

Laser-Optik__Teil__B

July 6, 2024

1 Fakultät für Physik

1.1 Physikalisches Praktikum P2 für Studierende der Physik

Versuch P2-23, 24, 25 (Stand: April 2023)

[Raum F1-16](#)

Fadi Alhelo, Tony Ji

Gruppennummer: 14

Betreuer: _____

Versuch durchgeführt am: 04.07.2024

Beanstandungen:

Testiert am: _____ Vermerk: _____

2 Laser-Optik, Teil B

2.1 Motivation

Im Versuch [Laser-Optik, Teil A](#) haben Sie sich mit Hilfe einfacher Messungen mit den grundlegenden Eigenschaften und den Anwendungen von Lasern vertraut gemacht. In diesem Versuch können Sie Ihre experimentellen Erfahrungen um die Anwendung komplexerer interferometrischer Methoden zur Bestimmung kleinster Längenänderungen und um die Untersuchung der Eigenschaften doppelbrechender Kristalle mit Hilfe von linear polarisiertem Laserlicht erweitern. Den eigentlichen Versuchsteilen ist ein Demonstrationsversuch zur Veranschaulichung der Fourier-Transformation und ihrer Bedeutung in der Physik vorangestellt, der nahtlos an die Aufgaben des Versuchs “Laser-Optik, Teil A” anschließt. Beachten Sie hierzu die Hinweise zu diesem Versuch.

2.2 Lernziele

Wir listen im Folgenden die wichtigsten **Lernziele** auf, die wir Ihnen mit dem Versuch **Laser-Optik, Teil B** vermitteln möchten:

- Sie untersuchen den Zusammenhang zwischen dem physikalischen Phänomen der Beugung, als Streuung von (kohärentem) Licht und der Fourier-Transformation, am Beispiel der Beugung am Einfachspalt. Dabei haben Sie die Möglichkeit eine vollautomatisierte Messanordnung genauer kennenzulernen.
- Sie untersuchen zwei Anwendungen für exakte interferometrische Messungen kleinster Längenänderungen. Dabei handelt es sich um die sehr kleinen ([magnetostriktiven](#)) [Längenänderung](#) von Nickel und um die direkte Bestimmung der Wellenlänge des verwendeten Laserlichts selbst.
- Sie untersuchen den [Dopplereffekt von Licht](#), als intelligent durchdachte Anwendung des [Michelson-Interferometers](#).
- Sie verwenden die Eigenschaft der linearen Polarisation des Laserlichts um den (Kristall im \vec{B} -Feld) [Faraday-](#) und (Kristall im \vec{E} -Feld) [Pockels-Effekt](#) zu studieren. Dabei bestimmen Sie verschiedene Materialkonstanten entsprechender [doppelbrechender Kristalle](#).

- Sie untersuchen die [optische Aktivität](#) von Zuckerlösungen. Auch hierzu verwenden Sie die Eigenschaft der linearen Polarisierung des kohärenten Laserlichts.

2.3 Versuchsaufbau

Auf einer optischen Bank können neben einem He-Ne-Laser die optischen Aufbauten für die durchzuführenden Versuche montiert werden. Die Versuche befinden sich in separaten Kabinen. Ein Beispielaufbau ist in der folgenden Photographie abgebildet: ([Link](#))

Für die verschiedenen Versuchsteile stehen Ihnen die folgenden Geräte und Materialien zur Verfügung:

- Ein Experimentiertisch (mit 3 m-Zeisschiene) mit diversen Verschiebereitern.
- Ein 2 mW-He-Ne-Laser mit $\lambda_0 = 632,8 \text{ nm}$ Wellenlänge (in geschlossener Bauweise mit integriertem Netzteil, mit polarisiertem Licht).
- Ein Strahlaufweitungssystem (wie im Versuch Laser-Optik, Teil A), Justieraufbau mit Fassungen, Halter für Linsen und Blenden und ein großer weißer Schirm.
- Ein Multimeter (Vocraft in verschiedenen Ausführungen).
- Ein Ampèremeter (Gossen Manometer, ohne Zusatzwiderstände 100 mV/1 mA (Vorsicht bei der Bedienung!), dazu [Shunt](#)-Widerstände für 500 mA und für 5 A zur Messung der Spulenströme.
- Ein Funktionsgenerator FG 800/0, 2 Hz–200 kHz.
- Ein Netzgerät für die Gleichspannung an der Pockelszelle, einstellbar bis $\approx 1900 \text{ V}$ mit integriertem Modulationstransformator.
- Jeweils ein Nieder (NF)- und Audiofrequenz(AF)-Verstärker.
- Ein Stromversorgungsgerät/Labor-Netzgerät (stufenlos und kurzzeitig bis zu 4 A einstellbar).
- Ein Glan-Thompson Polarisationsfilter; Durchmesser $d = 10 \text{ mm}$, auf einem Stift drehbar montiert mit Winkelskala ([Extinktionsverhältnis](#): $10^5/1$). **Diesen Filter dürfen Sie nicht im unaufgeweiteten Strahl benutzen!**
- In 25 mm-Fassungen:
 - Ein Polarisationsfilter ohne Skala (nicht an allen Plätzen verfügbar),
 - Ein Spalt der Breite $b = 0,4 \text{ mm}$,
 - Eine Lochblende mit Durchmesser $d = 1 \text{ mm}$ (nicht an allen Plätzen verfügbar),
 - Eine Irisblende,
 - Ein [Achromat](#) mit Brennweite $f = 10 \text{ mm}$,
 - Sammellinsen mit Brennweiten $f = 30 \text{ mm}$, 60 mm und 150 mm (die Linse mit $f = 60 \text{ mm}$ ist nicht an allen Plätzen verfügbar),
 - Tischlampe, Taschenlampe, 2 Laserschutzbrillen (nicht vollständig an allen Plätzen verfügbar).
- Im Schrank:
 - Lichtdetektor Si-Photoelement BPW34 (kleinflächig), $2,7 \text{ mm} \times 2,7 \text{ mm}$, nur im Elementbetrieb, d.h. ohne Betriebsspannung direkt an Spannungs- oder Strommessgerät angeschlossen, zu verwenden. Der Anschluss erfolgt an den mit “+” und “-” bezeichneten Stiften mit jeweils spezieller Leitung (einfach vorhanden).
 - Lichtdetektor Si-Photoelement, Durchmesser $d = 12 \text{ mm}$, wie bei Versuchsteil A (einfach vorhanden).
 - Lichtdetektor für modulierte Licht (mit Photoelement $2,7 \text{ mm} \times 2,7 \text{ mm}$, NF-Verstärker und Lautsprecher).
 - Ein Michelson-Interferometer mit Feinverstellung eines Spiegels durch (10 : 1)-

- Hebeluntersetzung und Mikrometerschraube, eine dazu aufsteckbare Antriebsrolle für Motorantrieb (drei mal vorhanden).
- Ein Michelson-Interferometer, ein Spiegel auf einem Ni- bzw. Fe-Stab befestigt, Länge $\ell = 105$ mm, in einer Spule mit $n = 2000$ Windungen (jeweils einmal vorhanden).
 - Ein Synchronmotor (1 U/min, mit Antriebsrolle und Gummiriemen für die Bewegung des Interferometerspiegels).
 - Eine Küvette (198 mm \times 58 mm), in einem Halter auf einem Stift, für optisch aktive Lösungen (zweimal in Plastik- und einmal in Glasausführung).
 - Haushaltszucker in zwei Gefäßen.
 - Eine Chemikalienwaage, 1 \times Mettler H 315 auf einem Wägetisch und drei verschiedene mechanische Waagen.
 - Bechergläser, Messzylinder, Trichter.
 - Sorbose-Lösung (optisch aktiv, linksdrehend, Massenkonzentration $\beta = 0,33$ g cm⁻³).
 - Faraday-Modulator, Bleisilikatglas der Länge $\ell = 75$ mm in einer Spule mit $n = 800$ Windungen.
 - Ein Radioapparat mit Zweitlautsprecherausgang und zugehöriger Anschlussleitung, als Modulationsquelle.
 - Ein Lichtdetektor für moduliertes Licht (mit Photoelement 2,7 mm \times 2,7 mm, NF-Verstärker und Lautsprecher).
 - Pockelszelle im Drehhalter mit Skala zur Angabe des Winkels zwischen Feld- und Laserpolarisationsrichtung, Lithiumniobat-Kristall, Höhe $h = 2$ mm (entspricht dem Elektrodenabstand), Länge $\ell = 20$ mm, optische Achse parallel zur Feldrichtung.
 - Stimmgabel 1700 Hz (2 \times), Maßband (1 \times), Stoppuhr (5 \times).
 - Aufbau für die optische Bank mit Fototransistor, Schrittmotor und Endschaltern.
 - Vorverstärker, Schrittmotor- und Relais-Schnittstelle.
 - 2 Laserschutzbrillen (für das Betreuungspersonal).
 - Rechner (IBM-kompatibler PC 386SX) mit VGA-Graphikkarte, Graphik-Drucker, Maus, Festplatte, 1,2 MB und 1,44 MB-Laufwerk und spezieller Schnittstellen-Karte (ADC, DAC, PIO), (nur einmal vorhanden).

2.4 Wichtige Hinweise

- Bei diesem Versuch arbeiten Sie mit einem Laser, der entsprechend **gefährlich für Ihre Augen** sein kann. Gehen Sie daher **vorsichtig und verantwortungsbewusst** mit dem Laser um und halten Sie sich an die Anweisungen des/der Tutor:in.
- Achten Sie darauf, dass alle Personen im Raum bei der Durchführung des Versuchs eine **Schutzbrille** tragen.
- Vermeiden Sie direkten Blickkontakt mit dem Laserstrahl und richten Sie ihn niemals auf andere Personen. Bleiben Sie beim Experimentieren in der Regel stehen, mit den Augen also weit oberhalb der Strahlhöhe.
- Stellen Sie sicher, dass die Laserleistung und -frequenz auf die vorgesehenen Werte eingestellt sind und überprüfen Sie dies regelmäßig während des Experiments.
- Beachten Sie, dass der Laserstrahl bei falscher Handhabung Schäden an optischen Elementen verursachen kann. Verwenden Sie nur die bereitgestellten optischen Elemente und reinigen Sie sie nur mit geeigneten Materialien.
- Vor dem Einschalten des Lasers müssen alle Geräte sorgfältig aufgebaut und justiert werden. Führen Sie diese Schritte **erst nach Rücksprache mit dem/der Tutor:in** durch.

2.5 Durchführung

2.5.1 Aufgabe 1: Beugungsbild eines Spalts

Hierbei handelt es sich um einen **Demonstrationsversuch**. Er soll von allen Gruppen gemeinsam und mit Unterstützung des Betreuers durchgeführt werden. Mithilfe eines auf einen Schrittmotor montierten Phototransistors messen Sie das Beugungsbild eines Spalts aus, der mit einem He-Ne-Laser ausgeleuchtet wird. Die gewonnenen Daten werden auf einem bereitstehenden Computer verarbeitet; aus der [Fourier-Rücktransformation](#) des aufgezeichneten Beugungsbildes erhalten Sie das Bild des Spalts. Dokumentieren und diskutieren Sie Ihre Beobachtungen.

Die Beugung am Spalt lässt sich durch eine rechteckförmige Transmissionsfunktion $\tau(x)$ beschreiben.

Die Fouriertransformierte lautet:

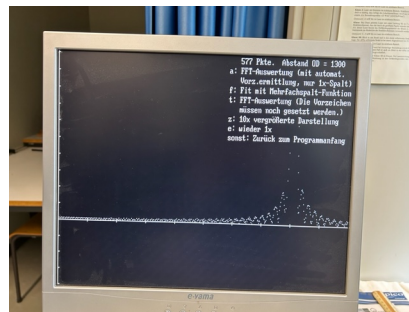
$$\tilde{\tau}(k) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} \tau(x) e^{-ikx} dx$$

Dabei gilt für die Intensität

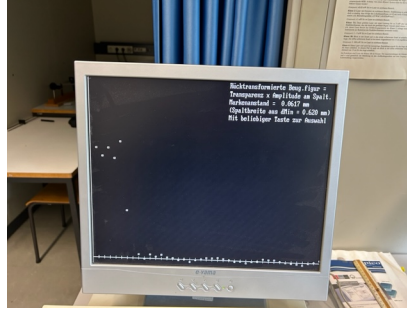
$$I \propto |\tilde{\tau}(k)|^2$$

Der Phototransistor misst also die Intensitäten des Beugungsbildes und mithilfe des FFT-Programms kann die Amplitudenfigur in ein Spaltbild rücktransformiert werden.

Die Intensitätsverteilung des Einzelspalters sieht folgendermaßen aus:



Mithilfe der Rücktransformation erhalten wir das Spaltbild, was gemäß unseren Erwartungen eine Rechtecksfunktion darstellt.



Die Rechtecksfunktion ist offensichtlich nicht perfekt, was mehrere Ursachen haben kann:

1. Begrenzte Auflösung des Phototransistors
2. Elektronisches Rauschen im Phototransistor oder in der Datenübertragung
3. Unpräzise Ausrichtung des Spalts, des Lasers oder des Phototransistors
4. Numerische Ungenauigkeiten bei der Berechnung der Fourier-(Rueck)Transformation
5. Unzureichende Anzahl an Messpunkten

2.5.2 Aufgabe 2: Anwendungen des [Michelson-Interferometers](#)

2.1: Beobachten Sie interferometrisch die sehr geringe Abhängigkeit der Länge von Nickel vom Magnetfeld \vec{H} und bestimmen Sie den [Magnetostriktionskoeffizienten](#).

2.2: Bestimmen Sie aus den beobachteten Änderungen des Interferenzbildes bei gemessener Verschiebung eines der Spiegel die Wellenlänge des Laserlichts.

2.3: Demonstrieren Sie den “[Dopplereffekt](#)” mit Lichtwellen im Fall $v \ll c$ und messen Sie v interferometrisch.

2.4: Bewegen Sie eine schwingende Stimmgabel von Ihrem Ohr weg und auf Ihr Ohr zu und zwar einmal mit und einmal ohne eine reflektierende Wand in der Nähe (akustisches Analogon zu Aufgabe 2.3). Dokumentieren und diskutieren Sie Ihre Beobachtungen.

2.1 Wir untersuchen einen Nickelstab, der von einer Spule umwickelt ist. Auf der Stirnseite des Nickelstabs befindet sich ein Spiegel des Interferometers.

Legt man ein Magnetfeld \vec{H} an, so richten sich die Weisschen Bezirke gleich aus. Die dadurch entstehende Längenänderung des Stabes beträgt:

$$\Delta l = C \cdot l \cdot H$$

mit dem Magnetostriktionskoeffizienten C und der Stablänge l .

Für das Magnetfeld einer langen Spule gilt:

$$H = N \cdot \frac{I}{L}$$

mit dem Strom durch die Spule I , Windungszahl $N=2000$ und Spulenlänge L .

Wir erhalten destruktive Interferenz wenn gilt:

$$\Delta l = m \cdot \frac{\lambda}{2}$$

Somit gilt mit $L = l$ folgender Zusammenhang:

$$m = \frac{2 \cdot I \cdot N}{\lambda} C$$

Tragen wir die Ordnung m der Minima gegen $\frac{2 \cdot I \cdot N}{\lambda}$ auf, so entspricht die Steigung der Regressionsgeraden den Magnetostruktionskoeffizienten C .

```
[2]: import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import PhyPraKit as ppk

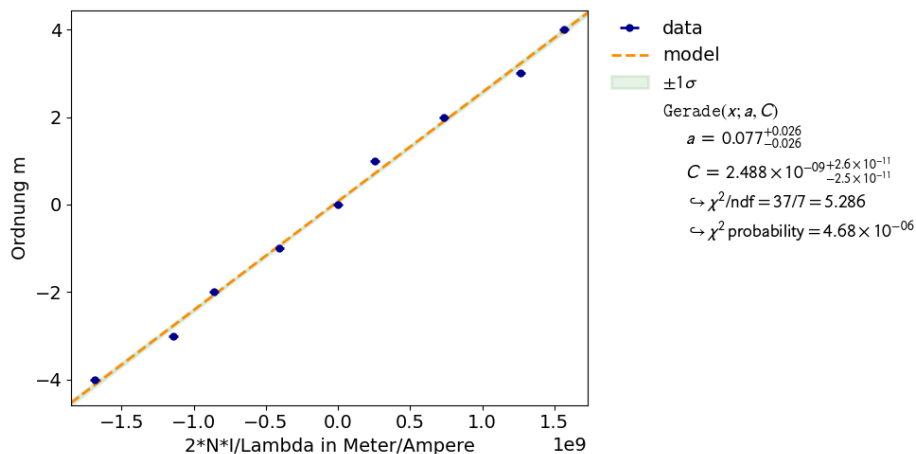
m = np.array([-4,-3,-2,-1,0,1,2,3,4])

I = np.array([-0.267,-0.181,-0.136,-0.064,0,0.040,0.116,0.200,0.248]) #Ampere

I_err = 0.005
wdz = 2000

wl = 632.8*(1/10**9)

def Gerade(x,a,C):
    return C*x+a
ppk.phyTools.k2Fit(Gerade, 2*wdz*I/wl, m,sx = 2*wdz*I_err/wl,sy=0 ,axis_labels_
    ↳ ['2*N*I/Lambda in Meter/Ampere', 'Ordnung m'])
```



```
[2]: (array([7.68925269e-02, 2.48837322e-09]),
array([[ -2.62142978e-02,  2.62426062e-02],
[ -2.49988309e-11,  2.55129341e-11]]),
array([[1.          , 0.02975344],
[0.02975344, 1.          ]]),
37.00324490017218)
```

Wir erhalten somit:

$$C = 2.488(\pm 0.026) \cdot 10^{-9} \frac{m}{A}$$

Es wurde leider kein Literaturwert zum Vergleich gefunden, jedoch scheint die Groessenordnung plausibel zu sein.

Fehlerdiskussion:

Mögliche Fehlerquellen sind Vibrationen in der Umgebung oder mechanische Bewegungen, die das Interferenzmuster stören können. Ausserdem können Inhomogenitäten im Magnetfeld zu unterschiedlichen Längenaenderungen in verschiedenen Bereichen des Stabs führen und somit die Messgenauigkeit beeinträchtigen. Desweiteren wird durch den steigenden Spulenstrom immer mehr Wärme erzeugt, sodass die daraus resultierende thermische Ausdehnung des Nickelstabs die Messung verfälschen kann.

2.2 Treten bei der Verschiebung eines Spiegels um Δx N Interferenzminima auf, so gilt für die Wellenlänge

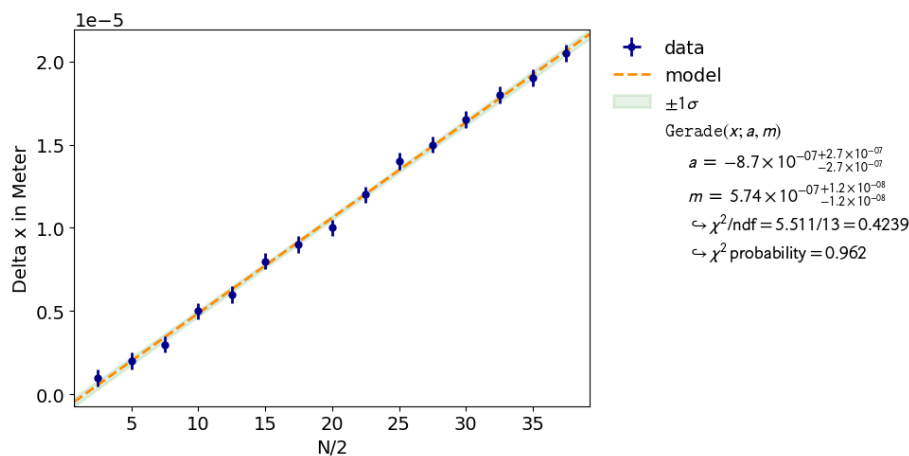
$$\lambda = \frac{2\Delta x}{N}$$

Tragen wir $N/2$ gegen die Verschiebung Δx auf, so entspricht die Steigung der Geraden unsere Wellenlänge.

```
[15]: minimum = np.array([5,10,15,20,25,30,35,40,45,50,55,60,65,70,75])

deltax = np.array([1,2,3,5,6,8,9,10,12,14,15,16.5,18,19,20.5]) #mikrometer
deltax_err = 0.5 #mikrometer

def Gerade(x,a,m):
    return m*x+a
ppk.phyTools.k2Fit(Gerade, minimum/2, deltax*(1/10**6), sx = 0, sy=□
    ↪deltax_err*(1/10**6), axis_labels = ['N/2', 'Delta x in Meter'])
```




```
[15]: (array([-8.71428560e-07,  5.73571428e-07]),
      array([[ -2.71679094e-07,  2.71679071e-07],
            [-1.19522856e-08,  1.19522866e-08]]),
      array([[ 1.          , -0.87988271],
            [-0.87988271,  1.          ]]),
      5.510714285714281)
```

Wir erhalten fuer den experimentell bestimmten Wert der Wellenlaenge:

$$\lambda = 547(\pm 12)nm$$

Dieser Wert weicht ziemlich stark vom Literaturwert $\lambda_{Lit.} = 632.8nm$ ab.

Fehlerdiskussion:

Zum einen stellen Ablesefehler eine hauptsaechliche Fehlerquelle dar. Desweiteren koennen eine ungenaue Kalibrierung der Skala die gemessene Wellenlaenge stark beeinflussen. Ausserdem koennen Ungenauigkeiten beim Zaehlen der Minima aufgrund der nicht besonders deutlichen Interferenzstruktur auftreten.

2.3 Bewegen sich Sender und Empfaenger/Beobachter voneinander weg oder aufeinander zu, so ist die wahrgenommene Frequenz

$$f = \frac{c \pm v_B}{c \mp v_S} f_0$$

Fuer den Fall $v \ll c$ gilt mit $v_B = v_S$ (der Spiegel ist sowohl Sender als auch Empfaenger) fuer die Frequenzaenderung

$$\Delta f = f - f_0 \approx \pm \frac{2v}{\lambda}$$

Am Detektor ueberlagern sich somit zwei EM-Wellen gleicher Amplitude aber unterschiedlicher Frequenz.

$$E = 2E_0 \cos(\pi \Delta f \cdot t) \sin(\pi(2f_0 + \Delta f) \cdot t)$$

wobei der Kosinusterm die Einhuellende der Schwingung darstellt.

Somit gilt fuer die Intensitaet

$$I \propto \cos^2(2\pi \Delta f \cdot t)$$

Wenn wir in einem Zeitintervall Δt N Minima beobachten, so gilt

$$2\pi \Delta f \cdot t = 2\pi \cdot N$$

Daraus ergibt sich

$$\Delta f = \frac{N}{\Delta t} = \pm \frac{2v}{\lambda}$$

Aufloesen nach der Geschwindigkeit des Spiegels v :

$$v = \frac{N\lambda}{2 \cdot \Delta t}$$

Wir bestimmen die Zeitintervalle, in der 5 Minima beobachtet wurden, zudem messen wir die zurueckgelegte Strecke nach jedem Zeitintervall:

```
[14]: delta_t1 = np.array([34.31,31.23])

N = 5

strecke1 = np.array([ 1.5, 1.5]) #mikrometer

delta_t2 = np.array([38.81,32.85])

strecke2 = np.array([1.5,1.5 ]) #mikrometer

delta_t3 = np.array([31.09,33.18 ])

strecke3 = np.array([1.5,1.5]) #mikrometer

v1=(N*632.8*(1/10**9))/(2*delta_t1)
v2=(N*632.8*(1/10**9))/(2*delta_t2)
v3=(N*632.8*(1/10**9))/(2*delta_t3)

print(np.mean(v1))
print(np.std(v1))
print(np.mean(strecke1*(1/10**6)/delta_t1))
print(np.std(strecke1*(1/10**6)/delta_t1))

print(np.mean(v2))
print(np.std(v2))
print(np.mean(strecke2*(1/10**6)/delta_t2))
print(np.std(strecke2*(1/10**6)/delta_t2))

print(np.mean(v3))
print(np.std(v3))
print(np.mean(strecke3*(1/10**6)/delta_t3))
print(np.std(strecke3*(1/10**6)/delta_t3))
```

```
4.83827131147671e-08
2.273706994102573e-09
4.587488601273746e-08
2.155853660653514e-09
4.446049265496308e-08
3.697802626619871e-09
4.2155966487006714e-08
3.5061339696142893e-09
```

4.928192684095311e-08
1.6026019464383382e-09
4.6727490683583854e-08
1.5195340832221915e-09

1. Messreihe:

$$v_1 = 48.383(\pm 2.274) \frac{nm}{s}$$

Zum Vergleich lässt sich auch die Geschwindigkeit mit ‘zurückgelegte Strecke/Zeitintervall’ berechnen.

Auf diese Weise erhalten wir:

$$v_{1,s/t} = 45.875(\pm 2.156) \frac{nm}{s}$$

2. Messreihe

$$v_2 = 44.460(\pm 3.698) \frac{nm}{s}$$

$$v_{2,s/t} = 42.156(\pm 3.506) \frac{nm}{s}$$

3. Messreihe

$$v_3 = 49.282(\pm 1.603) \frac{nm}{s}$$

$$v_{3,s/t} = 46.727(\pm 1.520) \frac{nm}{s}$$

Wir sehen also, dass die interferometrisch bestimmten Geschwindigkeiten ziemlich gut mit den auf ‘gewöhnlicher’ Weise bestimmten Geschwindigkeiten übereinstimmen.

Fehlerquelle ist hierbei insbesondere die Messung der Zeit mit der Stoppuhr per Hand und ‘Augenmaß’.

2.4 Wenn wir ohne Wand eine schwingende Stimmgabel zu uns hin bzw. von uns weg bewegen, so veränderte sich die wahrgenommene Frequenz, was dem Dopplereffekt entspricht. Ist eine Wand da, so konnte man eine Schwebung hören, da die Schallwellen an der Wand reflektiert werden und sich überlagerten.

2.5.3 Aufgabe 3: Faraday- und Pockels-Effekt

3.1: Modulieren Sie die Intensität des Laserlichts durch Anwendung des [Faraday-Effekts](#), indem Sie das linear polarisierte Laserlicht erst einen Stab aus Bleisilikatglas im longitudinalen Magnetfeld einer Spule und dann einen Polarisationsfilter durchlaufen lassen.

3.2: Bestimmen Sie die [Verdet-Konstante](#)

$$V \equiv \frac{\alpha}{Bl}$$

von Bleisilikatglas, wobei B der Magnetfeldstärke und l der Länge des Stabs entsprechen und α der Winkel ist, um den das linear polarisierte Licht beim Durchlaufen des Stabs gedreht wurde.

3.3: Modulieren Sie die Intensität des Laserlichts durch Anwendung des [Pockels-Effekts](#), indem Sie das linear polarisierte Laserlicht einen Lithiumniobat-Kristall mit transversalem elektrischen Feld (Feldrichtung 45° gegen die Polarisationsrichtung des Laserlichts gedreht) und ein Polarisationsfilter (90° gegen die Polarisationsrichtung des Laserlichts gedreht) durchlaufen lassen.

3.4: Bestimmen Sie die Konstante

$$k \equiv \frac{\Delta n(E)}{E}$$

für den Pockels-Effekt bei Lithiumniobat für die Wellenlänge des Laserlichts, wobei $\Delta n(E)$ der Änderung des Brechungsindex und E der elektrischen Feldstärke entsprechen.

3.1 Der Faraday-Effekt ist ein magnetooptischer Effekt. Er beschreibt die Drehung der Polarisationssebene einer linear polarisierten elektromagnetischen Welle in einem Medium, wenn darin ein Magnetfeld parallel zur Ausbreitungsrichtung der Welle herrscht.

Zur Intensitäts-Modulation des Laserlichts durch den Faraday-Effekt wird linear polarisiertes Laserlicht durch einen Stab aus Bleisilikatglas im longitudinalen Magnetfeld einer Spule geschickt. An die Spule wird der MP3-Output eines Rechners angelegt, sodass die Stärke des Magnetfelds von der abgespielten Frequenz abhängt. Das Laserlicht durchläuft dann einen Polarisationsfilter und wird schließlich vom Photoelement eines Verstärkers mit Lautsprecher registriert.

Wird nun ein Lied abgespielt, so ändert sich die Frequenz und damit auch die Magnetfeldstärke, sodass die Polarisationssebene des Laserlichts gedreht wird. Der Polarisationsfilter dient nun als Analysator und die hindurchgelassene Intensität hängt vom Drehwinkel und somit von der Magnetfeldstärke ab.

Über den Lautsprecher ist dann trotz des relativ starken Rauschens das Lied zu hören.

3.2 Die magnetische Flussdichte einer langen Spule durch die ein Strom I fließt beträgt

$$B = \mu_0 \frac{N \cdot I}{L}$$

Einsetzen ergibt mit $L = l$ für den Drehwinkel:

$$\alpha = \mu_0 \cdot N \cdot V \cdot I$$

Um den Drehwinkel zu bestimmen verwenden wir einen Polarisationsfilter, den wir so einstellen, dass die Intensität minimal ist. Erhöht sich das Magnetfeld infolge einer Erhöhung des Stroms, so wird die Polarisationssebene des Lichts gedreht und die Intensität nimmt zu. Dann wird der

Polarisationsfilter so weit gedreht, bis die Intensität wieder minimal ist. Der Winkel um den gedreht wurde entspricht dann unseren Drehwinkel α .

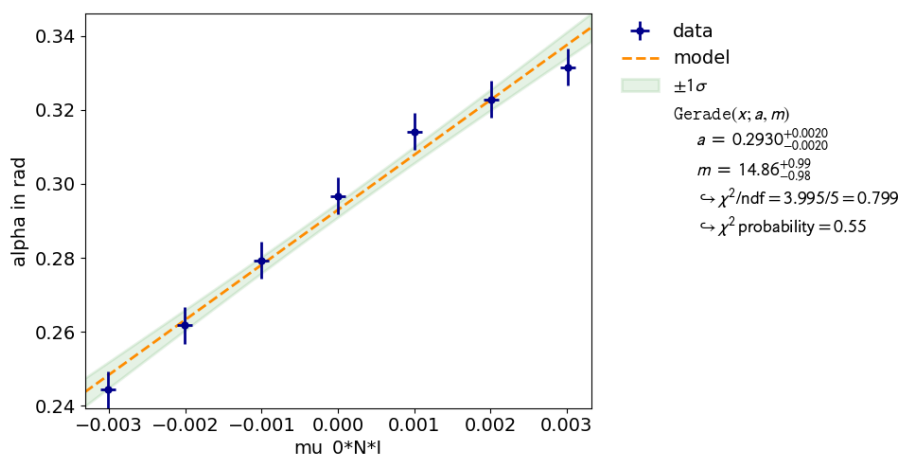
Tragen wir α gegen $\mu_0 \cdot N \cdot I$ auf, so entspricht die Steigung der Geraden die Verdet-Konstante.

```
[24]: strom = np.array([-3,-2,-1,0,1,2,3]) #ampere
strom_err = 0.1

alpha = np.array([14,15,16,17,18,18.5,19])

widuza = 800

def Gerade(x,a,m):
    return m*x+a
ppk.phyTools.k2Fit(Gerade, 4*np.pi*(1/10**7)*widuza*strom , np.deg2rad(alpha),
    ↪,sx = 4*np.pi*(1/10**7)*widuza*strom_err,sy= 0.005,axis_labels =
    ↪['mu_0*N*I', 'alpha in rad'])
```



```
[24]: (array([ 0.29296598, 14.86499541]),
array([[ -0.00197245,  0.00197245],
       [-0.97517098,  0.98576024]]),
array([[1.00000000e+00, 2.22650221e-05],
       [2.22650221e-05, 1.00000000e+00]]),
3.9950908198835338)
```

Wir erhalten somit:

$$V = 14.86(\pm 0.99) \frac{\text{rad}}{\text{Tm}}$$

3.3 Als Pockels-Effekt wird das Auftreten von Doppelbrechung bzw. deren Änderung bei Kristallen bezeichnet, an die eine elektrische Spannung angelegt wird.

Auch hier kann mittels des Pockels-Effekts die Intensitaet des Laserlichts moduliert werden, indem linear polarisiertes Laserlicht einen Lithiumniobat-Kristall mit transversalem elektrischen Feld (Feldrichtung 45° gegen die Polarisationsrichtung des Laserlichts gedreht) und ein Polarisationsfilter (90° gegen die Polarisationsrichtung des Laserlichts gedreht) durchlauft.

Aufgrund der unterschiedlichen Brechungsindizes des Kristalls erfahren die beiden Komponenten des E-Felds parallel und senkrecht zur optischen Achse eine Phasenverschiebung. Die Polarisationssebene wird gedreht und durch den Polarisationsfilter wird eine von der angelegten Spannung abhaengigen Intensitaet durchgelassen.

Analog zu 3.1 kann wieder ein Lied ausgegeben werden.

Wird das Licht auf einen Schirm projiziert, so erkennt man Hyperbelstrukturen, da durch das Linsensystem die Laserstrahlen mit unterschiedlichen Winkeln auf den Kristall treffen.

3.4 Wir variieren die Spannung an der Pockelszelle und notieren uns die Werte, bei denen im Zentrum der Hyperbelfigur Helligkeitsextrema (Maxima oder Minima) auftreten. Diese Extrema werden fortlaufend nummeriert und wir tragen die Spannungswerte gegen die Nummer n der Extrema auf. Die Steigung der Geraden ist die Halbwellenspannung.

Mit $\Delta\phi = n \cdot \pi$ ($n = 0, 1, 2, \dots$) erhalten wir fuer die Halbwellenspannung

$$U_{HW} = \frac{dU}{dn} = \pi \frac{dU}{d\Delta\phi}$$

Zudem gilt

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta n \cdot \ell = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot k \frac{U}{h} \ell$$

Und somit

$$\frac{dU}{d\Delta\phi} = \frac{\lambda \cdot h}{2\pi \cdot \ell \cdot k}$$

Die Konstante k betraegt somit

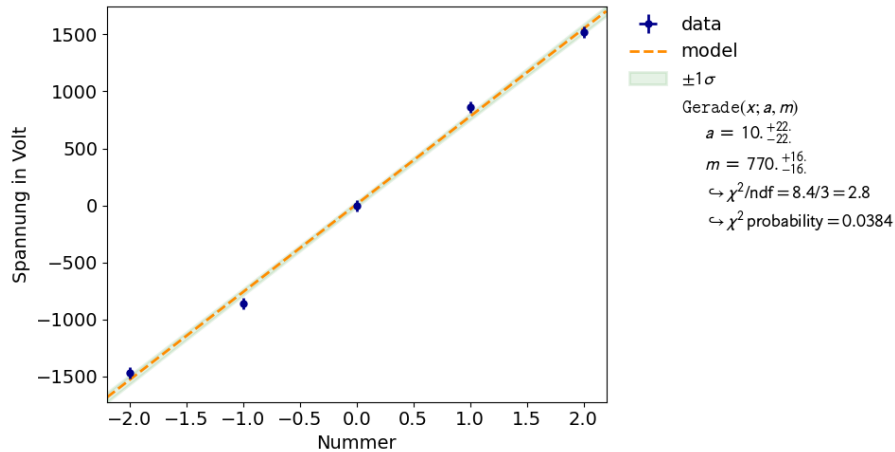
$$k = \frac{\lambda \cdot h}{2 \cdot \ell \cdot U_{HW}}$$

mit der Kristalllaenge $\ell = 20mm$ und dem Elektrodenabstand $h = 2mm$.

```
[27]: spannung = np.array([-1470,-860,0,860,1520]) #in Volt

extrema=np.array([-2,-1,0,1,2])

def Gerade(x,a,m):
    return m*x+a
ppk.phyTools.k2Fit(Gerade, extrema , spannung ,sx = 0,sy= 50,axis_labels =_
↳ ['Nummer', 'Spannung in Volt'])
```



```
[27]: (array([ 10., 770.]),
      array([[-22.36067977,  22.36067977],
             [-15.8113883 ,  15.8113883 ]]),
      array([[1.00000000e+00, 1.53557884e-09],
             [1.53557884e-09, 1.00000000e+00]]),
      8.399999999999999)
```

```
[28]: uhv = 770

uhv_err = 16

k = 632.8*(1/10**9)*0.002/(2*0.02*uhv)

k_err = np.sqrt((632.8*(1/10**9)*0.002/(2*0.02*uhv**2))**2*uhv_err**2)

print(k, k_err)
```

```
4.109090909090909e-11 8.538370720188902e-13
```

Wir erhalten somit:

$$k = 41.091(\pm 0.854) \frac{\text{pm}}{\text{V}}$$

3.5 Fehlerdiskussion Fehlerquelle sind auch hier Ablesefehler und Schwierigkeiten beim genauen Bestimmen der Intensitätsminima.

2.5.4 Aufgabe 4: Optische Aktivität (Saccharimetrie)

4.1: Bestimmen Sie den spezifischen Drehwinkel

$$[\alpha]_{\lambda}^T = \frac{\alpha}{\beta \ell}$$

einer Haushaltszuckerlösung bei verschiedenen Massenkonzentrationen β (gemessen in g cm^{-3}) sowie die Drehrichtung. Dabei entsprechen α dem unspezifischen (gemessenen) Drehwinkel gemessen in $^\circ$ und ℓ der Länge des Lichtweges durch die Lösung (gemessen in dm). Zeigen Sie, dass $\alpha \propto \ell$ und $\alpha \propto \beta$ gilt.

Zum Nachweis von $\alpha \propto \ell$ genügt es zwei Messwerte aufzunehmen bei denen die Küvette mit der Probelösung einmal längs und einmal quer durchstrahlt wird. Zum Nachweis von $\alpha \propto \beta$ beginnen Sie z.B. bei $\beta \approx 0,3 \text{ g cm}^{-3}$ und reduzieren Sie die Konzentration, indem Sie Wasser zugießen. Diskutieren Sie von welchen weiteren Parametern α noch abhängt.

Wenn Sie die Konzentration ändern, während Sie den durchtretenden Laserstrahl beobachten, scheint dieser "krummen Bahnen" zu folgen. Beachten Sie Ähnlichkeiten zwischen der optischen Aktivität und dem Faraday-Effekt.

4.2: Bestimmen Sie den spezifischen Drehwinkel einer entgegengesetzt drehenden [Sorbosc](#)-Lösung mit vorgegebener Konzentration.

```
[61]: zucker = 50 #ml
      zucker_err = 1

      wasser = np.array([200, 250, 300, 350, 400, 450, 500, 550, 600, 650, 700, 750]) #ml
      wasser_err = 5

      quer = np.array([22, 22, 20, 20, 19, 19, 18, 18, 18, 18, 18, 18])

      laengst = np.array([36, 32, 29, 28, 26, 25, 25, 24, 24, 22, 22, 22])

      l_quer = 0.058

      l_laengst = 0.198
```

Zunächst weisen wir $\alpha \propto \ell$ nach:

```
[62]: print(22/l_quer)
      print(36/l_laengst)
```

```
379.31034482758616
181.8181818181818
```

Entgegen unserer Erwartungen weichen die beiden Werte ziemlich stark voneinander ab.

Nun weisen wir $\alpha \propto \beta$ nach:

Die Dichte von Saccharose beträgt:

$$\rho = 1.57 \frac{\text{g}}{\text{ml}}$$

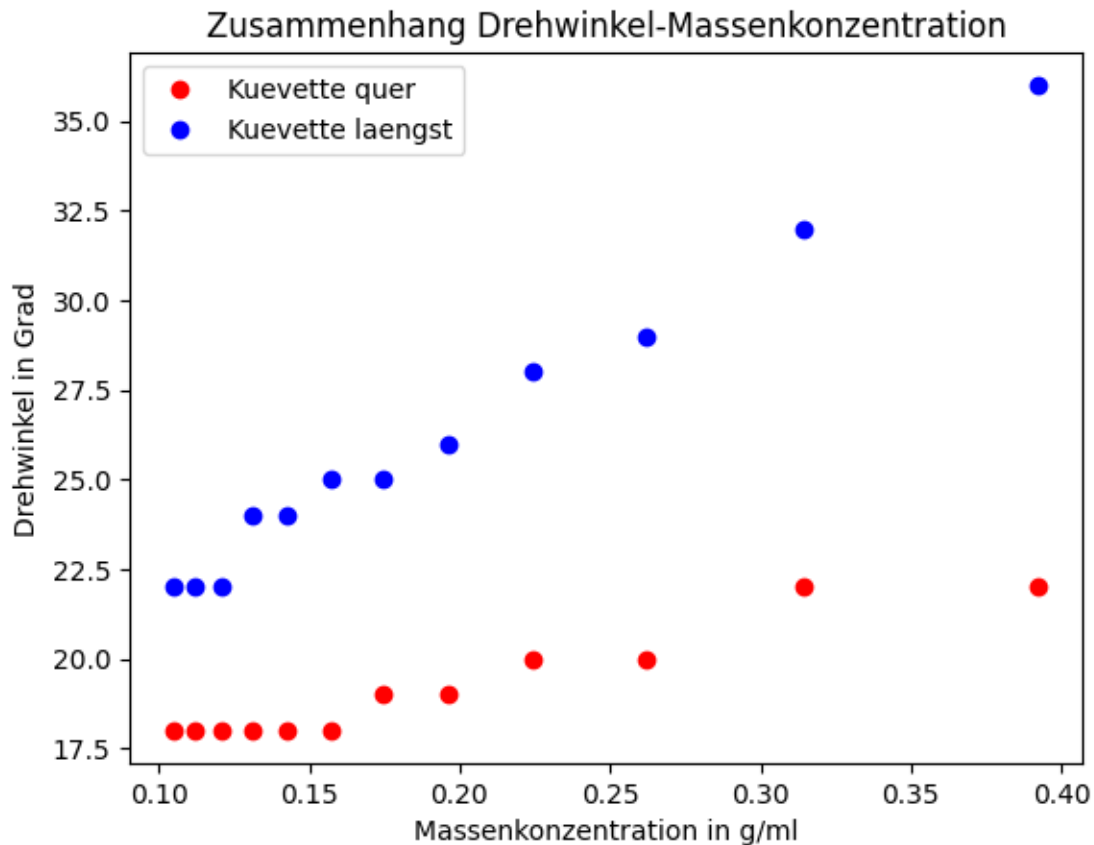
Die Massenkonzentration berechnet sich dann zu

$$\beta = \frac{m}{V} = \frac{\rho \cdot V_{\text{Zucker}}}{V}$$

wobei $V_{\text{Zucker}} = 50 \text{ ml}$.


```
[63]: beta = 1.57*50/wasser #in g/ml

plt.plot(beta, quer, 'o',color='red',label='Kuvette quer')
plt.plot(beta, laengst, 'o',color='blue',label='Kuvette laengst')
plt.title('Zusammenhang Drehwinkel-Massenkonzentration')
plt.xlabel('Massenkonzentration in g/ml')
plt.ylabel('Drehwinkel in Grad')
plt.legend()
plt.show()
```



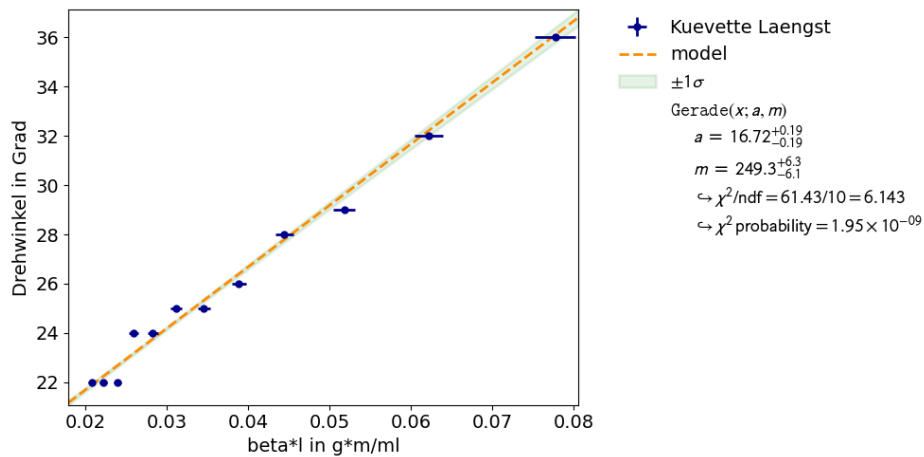
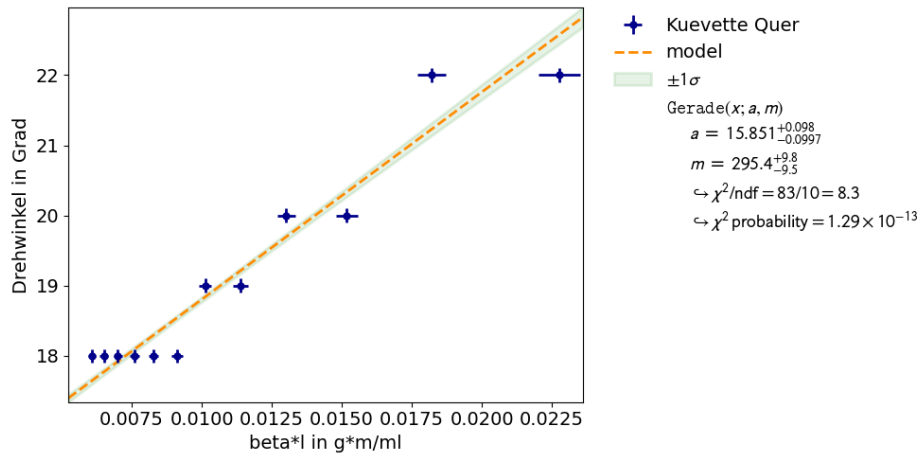
Bei groesseren Massenkonzentrationen laesst sich bei der Messreihe mit der Kuvette in Laengststellung einen linearen Verlauf feststellen. Ansonsten laesst sich leider keine Proportionalitaet feststellen.

Ursache dafuer ist vermutlich die Tatsache, dass bei einer geringen Massenkonzentration und einem geringen Lichtweg in der Querstellung der Drehwinkel so gering ist, dass die Intensitaetsveraenderung kaum mit dem Auge zu erkennen ist.

Zuletzt bestimmen wir den spezifischen Drehwinkel von Saccharose durch Auftragen von α gegen βl .

```
[69]: beta_err = np.sqrt((1.57*zucker_err/wasser)**2+(1.57*zucker*wasser_err/
↪wasser**2)**2)

def Gerade(x,a,m):
    return m*x+a
ppk.phyTools.k2Fit(Gerade, beta*l_quer, quer ,sx = beta_err*l_quer,sy= 0.
↪1,data_legend = 'Kuevette Quer',axis_labels = ['beta*l in g*m/ml',␣
↪'Drehwinkel in Grad'])
ppk.phyTools.k2Fit(Gerade, beta*l_laengst, laengst,sx = beta_err*l_laengst,sy=␣
↪0.1,data_legend = 'Kuevette Laengst',axis_labels = ['beta*l in g*m/ml',␣
↪'Drehwinkel in Grad'])
```



```
[69]: (array([ 16.71620454, 249.33053601]),
      array([[ -0.19280127,  0.18608865],
             [-6.07357714,  6.32990431]]),
```

```
array([[ 1.          , -0.94842501],
       [-0.94842501,  1.          ]]),
61.42609965411583)
```

Fuer die Messreihe mit der Kuevette in Querstellung erhalten wir fuer den spezifischen Drehwinkel von Saccharose:

$$[\alpha]_{\lambda}^T = 295.4(\pm 9.8) \frac{ml \cdot ^\circ}{g \cdot m}$$

Fuer die Messreihe mit der Kuevette in Laengststellung erhalten wir

$$[\alpha]_{\lambda}^T = 249.3(\pm 6.2) \frac{ml \cdot ^\circ}{g \cdot m}$$

Der gemessene Drehwinkel α haengt ausserdem vom verwendeten Loesungsmittel, von der Temperatur und der Wellenlaenge der Lichtquelle ab.

```
[71]: #sorbose

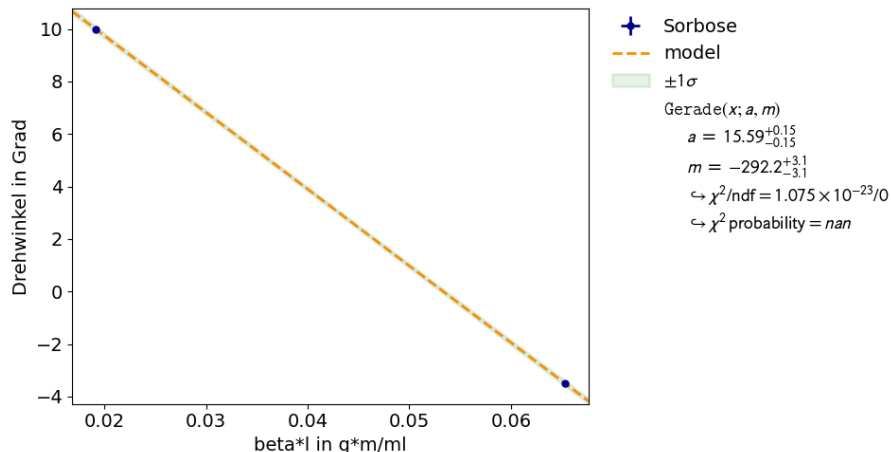
drehwinkel_quer = 10

drehwinkel_laengst = -3.5

a = np.array([10,-3.5])
lange = np.array([l_quer,l_laengst])
betas = 0.33 #g/ml

ppk.phyTools.k2Fit(Gerade, betas*lange, a ,sx = 0,sy= 0.1,data_legend = '
↳ 'Sorbose',axis_labels = ['beta*l in g*m/ml', 'Drehwinkel in Grad'])
```

```
/opt/conda/lib/python3.10/site-packages/kafe2/fit/_base/fit.py:1156:
RuntimeWarning: divide by zero encountered in scalar divide
  _result_dict["gof/ndf"] = _gof / _ndf if _gof is not None else _gof
```



```
[71]: (array([ 15.59285714, -292.20779221]),
      array([[ -0.14737153,  0.14737153],
             [-3.06106832,  3.06106832]]),
      array([[ 1.          , -0.87737114],
             [-0.87737114,  1.          ]]),
      1.0748703150179418e-23)
```

Wir erhalten fuer den spezifischen Drehwinkel der Sorbose-Loesung:

$$[\alpha]_{\lambda}^T = -292.2(\pm 3.1) \frac{ml \cdot ^\circ}{g \cdot m}$$

Wir erkennen dass die Sorbose die Polarisationssebene des Lichts in die entgegengesetzte Richtung dreht.

Fehlerdiskussion:

Zum einen stellen Ungenauigkeiten beim Abwiegen des Zuckers und des Loesungsmittels eine Fehlerquelle dar. Ausserdem kann es sein, dass sich der Zucker nicht vollstaendig geloest hat. Desweiteren koennen Inhomogenitaeten der Zuckerloesung die Messung verfaelschen. Auch hier war es schwierig, die Intenitaetsminima mit blosssem Auge festzulegen.

Bei der Bestimmung des spezifischen Drehwinkels von Sorbose ist zudem anzumerken, dass die verwendete Sorbose-Loesung bereits mehrfach wiederverwendet wurde, sodass diese verunreinigt war und die angegebene Konzentration vermutlich vom tatsaechlichen Wert abweicht.

[]: