn}{dt} \right)_{\text{Relax}} = -\frac{n}{T_R}$$

Grundlagen: Relaxationsprozesse beim optischen Pumpen

- Pumpzeit T_P

$$\left(\frac{dn}{dt} \right)_{\text{Pump}} = \frac{N - n}{T_P}$$

N : Anzahl der Atome in Ensemble, n : Differenz der Besetzungszahlen

- Relaxation durch

- Wechselwirkung mit Wand der Messzelle
- Stöße mit dem Puffergas
- Spinaustausch zwischen Rubidiumatomen

- Relaxationszeit T_R

$$\left(\frac{dn}{dt} \right)_{\text{Relax}} = -\frac{n}{T_R}$$

Grundlagen: Relaxationsprozesse beim optischen Pumpen

- Pumpzeit T_P

$$\left(\frac{dn}{dt} \right)_{\text{Pump}} = \frac{N - n}{T_P}$$

N : Anzahl der Atome in Ensemble, n : Differenz der Besetzungszahlen

- Relaxation durch

- Wechselwirkung mit Wand der Messzelle
- Stöße mit dem Puffergas
- Spinaustausch zwischen Rubidiumatomen

- Relaxationszeit T_R

$$\left(\frac{dn}{dt} \right)_{\text{Relax}} = -\frac{n}{T_R}$$

Grundlagen: Relaxationsprozesse beim optischen Pumpen

- Pumpzeit T_P

$$\left(\frac{dn}{dt} \right)_{\text{Pump}} = \frac{N - n}{T_P}$$

N : Anzahl der Atome in Ensemble, n : Differenz der Besetzungszahlen

- Relaxation durch

- Wechselwirkung mit Wand der Messzelle
- Stöße mit dem Puffergas
- Spinaustausch zwischen Rubidiumatomen

- Relaxationszeit T_R

$$\left(\frac{dn}{dt} \right)_{\text{Relax}} = -\frac{n}{T_R}$$

Grundlagen: Relaxationsprozesse beim optischen Pumpen

- Pumpzeit T_P

$$\left(\frac{dn}{dt} \right)_{\text{Pump}} = \frac{N - n}{T_P}$$

N : Anzahl der Atome in Ensemble, n : Differenz der Besetzungszahlen

- Relaxation durch

- Wechselwirkung mit Wand der Messzelle
- Stöße mit dem Puffergas
- Spinaustausch zwischen Rubidiumatomen

- Relaxationszeit T_R

$$\left(\frac{dn}{dt} \right)_{\text{Relax}} = -\frac{n}{T_R}$$

Grundlagen: Relaxationsprozesse beim optischen Pumpen

- Orientierungsprozess

$$\left(\frac{dn}{dt} \right)_{\text{Orient}} = \left(\frac{dn}{dt} \right)_{\text{Pump}} + \left(\frac{dn}{dt} \right)_{\text{Relax}} = \frac{N}{T_P} - n \left(\frac{1}{T_P} + \frac{1}{T_R} \right)$$

- Orientierungszeit τ

$$\left(\frac{dn}{dt} \right)_{\text{Orient}} = \frac{N}{T_P} - \frac{n}{\tau} \Rightarrow n(t) = \frac{N\tau}{T_P} - C \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}, C > 0$$

$$\frac{1}{\tau} := \frac{1}{T_P} + \frac{1}{T_R}$$

- Pumpzeit T_P ist umgekehrt proportional zur Intensität I

$$\frac{1}{T_P} = \alpha / I$$

Grundlagen: Relaxationsprozesse beim optischen Pumpen

- Orientierungsprozess

$$\left(\frac{dn}{dt} \right)_{\text{Orient}} = \left(\frac{dn}{dt} \right)_{\text{Pump}} + \left(\frac{dn}{dt} \right)_{\text{Relax}} = \frac{N}{T_P} - n \left(\frac{1}{T_P} + \frac{1}{T_R} \right)$$

- Orientierungszeit τ

$$\left(\frac{dn}{dt} \right)_{\text{Orient}} = \frac{N}{T_P} - \frac{n}{\tau} \quad \Rightarrow \quad n(t) = \frac{N\tau}{T_P} - C \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad C > 0$$

$$\frac{1}{\tau} := \frac{1}{T_P} + \frac{1}{T_R}$$

- Pumpzeit T_P ist umgekehrt proportional zur Intensität I

$$\frac{1}{T_P} = \alpha / I$$

Grundlagen: Relaxationsprozesse beim optischen Pumpen

- Orientierungsprozess

$$\left(\frac{dn}{dt} \right)_{\text{Orient}} = \left(\frac{dn}{dt} \right)_{\text{Pump}} + \left(\frac{dn}{dt} \right)_{\text{Relax}} = \frac{N}{T_P} - n \left(\frac{1}{T_P} + \frac{1}{T_R} \right)$$

- Orientierungszeit τ

$$\left(\frac{dn}{dt} \right)_{\text{Orient}} = \frac{N}{T_P} - \frac{n}{\tau} \quad \Rightarrow \quad n(t) = \frac{N\tau}{T_P} - C \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad C > 0$$

$$\frac{1}{\tau} := \frac{1}{T_P} + \frac{1}{T_R}$$

- Pumpzeit T_P ist umgekehrt proportional zur Intensität I

$$\frac{1}{T_P} = \alpha I$$

Aufbau: Bestimmung der Relaxationszeit nach Dehmelt

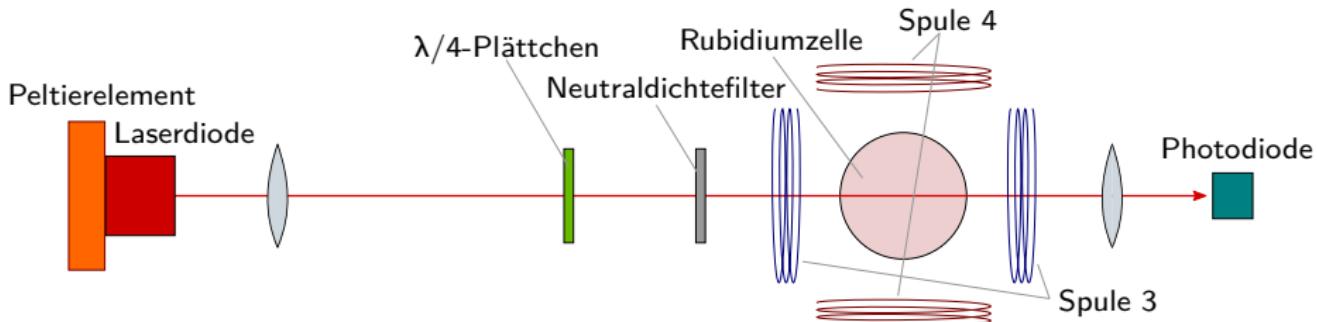


Abbildung 37: Aufbau zur Bestimmung der Relaxationszeit nach Dehmelt.

- **ND-Filter:** Abschwächung der Laserintensität um 60% bis 98%
- **Spule 3:** Rechteckiges Wechselfeld mit 50 Hz
- **Spule 4:** Kompensation von vertikalem Erdmagnetfeld

Optisches Pumpen

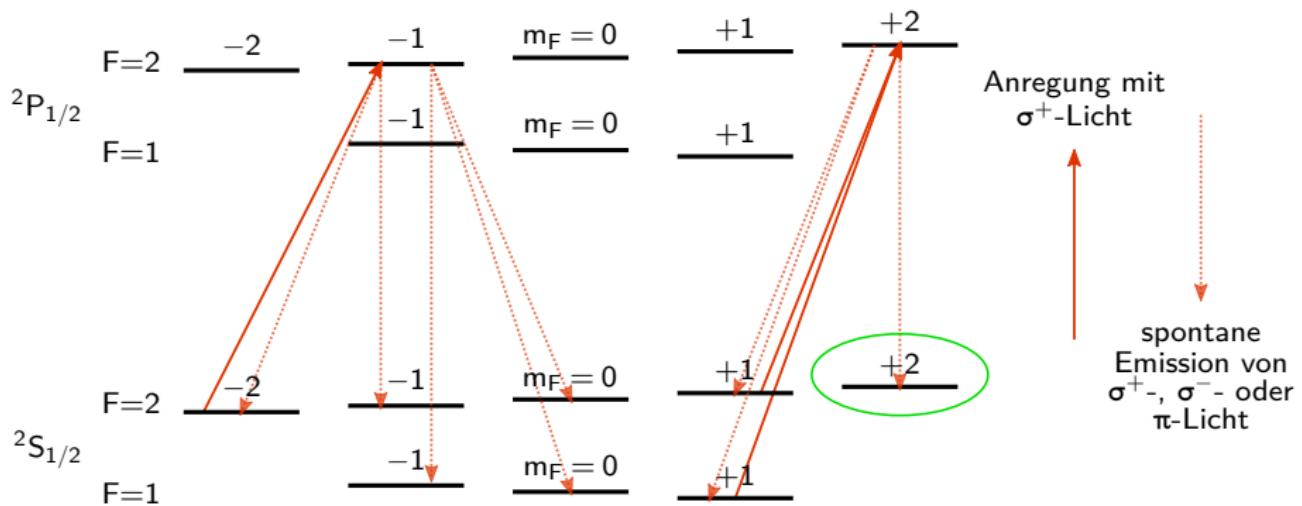


Abbildung 38: Zeeman-Pumpen von ^{85}Rb mit σ^+ -Licht.

Auswertung: Bestimmung der Orientierungszeit

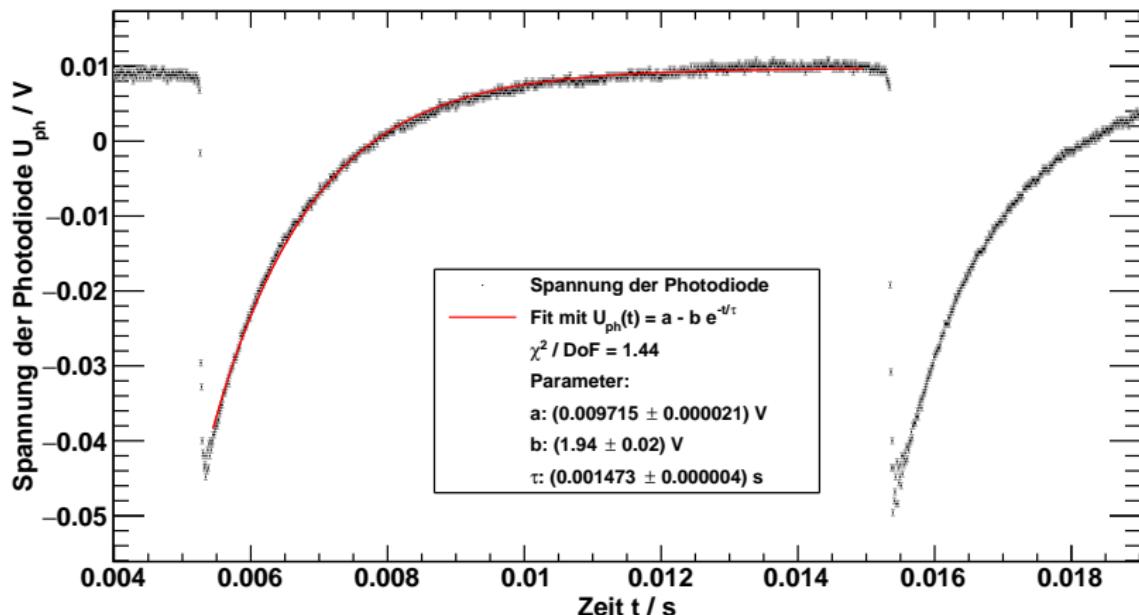


Abbildung 39: Transmission nach Umpolung des horizontalen Magnetfeldes.

Auswertung: Bestimmung der Orientierungszeit

- Fit mit

$$U_{\text{ph}}(t) = a - b \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$$

- Auftragen von $\tau(I)^{-1}$ gegen rel. Intensität I
- Fit der inversen Orientierungszeiten $\tau(I)^{-1}$ mit

$$\frac{1}{\tau(I)} = \alpha I + \frac{1}{T_{R_D}}$$

Auswertung: Bestimmung der Orientierungszeit

- Fit mit

$$U_{\text{ph}}(t) = a - b \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$$

- Auftragen von $\tau(I)^{-1}$ gegen rel. Intensität I
- Fit der inversen Orientierungszeiten $\tau(I)^{-1}$ mit

$$\frac{1}{\tau(I)} = \alpha I + \frac{1}{T_{R_D}}$$

Auswertung: Bestimmung der Orientierungszeit

- Fit mit

$$U_{\text{ph}}(t) = a - b \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$$

- Auftragen von $\tau(I)^{-1}$ gegen rel. Intensität I
- Fit der inversen Orientierungszeiten $\tau(I)^{-1}$ mit

$$\frac{1}{\tau(I)} = \alpha I + \frac{1}{T_{R_D}}$$

Auswertung: Extrapolation auf keine Intensität

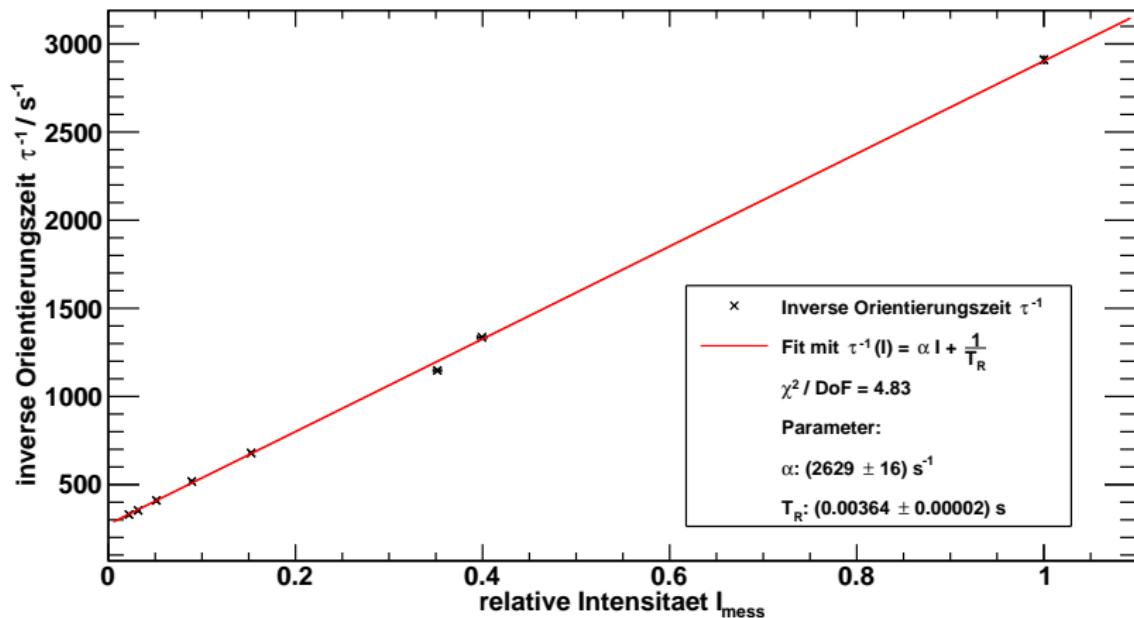


Abbildung 40: Bestimmung der Relaxationszeit T_{R_D} mit Achsenabschnitt.

Ergebnis: Bestimmung der Relaxationszeit nach Dehmelt

- Relaxationszeit

$$T_{R_D} = 3.64 \pm 0.02 \text{ ms}$$

- Literaturwert

$$T_R^{\text{Lit.}} = 6.5 \text{ ms}$$

- Mögliche Fehlerquellen

- Andere Relaxationsmechanismen
- Abhängig von vielen Parametern (Laserspannung, Temperatur, ...)

Ergebnis: Bestimmung der Relaxationszeit nach Dehmelt

- Relaxationszeit

$$T_{R_D} = 3.64 \pm 0.02 \text{ ms}$$

- Literaturwert

$$T_R^{\text{Lit.}} = 6.5 \text{ ms}$$

- Mögliche Fehlerquellen

- Andere Relaxationsmechanismen
 - Abhängig von vielen Parametern (Laserspannung, Temperatur, ...)

Ergebnis: Bestimmung der Relaxationszeit nach Dehmelt

- Relaxationszeit

$$T_{R_D} = 3.64 \pm 0.02 \text{ ms}$$

- Literaturwert

$$T_R^{\text{Lit.}} = 6.5 \text{ ms}$$

- Mögliche Fehlerquellen

- Andere Relaxationsmechanismen
- Abhängig von vielen Parametern (Laserspannung, Temperatur, ...)

Ergebnis: Bestimmung der Relaxationszeit nach Dehmelt

- Relaxationszeit

$$T_{R_D} = 3.64 \pm 0.02 \text{ ms}$$

- Literaturwert

$$T_R^{\text{Lit.}} = 6.5 \text{ ms}$$

- Mögliche Fehlerquellen

- Andere Relaxationsmechanismen
- Abhängig von vielen Parametern (Laserspannung, Temperatur, ...)

Ergebnis: Bestimmung der Relaxationszeit nach Dehmelt

- Relaxationszeit

$$T_{R_D} = 3.64 \pm 0.02 \text{ ms}$$

- Literaturwert

$$T_R^{\text{Lit.}} = 6.5 \text{ ms}$$

- Mögliche Fehlerquellen

- Andere Relaxationsmechanismen
- Abhängig von vielen Parametern (Laserspannung, Temperatur, ...)

Allgemeine Grundlagen

Hyperfeinstrukturspektrum

Doppelresonanz

Spinpräzession

Bestimmung der Relaxationszeit nach Dehmelt

Bestimmung der Relaxationszeit nach Franzen

Grundlagen

Aufbau

Auswertung

Grundlagen: Bestimmung der Relaxationszeit nach Franzen

Polarisation
des Rubidiums

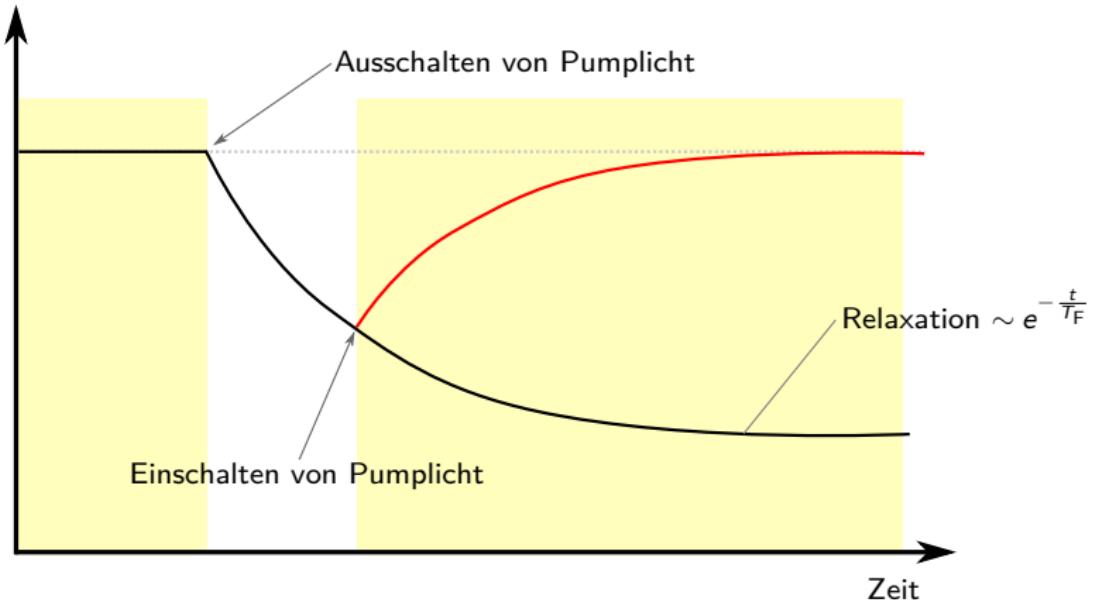


Abbildung 41: Theoretischer Verlauf der Polarisation/Transmission bei der Messmethode nach Franzen.

Grundlagen: Bestimmung der Relaxationszeit nach Franzen

Polarisation
des Rubidiums

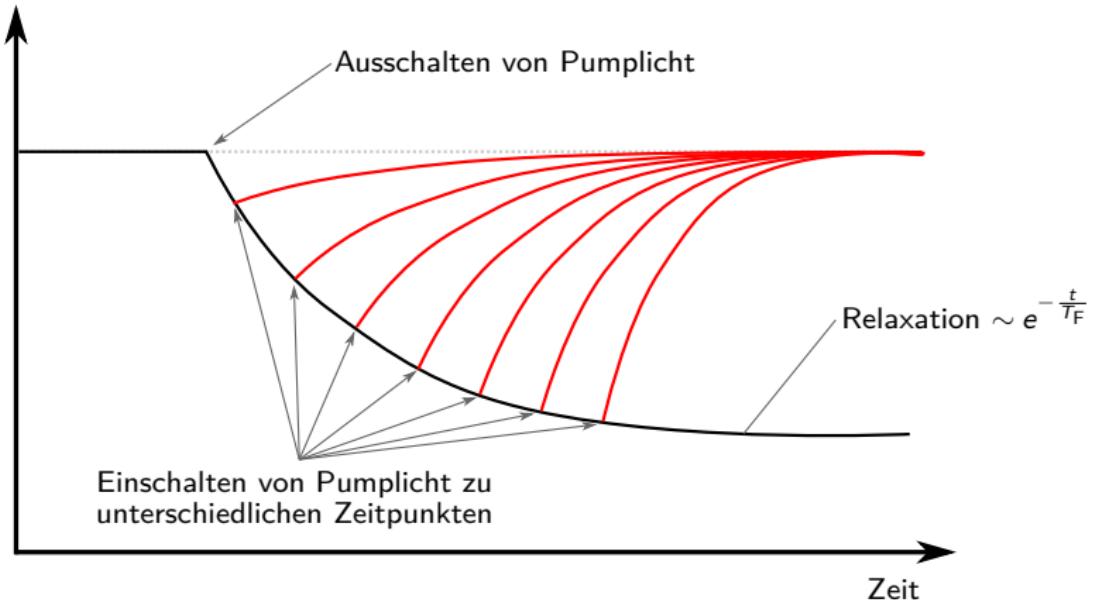


Abbildung 41: Theoretischer Verlauf der Polarisation/Transmission bei der Messmethode nach Franzen.

Aufbau: Bestimmung der Relaxationszeit nach Franzen

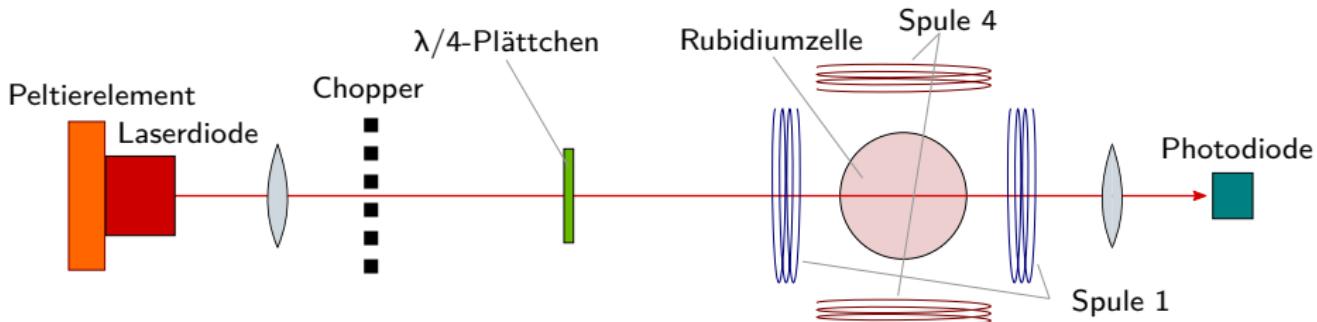


Abbildung 42: Aufbau zur Bestimmung der Relaxationszeit nach Franzen.

- **Chopper:** Periodische Unterbrechung des Laserlichts
- **Spule 1:** Kompensation von horizontalem Erdmagnetfeld
- **Spule 4:** Kompensation von vertikalem Erdmagnetfeld

Auswertung: Bestimmung der Relaxationszeit nach Franzen

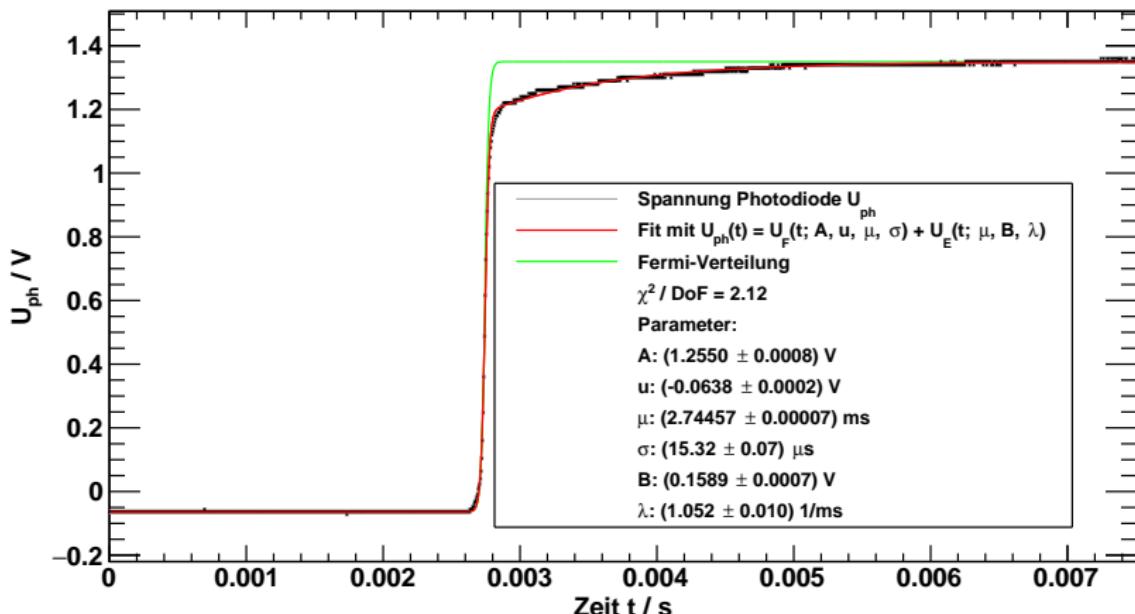


Abbildung 43: Transmission der Messzelle nach Öffnung des Strahlengangs.

Auswertung: Bestimmung der Relaxationszeit nach Franzen

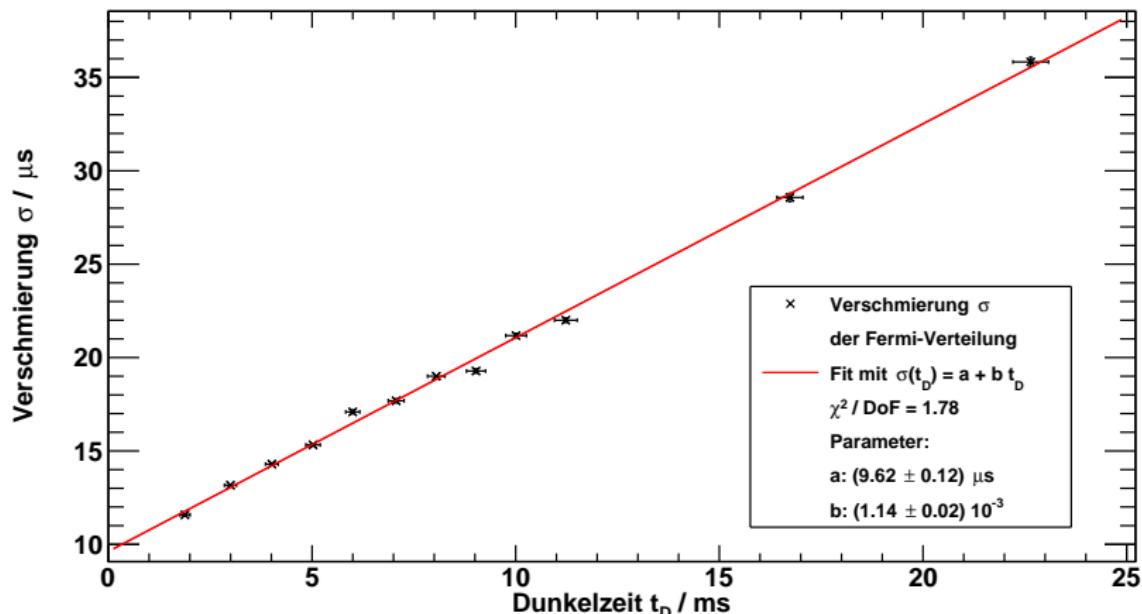


Abbildung 44: Abrundung σ der gefitteten Fermi-Funktionen.

Auswertung: Bestimmung der Relaxationszeit nach Franzen

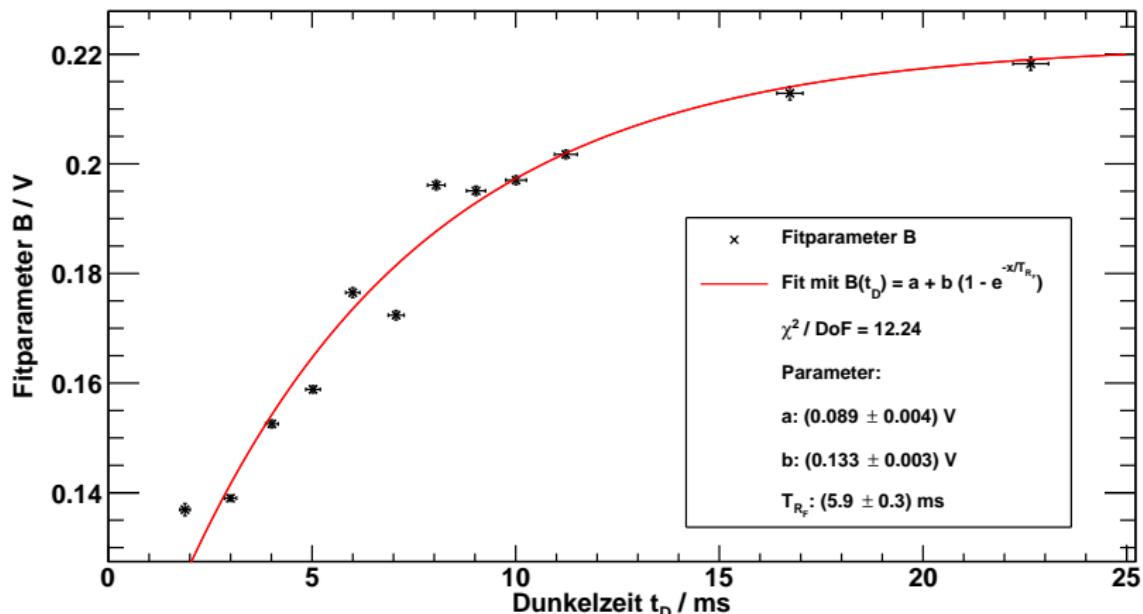


Abbildung 45: Startwerte der gefitteten Exponentialfunktionen.

Ergebnis: Bestimmung der Relaxationszeit nach Franzen

- Relaxationszeit

$$T_{RF} = 5.9 \pm 0.3 \text{ ms}$$

- Literaturwert

$$T_R^{\text{Lit.}} = 6.5 \text{ ms}$$

Quellen

- Baur, C. *Einrichtung des Versuches “Optisches Pumpen mit Laserdioden”*; Zulassungsarbeit. Freiburg, 1997
- Köhli, M. *Versuchsanleitung, Fortgeschrittenenpraktikum Teil II: Optisches Pumpen*. Institut für Mathematik und Physik, Albert-Ludwigs-Universität, Freiburg im Breisgau, 2011.

