

Optisches Pumpen: Beobachtung des Pumpsignals

Versuchsziel

- Beobachtung des Pumpsignals bei schneller Umpolung des Zeeman-Magnetfeldes.

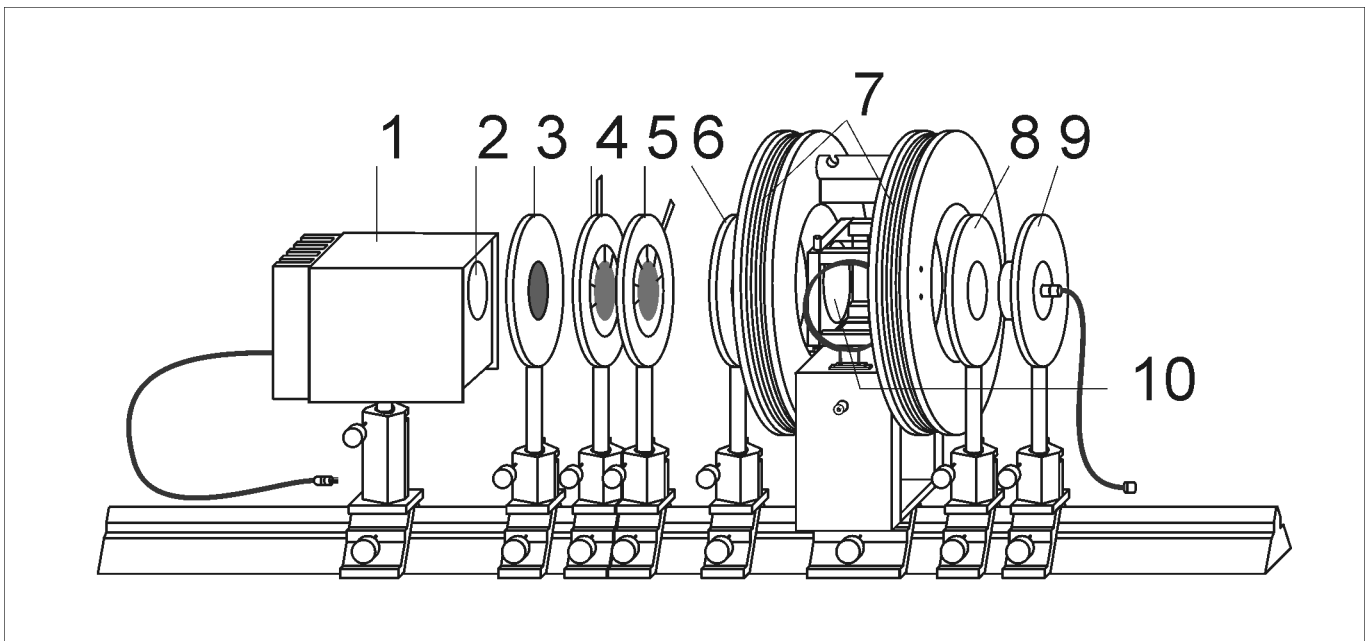


Fig. 1: optische und magnetische Komponenten des Versuchs Optisches Pumpen

- | | | | |
|---|--------------------------------------|----|---|
| 1 | Rubidium-Hochfrequenz-Leuchte | 6 | Linse auf Messing-Stiel, $f = + 100$ mm |
| 2 | Linse, $f = + 50$ mm | 7 | Helmholtz-Spulenpaar |
| 3 | Linienfilter, 795 nm | 8 | Linse auf Messing-Stiel, $f = + 50$ mm |
| 4 | Polarisationsfilter für Rotstrahlung | 9 | Silizium-Photodetektor |
| 5 | Viertelwellenlängen-Platte, 200 nm | 10 | Absorptionskammer mit Rubidium-Absorptionszelle |

Grundlagen

Optisches Pumpen [1,2,3] ermöglicht die Spektroskopie von atomaren Energiezuständen in einem Energiebereich, der der direkten optischen Beobachtung nicht zugänglich ist.

In schwachen Magnetfeldern sind die Besetzungszahldifferenzen zwischen den Zeeman-Niveaus im Grundzustand von ^{87}Rb verschwindend gering, da der Energieabstand zwischen diesen Niveaus weniger als 10^{-8} eV beträgt. Durch Optisches Pumpen wird eine von der thermischen Gleichgewichtsbesetzung stark abweichende Besetzung erzielt. Dazu wird Rubidiumdampf in einer Absorptionszelle mit der zirkular polarisierten Komponente des D_1 -Lichts aus einer Rubidiumlampe bestrahlt. Die Besetzung der Zeeman-Niveaus richtet sich nach der Polarität des einfallenden Lichts. Bei Einstrahlung eines hochfrequenten magnetischen Wechselfeldes beobach-

tet man die Änderung der Transparenz des Rubidiumdampfes für Rubidium- D_1 -Licht.

Als Pumplicht-Quelle dient eine Rubidium-Hochfrequenz-Leuchte. In einer Glasampulle werden Rubidiumatome im elektromagnetischen Feld eines HF-Senders angeregt.

Die Kombination aus einem Interferenzfilter, einem Polarisationsfilter und einer Viertelwellenlängen-Platte separiert die gewünschte zirkular polarisierte Komponente der D_1 -Linie aus dem Emissionsspektrum der Lichtquelle. Abhängig von der Stellung der Viertelwellenlängen-Platte entsteht σ^+ - oder σ^- -Polarisation.

Ein System konvexer Linsen fokussiert das Pumplicht auf die Mitte einer ebenfalls mit Rubidiumdampf gefüllten Absorptionzelle und den transmittierten Anteil des Pumplichts auf einen Photodetektor (vgl. Fig. 4).

Das Zeeman-Magnetfeld wird mit Helmholtz-Spulen erzeugt. Je nach Vorzeichen des Spulenstroms verlaufen die Feldlinien parallel oder antiparallel zur optischen Einstrahlung.

Rubidium hat wie alle Alkalimetalle im Grundzustand einen Gesamtspin der Elektronenhülle mit der Quantenzahl $J = \frac{1}{2}$. Der Grundzustand spaltet daher in zwei Hyperfeinzustände mit den Gesamtdrehimpulsen $F = I + \frac{1}{2}$ und $F = I - \frac{1}{2}$ auf.

In einem Magnetfeld spalten die Hyperfeinzustände in jeweils $2F+1$ Zeeman-Niveaus mit den magnetischen Quantenzahlen $m_F = -F, \dots, F$ auf. Fig. 2 zeigt als Beispiel das Niveauschema von ^{87}Rb .

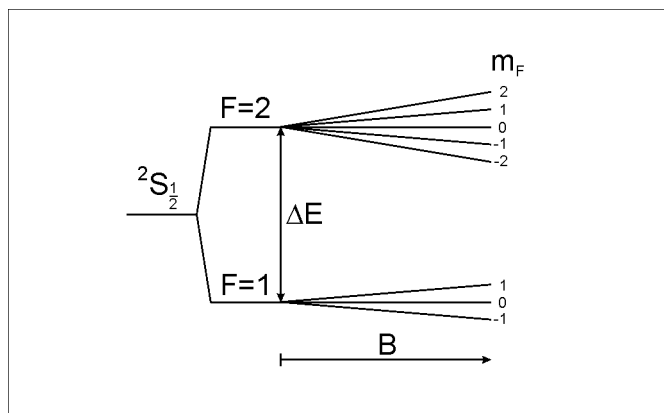


Fig. 2 Schema der Zeeman-Niveaus im Grundzustand von ^{87}Rb . Hyperfeinaufspaltung ΔE und Zeeman-Aufspaltung sind nicht maßstabgetreu gezeichnet.

Die Energie E der Zeeman-Niveaus kann man bei den hier verwendeten Magnetfeldern mit der Breit-Rabi-Formel [4,5] berechnen:

Für $F = I \pm \frac{1}{2}$ ist

$$E(F, m_F) = -\frac{\Delta E}{2(2I+1)} + \mu_K g_I B m_F \pm \frac{\Delta E}{2} \left(1 + \frac{4m_F}{2I+1} \xi + \xi^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad \text{mit}$$

$$\xi = \frac{g_J \mu_B - g_I \mu_K}{\Delta E} B \quad (I)$$

F : Gesamtdrehimpuls

I : Kernspin

J : Drehimpuls der Elektronenhülle

m_F : magnetische Quantenzahl zum Gesamtdrehimpuls F

g_I : g-Faktor des Kerns

g_J : g-Faktor der Elektronenhülle

ΔE : Hyperfeinstrukturabstand

μ_B : Bohrsches Magneton

μ_K : Kernmagneton

B : magnetische Flußdichte

Bei Einstrahlung von σ^+ -Pumplicht reichern sich innerhalb eines Hyperfeinzustandes die Zeeman-Niveaus mit positiven Quantenzahlen m_F auf Kosten der Niveaus mit negativen Quantenzahlen an. Im Grundzustand von ^{87}Rb z.B. wird das Niveau mit $F = 2$, $m_F = +F$ am stärksten besetzt. Man erhält also eine Abweichung der Besetzung von der thermischen Besetzung.

Mit σ^- -Pumplicht reichern sich die Zeeman-Niveaus mit negativen Quantenzahlen an. Im Grundzustand von ^{87}Rb wird hier das Niveau mit $F = 2$, $m_F = -F$ am stärksten besetzt.

Bei einer Änderung der Polarisation von σ^+ nach σ^- werden Übergänge zwischen den Zeeman-Niveaus mit $\Delta m_F = -1$ ermöglicht. Während dieser Umbesetzung der Zeeman-Niveaus ändert sich die Transparenz des Rubidiumdampfes.

Experimentell erreicht man eine Änderung der Polarisation des Pumplichts am einfachsten durch eine Richtungsumschaltung des Magnetfeldes. Hierfür wird die Richtung des Helmholtz-Spulenstroms mit einem Schalter umgepolt.

Zur Bestimmung der Transparenzänderung wird die Intensität des transmittierten Lichts mit einem Silizium-Photodetektor gemessen. Ein Strom/Spannungs-Konverter verstärkt dessen Ausgangssignal. Aufgezeichnet wird die transmittierte Intensität in Abhängigkeit von der Zeit.

Sicherheitshinweise

Schutz von Personen

Verbrühungsgefahr: Aus schlecht befestigten oder schadhafte Wasserschläuchen zwischen Umwälzthermostat und Absorptionskammer kann heißes Wasser austreten:

- nur Silikonschläuche mit dem angegebenen Schlauchdurchmesser verwenden.
- Schläuche in die Halterung zwischen den Helmholtz-Spulen klemmen und gegen Verrutschen sichern

Schutz der Apparatur

Die Absorptionskammer ist aus Acrylglas gefertigt und kann thermisch zerstört werden.

- nur destilliertes Wasser in die Absorptionskammer füllen.
- Absorptionskammer höchstens bis 80°C heizen.
- niemals die Absorptionskammer mit Lösungsmitteln reinigen

Wenn die Helmholtz-Spulenkörper verformt werden, ist die Homogenität des Helmholtz-Feldes beeinträchtigt.

- Helmholtz-Spulen vor Schlag oder Stoß schützen.

Der HF-Sender in der Rubidium-Hochfrequenz-Leuchte kann durch zu hohe Spannung zerstört werden:

- Rubidium-Hochfrequenz-Leuchte nur mit dem Versorgungsgerät zum Optischen Pumpen betreiben.

optimaler Versuchsablauf

Der experimentelle Aufbau ist empfindlich gegen störende Magnetfelder:

- sämtliche Netz-, Versorgungs- und Nachweisgeräte möglichst weit entfernt vom Versuchsaufbau aufstellen.
- ferromagnetische Materialien oder Geräte, die Magnetfelder erzeugen, aus der Nähe des Versuchsaufbaus entfernen.
- nur Linsen auf Messing-Stiel (460 021 u. 460 031) verwenden

Bei Raumbelichtung kann das Nachweissignal am Silizium-Photodetektor durch Netzfrequenz überlagert werden. Fremdlicht erhöht den Gleichstromanteil des Photodetektor-Signals unnötig:

- elektrische Raumbelichtung ausschalten.
- Einstreuung von Fremdlicht vermeiden.
- Experimentierraum verdunkeln.
- spiegelnde Seite des Linienfilters zur Rubidium-Hochfrequenz-Leuchte drehen.

Die Durchflußrichtung des Heizwassers in der Absorptionskammer ist konstruktiv vorgegeben:

- Wasser-Zulauf und -Ablauf nicht verwechseln.

Hochfrequenz stört spannungsempfindliche Messgeräte:

- Rubidium-Hochfrequenz-Leuchte nur zusammengebaut betreiben.

Geräte

1	Rubidium-Hochfrequenz-Leuchte.....	558 823
1	Paar Helmholtz-Spulen auf Stativreiter	558 826
1	Absorptionskammer mit Rubidium-Absorptionszelle.....	558 833
1	Silizium-Photodetektor	558 835
1	I/U-Konverter zum Silizium-Photodetektor	558 836
1	Versorgungsgerät zum Optischen Pumpen	558 814
1	DC-Netzgerät, 0...±15 V	521 45
1	Umwälzthermostat, +30°C bis +100°C.....	6 66 768
1	Digital-Speicheroszilloskop, z.B.	575 294
1	Steckernetzgerät, 9,2V-, stabilisiert.....	530 88
1	Digital-Analog Multimeter MetraHit24S	531 281
1	Wechselschalter.....	504 48
1	Optische Bank mit Normalprofil, 1m	460 32
1	Linienfilter, 795 nm.....	468 000
1	Polarisationsfilter für Rotstrahlung	472 410
1	Viertelwellenlängen-Platte, 200 nm.....	472 611
1	Linse auf Messing-Stiel, f = +50 mm	460 021
1	Linse auf Messing-Stiel, f = +100 mm	460 031
6	Optische Reiter 60/34	460 370
1	Optischer Reiter 95/50	460 374
2	Silikonschläuche, 1 m lang, 6,0x2,0 ... LN-Nr. 20066843	
4	Experimentierkabel, schwarz 50 cm.....	501 28
2	Experimentierkabel, schwarz 200 cm.....	501 38
2	HF-Kabel, 1 m.....	501 02

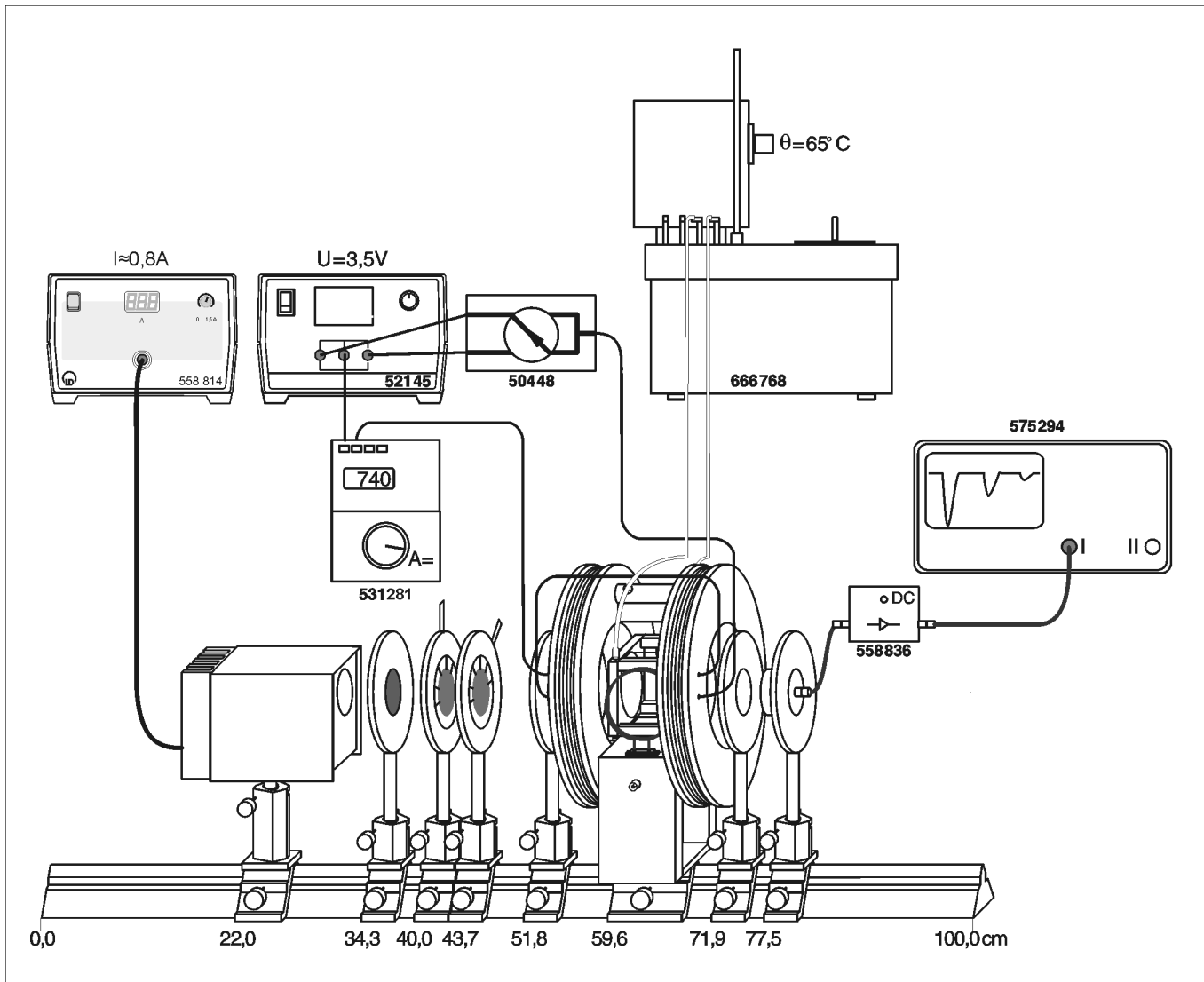


Fig.3: Übersicht über den gesamten experimentellen Aufbau mit Positionsangabe für den linken Rand der optischen Reiter.

Aufbau

Optischer und elektrischer Aufbau

- optische und magnetische Komponenten gemäß Fig. 1 und Fig. 3 auf der optischen Bank mit Normalprofil (460 32) montieren.
- Rubidium-Hochfrequenz-Leuchte mit dem Versorgungsgerät Optisches Pumpen (558 814) verbinden.
- Helmholtz-Spulen und Vielfachmeßgerät (531 281) in Reihenschaltung an das Netzgerät (521 45) schließen.
- Wechselschalter (504 48) zur bequemen Umpolung des Magnetfelds einsetzen.
- Photodetektor-Ausgang über den I/U-Konverter (558 836) in Kanal I des Oszilloskops (575 294) speisen.

Thermische Inbetriebnahme

- Mit Silikonschläuchen einen Heizwasser-Kreislauf zwischen Absorptionskammer und Umwälzthermostat (666 768) herstellen (vgl. Fig.3).
- Umwälzthermostat einschalten und Solltemperatur θ auf 65°C einstellen.

- Versorgungsgerät Optisches Pumpen einschalten und Betriebsstrom auf ca. 0,8 A einstellen (s. Gebrauchsanweisung zu Rubidium-Hochfrequenz-Leuchte 558 823).
- stabilisiertes Netzgerät einschalten.
- mindestens 15 min bis zum Erreichen der Betriebstemperatur warten.

Falls die Lichtausbeute der Rubidium-HF-Leuchte instabil ist:

- Betriebsstrom um ca. 0,1 A erhöhen.

Optische Vorjustierung

- Optik-Reiter mit Linienfilter, Polarisationsfilter und Viertelwellenlängen-Platte von der optischen Bank entfernen.
- Absorptionskammer aus dem Stativ der Helmholtz-Spulen nehmen.
- weißes Blatt Papier an die Stelle der Absorptionszelle in die Mitte zwischen den Helmholtz-Spulen halten.
- Linse (6) und Rubidium-Hochfrequenz-Leuchte so verschieben, daß auf dem Papier ein möglichst kleiner, gleichmäßig ausgeleuchteter Lichtfleck entsteht (vgl. Fig. 4).

- Optik-Reiter mit dem Silizium-Photodetektor von der optischen Bank entfernen.
- mit dem Blatt Papier die Stelle suchen, an der ein möglichst kleiner, gleichmäßig ausgeleuchteter Lichtfleck erscheint.
- Linse (8) so verschieben, daß die Ausleuchtung verbessert wird (vgl. Fig.4).
- anstelle des Papiers den Silizium-Photodetektor aufstellen.

Wenn die Vorjustierung beendet ist:

- entfernte Komponenten wieder auf der optischen Bank montieren.

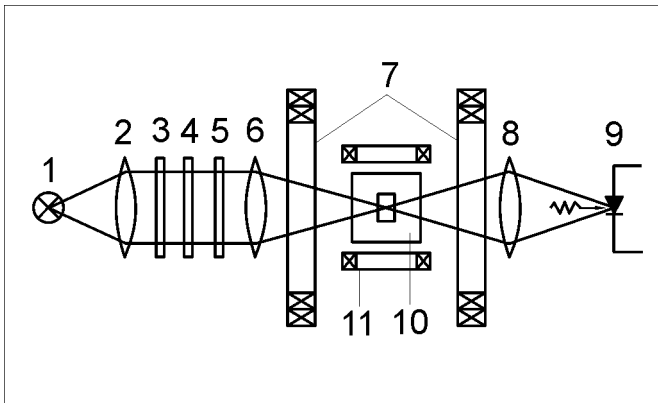


Fig. 4 Schematische Darstellung des Strahlengangs beim Optischen Pumpen, Bezeichnung der optischen und magnetischen Komponenten siehe Fig.1.

Feinjustierung

Um maximale Beleuchtungsstärke auf dem Silizium-Photodetektor zu erreichen:

- Photodetektor-Signal am Oszilloskop beobachten.
- Rubidium-Hochfrequenz-Leuchte, Linsen (6) und (8), Absorptionskammer und Silizium-Photodetektor abwechselnd in Höhe und Position so feinjustieren, daß das Photodetektor-Signal maximal wird.
- ggf. mit Offsetpotentiometer des I/U-Konverters das Signal wieder auf die Mitte des Oszilloskop-Bildschirms bringen.

Einstellungen:

Oszilloskop:

Kanal I: 10-20 mV/DIV. (DC)

I/U-Konverter:

Umschalter: DC

Messung

Vorbereitung

- storage mode des Oszilloskop einschalten.
- horizontale Ablenkung des Oszilloskops mit dem Drehknopf X-POS. einstellen.
- beliebigen Helmholtz-Spulenstrom (z.B. $I \approx 0,8$ A) einstellen.
- Y-Ablenkung des Oszilloskop unempfindlich schalten.

Durchführung

- Speichermodus des Oszilloskop starten.
- Wechselschalter hin- und herdrehen.
- Aufzeichnung des Pumpsignals am Oszilloskop beenden.
- Pumpsignal durch Verändern der Betriebsparameter der Rubidium-HF-Leuchte maximieren und Aufzeichnung wiederholen.

Einstellungen:

Oszilloskop:

Betriebsart: storage mode

Trigger: Auto

Y-Ablenkung, Kanal I: 0,1 V/DIV. DC

Zeitablenkung: 1 s/DIV.

Polarisationsfilter:

Winkel: 0°

Viertelwellenlängen-Platte:

Winkel: $+45^\circ$ oder -45°

I/U-Konverter:

Umschalter: DC

Meßbeispiel

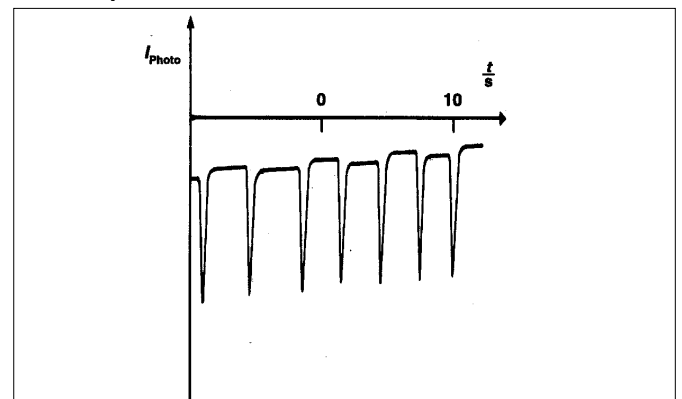


Fig. 5: Zeitabhängigkeit der transmittierten Intensität bei mehrfachem schnellem Umpolen des Zeeman-Magnetfeldes. Die Amplitude des Signals ist ein Maß für die Güte der Justierung.

Literatur

- [1] A.Kastler: Journal de Physique, 11 (1950) 255
- [2] H. Kopfermann: Über optisches Pumpen an Gasen, Sitzungsberichte der Heidelberger Akademie der Wissenschaften, Jahrgang 1960, 3. Abhandlung
- [3] J. Recht, W. Klein: LH-Contact 1 (1991) S. 8–11
- [4] G. Breit, I. Rabi: Phys. Rev. 38 (1931) 2002
- [5] Kopfermann, H.: Kernmomente, 2.Aufl., S. 28ff

