

Fortgeschrittenes Physik Lab SS19

# **Experiment: Hanle Effekt**

(Durchgeführt am: )

Erik Bode, Damian Lanzenstiel  
(Group 103)

September 24, 2019

**Abstract**

# Contents

|          |  |          |
|----------|--|----------|
| <b>1</b> | <b>Theorie</b>                               | <b>2</b> |
| 1.1      | Semiklassische Herleitung . . . . .          | 2        |
| 1.2      | Quantenmechanische Erklärung . . . . .       | 3        |
| 1.2.1    | Breit-Formel . . . . .                       | 4        |
| 1.3      | Coherence Narrowing und Dampfdruck . . . . . | 4        |
| 1.4      | Versuchsaufbau . . . . .                     | 4        |
| <b>2</b> | <b>Versuchsdurchführung</b>                  | <b>5</b> |
| <b>3</b> | <b>Tabellen</b>                              | <b>6</b> |
| <b>4</b> | <b>Bilder</b>                                | <b>6</b> |
| <b>5</b> | <b>Bibliograpy</b>                           | <b>6</b> |
|          | <b>Literatur</b>                             | <b>6</b> |
| <b>6</b> | <b>Anhang</b>                                | <b>6</b> |

# 1 Theorie

## 1.1 Semiklassische Herleitung

Ein Hg-Atom welches ein Photon absorbiert kann als ein gedämpfter oszillierender Dipol beschrieben werden. Die Dipolachse ist dabei parallel zur Polarisation des absorbierten Photons. Zur Bestimmung der gesamt Intensität eines einzelnen angeregten Atoms muss über alle Zeiten integriert werden wodurch sich folgende Gleichung ergibt.

$$I = C \cdot \int_0^\infty \sin(\phi)^2 e^{-\frac{t}{\tau}} dt \quad (1)$$

Hierbei ist zu erkennen das die Strahlungscharakteristik proportional zu  $\sin(\phi)^2$  ist, wobei  $\phi$  der Winkel zwischen Dipolachse und Beobachtungsrichtung ist. Der Faktor  $e^{-\frac{t}{\tau}}$  beschreibt die Dämpfung.

Wenn nun ein Magnetfeld angelegt wird und dieses senkrecht auf der Oszillation-Achse liegt so wird ein Drehmoment auf den Dipol ausgeübt. Dieses führt zur Präzession des Dipols und des magnetischen Moments welches hier als starr zusammenhängend betrachtet wird. Für das magnetische Moment  $\mu$  eines Niveaus mit Drehimpulsquantenzahl  $J$  gilt im schwachen Feld folgende Bewegungsgleichung:

$$\frac{d\vec{\mu}}{dt} = \frac{\omega_L}{B} \vec{\mu} \times \vec{B} \quad (2)$$

hierbei ist  $\omega_L$  die Larmorfrequenz mit:

$$\omega_L = g_J \frac{\mu_B}{\hbar} B \quad (3)$$

Grafisch wird die Bewegung in Abbildung 1 dargestellt.

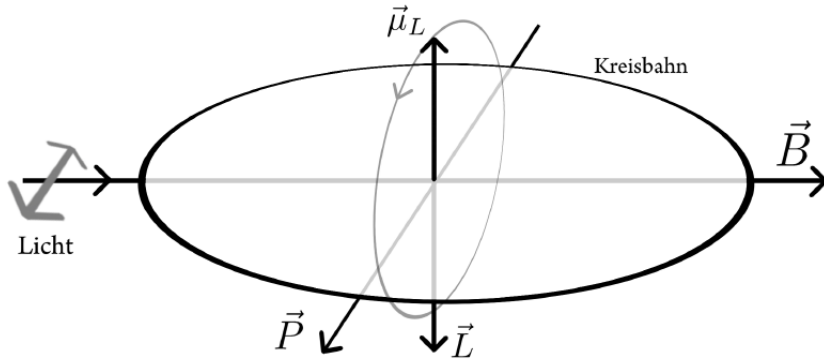


Figure 1: Darstellung der Präzessionsbewegung eines Elektrons mit Dipolmoment  $\vec{P}$ , Drehimpuls  $\vec{L}$  und magnetischem Moment  $\mu_L$  bei angelegtem Magnetfeld der Flussdichte  $B$ . [1]

Sind Polarisation (und somit auch Dipolachse) zum Zeitpunkt der Absorption parallel zur Beobachtungsebene gilt  $\theta(t) = \omega_L t$  mit  $\theta(t=0) = 0$ . Das bedeutet für die Intensität:

$$I = C \cdot \int_0^\infty \sin(\phi)^2 e^{-\frac{t}{\tau}} dt = \frac{C\tau}{2} \left( \frac{(2\omega_L\tau)^2}{1 + (2\omega_L\tau)^2} \right) \quad (4)$$

Ist die Beobachtungsrichtung zum Zeitpunkt der Absorption senkrecht zur Polarisationsrichtung gilt:  $\theta(t) = \omega_L t + \frac{\pi}{2}$  mit  $\theta(t=0) = \frac{\pi}{2}$ . Die Intensität lässt sich ähnlich wie in Gleichung 4 beschreiben:

$$I = C \cdot \int_0^\infty \cos(\phi)^2 e^{-\frac{t}{\tau}} dt = \frac{C\tau}{2} \left( 2 - \frac{(2\omega_L\tau)^2}{1 + (2\omega_L\tau)^2} \right) \quad (5)$$

Die Gleichung 4 entspricht einer inversen Lorenz-kurve und Gleichung 5 einer normalen. Die Lebensdauer  $\tau$  dieser Kurven kann über die Breite der Funktion auf halber Höhe (eng: *Full width at half maximum (FWHM)*) bestimmt werden (siehe Abb.2). Hierfür gilt:

$$\tau = \frac{\hbar}{g_J \mu_B B_{FW}} \quad (6)$$

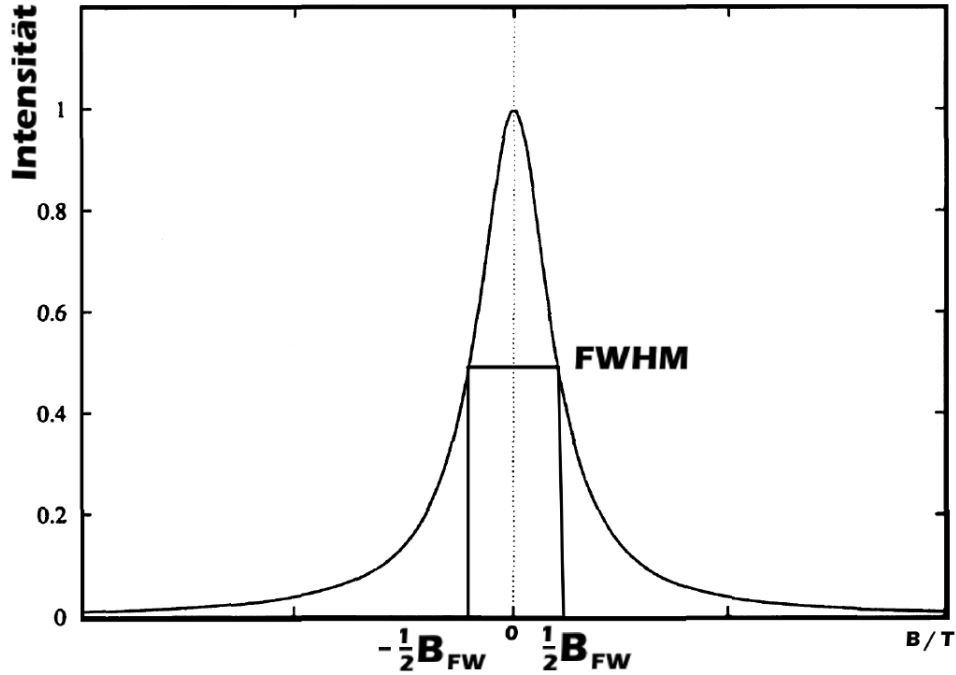


Figure 2: Lorentzkurve mit sichtbare Intensität in Beobachtungsrichtung  $0^\circ$  mit FWHM eingezeichnet.[1]

## 1.2 Quantenmechanische Erklärung

In der Quantenmechanik wird das Phänomen der Resonanzfluoreszenz durch Interferenz sich überlagernder Zustände beschrieben. Zustände unterschiedlicher magnetischer Quantenzahl  $m_j$  sind im Allgemeinen erst einmal energetisch gleich, "entartet". Die Entartung kann aber durch Anlegen eines Magnetfeldes aufgehoben werden (Zeeman-Effekt). In Spezialfällen verursacht die Kreuzung zweier Niveaus von Zuständen verschiedener Gesamtdrehimpulse, bei bestimmten Magnetfeldstärken, eine weitere Entartung. Liegt keine Energieaufspaltung vor werden die Niveaus kohärent angeregt werden und bei

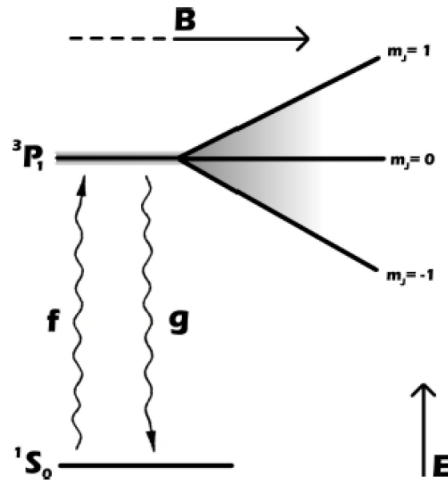


Figure 3: Aufspaltung der Energieniveaus durch  $m_j$  in einem Magnetfeld.[1]

Abregung kommt es zur Interferenz mehrerer Zustände des selben Atoms. Damit gilt:

$$I \propto (A_1 + A_2)^2 \quad (7)$$

Bei einer Aufspaltung der Niveaus können die Niveaus getrennt angeregt und abgeregt werden. Für die gesamt Intensität gilt dann:

$$I \propto A_1^2 + A_2^2 \quad (8)$$

### 1.2.1 Breit-Formel

Zur quantenmechanischen Auswertung wird eine allgemeine Formel zur Resonanzfluoreszenz von G.Breit und P.Franken. Die Formel beschreibt die Rate mit der Photonen einer linearen Polarisationsrichtung  $\vec{g}$  emittiert wenn die Probe mit in  $\vec{f}$  polarisiertes Licht gestrahlt wird. Die Gleichung, hier ohne Herleitung lautet:

$$R(\vec{f}, \vec{g}) = N \int_0^\infty R(\vec{f}, \vec{g}, t) dt = N \sum_{m, m'}^{\mu, \mu'} \frac{f_{m\mu} f_{\mu' m} g_{\mu m'} g_{m', \mu'}}{L_{\mu, \mu'} - i(\omega_\mu - \omega_{\mu'})} \quad (9)$$

Eine genauere Herleitung findet sich in der Versuchsanleitung[?] oder in der 'Interference Effects in the Resonance Fluorescence of "Crossed" Excited Atomic States' by P.A.Franken.[2]

Diese Formel für das hier durchgeführte Experiment auf den Übergang von  $^3P_1$  auf den  $^1S_0$  Zustand angewendet. Daraus ergibt sich wie in der Versuchsanleitung [?] beschrieben die Form:

$$R = C \frac{1}{1 + (2\omega_L \tau)^2} \quad (10)$$

Diese entspricht dem Semiklassischen Ergebnis in Gleichung 4.

## 1.3 Coherence Narrowing und Dampfdruk

Coherence Narrowing bezieht sich auf den Effekt, dass ein von einem Atom emittiertes Photon ein weiteres Atom anregt. Dieses Atom würde nun die gleiche Präzessionsbewegung machen und wieder ein identisches Photon aussenden. Dies führt dazu, dass bei genügend großen Streuquerschnitt sich dieser Prozess mehrfach wiederholen kann. Durch die Ununterscheidbarkeit der Photonen wird die Lebenszeit künstlich erhöht. Um diesen Effekt zu eliminieren werden die Messungen bei variierendem Druck durchgeführt und die tatsächliche Lebensdauer aus der Extrapolation für den Druck  $p = 0$  bestimmt. Da der Druck im System nicht messbar ist, muss er mit folgender empirisch bestimmten Formel aus der Temperatur berechnet werden:

$$\ln\left(\frac{p}{p_c}\right) = \left(\frac{T_c}{T}\right)(a_1 T_r + a_2 T_r^{1.89} + a_3 T_r^2 + a_4 T_r^8 + a_5 T_r^{8.5} + a_6 T_r^9) \quad (11)$$

## 1.4 Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau sieht wie in Abbildung:4 gezeigt aus. Zu Beginn wird Licht aus einer Quecksilberdampfampe genommen und durch eine Linse fokussiert mit der Hilfe eines Interferenzfilters wird dann die gesuchte Wellenlänge von herausgefiltert. Daraufhin wird ein Polarisationsfilter genutzt um die Polarisation des Lichtes einzustellen. Hiernach wird das Licht auf die Quecksilber Probe fokussiert mit einer weiteren Linse. Senkrecht zum Strahlengang befindet sich der Photomultiplier welcher als Detektor der emittierten Photonen genutzt wird. Die Quecksilber probe wird über Wärmeleitungen (HP) mit Peltierelementen verbunden welche die Probe kühlen. Um das Magnetfeld zu kontrollieren wird eine Anordnung von Helmholtz-Spulen verwendet. Hierbei werden einmal die Felder in  $y, z$  Richtung eliminiert. Die Spule die das Feld in  $x$  Richtung verändert wird zum Durchfahren des Feldes genutzt um die Zeeman Aufspaltung zu erreichen welche letztendlich das Hanle-Signal generiert. Hierzu wird ein Rampengenerator verwendet der die Spannung die an der Helmholtz-Spule anliegt langsam verändert wodurch sich die Lorentzkurve bei Richtiger Polarisationseinstellung ausbildet.

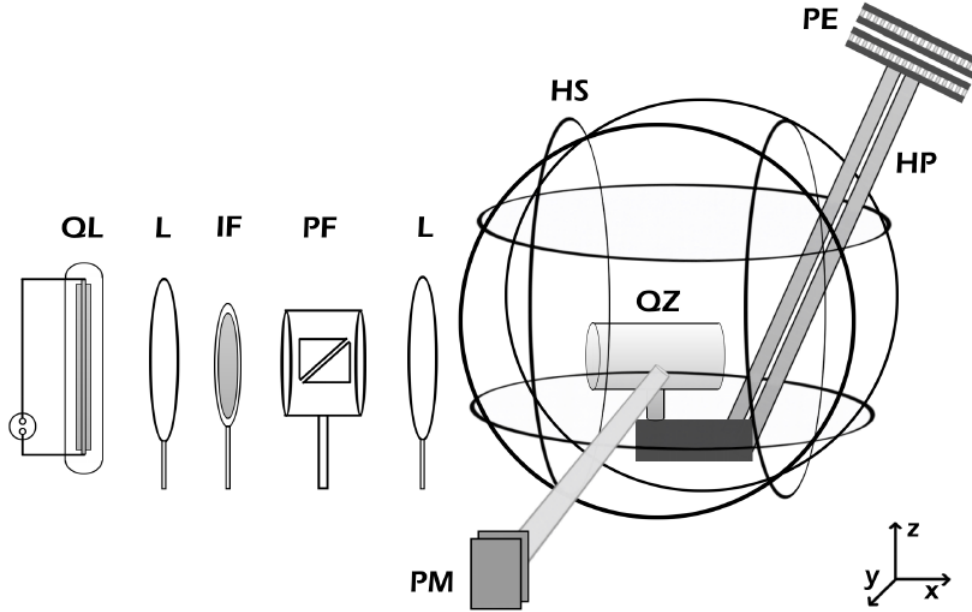


Figure 4: Versuchsaufbau des Experiments. Quecksilberdampf Lampe (QL), Linse (L), Interferenzfilter (IF), Polarisationsfilter (PF), Quecksilberdampf-Resonanzzelle (QZ), Heatpipes (HP), Peltierelemente (PE), Helmholtz-spulen (HS), Photomultiplier (PM). [1]

## 2 Versuchsdurchführung

Zu Beginn des Experiments musste als erstes die Magnetfelder in  $y$  und  $z$  Richtung kalibriert werden. Dafür musste am Polarisationsfilter die  $0^\circ$  Einstellung gefunden werden. Durch das Durchfahren des Feldes in  $x$  Richtung erkennt man bei  $0^\circ$  eine Lorentzkurve. Diese muss durch Veränderung der Spannung in  $y$  und  $z$  verbessert werden. So war zu Beginn die Kurve nicht sehr symmetrisch. Dies wurde dann nochmal für  $90^\circ$  gemacht. Dies stellte sich an vielen Stellen als sehr schwierig und Zeitaufwendig heraus. Besonders bei  $45^\circ$  wurde keine besonders schöne Symmetrie erreicht.

$$I_y = (-0.0217 \pm 0.0001) \text{ A} \quad (12)$$

$$I_z = (-0.2957 \pm 0.0001) \text{ A} \quad (13)$$

Nachdem eine geeignete Einstellung gefunden wurde, wurden bei  $0^\circ$  15 Messungen der Lorentzkurve gemacht. Danach wurde das System mit Hilfe der Peltierelemente stückweise abgekühlt um an diesen Stellen die Kurven für die unterschiedlichen Polarisationsrichtungen gemessen. Aus Zeitgründen wurde diese erste Messung kurzgehalten und eine Messung bei steigender Temperatur gemacht. Am nächsten Tag wurde nochmal eine Kühlmessung gemacht mit mehr Messpunkten.

## 3 Tabellen

### List of Tables

## 4 Bilder

### List of Figures

|   |  |    |
|---|--|----|
| 1 | Semiklassische Darstellung des Hanle Effekts . . . . . | 2  |
| 2 | Lorentzkurve . . . . .                                 | 3  |
| 3 | Zeeman-Effekt . . . . .                                | 3  |
| 4 | Versuchsaufbau . . . . .                               | 5  |
| 5 | Labor Aufschrieb . . . . .                             | 7  |
| 6 | Labor Aufschrieb . . . . .                             | 8  |
| 7 | Labor Aufschrieb . . . . .                             | 9  |
| 8 | Labor Aufschrieb . . . . .                             | 10 |

## 5 Bibliograpy

### References

- [1] *Versuchsanleitung: Fortgeschrittenen Praktikum Teil 1 Der Hanle-Effekt.*
- [2] P.A.Franken. Interference effects in the resoanance fluorescence of "crossed" excited atomic states. *The Harrison M.Randall Laboratory of Physics, The University of Michigan, Ann Arbor, Michigan, 1960.*

## 6 Anhang

| Hanle-Effekt     |  |
|------------------|--|
| Date Time        | Description  |
| 10:36            | Start testing the machines (Rampenspannung)  |
| 10:55            | Photomultiplier einstellen   |
| 11:15            | Testing the suppression by different $\theta \rightarrow -90^\circ$ kalibriert   |
| 13:14            | $Y \ 0,1351 \quad Z \ 0,1049$ $A \ 0,0348 \quad 0,0054$ <p>Winkel <math>87^\circ</math> nice <math>Y - 0,092 \ V</math><br/> <math>-0,0978 \ A</math> <span style="float: right;">1V scale</span><br/> <math>Z - 3,560</math><br/> <math>-0,3959</math><br/> <hr/> Für Angle <math>132^\circ</math> unsymmetrisch<br/> <math>177^\circ</math> nice</p> |
|                  | <p>flucts <math>Y - 0,1 A</math><br/> <math>Z = 0,3 A</math></p>   |
| Lampe gewechselt | - Fokuspunkt bei $-180$  |
| (190°)           | $Y - 1,220$ $Z - 1,0217$ $-1,20457$  |
| 20°              | $Z - 3,655$ $3,616(CSV) \quad -2,5(-x.CSV) \quad 2,5(CSV)$ $XEL.153$   |
| 15:27            | <p>speichern von Kurven mit emst. von <math>87,5.CSV</math><br/> oben: <math>236,501</math><br/> Skalenwahl: <math>CA/2: 1V \ A: 5s</math><br/> <math>10 \cdot 10^{-9} A / 10^{-6} Supp. \ 20V</math><br/> <math>30s \quad 2,2V \quad UP \quad LOW</math><br/> <math>(2V) \quad (Start from)</math></p>  |

Figure 5: Labor Aufschrieb



Messunges herdent- & kühl-  
 16:20 start 20°C  
 7,52 A kühl 2 min  
 1 A 16:40 8°C  
 3,4 A 17:10 10°C  
 17:17 10°C  
 17:22 10°C

Lampe aufgew.

Messungen:

87,5° 90-2.CSV Range:  $10^{-6}$  A 0,03  
 36,5° 45-2.CSV rest S. etc oben 1V/IV  
 -2,5° 0-2.CSV  $10 \times 10^{-9}$  1V/IV  
 12°C am Ende der Messung  $10 \times 10^{-9}$  A 2V/IV  
 $10 \times 10^{-9}$  A 10V/IV

|               |                                  |                       |       |
|---------------|----------------------------------|-----------------------|-------|
| 17:57 8°C     | -2,5° 0-3.CSV                    | $10 \times 10^{-9}$ A | 1V/IV |
| 2,5 A kühlend | 36,5° 45-3.CSV                   |                       | "     |
| 18:03 6°C     | 87,5° 90-3.CSV                   | 0,03 $\times 10^{-6}$ |       |
| 18:10 6°C     | Temp am ende d's Messung:<br>6°C |                       |       |

SA kühlung 87,5° 90-4.CSV  $10 \times 10^{-9}$  A  
 18:46 -1°C 36,5° 45-4.CSV  $0,03 \times 10^{-6}$  A 0,5V/IV  
 18:52 -1°C -2,5° 0-4.CSV  $10 \times 10^{-9}$  A  
 Temp ende -2°C

7,5 A kühl- -2,5° 0-5.CSV  $10 \times 10^{-9}$  A  
 19:05 -2°C 36,5° 45-5.CSV  $0,03 \times 10^{-6}$  A  
 19:43 -1°C -2,5° 0-5.CSV  $0,03 \times 10^{-6}$  A  
 ende: -17°C 20:17

Figure 6: Labor Aufschrieb



# Abkühlungsmessung

Start:  $-17^{\circ}\text{C}$  20:17

20:21  $-15^{\circ}\text{C}$   $87,5^{\circ}$   $Q_W$   $1.0 \times 10^{-6} \text{ A}$   
 $-14^{\circ}\text{C}$   $36,5^{\circ}$   $45$   $W$   $1$   $CSV$   $0,03 \times 10^{-6} \text{ A}$   
 $-13^{\circ}\text{C}$   $-4,5^{\circ}$   $Q_W$   $1$   $CSV$   $0,03 \times 10^{-6} \text{ A}$   
 $-12^{\circ}\text{C}$   $-13^{\circ}\text{C}$   $W$   $\rightarrow$   $d$   $h$   $e$   $r$   $W$   $s$   $c$   $h$   $n$   $e$   $l$   
 $\rightarrow$   $n$   $u$   $r$   $n$   $o$   $c$   $h$   $-25^{\circ}$   $M$   $e$   $s$   $s$   $u$   $n$   $g$   $e$   $n$

20:36  $-10^{\circ}\text{C}$   $Q_W$   $2$   $CSV$   $10 \times 10^{-6} \text{ A}$

20:42  $-8^{\circ}\text{C}$   $Q_W$   $3$   $CSV$   
 $-7^{\circ}\text{C}$

20:48  $-6^{\circ}\text{C}$   $Q_W$   $4$   $CSV$

20:54  $-4^{\circ}\text{C}$   $Q_W$   $5$   $CSV$   
 $6$   $3$   
 $Q_W$   $5$   $CSV$

21:02  $-2^{\circ}\text{C}$   $Q_W$   $5$   $CSV$

21:11  $+0^{\circ}\text{C}$   $Q_W$   $7$   $CSV$

21:23  $2^{\circ}\text{C}$   $Q_W$   $8$   $CSV$

21:35  $4^{\circ}\text{C}$   $Q_W$   $9$   $CSV$

21:44  $6^{\circ}\text{C}$   $Q_W$   $10$   $CSV$

Ende der Messung

Figure 7: Labor Aufschrieb



## 2. Tag

- Überprüfung ob Einstellungen für Kalibration noch stimmen
- 2. Abkühlungsmessung
- 1. Schritte, ~~den~~ anschließend auf abkühlung weiter
- Starttemperatur

|       |                                  | 8750                                | Strom         | Temp  |
|-------|----------------------------------|-------------------------------------|---------------|-------|
| 9:20  | 0-1.csv<br>$10 \times 10^{-9} A$ | 90-1.csv<br>$10 \times 10^{-9} A$   | 0,04          | 18°C  |
| 9:26  |                                  |                                     |               | 17°C  |
| 10:00 |                                  |                                     |               | 11°C  |
| 10:10 |                                  |                                     |               | 10°C  |
| 10:24 | 0-2.csv<br>$10 \times 10^{-9} A$ | 90-2.csv<br>$0,03 \times 10^{-6} A$ | 2,5V<br>1,0A  | 10°C  |
| 10:35 |                                  |                                     |               | 7°C   |
| 10:50 |                                  |                                     |               | 4°C   |
| 10:59 |                                  |                                     |               | 5°C   |
| 11:04 | 0-3.csv<br>$10 \times 10^{-9} A$ | 90-3.csv<br>$0,03 \times 10^{-6} A$ | 2A            | 5°C   |
| 11:16 |                                  |                                     |               | -1°C  |
| 11:20 |                                  |                                     |               | -2°C  |
| 11:40 | 0-4.csv<br>$10 \times 10^{-9} A$ | 90-4.csv<br>$0,03 \times 10^{-6} A$ | 22V<br>3A     | 1°C   |
| 11:47 |                                  |                                     |               | 10°C  |
| 12:02 |                                  |                                     |               | -9°C  |
| 12:20 |                                  |                                     |               | -7°C  |
| 12:25 | 0-6.csv<br>$10 \times 10^{-9} A$ | 90-6.csv<br>$0,03 \times 10^{-6} A$ | 4A/8,9V       | -7°C  |
| 12:34 |                                  |                                     |               | -8°C  |
| 13:02 | 0-7.csv                          | 90-7.csv<br>16.8.13                 | 7,5A<br>15,9V | -17°C |

Figure 8: Labor Aufschrieb