

Fakultät für Physik der  
Ludwig-Maximilians-Universität München

Fortgeschrittenenpraktikum I in Experimentalphysik - Kurs P3A

Blockpraktikum vom 01. bis 31. März 2021

Name:	Yindong Sun	Gruppe:	14
-------	-------------	---------	----

Datum	Versuch	Punkte	Testat
	1 Mikroskopie@Home Mikroskopie mit dem Foldscope		
	2 BEU - Beugung		
2. MAR 2021	3 LAS - Lasersicherheit		
	4A INP - Interferenzphänomene		
	4B MIN - Michelson-Interferometer		
	4D FPI - Fabry-Pérot-Interferometer		
4. MAR 2021	4E MZI - Mach-Zehnder-Interferometer		
	5B LLA - c-Messung/Lambertscher Strahler		
	5C POL - Polarisierung		
	5D SPG - Spektrogoniometer		
	5E FFR - Fresnelsches Gesetz der Reflexion		

Unterschrift der/des  
Studierenden:

Bitte bewahren Sie Ihre Hefte nach dem Praktikum auf.

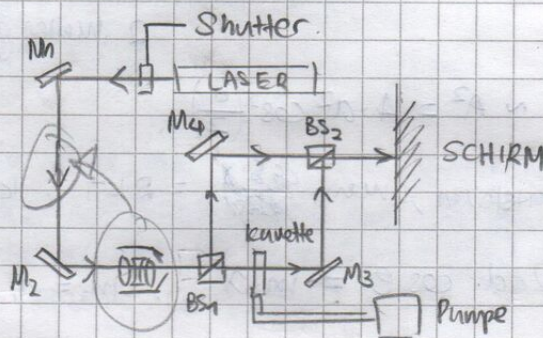


## Teilversuch 1: Aufbau eines Mach-Zehnder-Interferometers

Versuchsziel: Ein Mach-Zehnder-Interferometer aufbauen.

Messmethode: Keine

Skizze:



### Durchführung

- ① Aufbau wie in Skizze mit Strahlengangshöhe 130 mm.
- ② Strahlengang mittels  $M_1$  und  $M_2$  justieren, sodass Strahl parallel zum Tisch
- ③  $M_3$  einsetzen und justieren, sodass Strahl auf  $BS_2$  trifft.
- ④  $BS_1$  einsetzen, sodass Strahlengang nicht verändert.
- ⑤  $M_4$  einsetzen, sodass Strahl auf  $BS_2$  trifft.
- ⑥ mit  $M_3$  und  $M_4$  Laserstrahl justieren, sodass die Ausgangsstrahlen den gleichen Ausbreitungswinkel haben.
- ⑦ Lochblende einsetzen (Strahlauflaufsystem) und justieren, sodass Laserstrahl durch den das System läuft.

## Teilversuch 2: Bestimmung des Brechungsindex von Luft

Versuchsziel: Brechungsindex von Luft bestimmen.

Messmethode: Mach-Zehnder-Interferometer

Anzahl von Max/Min, die über ein Punkt durchläuft.

Skizze: Wie in TV1

### Durchführung:

- ① Setzen Kuvette vor Laserstrahl zwischen  $BS_1$  und  $M_3$ . Strahl soll sich nicht verändern.
- ② Vakuumschlauch mit der Handvakuumpumpe und einer Öffnung der Kuvette verbinden.
- ③ Andere Öffnung über einen weiteren Schlauch mit dem Druckmessgerät verbinden.



- ④ Druck in der Kavette mit der Handpumpe verringern bis ca. 500 hPa. Druck notieren.
  - ⑤ Phasenlage des Zentrums notieren. Oder wenn das nicht möglich ist, einen festen Punkt auf einem Blatt Papier markieren, das auf dem Schirm geklebt ist. Punkt soll ein Min oder Max im Muster entsprechen.
  - ⑥ Mit dem Ventil an der Kavette langsam ~~lassen~~ Luft einströmen. Die Anzahl der Maxima / Minima, welche die markierte Stelle passieren. <sup>zählen</sup>
- Je 10 Durchgänge soll den Druck am Druckmessgerät notiert werden.  
 → Punkt = Max, Zahlen min (?)
- ⑦ Schritt ⑥ weiter machen, bis die Kavette wieder vollständig gefüllt ist.

### Gefakte Auswertung

- Die Zahl der verschobene Maxima soll gegen den Druck  $p$  aufgetragen werden

$$\Delta m = \underbrace{\left[ (n-1) \cdot \frac{s}{\lambda p_0} \right]}_{\text{Gradient}} p$$

$l = (256,38 \pm 0,03) \text{ mm}$   
 von Hersteller

$$n = \frac{\lambda p_0}{s} g + 1$$

### Teilversuch 3: Bestimmung des Brechungsindex von $\text{CO}_2$ .

Versuchsziel: Brechungsindex von  $\text{CO}_2$  bestimmen

Messmethode: Mach Zehnder Interferometer,  
 Anzahl von Min/Max, die über ein Punkt durchläuft.

Skizze: siehe TV1

### Durchführung

- ① Handpumpe, Druckmessgerät, Vakuumschläuche und Kavette ab.
- ② Setze Glaszapsel mit den zwei Stopfen an die Stelle der Kavette.
- ③ Führe Glaszapsel <sup>auf  $\text{CO}_2$  Dose</sup> zu einer der Öffnungen der Glaszapsel und hineinschieben.



- ④ Ventil langsam und kontrolliert öffnen.
- ⑤ Umgekehrte Anzahl von Max/Min, die über dem Punkt durchläuft.
- ⑥ Stoppe, wenn keine Änderung im Interferenzbild zu sehen ist (Kapsel ist mit  $\text{CO}_2$  gefüllt)
- ⑦  $\text{CO}_2$  Dose schließen und ~~die~~ Kapsel leeren.

### Geplate Auswertung

$$\Delta n = \frac{N-2}{2 \cdot l}$$

Anzahl durchlaufene Min / max

$l = s = 50 \text{ mm}$   
(Messen)

$$n_{\text{CO}_2} = n_{\text{Luft}} + \Delta n$$

(Theoretisch ist  $\Delta n > 0$ )

### Lehrprotokoll

#### Vorversuch 1: Aufbau

- ① M3 und M4 so justieren, dass die Laserstrahl auf genauem Punkt auf BS2 trifft.
- ② BS2 rotieren, sodass die Punkte auf den 2 Seiten (nach auf Fern) trifft.
- ③ Vertikal Justage, sodass nach und fern gleiche Höhe hat. (M3 und M4 gleichzeitig)
- ④ Horizontal Justage,
  - Punkt auf Nahfeld trifft
  - Punkt im Nahfeld bewegen (mit M3 und M4 gleichzeitig) bis Fernfeld auch trifft.

Auf Nahfeld konzentrieren und beide Spalte gleichzeitig im Nahfeld bewegen, so dass im Fern alles immer auf ein Punkt ist
- ⑤ Objektiv versetzen, sodass Laser am Ende immer noch auf gleichen Punkt trifft.
- ⑥ behälter einsetzen, dann max suchen.  
Dann Lochblende langsam nach Fokus der Linse schieben, sodass wieder ein max getroffen ist.  
Stein soll außerdem Gaußförmig sein
- ⑦ Skizze:



## Teilversuch 2: Brechungsindex von Luft

( $\Delta P_z = \pm 1 \text{ hPa}$ )

	$m = 0,1288$	$m = 0,130$	$m = 0,152$	$= 0,137$
# Durchgänge	Druck $P_1 / \text{hPa}$	$P_2 / \text{hPa}$	$P_3 / \text{hPa}$	$\downarrow$
0	494	509	482	$n = 1,000264253$
5	534	545	517	
10	571	586	549	
15	610	621	586	
20	649	661	622	
25	689	702	641	
30	-	-	669	
$\lambda = (520 \pm 20) \text{ nm}$ $P_0 = (951 \pm 1) \text{ hPa}$				

$\leftarrow$  Nur in Auswertung verwendet

$\leftarrow$  Wert in Auswertung verwendet

## Teilversuch 3: Brechungsindex von $\text{CO}_2$

Versuch	# Durchgänge
1	12
2	13
3	12

$$\Rightarrow n_{\text{CO}_2} = 1,000528387$$

Länge  $l$  der Kapsel =  $(50 \pm 1) \text{ mm}$

LMU München Physikalische Praktika	
Versuch:	721
Datum:	4.3.2021
Betreuer:	<i>[Signature]</i>



# MZI – Mach-Zender-Interferometer

## Auswertung

Yudong Sun  
Gruppe I4

5. März 2021

### Teilversuch 1: Aufbau eines Mach-Zender-Interferometers

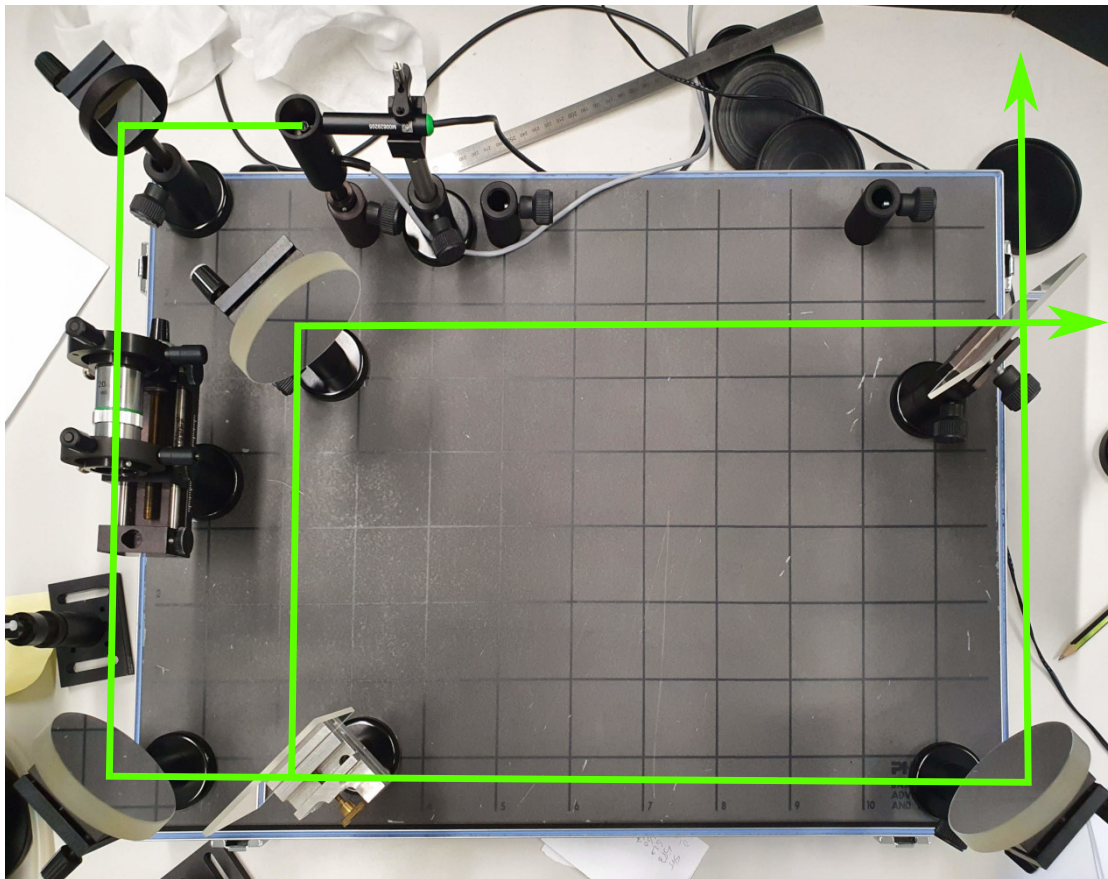


Abbildung 1.1: Mach-Zender-Interferometer Aufbau

## Teilversuch 2: Bestimmung des Brechungsindex von Luft

Aus der Anleitung ist der Brechungsindex von Luft gegeben durch:

$$n_{\text{Luft}} = \frac{\lambda P_0}{s} \cdot g + 1 \quad (2.1)$$

mit dem entsprechen Fehler:

$$\Delta n_{\text{Luft}} = n_{\text{Luft}} \sqrt{\left(\frac{\Delta \lambda}{\lambda}\right)^2 + \left(\frac{\Delta P_0}{P_0}\right)^2 + \left(\frac{\Delta s}{s}\right)^2 + \left(\frac{\Delta g}{g}\right)^2} \quad (2.2)$$

wobei  $g$  die Steigung des Graphs von  $\Delta m$  (die Anzahl der Durchgänge) gegen  $P$  (Druck) ist.

Wir plotten zunächst die Messwerten und führe mittels `gnuplot` eine Kurvenanpassung der Form  $\Delta m = gP + c$  durch (Siehe Appendix A). Ein Messfehler von  $\Delta P_i = 1 \text{ hPa}$  wird bei der Kurvenanpassung wegen der hohe Anzahl von Messwerten nicht berücksichtigt.

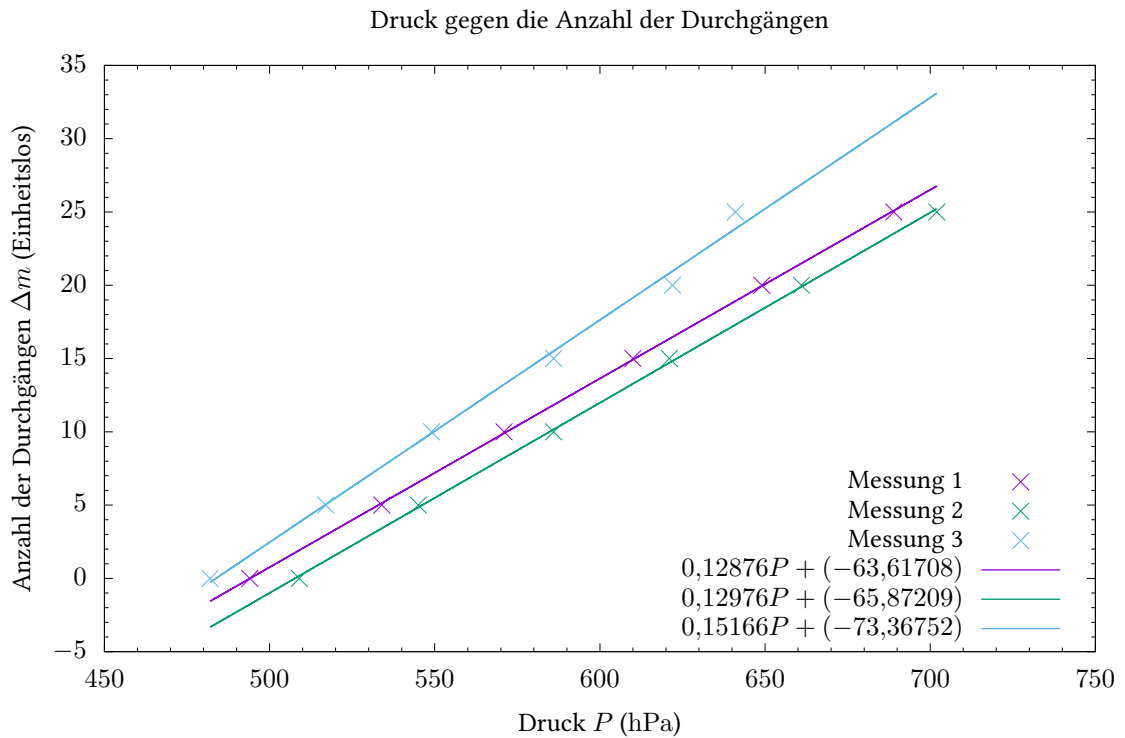


Abbildung 2.1: Druck gegen die Anzahl der Durchgängen

Als Ergebnis erhalten wir:

Messung	$g/\text{hPa}^{-1}$	$c$	$\chi_{\text{red}}^2$
1	$0,128\,76 \pm 0,000\,67$	$-63,617\,08 \pm 0,395\,87$	0,011 69
2	$0,129\,76 \pm 0,001\,47$	$-65,872\,09 \pm 0,894\,62$	0,056 31
3	$0,151\,66 \pm 0,005\,86$	$-73,367\,52 \pm 3,336\,79$	0,650 34

Gerundet:

Messung	$g/\text{hPa}^{-1}$	$c$
1	$0,1288 \pm 0,0007$	$-63,6 \pm 0,4$
2	$0,1298 \pm 0,0015$	$-65,9 \pm 0,9$
3	$0,152 \pm 0,006$	$-73 \pm 4$

Nun berechnen wir den Mittelwert von  $g$ . Wir vernachlässigen jegliche Fehler bei der einzelnen  $g$ -Werten und nehmen die statische Schwankung

$$\Delta g = \frac{g_{\max} - g_{\min}}{2}$$

als der Fehler, da diese Schwankung viel größer ist. Es ist in diesem Fall wegen der niedrigen Anzahl von  $g$ -Werten nicht sinnvoll, die Standardabweichung zu nehmen.

Wir erhalten somit  $\bar{g} = (0,137 \pm 0,012) \text{ hPa}^{-1}$ . Im Folgenden ist  $g = \bar{g}$ .

Mit der Messwerten:

Variable	Wert	Bedeutung
$\lambda$	$(520 \pm 20) \text{ nm}$	Wellenlänge des Lasers
$P_0$	$(9,51 \pm 0,01) \cdot 10^4 \text{ Pa}$	Atmosphärendruck im Raum
$s$	$(256,38 \pm 0,03) \text{ mm}$	Optische Länge der Küvette
$g$	$(1,37 \pm 0,12) \cdot 10^{-3} \text{ Pa}^{-1}$	Durchschnittliche Steigung

erhalten wir:

$$n_{\text{Luft}} = \frac{(520 \cdot 10^{-9} \text{ m})(9,51 \cdot 10^4 \text{ Pa})}{256,38 \cdot 10^{-3} \text{ m}} \cdot (1,37 \cdot 10^{-3} \text{ Pa}^{-1}) + 1$$

$$= 1,000\,264\,253 \quad (10 \text{ sig. Zif.}) \quad (2.3)$$

$$\Delta n_{\text{Luft}} = (1,000\,264\,253) \sqrt{\left(\frac{20}{520}\right)^2 + \left(\frac{0,01}{9,51}\right)^2 + \left(\frac{0,03}{256,38}\right)^2 + \left(\frac{0,12}{1,37}\right)^2}$$

$$= 0,10 \quad (2 \text{ sig. Zif.}) \quad (2.4)$$

Somit erhalten wir als Endergebnis:  $n_{\text{Luft}} = 1,00 \pm 0,10$ .

Dieses Ergebnis stimmt mit der Literaturwert  $n_{\text{Luft, Lit}} = 1.000269$  überein. Der Fehler ist aber sehr groß, was hauptsächlich zur

- Unsicherheit in der Wellenlänge des Lasers und
- Unsicherheit bei dem selbstständigen Zählen der Durchgängen

zurückzuführen ist.



### Teilversuch 3: Bestimmung des Brechungsindex von CO<sub>2</sub>

Aus der Anleitung ist der Brechungsindex von CO<sub>2</sub> gegeben durch:

$$n_{\text{CO}_2} = n_{\text{Luft}} + \frac{N\lambda}{2l} \equiv n_{\text{Luft}} + \varepsilon \quad (3.1)$$

mit dem entsprechenden Fehler:

$$\begin{aligned} \Delta n_{\text{CO}_2} &= \sqrt{(\Delta n_{\text{Luft}})^2 + (\Delta \varepsilon)^2} \\ &= \sqrt{(\Delta n_{\text{Luft}})^2 + \varepsilon^2 \left[ \left( \frac{\Delta N}{N} \right)^2 + \left( \frac{\Delta \lambda}{\lambda} \right)^2 + \left( \frac{\Delta l}{l} \right)^2 \right]} \end{aligned} \quad (3.2)$$

Aus dem Versuch haben wir einen Durchschnitt von  $N = 12 \pm 1$ , wobei  $\Delta N = 1$  die Schwankung ist. Die Schwankung ist hier als Unsicherheit genommen, da  $n = 3$  zu klein einer Datensatz ist, um die statische Unsicherheit als Unsicherheit zu betrachten.

Mit der Werten:

Variable	Wert	Bedeutung
$\lambda$	$(520 \pm 20) \text{ nm}$	Wellenlänge des Lasers
$l$	$(50 \pm 1) \text{ mm}$	Optische Länge der Kapsel
$n_{\text{Luft}}$	$1,00 \pm 0,10$	Brechungsindex von Luft
$N$	$12 \pm 1$	Durchschnittliche Anzahl von Durchgänge

erhalten wir:

$$n_{\text{CO}_2} = 1,00 + \frac{12(520 \cdot 10^{-9} \text{ m})}{2(50 \cdot 10^{-3} \text{ m})} = 1,000\,062\,4 \quad (3.3)$$

$$\begin{aligned} \Delta n_{\text{CO}_2} &= \sqrt{(0,10)^2 + (6,24 \cdot 10^{-5})^2 \left[ \left( \frac{1}{12} \right)^2 + \left( \frac{20}{520} \right)^2 + \left( \frac{1}{50} \right)^2 \right]} \\ &= 0,11 \quad (2 \text{ sig. Zif.}) \end{aligned} \quad (3.4)$$

Somit ist  $n_{\text{CO}_2} = 1,00 \pm 0,11$ , was mit dem Literaturwert von  $n_{\text{CO}_2, \text{Lit}} = 1,000\,416$  übereinstimmt. Unserer Mach-Zender-Interferometer ist aber einfach zu ungenau, um ein besseres Ergebnis zu erhalten.



## A gnuplot Quellcode zur Auswertung von Teilversuch 2

```

1  #!/usr/bin/env gnuplot
2  # Version >= 5.2
3
4  set term epslatex color size 6in, 4in
5  set output "tv2-plot.tex"
6  set decimalsign locale 'de_DE.UTF-8'
7
8  set title "Druck gegen die Anzahl der Durchgängen"
9  set ylabel "Anzahl der Durchgängen  $\Delta m$  (Einheitslos)"
10 set xlabel "Druck  $P$  ( $\text{si}\{\text{hecto}\}\text{pascal}$ )"
11
12 set mxtics
13 set mytics
14 set samples 10000
15
16 f(x) = g*x + c
17
18 array A_m[4]
19 array A_m_err[4]
20 array A_c[4]
21 array A_c_err[4]
22 array chisq[4]
23 array titel[4]
24
25 # https://stackoverflow.com/a/17884635
26 do for [t=2:4] {
27     g = 0.130; c = 60; # Reset params
28     fit f(x) "tv2.dat" u t:1 via g,c
29     A_m[t] = g
30     A_m_err[t] = g_err
31     A_c[t] = c
32     A_c_err[t] = c_err
33     chisq[t] = FIT_STDFIT**2
34     titel[t] = "$".gprintf("%.5f", g)."P + ("$.gprintf("%.5f", c).")$"
35 }
36 # Linien
37 set key bottom right vertical maxrows 10 width -8
38
39 plot for [i=2:4] "tv2.dat" u i:1 title "Messung ".(i-1) pointtype 77 lc (i-1)
    ↪ ps 2, for [i=2:4] A_m[i]*x+A_c[i] title titel[i] lc (i-1) lw 2

```

mit tv4.dat:

#	m	P1/hPa	P2/hPa	P3/hPa		5	15	610	621	586
2	0	494	509	482		6	20	649	661	622
3	5	534	545	517		7	25	689	702	641
4	10	571	586	549						



Rohausgabe:

```

1  After 5 iterations the fit converged.
2  final sum of squares of residuals : 0.0467405
3  rel. change during last iteration : -2.826e-12
4
5  degrees of freedom    (FIT_NDF)                : 4
6  rms of residuals      (FIT_STDFIT) = sqrt(WSSR/ndf)    : 0.108098
7  variance of residuals (reduced chisquare) = WSSR/ndf    : 0.0116851
8
9  Final set of parameters          Asymptotic Standard Error
10  =====
11  g              = 0.128757          +/- 0.0006655    (0.5168%)
12  c              = -63.6171          +/- 0.3959      (0.6223%)
13
14  correlation matrix of the fit parameters:
15              g          c
16  g              1.000
17  c             -0.994   1.000
18
19  After 5 iterations the fit converged.
20  final sum of squares of residuals : 0.225243
21  rel. change during last iteration : -9.26777e-13
22
23  degrees of freedom    (FIT_NDF)                : 4
24  rms of residuals      (FIT_STDFIT) = sqrt(WSSR/ndf)    : 0.237299
25  variance of residuals (reduced chisquare) = WSSR/ndf    : 0.0563106
26
27  Final set of parameters          Asymptotic Standard Error
28  =====
29  g              = 0.129755          +/- 0.001472    (1.135%)
30  c              = -65.8721          +/- 0.8946      (1.358%)
31
32  correlation matrix of the fit parameters:
33              g          c
34  g              1.000
35  c             -0.994   1.000
36
37  After 5 iterations the fit converged.
38  final sum of squares of residuals : 2.60135
39  rel. change during last iteration : -1.65252e-13
40
41  degrees of freedom    (FIT_NDF)                : 4
42  rms of residuals      (FIT_STDFIT) = sqrt(WSSR/ndf)    : 0.806435
43  variance of residuals (reduced chisquare) = WSSR/ndf    : 0.650338
44
45  Final set of parameters          Asymptotic Standard Error
46  =====
47  g              = 0.151665          +/- 0.005865    (3.867%)

```



```
48 | c                = -73.3675          +/- 3.337          (4.548%)
49 |
50 | correlation matrix of the fit parameters:
51 |           g          c
52 | g          1.000
53 | c        -0.995  1.000
```