Teilchenphysik Softwarekurs
–Übungen–

Günter Duckeck
Alexander Mann
Friedrich Hönig

Sommersemester 2018

Inhalt:

- Ein/Ausgabe von Daten
- Graphische Darstellung
- ROOT tuples und eine kleine Analyse
- Fitten von Daten

Für die Übungen wird das ROOT Programmpaket verwendet, das eine umfangreiche Klassen- und Funktionenbibliothek in C++ bereitstellt.

Allgemeines

Kursziele:

- Einführung in und Arbeit mit ROOT
- Ereignisse des ATLAS Experiments visualisieren
- Einfaches Gerüst für eine Datenanalyse

Folien & Übungen (pdf) im WWW
http://www.etp.physik.uni-muenchen.de/kurs/comp18/

1 Einführung in Linux und Python/C++

1.1 Links zu Python/C++, Root und Linux Tutorials

- Eine kompakte Einührung in C/C++ gibt es unter: C++ für Physiker
- Und das äquivalente für Python: Python für Physiker
- Ein sehr schönes und ausführliches Tutorial zu ROOT mit Beispielen sowohl in C++ als auch Python gibt es unter: Columbia ROOT Tutorial
- Aktueller ROOT Primer auf der ROOT Homepage

Einige Tutorials zu Linux gibt es z.B. unter:

- SelfLinux
- UNIX Tutorial for Beginners

1.2 Die Linux X-Benutzeroberfläche

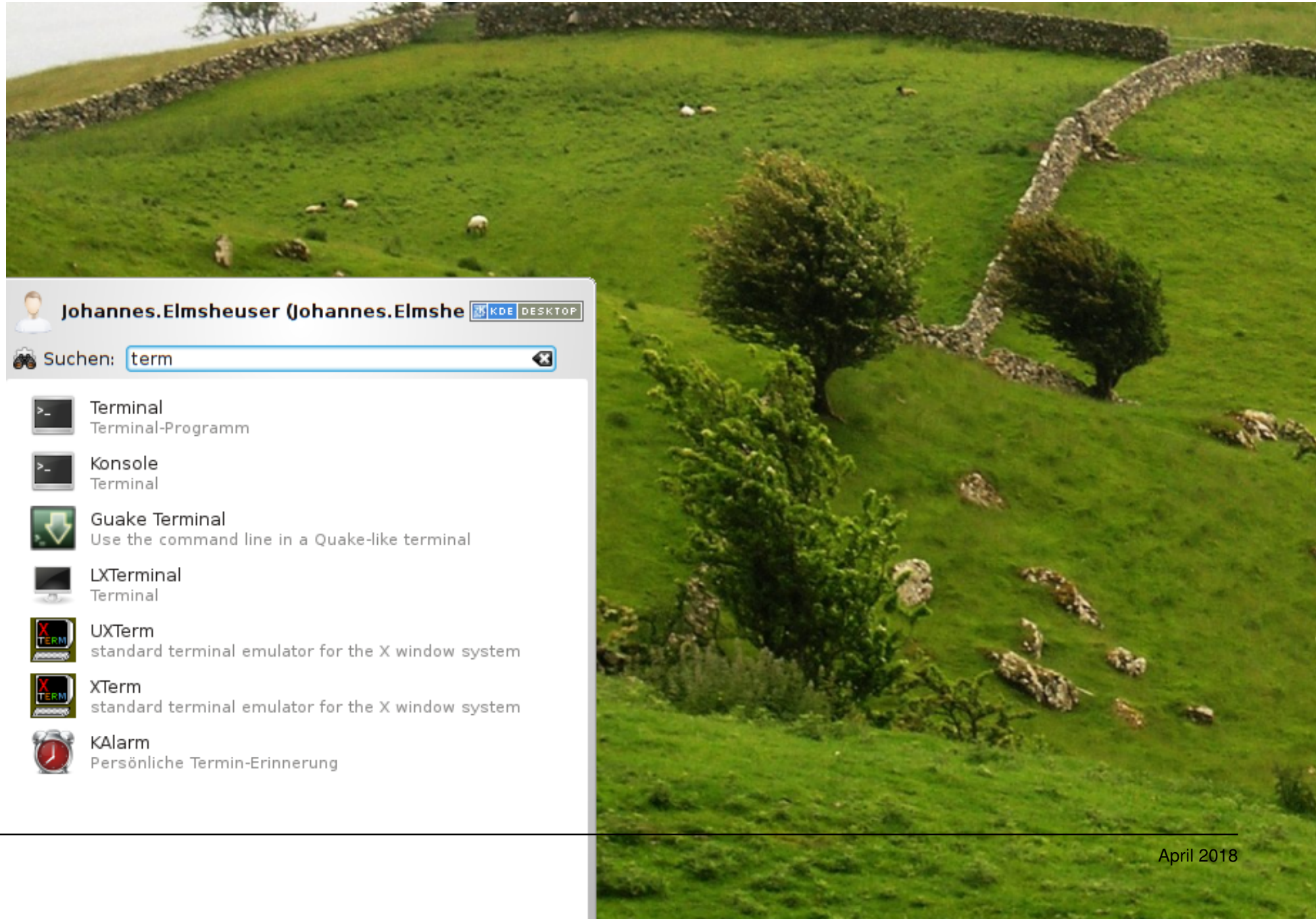
Die beliebtesten Benutzeroberflächen bzw. Fenstermanager auf Linuxsystemen sind: KDE bzw.

GNOME. Diese können auf dem login-screen unter ”Menü” -¿ ”Session type” zwischen verschiedenen Fenstermanager aussuchen. Wählen Sie entweder `"KDE"` bzw. `"GNOME Classic"`.

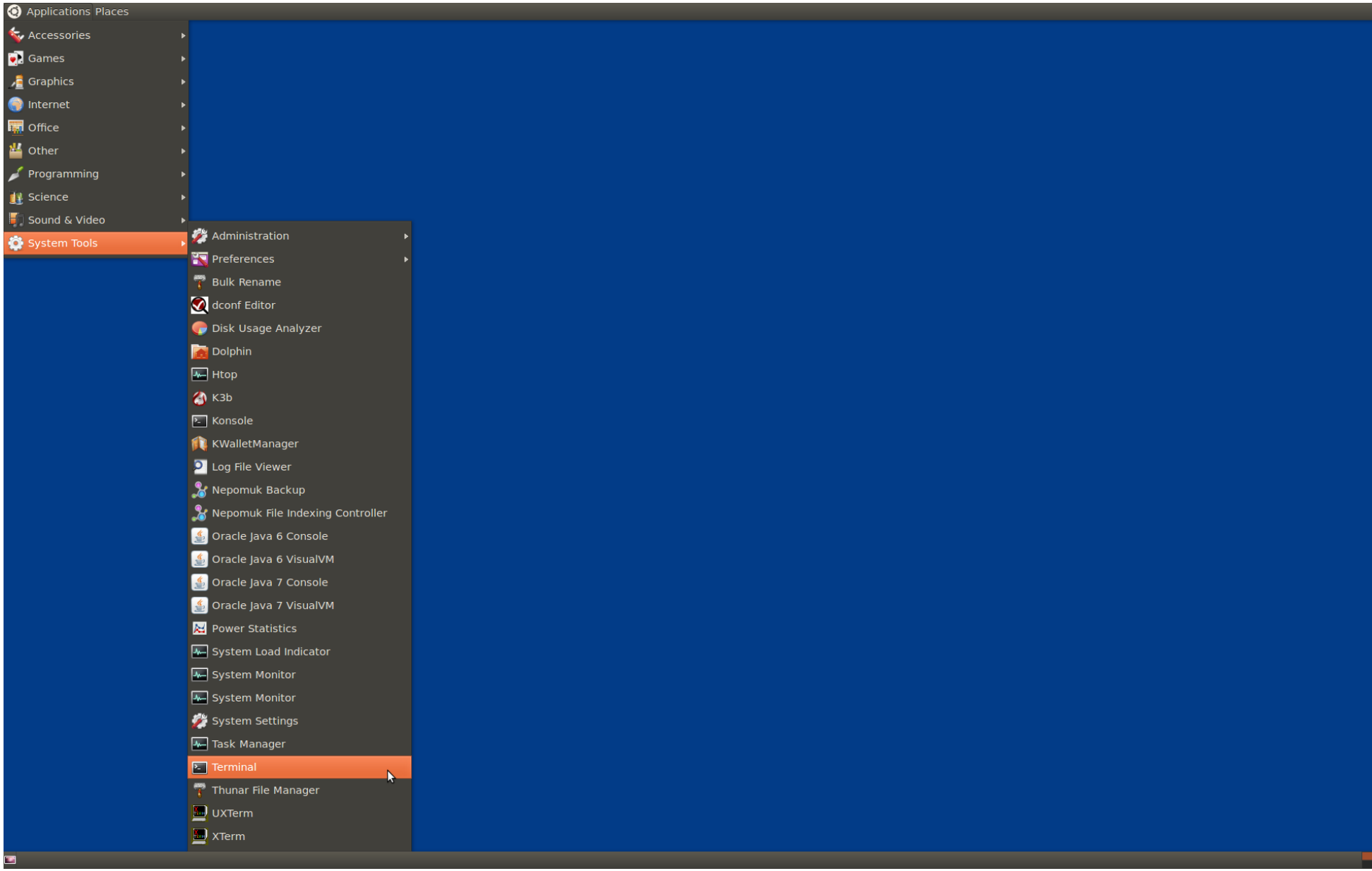
1.3 Terminalfenster starten

Nachdem Sie eingeloggt sind, starten Sie ein Terminalfenster, mit dem Sie verschiedene Befehle auf der Kommandzeile eingeben können:

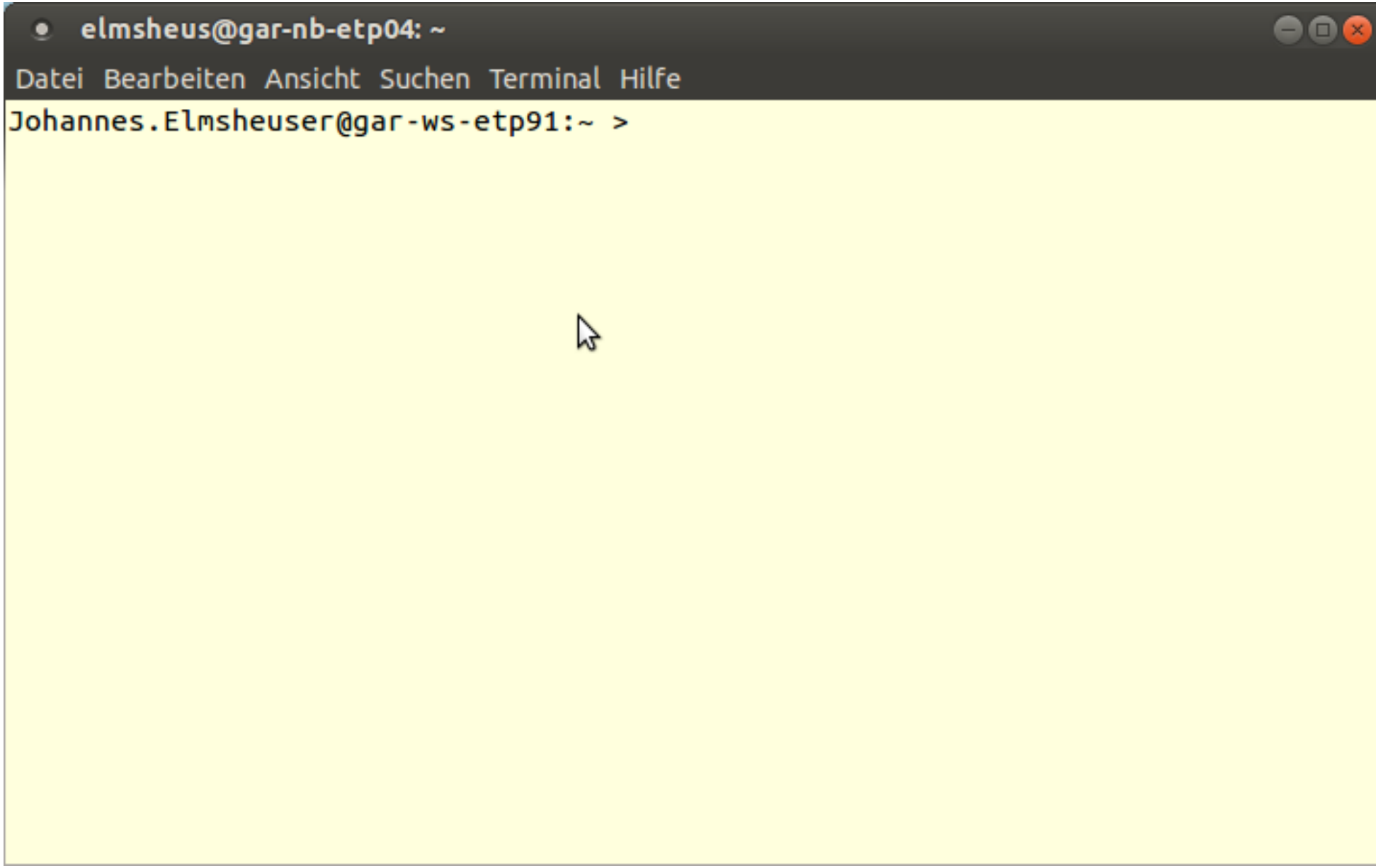
- Unter KDE klicken Sie in der rechten unteren Bildschirmecke auf den blauen ”K”-Knopf und tippen in das danach erscheinende Suchfeld des Startmenüs: ”term”. Klicken Sie anschliessend auf den ”Konsole” Menüeintrag und ein Terminalprogramm wird gestartet.


Johannes.Elmsheuser (Johannes.Elmshe
KDE DESKTOP
Suchen:
term
Terminal
Terminal-Programm
Konsole
Terminal
Guake Terminal
Use the command line in a Quake-like terminal
LXTerminal
Terminal
UXTerm
standard terminal emulator for the X window system
XTerm
standard terminal emulator for the X window system
KAlarm
Persönliche Termin-Erinnerung

- Unter GNOME classic klicken Sie in der oberen rechten Bildschirmecke auf ”Applications” und anschliessend im ”System Tools”-Menü auf den Eintrag ”Terminal”:


Applications Places
Accessories
Games
Graphics
Internet
Office
Other
Programming
Science
Sound & Video
System Tools
Administration
Preferences
Bulk Rename
dconf Editor
Disk Usage Analyzer
Dolphin
Htop
K3b
Konsole
KWalletManager
Log File Viewer
Nepomuk Backup
Nepomuk File Indexing Controller
Oracle Java 6 Console
Oracle Java 6 VisualVM
Oracle Java 7 Console
Oracle Java 7 VisualVM
Power Statistics
System Load Indicator
System Monitor
System Monitor
System Settings
Task Manager
Terminal
Thunar File Manager
UXTerm
XTerm

- Es öffnet sich ein Terminalfenster, in dem Sie Befehle auf der sog. bash Kommandzeile eingeben und ausführen können:


elmsheus@gar-nb-etp04: ~
Datei Bearbeiten Ansicht Suchen Terminal Hilfe
Johannes.Elmsheuser@gar-ws-etp91:~ >

1.4 Befehle im Terminalfenster

Auf der bash Kommandozeile können Befehle eingegeben werden, um Programme zu starten oder z.B. mit dem Dateisystem zu interagieren.

Einfache Befehle:

- Das aktuelle Arbeitsverzeichnis anzeigen:
  pwd
- Den Inhalt des aktuellen Verzeichnis anzeigen:
  ls
- Den Inhalt des aktuellen Verzeichnis als Liste anzeigen:
  ls -l
- Den Inhalt des aktuellen Verzeichnis als Liste mit versteckten Dateien anzeigen:
  ls -al
- Den Inhalt des aktuellen Verzeichnis als Liste sortiert nach Änderungdatum anzeigen:
  ls -rtl
- In das Homeverzeichnis wechseln:
  cd

- Ein neues Verzeichnis anlegen:
  mkdir mycode
- In das neue Verzeichnis wechseln:
  cd mycode

Weitere Befehle:

- Eine leere Datei anlegen:
  touch test.txt
- Eine Datei löschen:
  rm test.txt
- Eine Datei aus dem WWW herunterladen:
  wget http://www.etp.physik.uni-muenchen.de/kurs/Computing/ckurs/source/numbers.dat
- Den Inhalt einer Datei vollständig anzeigen:
  cat numbers.dat
- Den Inhalt einer Datei interaktiv anzeigen (Verlassen mit ”q”, Scrollen mit Pfeiltasten):
  less numbers.dat
- Die Anzahl der Zeilen einer Datei anzeigen:
  wc -l numbers.dat

- Ein leeres Verzeichnis löschen:
  rmdir mytestdir
- Das aktuelle Verzeichnis kann mit "." angesprochen werden:
  ls .
- In das übergeordnete Verzeichnis kann mit ".." angesprochen werden:
  ls ..
- In das übergeordnete Verzeichnis wechseln:
  cd ..
- Eine Datei von einem Verzeichnis in das aktuelle Verzeichnis kopieren:
  cp /path/to/somefile .
- Eine Datei "somefile" vom Verzeichnis "/path/from" in das Verzeichnis "/path/to" kopieren:
  cp /path/from/somefile /path/to/

Programme starten:

- Ein Programm starten Sie einfach durch Eingabe des Befehls auf der Kommandozeile. Dadurch wird die Kommandozeile für weitere Eingaben blockiert. Starten Sie deshalb saemtliche interaktiven Programme wie Editoren etc. immer mit einem zusätzlichem `&` am Ende der Befehlszeile, um die Kommandozeile wieder für neue Befehle freizugeben. Starten Sie den KDE Editor z.B. mit:
  kate &

Befehlseingabe:

- Auf vorher eingegebene Befehle kann mit der Pfeil-nach-oben bzw. Pfeil-nach-unten Taste zugegriffen werden.
- Kommandozeilenvervollständigung: Lange Programmnamen können mit Hilfe der Tabulatortaste vervollständigt werden, d.h. Sie müssen nicht immer lange Programmnamen oder Dateinamen eintippen, sondern brauchen nur die Anfangsbuchstaben eintippen und nach Drücken der Tabulatortasten kann die Befehlszeile vervollständigt werden.

Eingabe-/Ausgabeumleitung:

- Die Ausgabe eines Programms oder eines beliebigen Befehls kann vom Bildschirm des Terminalfensters in eine Datei mit ”¿” umgeleitet werden:
  ls -rtl ¿ out.txt
- Die Eingabe in ein Programm kann anstatt von der Tastatur von einer Datei mit ”¡” umgeleitet werden:
  cat ¡ numbers.dat

Editoren:

- KDE Editor:
  kate

- GNOME Editor:
  gedit
- Fortgeschrittene Editoren:
  emacs oder `vi`

Entwicklungsumgebungen und Debugger:

- Java, C++, Python Entwicklungsumgebung:
  eclipse
- C++ Entwicklungsumgebung:
  kdevelop
- Qt und C++ Entwicklungsumgebung:
  qtcreator
- Graphischer Debugger:
  ddd

GNU C++ Compiler:

- Ein C++ Programm kompilieren und linken in einem Schritt:
  g++ -o mytest mytest.cpp
- Ein C++ Programm kompilieren:

g++ -c mytest.cpp

- Ein zusammengesetztes C++ Programm kompilieren und linken:
  g++ -o TLVector MyLVector.cpp My3Vector.cpp

Verzeichnisse archivieren:

- Das aktuelle Verzeichnis in eine Datei archivieren und packen:
  tar cvzf myfile.tar.gz .
- Ein Archivdatei in aktuelle Verzeichnis entpacken:
  tar xvzf myfile.tar.gz

2 Einführung in ROOT

2.1 Was ist ROOT ?

Programmpaket zur Datennahme, Simulation und Datenanalyse, wird am CERN (European Center for Particle Physics, Genf) entwickelt.

- basierend auf C++
- objektorientiert

ROOT stellt eine Vielzahl von Objekten/Funktionen zur Verfügung

- Daten I/O
- und Verwaltung
- Simulation
- Analysieren
- graphische Darstellung

Wir beschränken uns auf einen kleinen Teilbereich:

- interaktives Arbeiten wahlweise mittels C++ Interpreter `(CINT bzw CLANG)`
- oder Python (pyROOT)
- C++/Python Makros
- Funktionen plotten
- Histogramme und Graphen
- Random numbers
- Fits

2.2 Infos und Links

ROOT :

- **Main ROOT page am CERN**
- **ROOT Klassenindex**
- **ROOT User Guide**
- Ein sehr schönes und ausführliches Tutorial zu ROOT mit Beispielen sowohl in C++ als auch Python gibt es unter: **ROOT Tutorials**
- Weiteres ausführliches Tutorial zur Benutzung von **ROOT (Uni Karlsruhe) (PDF)** bzw. **mit Macros (ZIP)**
- Aktueller ROOT Primer auf der ROOT Homepage

C++ :

- **C++ für Physiker (LMU)**
- **C++ basics for ROOT users**
- C/C++ Referenz Kompakte, übersichtliche Online-Referenz zu C/C++ Funktionen.

Python :

- **Python für Physiker (LMU)**
- Python for Science Schöne Online Referenz mit vielen Physik–Beispielen

2.3 Arbeiten mit ROOT – C++

2.3.1 ROOT initialisieren und starten

Vor dem ersten Mal:

- Verzeichnis anlegen:
  ```
  mkdir root
  ```
- Initialisierungsfiles kopieren:
  ```
  cp /project/etp/rootcourse/macros/rootlogon.C .
  ```
-

ROOT starten:

```
// Pfade setzen (evt.  in .bashrc kopieren)
module load marabou (oder:  module load root)
cd root
root
```

ROOT beenden:

```
.q
```

2.3.2 C++ Operationen – ROOT als Taschenrechner

- alle C++ Operationen
  - arithmetisch: `+, --, *, /`
  - bitwise: `&, |, <<, >>, ~`
  - logical: `&&, ||, !`
- CINT zusaetzlich Exponent (**)
- C++ standard math. Funktionen:
  sin, cos, tan, atan, log, exp ...
- weitere Funktionen in TMath Klassenbibliothek

2.3.3 ROOT Datentypen

ROOT definiert (`typedef`) eigene Datentypen um einheitliche Byte-Länge auf unterschiedlichen Systemen zu gewährleisten.

C++	FORTRAN	Bytes	ROOT	Bytes
char	CHARACTER*1	1	Char_t	1
int	INTEGER	2/4	Int_t	4
long		4/8	Long_t	8
float	REAL*4	4	Float_t	4
double	REAL*8	8	Double_t	8

⇒ Wichtig für Datenaustausch zwischen unterschiedlichen Systemen.

```
root [0] 5**2                                                    1
(int)25                                                          2
root [1] 25.1*3.5                                                3
(double)8.78500000000000085e+01                                  4
root [2] 25.1**3.5                                               5
(double)7.92242296929665754e+04                                  6
root [3] sin(2)                                                  7
(double)9.09297426825681709e-01                                  8
root [4] tan(1)                                                  9
(double)1.55740772465490229e+00                                  10
```

```
root [5] atan(1)                                                    11
(double)7.85398163397448279e-01                                     12
root [6] atan(1)*4                                                  13
(double)3.14159265358979312e+00                                     14
root [7] log(2)                                                     15
(double)6.93147180559945286e-01                                     16
root [8] exp(10)                                                    17
(double)2.20264657948067179e+04                                     18
root [9] exp(0)                                                     19
(double)1.00000000000000000e+00                                     20
root [10] exp(1)                                                    21
(double)2.71828182845904509e+00                                     22
root [14] 2<<10                                                     23
(int)2048                                                           24
root [15] 3<<10                                                     25
(int)3072                                                           26
root [16] sqrt(2)                                                   27
(double)1.41421356237309515e+00                                     28
root [17] atan2(1,1)                                                29
(double)7.85398163397448279e-01                                     30
```

```
root [18] atan2(1,0)                                                    31
(double)1.57079632679489656e+00                                         32
```

2.3.4 ROOT Klassen

ROOT stellt den Anwendern eine riesige Klassenbibliothek zur Verfügung für *Funktionen, Histogramme, Zufallszahlen, Statistik, I/O, etc*.

Arbeiten mit ROOT heisst in der Praxis, dass man Objekte der jeweiligen ROOT Klassen erzeugt und dann Methoden dieser Objekte aufruft.

Einfaches Beispiel:

```
{
  // book histo: tag, title, N-channels, xlow, x-high
  TH1F myhist("h1","Gauss Random Numbers",100,-5.,5.);
  // random generator object
  TRandom rng;
  for ( int i = 0; i<100000; i++ ) {
    double xrnd = rng.Gaus(); // Gaussian distributed Random number
    myhist.Fill( xrnd ); // Fill random number in histogram
  }
  myhist.Draw(); // Draw Histogramm
}
```

2.3.5 Schleifen

```
root [40] Double_t s = 1;
root [41] for ( Int_t i=1; i<70; i++ ) s *= i          // Fakultaet
root [42] s
(Double_t)1.71122452428141297e+98
root [57] TMath::Gamma(70)    // Dasselbe mit Gamma Fkt
(Double_t)1.71122452441969184e+98
```

2.3.6 Macros

```
// file fak.C                                                    1
Double_t fak( Int_t n = 1 )                                     2
{                                                               3
  Double_t t = 1;                                               4
  for ( Int_t i = 1; i <= n; i++ ) {                            5
    t *= i;                                                     6
  }                                                             7
  return(t);                                                    8
}                                                               9
root [63] .x fak.C(99) // direkt ausfuehren                     10
9.33262e+155                                                    11
root [64] .L fak.C      // oder erst Laden                      12
root [65] fak.C(99) // dann aufrufen                            13
9.33262e+155                                                    14
```

2.3.7 Macro Variationen

In Root gibt es verschiedene Möglichkeiten Macros zu definieren und auszuführen

- Direktes Ausführen:
  `.x myMacro.C`
  Zwei Arten von Macros:
  - **Named Macro:** .C-Datei enthält Funktion mit gleichem Namen. Bei Aufruf des Macros wird diese Funktion ausgeführt.
    Z.B. `.x fillH1.C(10000)`

```
int fillH1( int n=100000 )                                    1
{                                                             2
  TH1F * h2 = new TH1F("h2","mytitle",100,0,1);               3
  for ( Int_t i = 0; i<n; i++ ) {                             4
    h2->Fill(gRandom->Rndm());                                5
  }                                                           6
  h2->Draw();                                                 7
        }                                                     8
```

Optional können Argumente übergeben werden.

Alle Variablen, die in der Funktion angelegt werden, sind nach Ausführung wieder verschwunden *(local scope)*.

– **Un-Named Macro:** Keine Funktionsdeklaration, Root/C++ Anweisungen stehen direkt in Block von {}:

```
{                                                                    1
  int n=100000;                                                      2
  TH1F * h2 = new TH1F("h2","mytitle",100,0,1);                      3
  for ( Int_t i = 0; i<n; i++ ) {                                    4
    h2->Fill(gRandom->Rndm());                                       5
  }                                                                  6
  h2->Draw();                                                        7
        }                                                            8
```

Derselbe Effekt wie wenn diese Anweisungen direkt auf Root Kommandozeile eingegeben werden, insbesondere bleiben die Variablen erhalten *(global scope)*!

- Laden der Macro Datei:
  - Laden mit Cint (C++ Interpreter)

    `.L myMacro.C`

    Datei wird von CINT interpretiert, es können mehrere Funktionen deklariert werden, Funktionsnamen beliebig, unabhängig von Dateiname.
    - Vorsicht mit CINT–spezifischen Eigenschaften, nicht 100% C++ kompatibel
    - Standard Root Klassen (TH1F) bekannt, kein `#include <TH1F.h>` nötig.
    - Variablen sind im *(local scope)*.

    Manchmal obskure CINT Fehlermeldungen und Abbrüche, praktisch für einfache, kurze Funktionen.
  - Laden und Kompilieren mit C++ Compiler

    `.L myMacro.C+` bzw. `.L myMacro.C++`

    Datei wird kompiliert und *shared-object library* erzeugt und dynamisch geladen (`myMacro_d.so`).
    - Im 1. Fall (.C+) wird Datei nur kompiliert wenn geändert seit letzter Erstellung der .so lib
    - Im 2. Fall (.C++) wird immer kompiliert.

```
#include <TH1F.h>                                    1
#include <TRandom.h>                                 2
void fillH1( int n=100000 )                          3
{                                                    4
```

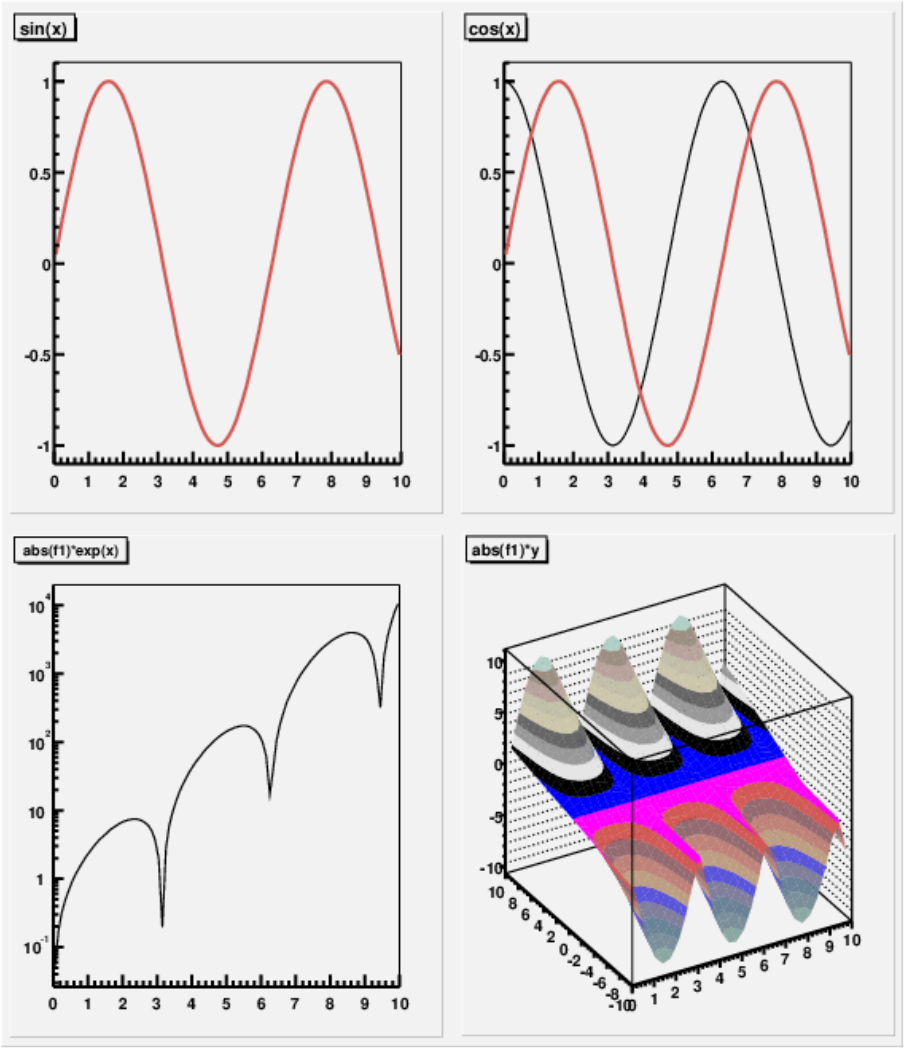
```
TH1F * h2 = new TH1F("h2","mytitle",100,0,1);
for ( Int_t i = 0; i<n; i++ ) {
  h2->Fill(gRandom->Rndm());
}
h2->Draw();
      }
```

Alle verwendeten Klassen/Funktionen müssen über die entsprechenden Header Dateien deklariert werden!

Üblicher C++ Standard, sehr gute Performance.

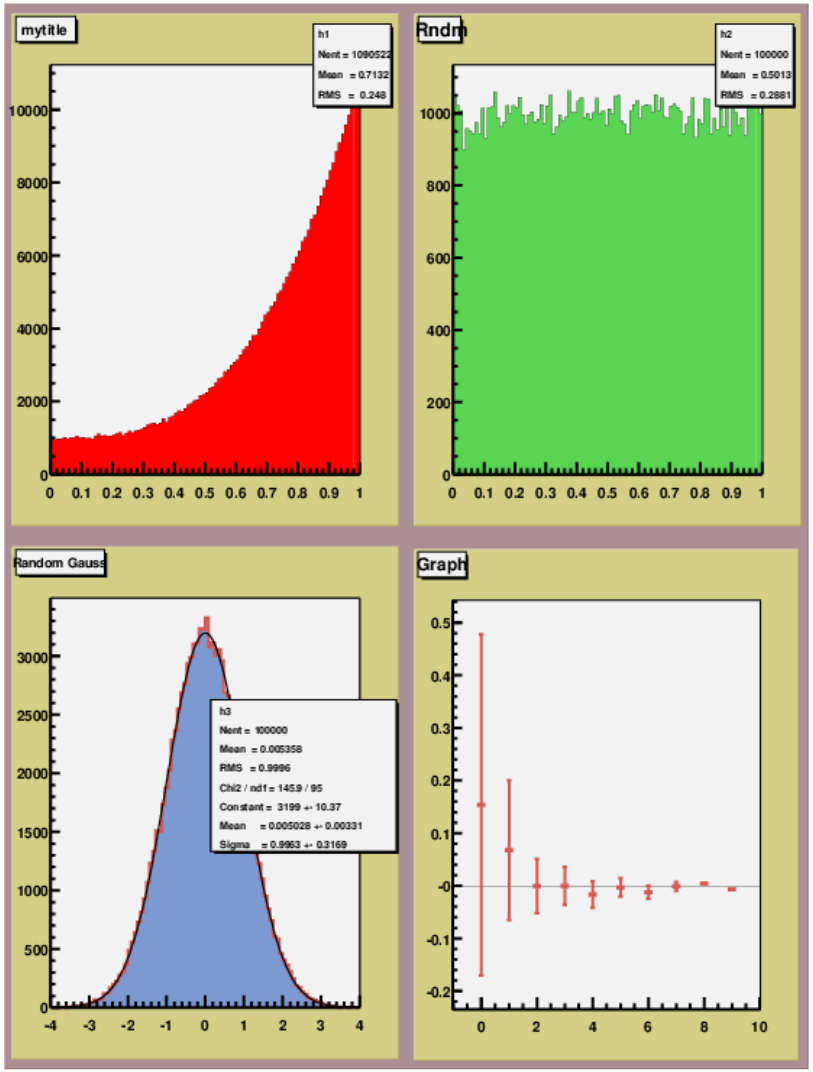
2.3.8 Funktionen

```
root [60] TF1 *f1 = new TF1("f1","sin(x)", 0, 10 );
root [61] f1->Draw();
root [68] TF1 *f2 = new TF1("f2","cos(x)", 0, 10 );
root [69] f2->Draw();
root [70] f1->Draw("same");
root [76] TF1 *f4 = new TF1("f4","abs(f1)*exp(x)", 0, 10 );
root [77] f4->Draw();
root [78] TF2 *ff1 = new TF2("f5","abs(f1)*y", 0, 10, -10, 10 );
root [79] ff1->Draw()
```


sin(x)
cos(x)
abs(f1)*exp(x)
abs(f1)*y

2.3.9 Histogramme und Zufallszahlen

```
root [83] TH1F * h1 = new TH1F("h1","mytitle",100,0,1);
root [84] for ( Float_t x = 0; x<1; x += 1e-6 ) h1->Fill(x,x**3);
root [85] h1->Draw();
root [80] TH1F * h2 = new TH1F("h2","mytitle",100,0,1);
root [81] for ( Int_t i = 0; i<100000; i++ ) h2->Fill(gRandom->Rndm());
root [82] h2->Draw();
root [87] TH1F * h3 = new TH1F("h3","Random Gauss",100,-4,4);
root [88] for ( Int_t i = 0; i<100000; i++ ) h3->Fill(gRandom->Gaus());
root [89] h3->Draw();
```


mytitle
h1
Nent = 1090522
Mean = 0.7132
RMS = 0.248
Rndm
h2
Nent = 100000
Mean = 0.5013
RMS = 0.2881
Random Gauss
h3
Nent = 100000
Mean = 0.005358
RMS = 0.9996
Chi2 / ndf = 145.9 / 95
Constant = 3199 +- 10.37
Mean = 0.005028 +- 0.00331
Sigma = 0.9953 +- 0.3169
Graph

2.3.10 Fitten

```
// file gausf.C
{
  Int_t nit = 10, nrnd, i, j;
  Float_t mean[10], emean[10], xv[10], ex[10];
  TH1F * h3 = new TH1F("h3","Random Gauss",100,-4,4);
  j =0;
  for ( i =0; i<nit; i++ ) {
    nrnd = 100*pow(2,i);
    xv[i] = i;
    ex[i] = 0.1;
    for ( ; j<nrnd; j++ ) {
      h3->Fill(gRandom->Gaus());
    }
    h3->Fit("gaus","eq");
    h3->Draw();
    TF1 *fit = h3->GetFunction("gaus");
    mean[i] = fit->GetParameter(1);
    emean[i] = fit->GetParError(1);
```

```
    cout << i << " Mean = " << mean[i] << " +- " << emean[i] << endl;
  }
  TCanvas *ce = new TCanvas("ce", "ce");
  TGraphErrors *tg = new TGraphErrors( nit, xv, mean, ex, emean );
  tg->Draw("AP");
}
root [1] .x gausf.C
```

2.3.11 Pointer in C++ und Root

Ein Pointer ist eine Variable, die eine Speicheradresse enthält.

Deklaration `Type * name`, d.h. auch hier Typ-Angabe erforderlich, Unterschied zu *normaler* Variablen–Deklaration ist * vor dem Identifier.

Zuweisung `name = & var`, Address-Zuweisung mittels Adress Operator **&** bei existierenden Objekten oder ...

Zuweisung `name = new Type( ... )`, Address-Zuweisung als Ergebnis von **new ...** bei neu angelegten Objekten.

Verwendung (1) Wert (=Inhalt der Pointer Variablen) ist Adresse

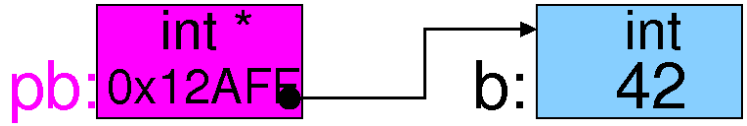
Verwendung (2) **De–Referenzieren**, d.h. Auslesen des Wertes an der Adresse mittels * vor Namen.

```
int b = 42;                                                    1
int *pb;    // pb deklariert als pointer auf int               2
pb = &b;  // & ist Adress operator, liefert Adresse von b      3
cout << b << endl;                                             4
cout << pb << endl; // Kryptische Adresse                      5
cout << *pb << endl; // De-referenzieren: *pb == b             6
```

```
double x = 7.256;                                                          7
double *px = &x; // px deklariert als pointer auf double                  8
px = &b; // illegal pointer auf double kann nicht Adresse von int nehmen   9
```

Einfache Variable: Name ist “Label” mit dem Inhalt der Variablen angesprochen wird:

Pointer: Auch Variable, aber Inhalt ist Adresse und Typ einer anderen Variablen:



Direkte Variable vs Pointer in ROOT

```
{                                                                                    1
  // histogram variable direct                                                       2
  TH1F h1("h1","mytitle",100,0,1); // h1 Variable vom Type TH1F                      3
  // Object-method call: objectname.method( ... )                                    4
  for ( int i = 0; i<1000000; i++ ) h1.Fill(gRandom->Rndm()); // Fill                5
  h1.Draw();    // Draw                                                             6
  // histogram variable as pointer to hist, histo object created with new ...       7
  TH1F * h2 = new TH1F("h2","mytitle",100,0,1);                                      8
  // Object-method call: objectpointer->method( ... )                               9
  for ( int i = 0; i<1000000; i++ ) h2->Fill(gRandom->Rndm()); // Fill               10
  h2->Draw(); // Draw                                                               11
  (*h2).Draw(); // altenative call (de-ref pointer).method( ... )                   12
}                                                                                   13
```

Warum Pointer?

Gültigkeitsbereich (Scope und Lifetime) von Variablen:

- Normal (=direkt) angelegte Variablen und Objekte existieren nur innerhalb Funktion bzw. des Blocks { ...} , wo sie definiert wurden.
- Nur mit `new ...` angelegte Variablen/Objekte existieren über Funktionsgrenzen hinweg und können direkt zurückgegeben werden.

```
TH1F Makehist( int n = 100000)                                                    1
{                                                                                 2
  // histogram variable direct                                                    3
  TH1F h1("h1","mytitle",100,0,1); // h1 Variable vom Type TH1F                   4
  // Object-method call: objectname.method( ... )                                5
  for ( int i = 0; i<n; i++ ) h1.Fill(gRandom->Rndm()); // Fill                   6
  return( h1 );                                                                   7
  // Object h1 will be deleted when function ends                                 8
  // returning h1 to caller requires complex copy operations -> discouraged      9
}                                                                                 10
TH1F * Makehistp( int n = 100000)                                                 11
{                                                                                 12
```

```
  // histogram variable direct                                                    13
  TH1F * h1 = new TH1F("h1","mytitle",100,0,1); // h1 Variable vom Type TH1F *   14
  // Object-method call: objectname.method( ... )                                 15
  for ( int i = 0; i<n; i++ ) h1->Fill(gRandom->Rndm()); // Fill                   16
  return( h1 );                                                                   17
  // Object h1 points to will stay beyond function end,                           18
  // -> programmer's responsibility to delete it                                  19
  // returning pointer h1 to caller fine, no extra copy                           20
}                                                                                 21
```

Wesentlich einfacher in Python: Alle Variablen sind quasi Pointer auf Objekte, automatisches Python Memory Management, ...

2.3.12 NTuple und Tree Ausgabe

- `basic.C`
- `basic2.C`
- `basic.dat`

2.4 Arbeiten mit ROOT – Python

2.4.1 ROOT initialisieren und starten

Vor dem ersten Mal:

- Verzeichnis anlegen:
  ```
  mkdir root
  ```
- Initialisierungsfiles kopieren:
  ```
  cp /project/etp/rootcourse/macros/rootlogon.C .
  ```
-

Python/Root starten:

```
# Pfade setzen (evt.  in .bashrc kopieren)
module load marabou/6.09.02 (oder:  module load root/6.09.02)
cd root
#
# interaktive Python Umgebung starten
ipython
>>> import ROOT
```

Python beenden:

```
Ctrl-d
```

2.4.2 Python Operationen – Python/ROOT als Taschenrechner

- alle Python Operationen
  - arithmetisch: `+, -, *, /, **`
  - logical: `and, or, !, <, >, ...`
- Python standard math. Funktionen:

```
import math
sin, cos, tan, atan, log, exp ...
```

- weitere ROOT-Funktionen via ROOT.TMath Klassenbibliothek

```
>>> import ROOT
>>> 5**2
25
>>> 25.1*3.5
87.85000000000001
>>> 25.1**3.5
79224.22969296658
>>> sin(2)
Traceback (most recent call last):
  File "<stdin>", line 1, in <module>
```

```
NameError: name 'sin' is not defined
>>> import math
>>> math.sin(2)
0.9092974268256817
>>> math.atan(1)*4
3.141592653589793
>>> math.log(2)
0.6931471805599453
>>> math.log(1)
0.0
>>> math.exp(1)
2.718281828459045
>>> 2<<10
2048
>>> math.atan2(1,1)
0.7853981633974483
```

2.4.3 Schleifen

```
>>> s=1.
>>> for i in range(1,70): s *= i # Fakultaet
...
>>> s
1.7112245242814127e+98
>>> ROOT.TMath.Gamma(70) # Root Gamma Fkt
1.7112245242814127e+98
```

2.4.4 Macros

```
# file fak.py
def fak( n = 1 ):
    t = 1.0
    for i in range(1,n+1):
        t *= i
    return(t)
>>> execfile("fak.py") # execute commands in file fak.py
>>> fak(99)
9.33262154439441e+155
```

2.4.5 Macros cont ...

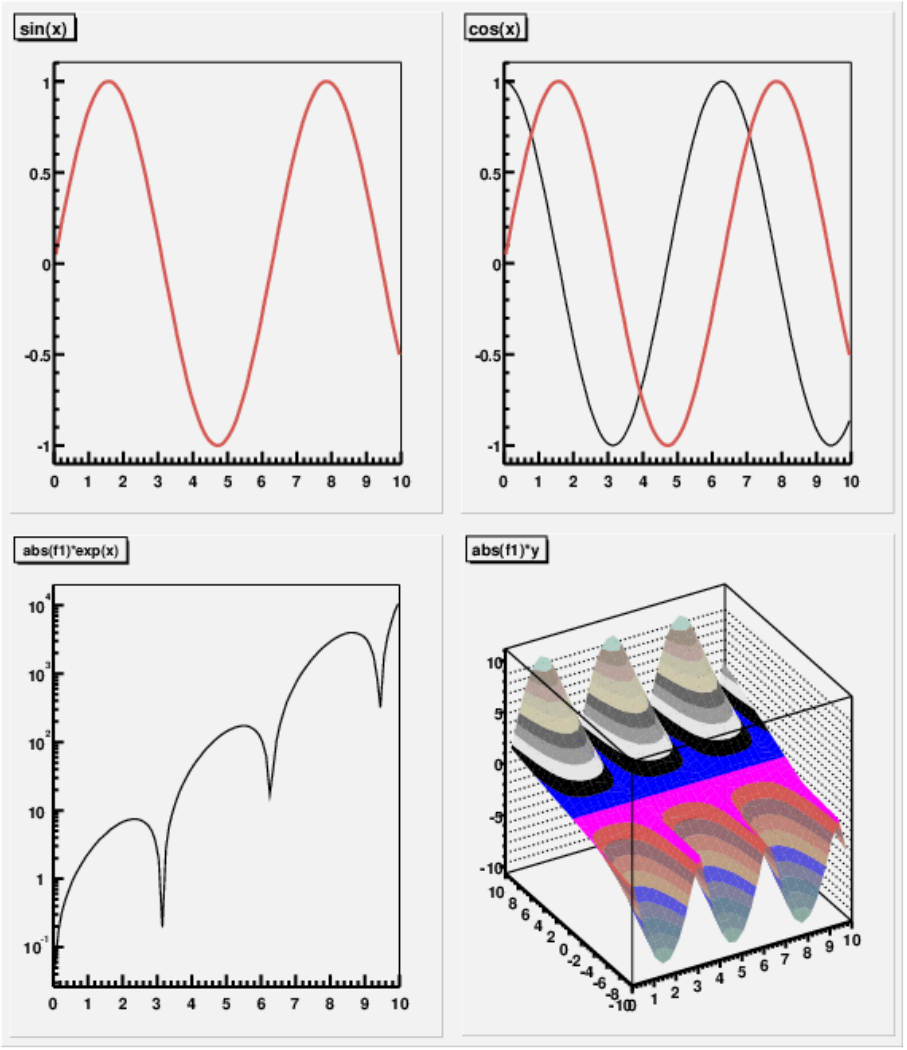
Vorsicht mit Gültigkeitsbereich von Variablen: Alle Variablen, die in der Funktion angelegt werden, sind nach Ausführung wieder verschwunden *(local scope)*

```
def fillH1( n=100000 ):
    h2 = ROOT.TH1F("h2","mytitle",100,0,1)
    for i in xrange(n):
        h2.Fill(ROOT.gRandom.Rndm())
    h2.Draw()
#
fillH1( 100000 ) # histo wird gefuellt aber nach Draw() wieder weg
```

```
def fillH1( n=100000 ):
    h2 = ROOT.TH1F("h2","mytitle",100,0,1)
    for i in xrange(n):
        h2.Fill(ROOT.gRandom.Rndm())
    h2.Draw()
    return h2
#
h = fillH1( 100000 ) # histo wird gefuellt und histo Objekt zurueckgegeben
# -> histo bleibt bestehen
```

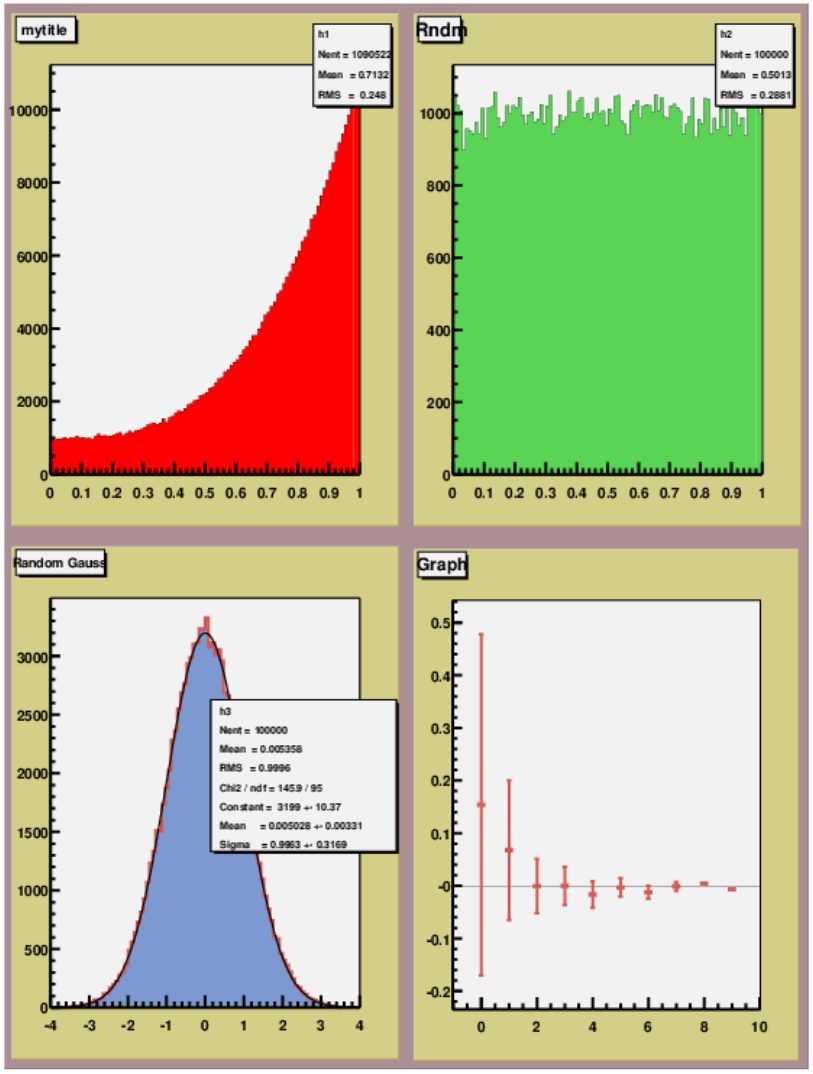
2.4.6 Funktionen

```
>>> f1 = ROOT.TF1("f1","sin(x)", 0, 10 )                                    1
>>> f1.Draw()                                                               2
Info in <TCanvas::MakeDefCanvas>: created default TCanvas with name c1      3
>>> f2 = ROOT.TF1("f2","cos(x)", 0, 10 )                                    4
>>> f2.Draw()                                                               5
Info in <TCanvas::MakeDefCanvas>: created default TCanvas with name c1      6
>>> f1.Draw("same")                                                         7
>>> f4 = ROOT.TF1("f4","abs(f1)*exp(x)", 0, 10 )                            8
>>> f4.Draw()                                                               9
```


sin(x)
cos(x)
abs(f1)*exp(x)
abs(f1)*y

2.4.7 Histogramme und Zufallszahlen

```
>>> h1 = ROOT.TH1F("h1","mytitle",100,0,1)
>>> for i in xrange(1000000):
...     x = float(i)/1e6
...     r=h1.Fill(x,x**3)
...
>>> h1.Draw()
>>> h2 = ROOT.TH1F("h2","uniform Random",100,0,1)
>>> for i in xrange(1000000): r=h2.Fill(ROOT.gRandom.Rndm())
...
>>> h2.Draw()
>>> h3 = ROOT.TH1F("h3","Random Gauss",100,-4,4)
>>> for i in xrange(1000000): r=h3.Fill(ROOT.gRandom.Gaus())
...
>>> h3.Draw()
```


mytitle
h1
Nent = 1090522
Mean = 0.7132
RMS = 0.248
Rndm
h2
Nent = 100000
Mean = 0.5013
RMS = 0.2881
Random Gauss
h3
Nent = 100000
Mean = 0.005358
RMS = 0.9996
Chi2 / ndf = 145.9 / 95
Constant = 3199 +- 10.37
Mean = 0.005028 +- 0.00331
Sigma = 0.9953 +- 0.3169
Graph

2.4.8 Fitten

```
# file pgausf.py
from array import array
nit = 10
mean=array('d',nit*[0])
emean=array('d',nit*[0])
xv=array('d',nit*[0])
ex=array('d',nit*[0])
h3 = ROOT.TH1F("h3","Random Gauss",100,-4,4)
for i in range(nit):
    nrnd = 100*pow(2,i)
    xv[i] = i
    ex[i] = 0.1
    for j in xrange(nrnd):
        r=h3.Fill(ROOT.gRandom.Gaus())
    h3.Fit("gaus","eq")
    h3.Draw()
    fit = h3.GetFunction("gaus")
    mean[i] = fit.GetParameter(1)
```

```
        emean[i] = fit.GetParError(1)                                    19
        print i , " Mean = " , mean[i] , " +- " , emean[i]               20
ce = ROOT.TCanvas("ce", "ce")                                            21
# TGraphErrors needs python array, not just list                         22
tg = ROOT.TGraphErrors( len(xv), xv, mean, ex, emean )                   23
tg.Draw("AP");                                                           24
#                                                                        25
# in ROOT                                                                26
#>>> execfile(pgausf.py)                                                27
```

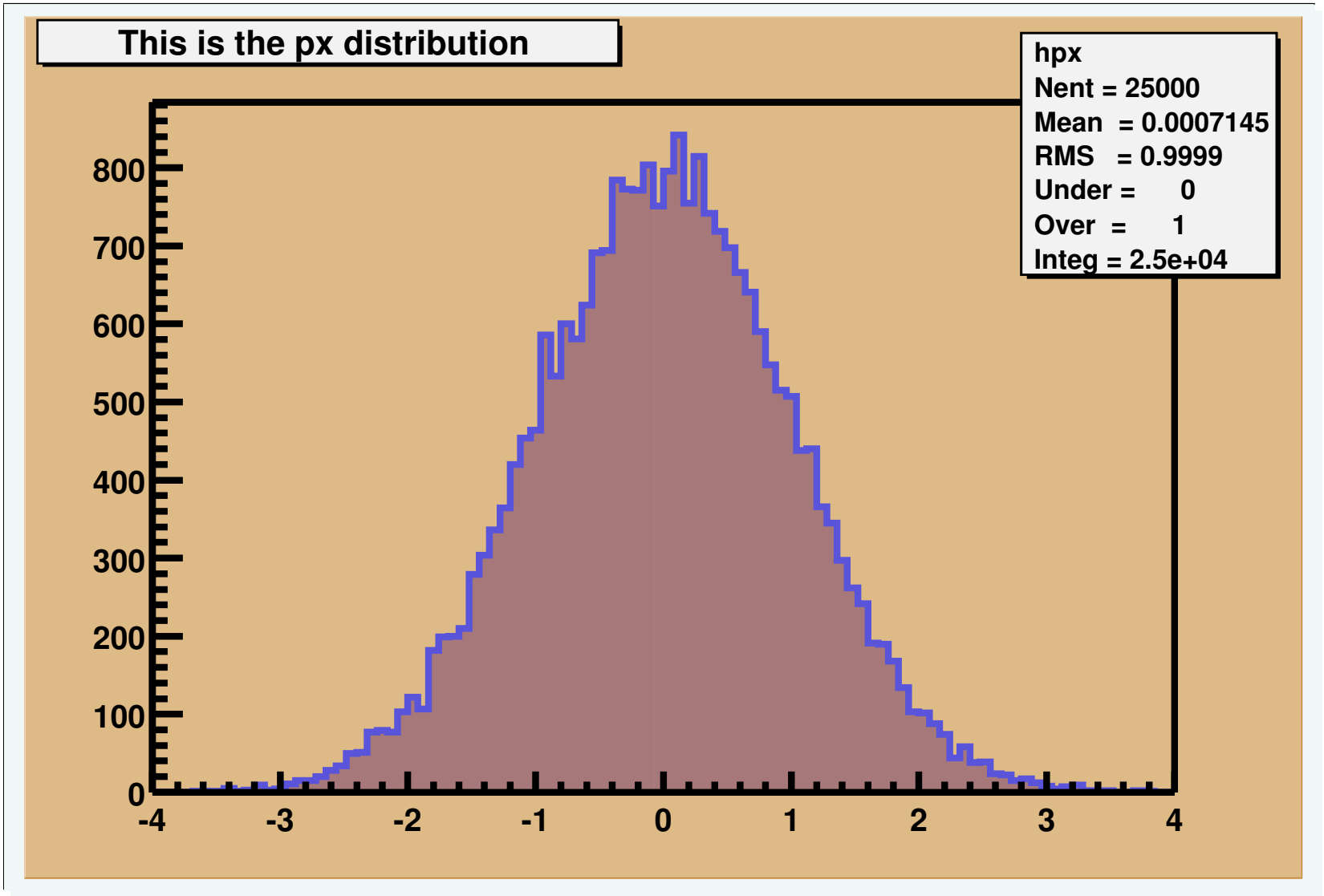
2.4.9 NTuple und Tree Ausgabe

- `basic.C`
- `basic2.C`
- `basic.dat`

2.5 Datenvisualisierung

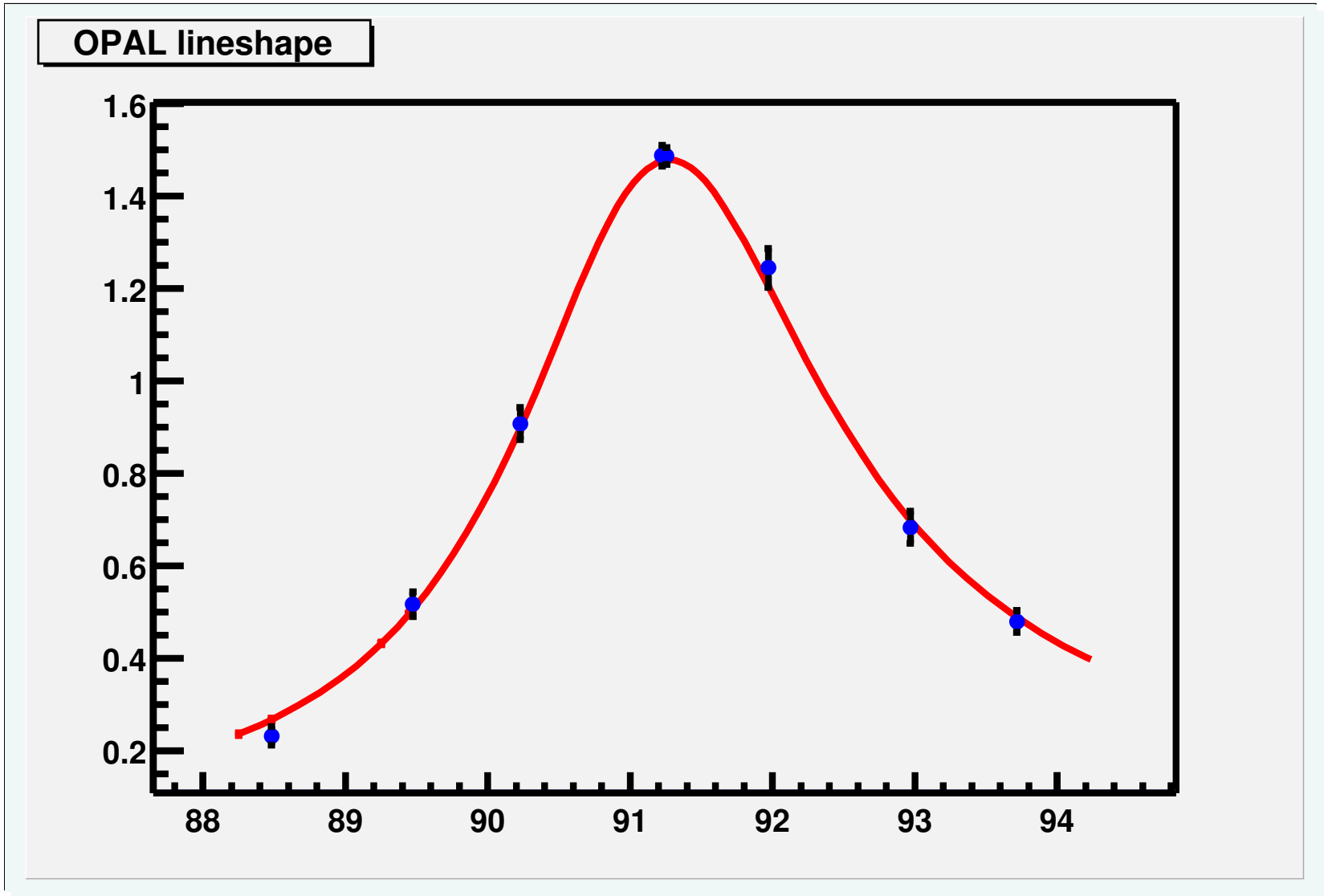
In Naturwissenschaften i.a. zwei Arten von Daten:
Häufigkeitsverteilung: Eine oder meherere Grössen werden wiederholt gemessen. Darstellung in ein- oder mehr-dimensionalen 'Histogrammen':

- Bereich `xlow` bis `xhigh` unterteilt in `nchannel` Intervalle.
- `TH1F * h1 = new TH1F("h1","mytitle",nchannel, xlow, xhig)`
- Jede Messung `x` wird in das Histogram gefüllt:
  `h1->Fill(x)`
- Darstellung $\Rightarrow$ Einträge pro Intervall.


This is the px distribution
hpx
Nent = 25000
Mean = 0.0007145
RMS = 0.9999
Under = 0
Over = 1
Integ = 2.5e+04
800
700
600
500
400
300
200
100
0
-4
-3
-2
-1
0
1
2
3
4

(x,y) Wertepaare mit Fehlern: Messungen einer Grösse y in Abhängigkeit von x mit bekannten Fehlern Δy (und evt. auch Δx) werden in einen 'x,y–Graph' eingetragen.

- np Wertepaare x, y mit Fehlern ex, ey werden in ein Diagramm eingetragen
- `TGraphErrors *tg = new TGraphErrors( np, x, y, ex, ey )`
- `x, y, ex, ey` sind jeweils arrays vom Typ `double a[np]`


OPAL lineshape
1.6
1.4
1.2
1
0.8
0.6
0.4
0.2
88
89
90
91
92
93
94

2.6 Aufgaben

1. **Aufwärmübungen mit ROOT**
   - Initialisieren und Starten Sie ROOT
   - Gehen Sie die Beispiele in diesem Kapitel durch
2. **Histogramm Setup** Verwenden Sie das Beispiel Histogramm gefüllt mit Gaus-Zufallszahlen.
   - Variieren Sie Zahl der Einträge, z.B.: 20, 1000, 1e6
   - Was sind jeweils sinnvolle Einstellungen für Zahl Kanäle, untere und obere x-Achsen Grenze?
3. **Rohrdaten mit ROOT**
   Lesen Sie die Daten aus `rohr1.dat` in ROOT ein.

```
ifstream data_file;
data_file.open("rohr1.dat");
while ( data_file >>val );
```

   Erzeugen Sie ein Histogramm und Füllen die Werte ein. (Lösungsbeispiel: `.C`, `.py`)

   Analog für `rohr2.dat` in ein 2-dim Histogramm (‘scatter-plot’).

```
TH2F h2("h","mytitle",nx,xlow,xhig,ny,ylow,yhigh);
...
h2.Fill(x,y)
```

4. **Zentraler Grenzwert Satz**

   Überprüfen Sie das Theorem, dass die Mittelwerte beliebiger Verteilungen normalverteilt sind für große n.

   (a) Verwenden Sie gleichverteilte Zufallszahlen (`gRandom->Rndm()`) und testen Sie wie die Verteilung von n abhängt.

```
void tclim( Int_t n = 12, Int_t ns = 1000 )                                    1
{                                                                              2
  TH1F * hclim = new TH1F("hclim", "central limit test", 100, −5, 5);          3
  for ( Int_t i = 0; i<ns; i++ ) {                                             4
    Float_t sum = 0;                                                           5
    for ( Int_t j = 0; j<n ; j++ ) {                                           6
      sum += gRandom−>Rndm() − 0.5;                                            7
    }                                                                          8
    hclim−>Fill( sum );                                                        9
  }                                                                            10
    }                                                                                11
```

   (b) Nehmen Sie statt der Gleichverteilung die Exponentialverteilung (`gRandom->Exp(1)`

3 Datenanalyse – einfach

3.1 Einführung

ROOT ermöglicht die effiziente und schnelle Analyse von sehr großen Datenmengen. Daten können entweder in ASCII-Format gespeichert und mit normalen C/C++ Befehlen eingelesen und weiterverarbeitet werden. Sehr viel effizienter ist die Speicherung im ROOT-tuple- bzw. n-tuple-Format. In diesem Format werden Daten und ihre Eigenschaften bzw. Variablen in sog. Baum-Format (Trees) strukturiert.

Root–Trees sind optimiert zum Speichern und effizienten Prozessieren von *Event–Daten* der Teilchenphysik.

Typischerweise werden *Events*, die im Detektor aufgezeichnet werden, in sehr unterschiedlichen Varianten abgespeichert und prozessiert.

- **Rohdaten** enthalten alle Detailinformationen der Sub–Detektoren, z.B. die Driftzeiten jedes Rohrs im Myinspektrometer, das ein SIgnal registriert hat. Das erfordert eine komplexe, tiefe Tree-Struktur:
  ATLAS $\Rightarrow$ Muonspektrometer $\Rightarrow$ Kammer-ID $\Rightarrow$ Rohr-ID $\Rightarrow$ Driftzeit
- **rekonstruierte Daten:** Spuren in den Spur-Detektoren, Blöcke oder Cluster in den Calorimetern, rekonstruierte Zerfallsvertizes, ... Erfordert immer noch komplexe Tree Struktur

- **Summary Daten:** rekonstruierte abstrakte Objekte: Jets, Leptonen, Photonen, Missing Momentum Vektor, ...
- **Globale Summary:** Zahl der Spuren oder Jets, Energie in Kalorimeter, ... Für einfache Charakterisierung genügt flaches Layout, feste Zahl von Parametern pro Ereignis.

End-Analysen verwenden i.d.R. letztere Formate...

3.2 Trees in Root – C++

```
TFile *f = new TFile("/project/etp/gduckeck/Z0-Versuch/root/ntz0mhmc.root"); // local file
TFile *f = TFile::Open("http://www.etp.physik.uni-muenchen.de/kurs/comp10/uebungen/Z0-Versuch/data/
f->ls();  // liefert Info zu File Struktur
//  KEY: TTree  h5000;1  EVENT // h5000 ist Name des Trees
h5000->Print(); // liefert Info zu Variablen im Tree
h5000->Scan(); // zeigt Variablen
h5000->Draw("Ncharged"); // fuellt 1D Histogramm mit Variable Ncharged (automatische Histo Erzeugung)
h5000->Draw("N_ecal:Ncharged"); // fuellt 2D Histogramm mit Variable Ncharged vs N_ecal
TH1F* h1 = new TH1F("nc","N Tracks", 50, 0, 50); // Buche 1d Histo
h5000->Draw("Ncharged>>nc"); // fuellt 1D Histogramm mit Variable Ncharged in gebuchtes Histo
h5000->Draw("Ncharged","E_ecal>10"); // fuellt 1D Histogramm mit Variable Ncharged wenn Cut erfuellt ist
```

```
root [4] h5000->Scan()
************************************************************************************************
*    Row   *       Run *     Event *  Ncharged *  Pcharged *    N_ecal *    E_ecal *    E_hcal *   Nmuonen *
************************************************************************************************
*        0 *      2218 *         1 *        26 * 38.397747 *        27 * 36.205452 * 11.599842 *         0 *
*        1 *      2218 *         2 *        16 * 64.514289 *        28 * 44.801551 * 38.091690 *         0 *
*        2 *      2218 *         3 *        18 * 66.992874 *        25 * 62.047374 * 8.5534896 *         0 *
*        3 *      2218 *         4 *        18 * 48.595024 *        28 * 36.578704 * 21.679370 *         0 *
*        4 *      2218 *         5 *        18 * 61.430469 *        20 * 48.331787 * 27.177442 *         0 *
*        5 *      2218 *         6 *        18 * 54.334602 *        18 * 44.907646 * 24.114786 *         0 *
*        6 *      2218 *         7 *        19 * 35.843792 *        23 * 58.461139 * 22.394620 *         0 *
*        7 *      2218 *         8 *        16 * 41.584270 *        18 * 58.184280 * 3.3126409 *         0 *
*        8 *      2218 *         9 *        16 * 45.887008 *        28 * 49.633556 * 26.143417 *         0 *
*        9 *      2218 *        10 *        25 * 44.548332 *        27 * 55.208030 * 8.8243379 *         0 *
*       10 *      2218 *        11 *        24 * 44.738807 *        38 * 59.603416 * 18.317680 *         2 *
*       11 *      2218 *        12 *        13 * 52.757247 *        26 * 52.511863 * 14.622233 *         0 *
*       12 *      2218 *        13 *        13 * 20.022710 *        30 * 50.100910 * 48.417152 *         0 *
*       13 *      2218 *        14 *        23 * 50.225769 *        28 * 51.006218 * 18.736557 *         0 *
*       14 *      2218 *        15 *        26 * 60.560817 *        30 * 39.966857 * 29.236053 *         0 *
*       15 *      2218 *        16 *        14 * 32.095005 *        26 * 38.665847 * 20.759998 *         0 *
*       16 *      2218 *        17 *        27 * 55.119529 *        33 * 43.566032 * 23.216569 *         0 *
*       17 *      2218 *        18 *        20 * 47.500988 *        28 * 46.652893 * 28.731153 *         0 *
*       18 *      2218 *        19 *        24 * 45.464210 *        27 * 43.797489 * 10.828413 *         0 *
*       19 *      2218 *        20 *        16 * 70.423339 *        13 * 31.889572 * 37.487567 *         0 *
*       20 *      2218 *        21 *        15 * 989.52423 *        19 * 75.841720 * 3.0623478 *         0 *
*       21 *      2218 *        22 *        24 * 62.683868 *        25 * 43.378685 * 22.473934 *         0 *
*       22 *      2218 *        23 *        19 * 45.465820 *        27 * 41.769184 * 33.954277 *         0 *
*       23 *      2218 *        24 *        13 * 34.419353 *         9 * 53.902935 * 9.8699989 *         0 *
*       24 *      2218 *        25 *        18 * 56.245513 *        25 * 67.646148 * 2.1789655 *         0 *
Type <CR> to continue or q to quit ==>
```

3.3 Trees in Root – Python

```
import ROOT
f=ROOT.TFile.Open("http://www.etp.physik.uni-muenchen.de/kurs/comp10/uebungen/Z0-Versuch/data/nt
mytree = ROOT.gROOT.FindObject("h5000") # get access to tree
mytree.Print()
mytree.Scan() # zeigt Variablen
mytree.Draw("Ncharged") # fuellt 1D Histogramm mit Variable Ncharged (automatische Histo Erzeugung)
mytree.Draw("N_ecal:Ncharged") # fuellt 2D Histogramm mit Variable Ncharged vs N_ecal
h1 = ROOT.TH1F("nc","N Tracks", 50, 0, 50) # Buche 1d Histo
mytree.Draw("Ncharged>>nc") # fuellt 1D Histogramm mit Variable Ncharged in gebuchtes Histo
mytree.Draw("Ncharged","E_ecal>10") # fuellt 1D Histogramm mit Variable Ncharged wenn Cut erfuellt ist
```

3.4 Grafische Tree–Browser

Verschiedene Varianten in Root für GUI basierte File bzw. Tree Browser:

- Starten Sie einen `TBrowser` mit:

  ```
  TBrowser b
  ```

  - Klicken Sie im linken Unterfenster auf `ROOT Files` und anschliessen im rechten Unterfenster auf die entsprechende ROOT ntuple file
  - Navigieren Sie durch die Datei durch Doppel-Klicken auf die jeweiligen Elemente
- Weitere Features im TTreeViewer:
  - Start direkt von Kommandozeile:
    `TTreeViewer tv("h5000")`
  - oder via rechte Maustaste im `TBrowser->StartViewer`
- Oder noch besser über HistPresent

Direktes *Tree–Browsing* ok für einmalige, schnelle Checks.

Für systematische, reproduzierbare Analysen besser C++ Klassen für Analysen verwenden $\Rightarrow$ später mehr

3.5 ASCII-Datei in ROOT-Tree einlesen

Mit der Methode `TTree::ReadFile` können ASCII Daten automatisch in eine TTree-Struktur eingelesen und abgespeichert werden:

`Long64_t TTree::ReadFile(const char *filename, const char *branchDescriptor)` erzeugt oder liesst 'branches' aus einer Dateien mit dem Namen 'filename'.

Ein Beispiel ist gegeben in folgender Datei: readfile.C

3.6 Aufgaben

1. Plotten Sie die Verteilungen (1D Histogramme) wichtiger Größen wie `Ncharged`, `E_ecal`, `Pcharged` für die Datensets mit simulierten Ereignissen: ntz0mhmc.root (Quark/Hadronen Zerfälle), ntz0eemc.root (Elektron/Positron), ntz0mmmc.root (Myon), ntz0ttmc.root (Tau)
2. Machen Sie 2D Histogramme für die drei Kombinationen von `Ncharged`, `E_ecal`, `Pcharged` sowohl für die simulierten Datensets als auch für die Detektor-Daten (ntz0e4.root).
3. Finden Sie einfache Schniite auf diese Größen un diese Endzustände zu trennen.

4 Datenanalyse – ausführliches Beispiel Z0-Versuch

4.1 Einführung

Der Z0 versuch aus dem F-Praktikum gibt gutes Beispiel für Datenanalyse in Teilchenphysik.

- Verwendet Daten des OPAL Experiments am e^+e^- Beschleuniger LEP (Vorläufer von LHC).
- LEP Daten vergleichsweise sauber und “einfach” zu interpretieren.
- Aufgabe: Bestimmung des Wirkungsquerschnitts für die Reaktionen $e^+e^- \to Z^0 \to q\bar{q}$ und $e^+e^- \to Z^0 \to \mu^+\mu^-$
- Datensätze in `/project/etp/gduckeck/Z0-Versuch/root` bzw. http://www.etp.physik.uni-muenchen.de/kurs/comp10/uebungen/Z0-Versuch/data/
- Vorgehen:
  - Erstellen geeigneter Algorithmen (=Schnitte) zur Selektion dieser Endzustände
    Simulierte Daten für Signal und Untergrund Reaktionen :
    `ntz0mhmc.root` : $e^+e^- \to Z^0 \to q\bar{q}$
    `ntz0mmmc.root` : $e^+e^- \to Z^0 \to \mu^+\mu^-$
    `ntz0eemc.root` : $e^+e^- \to Z^0 \to e^+e^-$
    `ntz0ttmc.root` : $e^+e^- \to Z^0 \to \tau^+\tau^-$

  - Optimierung der Schnitte $\Rightarrow$ hohe Signal-Effizienz, wenig Untergrund
  - Bestimmung von entsprechenden Korrekturfaktoren
- Selektion anwenden auf echte Datensätze (7 verschiedene Schwerpunktsenergien) `ntz0e1.root - ntz0e7.root`
- Korrektur und Berechnung der Wirkungsquerschnitte
- Vergleich mit theoretischen Vorhersagen und weitere Interpretation

  Ausführliche Dokumentation in
  http://www.etp.physik.uni-muenchen.de/fp-versuch/index.html.

4.2 Ausarbeitung der Selektion

Zur Ausarbeitung der Selektionskriterien empfiehlt sich folgendes Vorgehen:

- Überlegen welche Grössen in Frage kommen für Cuts
- Verteilungen dieser Grössen studieren für Signal und Untergrund Daten
- Satz von Schnitten erstellen
- Vergleichen der Verteilungen Daten – Monte Carlo
  evt weitere Cuts nötig

Praktisches Beispiel für Vorgehen (Verwendung von Hilfsklasse GDUtils.C).

```
{                                                                                    1
  // some example commands for Z0-Versuch ntuple analysis                            2
  .L GDUtils.C+ ;    // Load utility Macro                                           3
  GDUtils u; // create object                                                        4
  // TFile *f = new     TFile("/project/etp/gduckeck/Z0-Versuch/root/ntz0mhmc.root");  5
  TFile *f1 = TFile::Open("http://www.etp.physik.uni-muenchen.de/kurs/comp10/uebungen/Z0-Versuch/da
  h1 = u.H1("e-mc","E_Ecal", 100, 0, 100); // book and fill histo from tree           7
  h5000->Draw("E_ecal>>e-mc");                                                       8
```

```
  //   TFile *f2 = new   TFile("/project/etp/gduckeck/Z0-Versuch/root/ntz0e4.root");
  TFile *f2 = TFile::Open("http://www.etp.physik.uni-muenchen.de/kurs/comp10/uebungen/Z0-Versuch/da
  h2 = u.H1("e-d","E_Ecal", 100, 0, 100); // book and fill histo from tree
  h5000->Draw("E_ecal>>e-d");
  u.NewCanvas();  // canvas with 2 pads
  u.Zone(1,2);
  u.Drawh1("e-d"); // draw histos
  u.Drawh1("e-mc");
  u.Over("e-d","e-mc"); // overlay histos with normalization
  u.Over("e-d","e-mc", 0, 20, 70);
}
```

GDUtils Klasse enthält einige nützliche Funktionen um Zugriff auf Histogramme und Zeichnen zu vereinfachen.

4.3 Selektion in C++ mit eigener TSelector Klasse

Für eine komplexe, reproduzierbare Selektion empfiehlt es sich die Schnitte in einer richtigen C++ Klasse bzw. Funktion zu definieren und damit den Tree zu prozessieren.

Eine Möglichkeit ist mit `TreeName->MakeClass("MyClass");` so eine Klasse mit Root zu erzeugen.

Eine zweite ähnliche Variante ist die Erzeugung einer *TSelector* Klasse:

- `h5000->MakeSelector("MyZ0Selector");`
  Vorher Tree File öffnen (`TFile f("ntz0mhmc.root")`)
- Generiert Dateien `MyZ0Selector.h` und `MyZ0Selector.C` mit Klasse MyZ0Selector.
- **MyZ0Selector** ist abgeleitete Klasse von **TSelector**
- Grundlegende Methoden:
  `Begin()` zur Initialisierung (Histogramme anlegen, etc.)
  `Terminate()` zum Abschliessen (Ergebnisse und Histogramme bzw abspeichern, etc.)
  `Process( entry )` zum Prozessieren, wird für jedes Event/entry gerufen, Schnitte anwenden, Histogramme füllen, etc.)
  `Process( )` Methode sollte Aufruf von `GetEntry(entry);` enthalten um erstmal komplettes Event einzulesen.

Zum Prozessieren des Trees am Besten:

```
.L MyZ0Selector.C+ // Klasse Kompilieren/Laden
MyZ0Selector *s1 = new MyZ0Selector() // Objekt anlegen
TFile f("ntz0e4.root") // Tree File oeffnen
h5000->Process(s1) // Tree Prozessieren
```

TSelector/MakeSelector ist modernere Variante von **MakeClass/MyClass**.

$\Rightarrow$ flexibler, kann auch mit **PROOF** (Paralleles Prozessieren mit Root) verwendet werden.

Weiteres Vorgehen für Z0 Versuch:

- Getrennte TSelector Klassen für jeweils Hadron- und Muon-Selektion erstellen
- Zum Prozessieren der verschiedenen Datensätze jeweils eigenes Objekt anlegen:

```
MyHadSelector *shd1 = new MyHadSelector() // Objekt anlegen
TFile f("ntz0e1.root") // Tree File oeffnen
h5000->Process(shd1) // Tree Prozessieren
...
MyHadSelector *shd2 = new MyHadSelector() // Objekt anlegen
TFile f("ntz0e2.root") // Tree File oeffnen
h5000->Process(shd2) // Tree Prozessieren
...
```

- Objekte enthalten anschliessend Histogramme und sonstige Ergebnisse der Selektionen.

Beispiele:

SomeZ0Selector.h

SomeZ0Selector.C

runZ0sel.C

Beispiel für Korrektur bzw Wirkungsquerschnitt-Berechnung: calcXS.C

Beispiel-Skript zum Überlagern von Histogrammen: stackHist.C

4.4 Tree Prozessieren/Selektion in Python

In Python lässt sich Prozessieren von Trees und Selektion sehr einfach erledigen:

- Tree öffnen
- Schleife über Einträge
- Tree Variablen werden automatisch an Tree-Objekt angehängt

```
import ROOT
# open file on wbe server
myf = ROOT.TFile.Open("http://www.etp.physik.uni-muenchen.de/kurs/comp10/uebungen/Z0-Versuch/dat
# retrieve tree
mychain = ROOT.gDirectory.Get( 'h5000' )
# N events
nentries = mychain.GetEntriesFast()
hnct = ROOT.TH1F("hnct","Ncharged",50,0,50)
for i in xrange( nentries ):
    mychain.GetEntry(i)
    # tree variables in mychain
    if i<20:
```

```
            print mychain.Event, mychain.Ncharged, mychain.E_ecal                13
        hnct.Fill( mychain.Ncharged )                                            14
hnct.Draw()                                                                      15
```

4.5 Aufgaben

1. Erstellen Sie Python Skripte zum Prozessieren der Trees mit Selektion und Erzeugen und Füllen der Histogramme für die Grössen `Ncharged, E_ecal, Pcharged`.

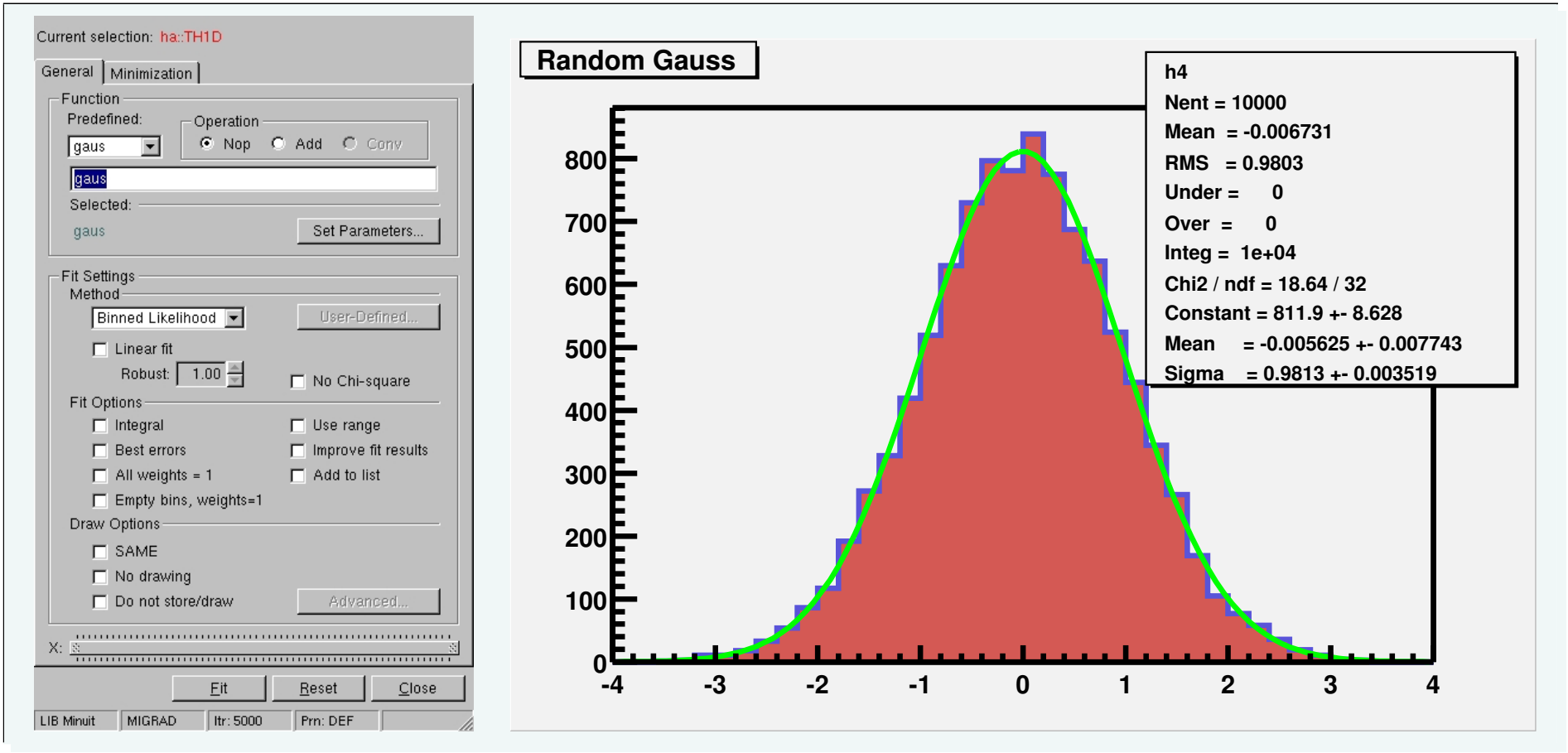
5 Fitten mit ROOT

ROOT beinhaltet das klassische Fit- oder Minimierungspaket **Minuit** (übernommen aus FORTRAN). Dies ist ein sehr mächtiges Programmpaket zur numerischen Minimierung; es ist Standard in Kern- und Teilchenphysik, wird aber auch ausserhalb der Physik verwendet (CERN Software für friedliche Zwecke frei verfügbar, Minuit ist das am meisten verwendete CERN Programm außerhalb der Physik, abgesehen vom WWW ...).

Mittlerweile weitere Varianten für Minimierung in ROOT: *Minuit2, Fumili*

Sowohl für Histogramme als auch für (x, y) Wertepaare mit Fehlern ist das Fitten eine integrierte Methode der jeweiligen Klasse (*TH, TGraph*).

Besonders komfortabel geht es mit dem eingebauten FitPanel, mit dem man verschiedene Funktionen auswählen kann, sowie Fit-Optionen einstellen und den Fit-Range begrenzen kann.


Current selection: ha::TH1D
General
Minimization
Function
Predefined:
gaus
Operation
Nop
Add
Conv
gaus
Selected:
gaus
Set Parameters...
Fit Settings
Method
Binned Likelihood
User-Defined...
Linear fit
Robust: 1.00
No Chi-square
Fit Options
Integral
Use range
Best errors
Improve fit results
All weights = 1
Add to list
Empty bins, weights=1
Draw Options
SAME
No drawing
Do not store/draw
Advanced...
X:
Fit
Reset
Close
LIB Minuit
MIGRAD
Itr: 5000
Prn: DEF
Random Gauss
h4
Nent = 10000
Mean = -0.006731
RMS = 0.9803
Under = 0
Over = 0
Integ = 1e+04
Chi2 / ndf = 18.64 / 32
Constant = 811.9 +- 8.628
Mean = -0.005625 +- 0.007743
Sigma = 0.9813 +- 0.003519
800
700
600
500
400
300
200
100
0
-4
-3
-2
-1
0
1
2
3
4

5.1 Fitten von (x, y) Wertepaaren mit TGraphErrors

Mit der ROOT Klasse TGraphErrors kann man Wertepaare mit Fehlern darstellen und Fitten:

```
double xv[5] = { 1., 2., 3., 4., 5.       };
double yv[5] = { 2.8, 3.7, 5.4, 6.1, 8.0 };
double ey[5] = { 0.5, 0.5, 0.5, 0.5, 0.5 };
double ex[5] = { 0.01, 0.01, 0.01, 0.01, 0.01 };
TGraphErrors *tg = new TGraphErrors( 5, xv, yv, ex, ey );
tg->Draw("AP");
```

Fitten anschliessend interaktiv

- Fitpanel: *mit rechter Maustaste auf Graph klicken, FitPanel auswählen*
- Kommandozeile/Programm:

  ```
  tg->Fit("pol1");
  ```

  Python Version:

```
import ROOT
#
from array import array
```

```
nit = 5                                                                    4
xv = array('d',[ 1., 2., 3., 4., 5.          ])                           5
yv = array('d',[ 2.8, 3.7, 5.4, 6.1, 8.0 ])                               6
ey = array('d',[ 0.5, 0.5, 0.5, 0.5, 0.5 ])                               7
ex = array('d',[0.01, 0.01, 0.01, 0.01, 0.01 ])                           8
# TGraphErrors needs arrays not just Python lists                         9
tg = ROOT.TGraphErrors( len(xv), xv, yv, ex, ey )                          10
tg.Draw("AP")                                                              11
    tg.Fit('pol1')                                                             12
```

Fitparameter, Fehler und Kovarianz kann man nach dem Fit über die ROOT Fitter Klasse `TVirtualFitter` abrufen:

```
TVirtualFitter *ft = TVirtualFitter::GetFitter();                                   1
// get fit parameter + error                                                        2
cout << ft->GetParameter(0) << " +- " << ft->GetParError(0) << endl;                3
cout << ft->GetParameter(1) << " +- " << ft->GetParError(1) << endl;                4
// get covariance                                                                   5
cout << ft->GetCovarianceMatrixElement(0,1) << endl;                                6
```

5.2 Fitten von Histogrammen

Mit den ROOT Histogramm Klassen (TH1F, ...) kann man 1-dim Häufigkeitsverteilungen darstellen und fitten:

```
// create histo
int nbins = 50;
TH1F * hn = new TH1F("h4","Random Gauss",nbins,-4,4);
for ( int i = 0; i<10000; i++ ) {
  hn->Fill(gRandom->Gaus());
 }
hn->Draw();
// direct fit
hn->Fit("gaus");
// retrieve fit-function
TF1 *fit = hn->GetFunction("gaus");
// retrieve sigma
double sigma = fit->GetParameter(2);
```

Interaktives Fitten analog

- Fitpanel: *mit rechter Maustaste auf Graph klicken, FitPanel auswählen*
- Kommandozeile/Programm ...

Standard ist ein χ^2 Fit :

Für Histogramme wird dabei als Fehler für ein Bin mit N Einträgen ein Gausscher Fehler $\sqrt{N}$ angesetzt.

- Diese Näherung ist ausreichend für genügend grosses $N \geq 10$, d.h. man braucht genügend Daten dass (fast) alle Kanäle des Histogramms dies erfüllen
- Ansonsten mehrere Probleme:
  - grundsätzlich: Gauss-Näherung nicht mehr adäquat (Einträge Poisson-verteilt)
  - praktisch: Kanäle mit Null Einträgen werden beim Gauss-Fit ignoriert (keine sinnvolle Gauss Fehlerannahme möglich)
    $\Rightarrow$ Erzeugt Bias für Fit-Parameter, Fluktuationen nach unten (0) werden tendenziell ignoriert.

5.3 Maximum Likelihood Fit für Häufigkeitsverteilungen

Die optimale Methode zum Fitten einer Häufigkeitsverteilung an die Daten x_i ist ein **Unbinned Maximum Likelihood Fit** $\ln \mathcal{L} = \sum_{i=1}^{n} \ln p(x_i, \vec{a})$ bei dem jeder Datenwert explizit verwendet wird.

- Die Information wird voll ausgenutzt, keine Verluste durch binning
- Funktioniert auch bei geringer Statistik (wenig Messwerte)

Allerdings gibt es auch ein paar Nachteile:

- Erfordert direkte Programmierung entsprechender Minuit Funktion $\Rightarrow$ Nächstes Mal.
- Konzeptionell: Keine direkte Kontrolle über Güte des Fits, man kann im Prinzip jede beliebige Funktion $p(x, \vec{a})$ fitten, egal ob sie die Verteilung der Daten beschreibt oder nicht. (Das resultierende $\mathcal{L}$ am Minimum ist kein Mass für die Qualität des Fits, im Gegensatz zum χ^2)
- Bei großer Zahl von Messwerten sehr rechenintensiv $(\propto N)$
- Keine direkte Visualisierung möglich

Die letzten beiden Punkte kann man umgehen durch einen **Binned Maximum Likelihood Fit**:

- Ähnlich wie beim χ^2 Fit fasst man Messwerte in Bins zusammen. (Rechenzeit $\propto N_{bins}$)
- Die Zahl der Einträge in den einzelnen Bins ist Poisson-verteilt.

$$\ln \mathcal{L}(n_1, n_2, ..., n_n|\vec{a}) = \sum_{bins} (\ln \frac{\mu_i^n e^{-\mu}}{n_i!})$$

  wobei μ sich aus der anzupassenden Verteilung berechnet:

$$\mu = N \int_{\Delta x_i} p(x|\vec{a})$$

- Im Vergleich zum χ^2 fit funktioniert das auch noch gut bei geringer Statistik, d.h. < 5 Einträgen pro Bin. Auch leere Bins mit n=0 werden im fit korrekt berücksichtigt, was bei χ^2 fits nicht sinnvoll möglich ist.
  $\Rightarrow$ Übungen

5.4 Definition der Fit-Funktion

Einige Funktionen sind vordefiniert in ROOT:

- Polynome bis zum 9. Grad
- Gauss
- Exponentialfunktion
- Landau Verteilung
- Über FitPanel können Funktionen kombiniert werden:
  z.B. `Gaus + pol2`

Fitten mit Benutzer definierten Funktionen

Für viele Fälle kann man auf weitere in ROOT eingebaute Funktionen zurückgreifen.

- `TF1 *myfit = new TF1("myfit","[0]*sin(x) + [1]*exp(-[2]*x)", 0, 2);`
- Auswahl `user` im FitPanel und Eintrag `myfit` in Textfeld
- Oder Kommandozeile `hist->Fit("myfit")`
- Meist müssen brauchbare Startwerte für den Fit vorgegeben werden: `myfit->SetParameters(1,0.05,0.2);`

Und für den allgemeinen Fall kann man eigene C++-Funktionen definieren:

```
double BreitWig( double *x, double *par)
{
  // Breit- Wigner function
  double mw = par[0], gw = par[1], spk=par[2], mw2, gw2, eb2;

  mw2 = mw*mw;
  gw2 = gw*gw;
  eb2 = x[0]*x[0];
  return( spk * gw2*mw2 / ( pow( eb2 - mw2, 2 ) + mw2 * gw2 ) );
  //    return( spk * gw2*mw2 / ( pow( eb2 - mw2, 2 ) + eb2*eb2/mw2 * gw2 ) );
}
void bwfit()
{
  const int np = 7;
  double xv[np] = { 88.396, 89.376, 90.234, 91.238, 92.068, 93.080, 93.912 };
  double *ex = 0;
  double yv[np] = {  6.943, 13.183, 25.724, 40.724, 27.031, 12.273, 6.980 };
  double ey[np] = {  0.087, 0.119, 0.178, 0.087, 0.159, 0.095, 0.064};
```

```
   TGraphErrors *tg = new TGraphErrors( 7, xv, yv, ex, ey );
   tg->Draw("AP");
   TF1 *bw = new TF1("bw",BreitWig, 70, 110, 3);
   // set parameters
   bw->SetParameters(80.,2. , 10.);
   // do the fit
   tg->Fit("bw");
   // retrieve fit function
   TF1 *f = bw;
}
```

5.5 Multi–Parameter Fit und Korrelationen

Wenn mehrere Parameter simultan gefittet werden ist es wichtig neben den Werten und Fehlern der Parameter auch die Korrelationen zu untersuchen.

In ROOT sind diese Informationen prinzipiell verfügbar, allerdings etwas versteckt und nicht direkt über das FitPanel abrufbar.

Für Fits die mit Minuit gemacht werden liefert folgende Funktion die Kovarianz- bzw. Korrelationsmatrix:

```
TMatrixD * GetCovMat( int ndim,  bool print = false, bool corrmat = false )
{
  TMatrixD td(ndim,ndim);
  gMinuit->mnemat(td.GetMatrixArray(),ndim);

  if ( corrmat ) {
    for ( int i=0; i<ndim; i++ ) {
      for ( int j=i+1; j<ndim; j++ ) {
    double cor = td(i,j) / sqrt( td(i,i) * td(j,j) );
    td(i,j) = cor;
    if ( i != j ) { // copy off diag elem
```

```
      td(j,i) = td(i,j);                                              12
    }                                                                 13
      }                                                               14
      td(i,i) = 1.0;                                                  15
    }                                                                 16
  }                                                                   17
  if ( print ) td.Print();                                            18
                                                                      19
  return ( new TMatrixD(td));                                         20
}                                                                     21
                                                                      22
```

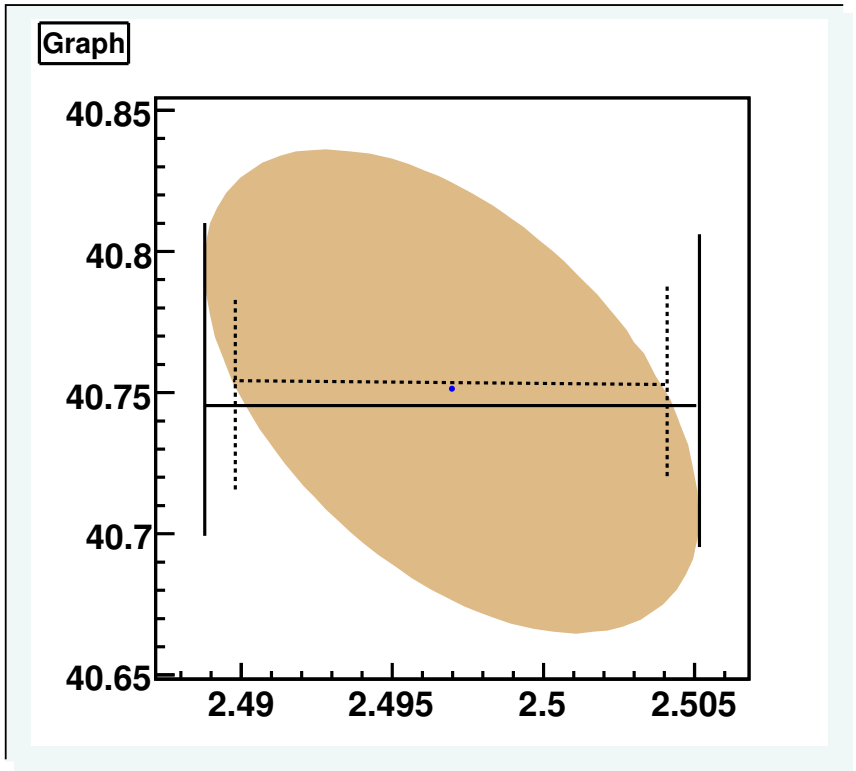
C/C++ Tricks:

- `TMatrixD` ist Matrix Klasse mit double als Elemente, viele nürtzliche Funktionen zum Bearbeiten, Drucken, Invertieren, ..., von Matrizen.
  `TMatrixD td(ndim,ndim)` definiert $ndimxndim$ Matrix.
- `gMinuit` ist **globaler Pointer** auf aktuelles `TMinuit` Objekt.
- `gMinuit->mnemat(...)` ruft Minuit Funktion, die die Kovarianzmatrix der gefitteten Parameter im übergebenen Array (`td.GetMatrixArray()`) speichert.

Contour-Plot

Eine gute Visualisierung der Korrelation erlauben die sog. Contour-Plots, die die 1-sigma (oder n-sigma) Ellipse für zwei Fit-Parameter zeigen.

- Der Fehler eines Parameters wird durch Korrelation erhöht, die volle Breite bzw Höhe der Contour-Ellipse entspricht dem Fehler
- An der Ellipse lässt sich aber auch leicht ablesen wie stark sich der Fehler verringert wenn man einen Parameter fixiert (gestrichelte Linie)



In Minuit Funktion `gMinuit->Contour(...)` , die direkt als TGraph-Objekt und zum Zeichnen der Contour benutzt werden kann:

```
void plotContour( int i, int j )
{
  // make contour plot for two vars:
  TGraph *gr2 = (TGraph*)gMinuit->Contour(80,i,j);
  gr2->SetFillColor(42);
  gr2->Draw("alf");

  // central value
  double pi, dpi;
  double pj, dpj;
  gMinuit->GetParameter( i, pi, dpi) ;
  gMinuit->GetParameter( j, pj, dpj) ;
  TMarker *marker = new TMarker(pi,pj,20);
  marker->Draw();
}
```

5.6 Fitten mit MINUIT

Das direkte Fitten mit ROOT ist beschränkt auf

- unkorrelierte Messungen
- χ^2 fit
- binned Maximum-Likelihood fit

Wenn das nicht reicht muss man innerhalb von ROOT MINUIT direkt aufrufen:

```
//      initialize TMinuit
TMinuit *gMinuit = new TMinuit(npar);
// Tell Minuit the function
gMinuit->SetFCN(fcn);
// Start Werte fuer Minuit
gMinuit->mnparm(0, "a", 1.3, 0.1, 0.1, 5., ierflg);
// minimization
gMinuit->mnexcm("MIGRAD", arglist ,2,ierflg);
```

In der Funktion `fcn` muss man dann selbst χ^2 oder $\mathcal{L}$ berechnen, wobei `fcn` folgende Argumente bekommt:

```
void fcn(Int_t &npar,Double_t *gin,Double_t &f,
Double_t *par,Int_t iflag)
```

Wichtig sind

- pointer/array `par`, enthält die aktuellen Werte der Parameter.
- `f`, damit wird das berechnete χ^2 oder $\mathcal{L}$ zurückgegeben.

Die Syntax zur Minuit Verwendung ist ein bisschen speziell, weder C noch C++ sondern an FORTRAN angelehnt. Minuit in FORTRAN geschrieben, ROOT Implementation ist direkte f2c Übersetzung.

5.7 Unbinned Maximum-Likelihood Fit

- log-likelihood für Daten und **pdf** in Abhängigkeit der FitParameter berechnen
- Minuit **minimiert**, deshalb Vorzeichen von *Max-LogLikelihood* rumdrehen
- Default Fehler Definition für χ^2 Fit $\Rightarrow$ Faktor 0.5 für log-likelihood

```
const int N = 40;
double arr[N];
void AsyRnd( bool outp = true )
{
  // get random number according to asymmetry function
  TF1 *f1 = new TF1("f1","3/8*(1+0.5*x+x*x)", -1, 1 );

  for   ( int i =0; i<N; i++ ) {
    //      arr[i] = f1->GetRandom();
    arr[i] = gRandom->Rndm()-0.1;
    if ( outp ) cout << " i = " << i << " x = " << arr[i] << endl;
  }
}
```

```
14
double fEval( double x, double p[])                                                    15
{  // calculate asy pdf for given x and asy par                                       16
  double val = 3./8*(1.+p[0]*x+x*x);                                                   17
  return val;                                                                          18
}                                                                                      19
void fcn(Int_t &npar,double *gin, double &f, double *par, int iflag)                   20
{  // calculate log likelihood for generated values arr[i]          and asy par       21
  double logl = 0.;                                                                    22
  for ( int i =0; i<N; i++ ) {                                                         23
    double fval = fEval( arr[i], par ) ;                                               24
    if ( fval < 1e-10 ) fval = 1e-10; // protect against 0/neg                         25
    logl += log( fval );                                                               26
  }                                                                                    27
  // return negative log-lik divided by 2 for error def                               28
  f = -logl/2.;                                                                        29
}                                                                                      30
void fAsyMn( )                                                                         31
{                                                                                      32
  // create asy numbers                                                                33
```

```
  AsyRnd();                                                                    34
  //     initialize TMinuit                                                    35
  const int npar = 1;                                                          36
  gMinuit = new TMinuit(npar);                                                 37
  // Tell Minuit the function                                                  38
  gMinuit->SetFCN(fcn);                                                        39
  // Start Werte fuer Minuit                                                   40
  int ierflg;                                                                  41
  gMinuit->mnparm(0, "Asy", 0.1, 0.01, 0., 0., ierflg);                        42
  // minimization                                                              43
  double arglist[3] = { 1000., 1., 0. };                                       44
  gMinuit->mnexcm("MIGRAD", arglist ,1,ierflg);                                45
                                                                               46
  double par, epar;                                                            47
  gMinuit->GetParameter( 0, par, epar ) ;                                      48
  cout << "Asy " << par << " +- " << epar << endl;                             49
}                                                                              50
```

5.8 Fitten korrelierter Daten

$$\chi^2 \equiv \sum_{i=1}^{N} \frac{(y_i - f(x_i, \vec{a}))^2}{(\sigma_i)^2}$$

Die einfache Formel
gilt nur für unkorellierte Messwerte, es gibt aber häufig Korrelationen zwischen Messwerten, z.B.

- gemeinsame Normierungsunsicherheit
- gemeinsamer Nullpunkt/Startwert
- andere systematische Effekte

Dann muss die 'Kovarianzmatrix' für den Fit benutzt werden. Für n Werte $y_1, y_2, ..., y_n$ beschreibt die $n \times n$ Kovarianzmatrix $\mathcal{C}$ Fehler und Korrelationen der einzelnen Werte:

$$\mathcal{C} = \begin{pmatrix} \sigma_{y_1}^2 & cov_{y_1,y_2} & \dots & cov_{y_1,y_n} \\ cov_{y_1,y_2} & \sigma_{y_2}^2 & \dots & cov_{y_2,y_n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ cov_{y_1,y_n} & cov_{y_2,y_n} & \dots & \sigma_{y_n}^2 \end{pmatrix}$$

mit $cov_{y_i,y_j} = \rho_{ij}\sigma_{y_i}\sigma_{y_j}$.

Das χ^2 wird dann gemäss der allgemeinen Formel

$$\chi^2 \equiv \vec{\Delta}^T \cdot \mathcal{C}^{-1} \cdot \vec{\Delta}$$

berechnet werden

($\mathcal{C}^{-1} =$ invertierte Kovarianzmatrix)

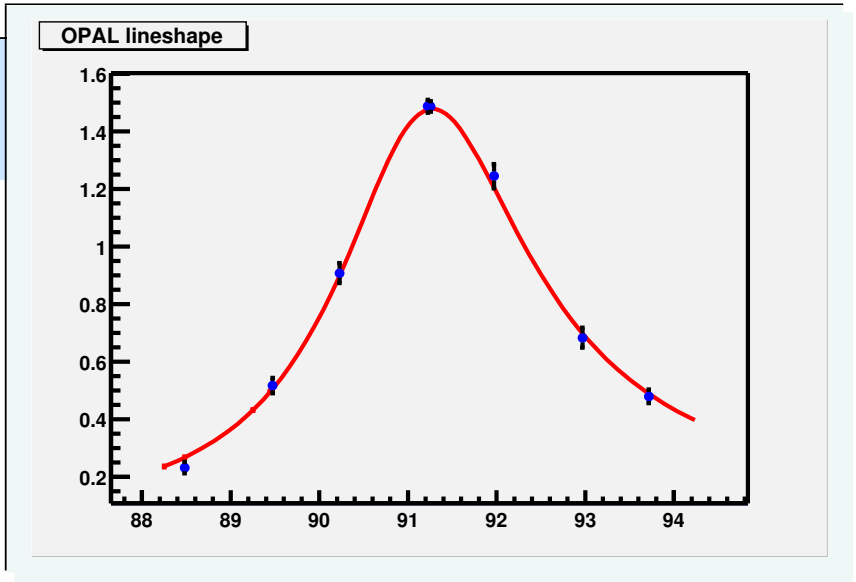
($\vec{\Delta} =$ Vektor der Residuen :$(y_i - f(x_i, \vec{a}))$)

Zum Erstellen und Invertieren der Kovarianzmatrix $\mathcal{C}$ empfiehlt sich die ROOT Klasse `TMatrixD`.

Z^0 Resonanzkurve des Wirkungsquerschnitts

Gutes Beispiel für korrelierte Fehler ist Messung des Wirkungsquerschnitts bei LEP im Bereich der Z^0 Resonanz.

$$\sigma_f(E_{CM}) = \frac{N_{sel} - N_{BG}}{\varepsilon \int \mathcal{L} dt}$$

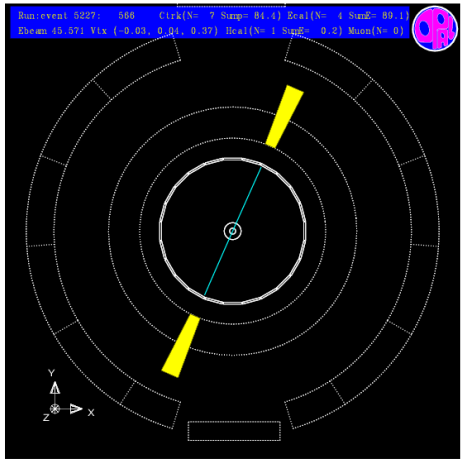


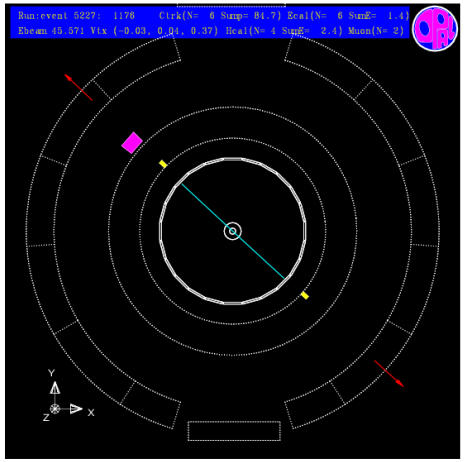
Experimentell:

- Statistische (=unabhängige) Fehler aus N_{sel}
- Systematische Fehler in y aus Selektion, Untergrund, Luminositätsmessung
- Systematische Fehler in x aus Unsicherheit in E_{CM}

Klassische Messung, auch im Fortgeschrittenen Praktikum an der LMU !

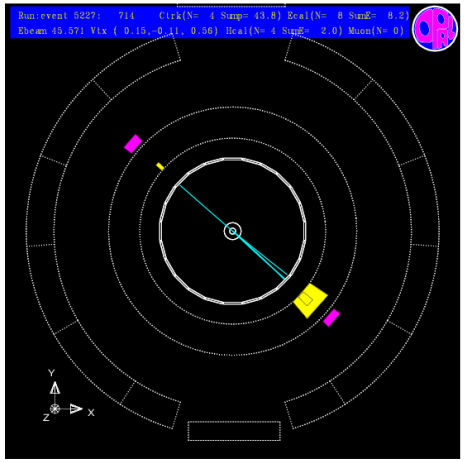
e^+e^-
(3.3 %)

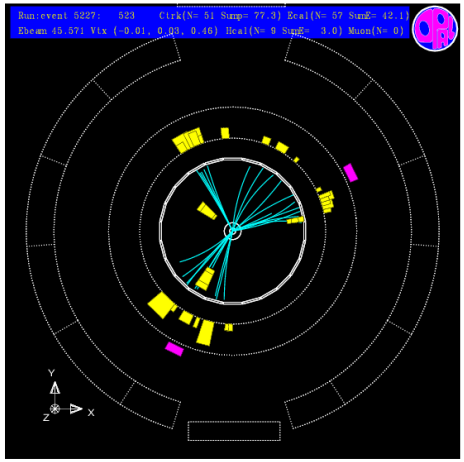




$\mu^+\mu^-$
(3.3 %)

$\tau^+\tau^-$
(3.3 %)





$q\bar{q}$
(70 %)

Entsprechender Fit mit Minuit:

```
#include "TMatrix.h"                                                                    1
TMatrixD *cov;                                                                          2
double *val;                                                                            3
double *xval;                                                                           4
const int nv = 7;                                                                       5
void setInput()                                                                         6
{ // define input                                                                       7
  val = new double[nv];                                                                 8
  xval = new double[nv];                                                                9
  cov = new TMatrixD(nv,nv);                                                            10
  double xv[nv] = { 88.396, 89.376, 90.234, 91.238, 92.068, 93.080, 93.912 };           11
  double yv[nv] = {  6.943, 13.183, 25.724, 40.724, 27.031, 12.273, 6.980 };           12
  double ey[nv] = {  0.087, 0.119, 0.178, 0.087, 0.159, 0.095, 0.064};                  13
  double rsys = 0.004; // correllated relative syst uncertainty on yv                   14
  for ( int i=0; i<nv; i++ ) {                                                          15
    val[i] = yv[i];                                                                     16
    xval[i] = xv[i];                                                                    17
    cov(i,i) = ey[i]*ey[i]; // stat errors                                              18
```

```
      for ( int j=i; j<nv; j++ ) {
        cov(i,j) = cov(i,j) + yv[i] * yv[j] * rsys * rsys;
        cov(j,i) = cov(i,j);
      }
    }

    cov->Print();
    cov->Invert();
    cov->Print();
}
double BreitWig( double *x, double *par)
{
    // Breit- Wigner function
    double mw = par[0], gw = par[1], spk=par[2], mw2, gw2, eb2;

    mw2 = mw*mw;
    gw2 = gw*gw;
    eb2 = x[0]*x[0];
    return( spk * gw2*mw2 / ( pow( eb2 - mw2, 2 ) + mw2 * gw2 ) );
    //    return( spk * gw2*mw2 / ( pow( eb2 - mw2, 2 ) + eb2*eb2/mw2 * gw2 ) );
```

```
}                                                                                    39
void fcn(Int_t &npar,double *gin, double &f, double *par, int iflag)                 40
 {                                                                                   41
   // calculate Chi2                                                                42
   double chi2 = 0.;                                                               43
   for ( int i=0; i<nv; i++ ) {                                                    44
     double fvali = BreitWig( &xval[i], par );                                     45
     for ( int j=0; j<nv; j++ ) {                                                  46
       double fvalj = BreitWig( &xval[j], par );                                   47
       chi2 += ( fvali - val[i] ) * cov(i,j) * ( fvalj - val[j] ) ;                48
     }                                                                             49
   }                                                                               50
   //     cout << "Chi2 = " << chi2 << endl;                                        51
   f = chi2;                                                                       52
 }                                                                                 53
void bwfitmnc()                                                                    54
{                                                                                  55
  setInput();                                                                      56
  //     initialize TMinuit                                                        57
  const int npar = 3;                                                              58
```

```
gMinuit = new TMinuit(npar);
// Tell Minuit the function
gMinuit->SetFCN(fcn);
// Start Werte fuer Minuit
int ierflg;
gMinuit->mnparm(0, "mass", 85, 0.1, 0., 0., ierflg);
gMinuit->mnparm(1, "width", 2., 0.1, 0., 0., ierflg);
gMinuit->mnparm(2, "speak", 10., 0.1, 0., 0., ierflg);
// minimization
double arglist[3] = { 1000., 1., 0. };
gMinuit->mnexcm("MIGRAD", arglist ,1,ierflg);

//    fcn( nparfit, &zero, &chi2, par, 5, 0 );
 //    TGraphErrors *tg = new TGraphErrors( 7, xv, yv, ex, ey );
 //tg->Draw("AP");
// central value
double par[npar], epar[npar];
for ( int i=0; i<npar; i++ ) {
  gMinuit->GetParameter( i, par[i], epar[i] ) ;
}
```

```
  double ey[nv] = {  0.087, 0.119, 0.178, 0.087, 0.159, 0.095, 0.064};                    79
  for ( int i=0; i<nv; i++ ) {                                                            80
    //      double delta = (yv[i]      - f->Eval(xv[i]);                                  81
    double delta = (val[i]      - BreitWig(&xval[i], par));                               82
    cout << val[i] << " +- " << ey[i] << " delta: " << delta << " " << delta/ey[i] << endl;  83
  }                                                                                       84
}                                                                                         85
```

Berücksichtigung von Fehlern in der x–Koordinate

Bei Messungen von (x, y) Wertepaaren gibt es oft Fehler nicht nur in Δy sondern auch in Δx .

- Der übliche χ^2 Ansatz erlaubt nur Unsicherheiten/Kovarianz in y
- Trick: Über Steigung der Fit-Funktion kann man Fehler Δx in Fehler Δy transformieren:

$$\sigma_i^{y(x)} = \left.\frac{d\, f(x, \vec{a})}{d\, x}\right|_{x=x_i} \sigma_i^x$$

- Iterativ vorgehen:
  - Erst Fit ohne Berücksichtigung der Δx $\Rightarrow$ Näherung für Fit-Funktion und Parameter
  - Dann Steigung der Fit-Funktion an den Stellen x_i bestimmen und Fehler zur Kovarianzmatrix addieren.
  - Meist genügt einer Iteration ...

```
#include "TMatrix.h"
TMatrixD *cov;
double *val;
double *xval;
const int nv = 7;
void setInput( bool deltax = true, double * par = 0 )
{ // define input
  val = new double[nv];
  xval = new double[nv];
  cov = new TMatrixD(nv,nv);
  double xv[nv] = { 88.396, 89.376, 90.234, 91.238, 92.068, 93.080, 93.912 };
  double yv[nv] = {  6.943, 13.183, 25.724, 40.724, 27.031, 12.273, 6.980 };
  double ey[nv] = {  0.087, 0.119, 0.178, 0.087, 0.159, 0.095, 0.064};
  double rsys = 0.004; // correlated relative syst uncertainty on yv
  double esys = 0.007; // 7 GeV syst error on x=E (absolute)
  TF1 * f1;
  if ( deltax ) {
    // use as Root function
    TF1 * f1 = new TF1( "bw", BreitWig, 70, 100, 3 );
    f1->SetParameters( par );
```

```
  }                                                                                    21
  for ( int i=0; i<nv; i++ ) {                                                         22
    val[i] = yv[i];                                                                    23
    xval[i] = xv[i];                                                                   24
    (*cov)(i,i) = ey[i]*ey[i]; // stat errors                                          25
    for ( int j=i; j<nv; j++ ) {                                                       26
      (*cov)(i,j) = (*cov)(i,j) + yv[i] * yv[j] * rsys * rsys;                         27
      if ( deltax ) { // treat errors in x, use TF1 Derivative method                  28
    double dydxi = f1->Derivative( xv[i] ); // slope at x[i]                           29
    double dydxj = f1->Derivative( xv[j] ); // slope at x[j]                           30
    (*cov)(i,j) = (*cov)(i,j) + dydxi * esys * dydxj * esys;                           31
      }                                                                                32
      (*cov)(j,i) = (*cov)(i,j);                                                       33
    }                                                                                  34
  }                                                                                    35
  cov->Print();                                                                        36
  cov->Invert();                                                                       37
  cov->Print();                                                                        38
}                                                                                      39
...                                                                                    40
```

```
void bwfitmnce()                                                    41
{                                                                   42
  setInput(false);                                                  43
  //     initialize TMinuit                                         44
  const int npar = 3;                                               45
  gMinuit = new TMinuit(npar);                                      46
  // Tell Minuit the function                                       47
  gMinuit->SetFCN(fcn);                                             48
  // Start Werte fuer Minuit                                        49
  int ierflg;                                                       50
  gMinuit->mnparm(0, "mass", 85, 0.1, 0., 0., ierflg);              51
  gMinuit->mnparm(1, "width", 2., 0.1, 0., 0., ierflg);             52
  gMinuit->mnparm(2, "speak", 10., 0.1, 0., 0., ierflg);            53
  // minimization                                                   54
  double arglist[3] = { 1000., 1., 0. };                           55
  gMinuit->mnexcm("MIGRAD", arglist ,1,ierflg);                     56
                                                                    57
  double par[npar], epar[npar];                                     58
  for ( int i=0; i<npar; i++ ) {                                    59
    gMinuit->GetParameter( i, par[i], epar[i] ) ;                   60
```

```
  }                                                                    61
  // include x errors and iterate fit                                  62
  setInput(true, par);                                                 63
  gMinuit->mnexcm("MIGRAD", arglist ,1,ierflg);                        64
  // accurate error matrix                                             65
  gMinuit->mnexcm("HESSE", arglist ,1,ierflg);                         66
  ...                                                                  67
}                                                                      68
```

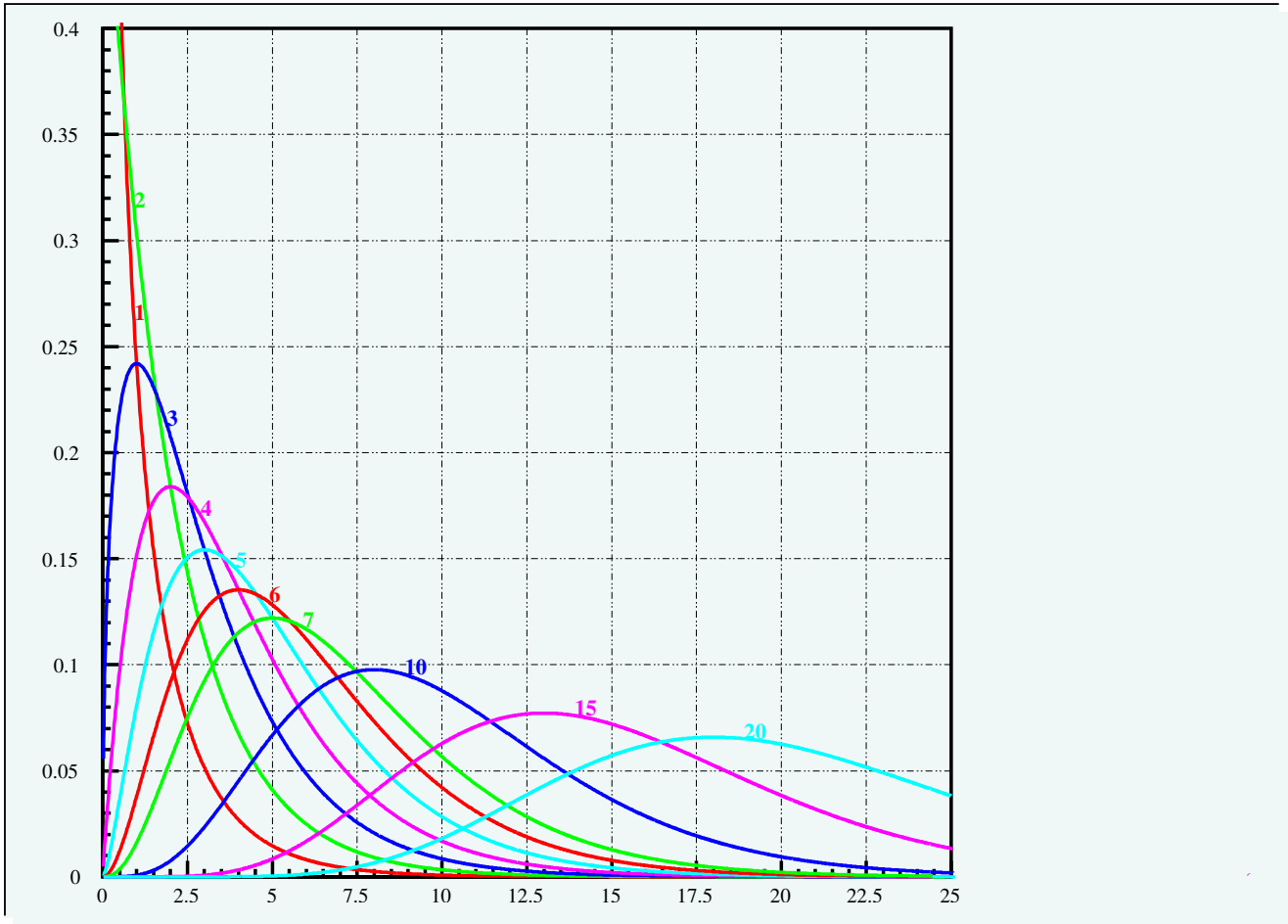
5.9 Güte des Fit – χ^2

Der Wert des χ^2 Fits am Minimum liefert auch gleichzeitig ein Mass für die Güte des Fits. Wenn die Unterschiede zwischen den gemessenen (y_i) und gefitteten ($f(x_i, \vec{a}$) Werten konsistent mit statistischen Schwankungen sind erwartet man ein χ^2 gemäss der χ^2 Funktion:

$$f(z, ndf) = \frac{z^{ndf-2} e^{-z^2/2}}{2^{-ndf/2}\Gamma(ndf/2)}$$

wobei ndf die Zahl der Freiheitsgrade ist, $ndf = N_{points} - N_{par}$.

Bei vielen Wiederholungen des Experiments bzw. Fits sollte das resultierende χ^2 einer solchen Verteilung folgen.



$$\chi^2/ndf \approx 1$$

Als Faustregel kann man sich merken:
Deutlich grössere Werte sind ein klarer Hinweis auf konzeptionelle Probleme, entweder sind die Fehler unterschätzt oder die angepasste Funktion ist nicht geeignet zur Beschreibung der Daten. Kleine Werte deuten auf zu große Fehler hin, typisch sind falsch bestimmte statistische Fehler.

In ROOT:

- Funktion `TMath::Prob(double chi2, int ndf )`
- Liefert Wahrscheinlichkeit $\chi^2 >= chi2$ bei ndf Freiheitsgraden zu bekommen, z.B.:

```
TMath::Prob( 1.0, 3) = 0.801
TMath::Prob( 3.0, 3) = 0.392
TMath::Prob( 8.5, 3) = 0.037
```

5.10 Güte des Fit – Maximum-Likelihood / Ensemble-Tests

(Log-)Likelihood Wert am Maximum liefert kein absolutes Maß für Güte des Fits.

- Wert hängt ab von Details der Verteilung und Parameter, kein **absoluter Gütefaktor** ableitbar.
- Wert ist aber spezifisch für konkrete Verteilung und Parametersatz $\Rightarrow$ **relativer Gütefaktor** im Vergleich mit *aehnlichen* Datensätzen.

Ensemble-Tests

- Fitte Datensatz mit unbinned Maximum-Likelihood.
- Würfle mit gefitteten Parametern N Datensätze gleicher Grösse, wiederhole Fit und speichere resultierenden (Log-)Likelihood Wert.
- Bestimme **p-Wert**, das ist Anteil der gewürfelten Datensätze die einen kleineren (Log-)Likelihood Wert haben.
- $\Rightarrow$ Wahrscheinlchkeit dass Datensatz mit Verteilung kompatibel ist, analog zu χ^2 p-Wert.

5.11 Summary – Fitten mit ROOT

- Fits in ROOT sehr einfach, interaktiv mit FitPanel, für (x,y) Paare und Histogramme bei unkorrelierten Messwerten.
- Große Flexibilität bei Definiton/Wahl der Fit-Funktion
- Komplexere Fit-Probleme, z.B. unbinned likelihood, korrelierte Fehler, erfordern direkte Verwendung von Minuit.
- Mehr Aufwand in Programmierung, aber damit volle Kontrolle über Fehlerbehandlung, Konstruktion der Kovarianzmatrix, Ablauf des Fits, Korrelationen der Parameter, u.v.m.

6 Übungsaufgaben

6.1 ROOT: Datenein-/ausgabe, Mittelwert

1. **C++ I/O und Mittelwert**
   In der Datei `rohr1.dat` finden Sie eine Liste von Messungen der Drahtposition in verschiedenen Atlas Muon–Kammer Rohren. Lesen Sie die Zahlen ein:
   In C++: `while ( cin >>val ) ;`
   In Linux: `./myprog < rohr1.dat`
   Berechnen Sie Mittelwert, kleinsten und grössten Wert.

2. **Aufwärmübungen mit ROOT**
   - Initialisieren und Starten Sie ROOT
   - Gehen Sie einige der Beispiele aus 1.2 durch

3. **Rohrdaten mit ROOT**
   Lesen Sie die Daten aus `rohr1.dat` in ROOT ein.

```
ifstream data_file;
data_file.open("rohr1.dat");
while ( data_file >>val );
```

   Erzeugen Sie ein Histogramm und Füllen die Werte ein. (Lösungsbeispiel: `.C`, `.py`)

Analog für `rohr2.dat` in ein 2-dim Histogramm ('scatter-plot').
`TH2F("h","mytitle",nx,xlow,xhig,ny,ylow,yhigh);`
`h->Fill(x,y)`

4. **C++ Mittelwert und Standardabweichung**
   In der Datei `rohr1.dat` finden Sie eine Liste von Messungen der Drahtposition in verschiedenen Atlas Muon–Kammer Rohren. Lesen Sie die Zahlen ein:
   In C++: `while ( (cin >>val[i++]) != 0 ) ;`
   In Linux: `./myprog < rohr1.dat`
   Berechnen Sie Mittelwert, und Standardabweichung, sowie Median und 25/75 % Quartile (Tip: Zahlen sortieren).

   Beispiellösungen: `readRohr1.C` Root macro, liest Werte ein und fuellt Histogramm.
   `readRohr2.C` C++ Programm, liest Werte in vector ein, berechnet Mittelwert, Median, etc.

5. **Korrelation**
   In `rohr2.dat` ist eine Liste mit jeweils zwei Messungen der Drahtpostion. Berechnen Sie Mittelwerte, und Standardabweichungen, sowie den Korrelationskoeffizienten.

6. **Zentraler Grenzwert Satz**
   Überprüfen Sie das Theorem, dass die Mittelwerte beliebiger Verteilungen normalverteilt sind für große n.
   (a) Verwenden Sie gleichverteilte Zufallszahlen (`gRandom->Rndm()`) und testen Sie wie die

Verteilung von n abhängt.

```
void tclim( Int_t n = 12, Int_t ns = 1000 )
{
  TH1F * hclim = new TH1F("hclim", "central limit test", 100, −5, 5);
  for ( Int_t i = 0; i<ns; i++ ) {
    Float_t sum = 0;
    for ( Int_t j = 0; j<n ; j++ ) {
      sum += gRandom−>Rndm() − 0.5;
    }
    hclim−>Fill( sum );
  }
  }
```

(b) Nehmen Sie statt der Gleichverteilung die Exponentialverteilung (`gRandom->Exp(1)`

7. **Verteilungen plotten**
   Erstellen Sie ROOT Macros zum Plotten von
   - Binomial-verteilung in Abhängigkeit von p, n
   - Poisson-verteilung in Abhängigkeit von μ

- Gauss-verteilung in Abhängigkeit von μ, σ

(Tip: Die **TMath Klasse** stellt entsprechende Funktionen oder Hilfsmittel bereit: `TMath::Gamma(n+1)`, `TMath::Binomial(n,k)`, `TMath::Poisson( x, mu)`, `...`)

Vergleichen Sie die Binomial-verteilung mit der entsprechenden Poisson-verteilung für verschiedene n und analog Binomial vs Gauss und Poisson vs Gauss.

6.2 Zufallszahlen

1. **Erzeugen von Zufallszahlen** Ein gängiges Verfahren zur Erzeugung von Pseudo–Zufallszahlen ist die *lineare Kongruenzmethode*:

   $$\mathcal{I}_{n+1} = (a \cdot \mathcal{I}_n + c)\ mod\ m$$

   Grundsätzlich sind solche Folgen periodisch, die Periodenlänge ist im besten Falle m. Entscheidend für die Güte des Generators ist die Wahl der Parameter a und b, sowie des 'Seed'-Werts $\mathcal{I}_0$.

   Im folgenden sollen die Eigenschaften von Generatoren mit verschiedenen Parametersets untersucht werden.

   Dazu benötigt man zunächst einen Zufallsgenerator, den man einfach als C++ Klasse implementieren kann (file MyRnd.C).

   Die Implementation des Zufallsgenerators als C++ Klasse hat wesentliche Vorteile gegenüber einer konventionellen Implementation als Funktion: alle Instanzen von **MyRnd** sind völlig unabhängig, d.h. man kann beliebig viele Zufallsgeneratoren mit unterschiedlichen Seeds und Parametern verwenden.

   Einfache Tests von Zufallsgeneratoren sind die Überprüfung der Gleichverteilung in 1, 2 oder 3 Dimensionen.

Beispielprogramm tRnd.C:

Aufgabe a:

Testen Sie verschiedene Parameter für den Zufallsgenerator:

(a) $a = 137,\ c = 187,\ m = 256$

(b) $a = 193,\ c = 73,\ m = 256$

(c) $a = 65539,\ c = 0,\ m = 2147483648$

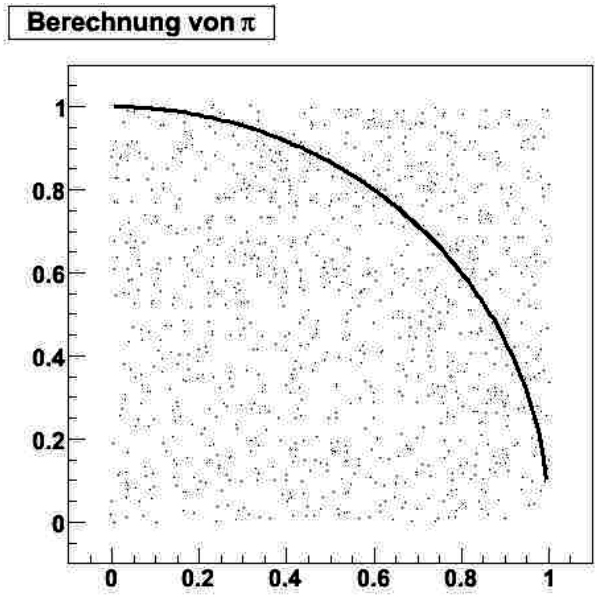
Als seed sollte man eine Zahl > 0 verwenden.

(a) und (b) sind 'kurze' Generatoren. Sie nutzen die Länge m voll aus, zeigen aber deutliche Unterschiede in ihrer Qualität in 2 D.

(c) ist der Generator **randu** von IBM, der in den 60er und 70er Jahren weitverbreitet war. Er hat zwar eine hohe Periode (2^{29}), aber $a = 2^{16}+3$ ist lausig gewählt, schon in 3 D zeigen sich deutliche Abweichungen von der Gleichverteilung. Viele wissenschaftliche Arbeiten haben darunter gelitten ...

Zum Vergleich können Sie auch den ROOT Standard Generator mit `gRandom->Rndm()` betrachten.

2. **Monte Carlo Berechung der Kreiszahl π**
   Berechnen sie die Kreiszahl pi mit Hilfe der Monte Carlo Integration wie in der Vorlesung gesprochen.
   - Verwenden sie hierzu die Tropfenmethode. Erzeugen sie zwei unabhñigige gleichförming verteilte Zufallszahlen mit:
   - `TRandom ran`
   - `ran.SetSeed("1'')`
   - `x = ran.Uniform()`
   - Testen sie ob $r^2 = x^2 + y^2$ innerhalb oder außhalb der Kreisfläche liegt
   - Berechnen sie π für 100, 1000 und 10000 Tropfen und den zugehörigen Fehler.
   - Füllen sie die erzeugten Zufallszahlen in ein Histogramm `histo = TH2F('test' ,'Berechnung von #pi', 100,-0.1,1.1, 100,-0.1,1.1 )`
   - Lösungsbeispiel: pi.C, pi.py



3. **Simulation des radioaktiven Zerfalls**

   Mit gleichverteilten Zufallszahlen lässt sich der radioaktive Zerfall leicht simulieren, die Wahrscheinlichkeit daß ein Kern zerfällt ist

   $$p = \lambda \Delta t$$

   In tdecay.C wird ein Zerfallsexperiment simuliert, wobei man die Zerfallskonstante λ, das Zeitintervall dt, die Gesamtzeit t und die Zahl der Nukleonen $n0$ zu Beginn vorgeben kann.

   Testen Sie zunächst das Programm für verschiedene Parameter. Dann ändern Sie das Programm so ab, daß Sie viele solcher Experimente durchführen und zusätzlich die Zahl der zerfallenen

Teilchen für einige Zeitintervalle histogrammieren.

```
// simulate radioactive decay
 void tdecay( Float_t lambda = 0.5, Float_t dt = 0.01, Float_t t = 20,
       Int_t n0 = 1000 )
 {
   TH1F * hdec = new TH1F("hdec", "radioactive decay", t/dt, 0, t);
   // loop over time
   for ( Float_t tnow = 0.; tnow < t; tnow += dt ) {
     // loop over remaining particles
     Int_t ndec = 0;
     for ( int ie = 0; ie < n0; ie++ ) {
       if ( gRandom->Rndm() < dt*lambda ) {
         ndec ++;
         hdec->Fill(tnow);
     }}
     n0 -= ndec; // subtract decayed particles
   }
     }
```

4. **Zusatzaufgaben:**

   Wie sieht die analytische Transformation aus, um Zufallszahlen gemäss $f(x) = 2 \cdot x$ bzw. e^{-x} zu erzeugen ? Probieren Sie es in ROOT.

   Erzeugen Sie eine beliebige Zufallsverteilung nach dem Hit&Miss Verfahren, z.B. für die Breit–Wigner Funktion (BreitWig.C).

   Hinweis: Funktionen als Macros

   Neben der direkten Art Funktionen zu definieren, wie in

   ```
   TF1 *f1 = new TF1("f1","sin(x)", 0, 10 );
   ```

   kann man auch eine Funtkion als Adresse angeben, z.B.:

```
// file BreitWig.C                                                    1
Double_t BreitWig( Double_t *x, Double_t *par)                        2
{                                                                     3
  // Breit- Wigner function                                          4
  Double_t mw = par[0], gw = par[1], mw2, gw2, eb2;                   5
  mw2 = mw*mw;                                                        6
  gw2 = gw*gw;                                                        7
  eb2 = x[0]*x[0];                                                    8
  return( gw2*mw2 / ( pow( eb2 - mw2, 2 ) + mw2 * gw2 ) );            9
}                                                                     10
```

```
root [0] .L BreitWig.C                                                    11
root [3] TF1 *f1 = new TF1("f1",BreitWig,50,100,2)                        12
root [4] f1->SetParameters( 80., 2.);                                     13
    root [5] f1->Draw();                                                  14
```

Als 5. Argument von `TF1(..)` muss die Zahl der Parameter stehen. Die Parameter können dann per `f1->SetParameters()` gesetzt werden.
Zufallszahlen die gemäss einer Funktion verteilt sind können in ROOT mit der Methode `TF1::GetRandom()` erzeugt werden, also z.B.:

```
root [5] f1->GetRandom()
```

6.3 Fehlerbestimmung

1. **Fehler I:** Welche Methode ist vorzuziehen: 10 Messungen mit einer Auflösung von 1 mm oder 1 Messung mit einer Auflössung von 0.2 mm ?

2. **Fehler II:** Eine elektrische Spannung U wird durch einen Strom $I = 1120 \pm 10\mathrm{mA}$ und einen Widerstand $R = 1400 \pm 30\Omega$ bestimmt. Wie groß ist U und der zugehörige Fehler ?

3. **Fehler III:** Ein Strom I wird bestimmt durch eine Spannung $U = 45 \pm 1\mathrm{V}$ und den Widerstand $R = 900 \pm 10\Omega$. Wie groß ist I und der zugehörige Fehler ?

4. **Fehlerfortpflanzung:** Sie messen 2 Grössen, die erste (x) hat Mittelwert 5 und $\sigma = 1$, die 2. (y) Mittelwert 10 und ebenfalls $\sigma = 1$. Die beiden Grössen haben eine Korrelation $\rho = 0.9$.

   (a) Was ist σ der Differenz $\delta = x - y$ bzw. des Quotienten $r = x/y$?

   (b) Folgendes Programm liefert ensprechende Zufallszahlen x und y. Probieren Sie's aus mit ROOT, und füllen Differenz bzw. Quotient in Histogramme.

```
void get2Rndm( double &x, double &y, double rho=0.9)                    1
{                                                                       2
```

```
double r1, r2;                                                    3
gRandom->Rannor(r1,r2);                                           4
x = r1 + 5.;                                                      5
y = rho * r1 + sqrt(1.-rho*rho) * r2 + 10.;                       6
  }                                                               7
```

6.4 Mittelwerte

1. **Fehler des Mittelwerts** Das folgende Root-Makro enthält ein kleines Toy-MC um Fehler des Mittelwerts bei Gleichverteilung zu studieren.

   (a) Untersuchen Sie die Streuung des Mittelwerts in Abhängigkeit der Sample Grösse n.

   (b) Nehmen Sie als Schätzer $(x_{max} - x_{min})/2$ und vergleichen Sie die Streuung.

```
TH1* hmean( int n=50, int ns=100 )
{
  // fill generated values in histo
  TH1D * hm = new TH1D("hm", "Mittelwert von Rndm", 200, -0.5, 0.5);
  for ( int i =0; i<ns; i++ ) {
    double sum = 0;
    for ( int j =0; j<n; j++ ) {
      sum += gRandom->Rndm() - 0.5; // gleichverteilung -0.5 .. 0.5
    }
    hm->Fill( sum / n );
  }
  hm->Draw();
    }
```

2. **Getrimmter Mittelwert** Im C++ Makro `hTrimMean.C` finden Sie eine Vorlage zur Berechnung des Trimmed-Mean.

   Untersuchen die Streuung des Mittelwerts als Funktion von r für verschiedene verteilungen (Gauss, Doppelt-Exponential, Cauchy, ...).

3. **Log-Likelihood für Asymmetrie** In `fAsy.C` ist der Code für das vorgestellt Beispiel zur Log-Likelihood Berechnung für die Asymmetrie.

   Untersuchen Sie die log-Likelihood Kurve für verschiedenen Fälle, variieren Sie die Zahl der Ereignisse.

6.5 Fits (I)

1. **Fits von Datenpunkten**
   Suchen Sie ein passendes Polynom um die beiden unten gegebenen Datensets vernünftig zu fitten, d.h. mit $\chi^2/ndf \approx 1$.

```
// 1. Datensatz
{
  Float_t xarr[16] = { 0.5, 1.5, 2.5, 3.5, 4.5, 5.5, 6.5, 7.5, 8.5, 9.5,
                       10.5, 11.5, 12.5, 13.5, 14.5, 15.5};
  Float_t yarr[16] = {0.731596, 3.11894, 0.368688, 5.24658, 4.34652,
                      7.10241, 9.99553, 9.5674, 11.0389, 13.5178, 11.9335,
                      14.9933, 15.1822, 18.3361, 17.5097, 21.8429};
  Float_t exarr[16] = { 0.1, 0.1, 0.1, 0.1, 0.1, 0.1, 0.1, 0.1, 0.1,
                  0.1, 0.1, 0.1, 0.1, 0.1, 0.1, 0.1 };
  Float_t eyarr[16] = { 0.701041, 0.668213, 1.24997, 1.77685, 0.804879,
                        1.48788, 0.945508, 0.508232, 0.817365, 1.5927,
                        1.34098, 1.3508, 0.914614, 1.897, 1.66663, 1.42966};
  TGraphErrors *tg = new TGraphErrors( 16, xarr, yarr, exarr, eyarr );
  tg->Draw("AP");}
// 2. Datensatz
```

```
{                                                                                16
  Float_t xarr[16] = { −3.5, −2.5, −1.5, −0.5, 0.5, 1.5,                         17
                        2.5, 3.5, 4.5, 5.5, 6.5, 7.5, 8.5, 9.5, 10.5, 11.5};     18
  Float_t yarr[16] = {219., 155., 89., 11.,                                      19
                      54., 80., 48., 5., −47.,                                   20
                      −64., −101., −125., −124., 13.,                            21
                      239., 525. };                                              22
  Float_t exarr[16] = { 0.1, 0.1, 0.1, 0.1, 0.1, 0.1, 0.1, 0.1, 0.1,             23
            0.1, 0.1, 0.1, 0.1, 0.1, 0.1, 0.1 };                                 24
  Float_t eyarr[16] = { 65., 41, 30., 26., 26., 24.,                             25
            18., 4., 17., 33., 45.,                                              26
            49., 38., 6., 74., 160.};                                            27
  TGraphErrors *tg = new TGraphErrors( 16, xarr, yarr, exarr, eyarr );           28
     tg−>Draw("AP");}                                                            29
```

2. **Eichkurve und Fehlerfortpflanzung**

   Sie kalibrieren einen Detektor mit Strahlen bekannter Energie von $60, 80, 100\,GeV$ und erhalten jeweils
   $59.73 \pm 0.35, 80.64 \pm 0.38, 100.51 \pm 0.42\,GeV$.

   Anschliessend messen Sie für ein Teilchen eine Energie
   $E_{mess} = 83\,GeV$.

   Was ist die wahre Energie und ihre Unsicherheit, $E_{true} \pm \Delta$?

```
void linefit()
{
   float xv[3] = { 60., 80, 100. };
   float yv[3] = { 59.73, 80.64, 100.51 };
   float ey[3] = { 0.35, 0.38, 0.42 };
   float ex[3] = { 0.01, 0.01, 0.01 };
   TGraphErrors *tg = new TGraphErrors( 3, xv, yv, ex, ey );
   tg->Draw("AP");
}
```

   Machen Sie einen Geradenfit: $E_{mess} = a + b \cdot E_{true}$.
   Durch umkehren $E_{true} = -a + 1/b \cdot E_{mess}$ bestimmen Sie die wahre Energie, für Δ müssen Sie

die Fehlerfortpflanzung bemühen, d.h. Sie brauchen die Kovarianzmatrix für a und b .
(Fitoption `"v"` oder `verbose` im Fit-panel)

3. **Fit in Subranges und mit selbstdefinierten Funktionen**
   Die Funktion tfbw.C erzeugt ein Histogramm mit Zufallszahlen gemäss einer Breit-Wigner Verteilung.

```
void tfbw()
{
  Double_t ecm = 200, mw = 80;
  Double_t gamma_w = 2; // W Zerfallsbreite
  Double_t eb, beta, gamma;
  Double_t xrnd;
  // initialize
  eb = ecm/2.;          // beam energy
  // define Breit-Wigner function
  TF1 *fbw = new TF1("fbw", BreitWig, 70, 90, 3);
  // set the parameters
  fbw->SetParameters( mw, gamma_w,1.);
  TH1F * hbw = new TH1F("hbw", "Breit Wigner", 100, 70, 90);
  for ( Int_t i = 0; i < 1000; i++ ) hbw->Fill(fbw->GetRandom());
}
Double_t BreitWig( Double_t *x, Double_t *par)
```

```
{                                                                                    17
  // Breit- Wigner function                                                          18
  Double_t mw = par[0], gw = par[1], mw2, gw2, eb2;                                  19
  mw2 = mw*mw;                                                                       20
  gw2 = gw*gw;                                                                       21
  eb2 = x[0]*x[0];                                                                   22
  return( par[2]*gw2*mw2 / ( pow( eb2 - mw2, 2 ) + mw2 * gw2 ) );                    23
    }                                                                                24
```

Versuchen Sie zunächst das Histogramm mit einer Gauss-Verteilung zu fitten. Variieren Sie dabei den Fit-range bis die Verteilung annähernd durch einen Gauss-Fit beschrieben wird.

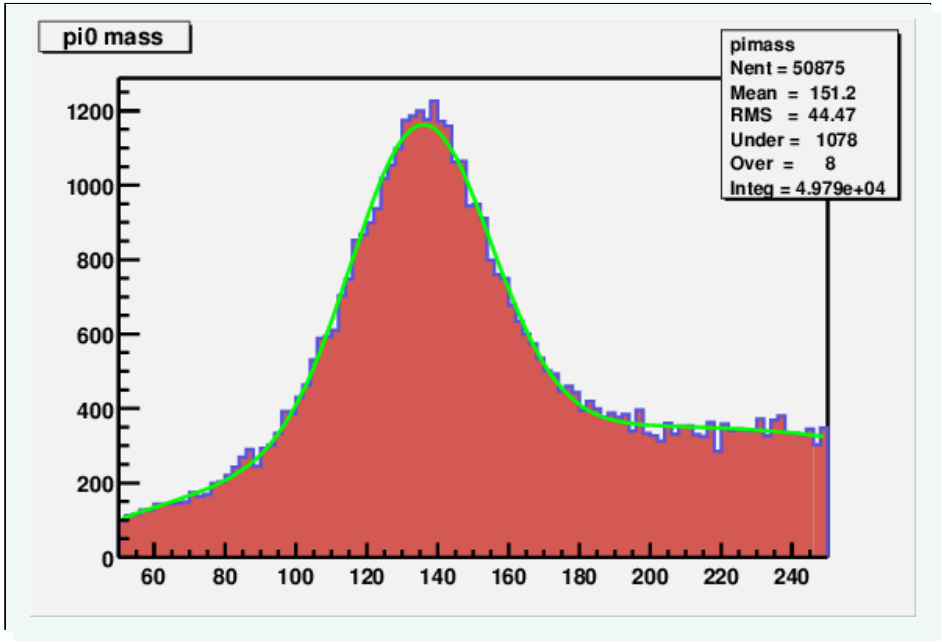
Anschliessend fitten Sie direkt die Breit-Wigner Funktion:

```
ROOT > fbw->SetParameters(83, 3, 100);
ROOT > hbw->Fit("fbw");
```

Testen Sie ob das Fit Resultat von den Startwerten abhängt.

4. **Massenspektrum**

   In der Datei pi0.dat sind Daten von einem Experiment, in dem der Zerfall des neutralen Pions in zwei Photonen gemessen wurde $\pi^0 \to \gamma\gamma$. Der Datensatz enthält die invariante Masse für alle möglichen paarweisen Kombinationen der Photonen. Photonen enstehen auch in anderen Zerfällen, d.h. nur ein Teil der Werte ist ein echter π^0 Zerfall, der Rest ist Untergrund den man subtrahieren muss.



   Bestimmen Sie die π^0 Masse und finden Sie heraus wieviele π^0 im Datensatz enthalten sind Dazu müssen Sie einen kombinierten Fit machen, der den Untergrund mit einem Polynom beschreibt und

den eigentlichen Signal peak mit einer Gauss Funktion.

```
TF1("pfit","gaus(0) + pol2(3)", 50, 250)
```

In diesem Fall müssen Sie Startwerte für die Parameter vorgeben; fitten Sie zunächst in sub-ranges einen Gauss bzw. Polynom um vernünftige Anfangswerte zu erhalten.

5. **χ^2 fit und Maximum Likelihood Fit**

   Die Funktion gausf2.C füllt ein Histogramm mit Zufallszahlen gemäss einer Gauss Verteilung.

   Anschliessend wird ein χ^2 oder Maximum Likelihood Fit durhgeführt.

   Das ganze wird mehrmal (*nit*) durchgeführt und die jeweils resultierende gefittete Breite in ein Histogramm gefüllt.

   Variieren Sie die Zahl der Bins oder der Einträge und vergleichen Sie die Ergebnisse der beiden Fit Methoden, insbesondere wenn nur wenig Einträge pro bin gemacht werden.

```
gausf2( bool logl = false, int niter = 100, int nrnd = 100, int nbins = 40 )
{
  // logl : flag for log-likelihood / chi2 fit
  // niter: number of iterations
  // nrnd : number of random entries for histo
  // nbins: number of bins
  double sig;
  // create histo
  TH1D * h4 = new TH1D("h4","Random Gauss",nbins,-4,4);
  // hist for sigma
  TH1D * sigma = new TH1D("sigma","sigma from gaus fit",20,0.5,1.5);
  for ( i =0; i<niter; i++ ) {
```

```
   // reset histo contents                                          13
   h4->Reset();                                                     14
   // fill histo                                                    15
   for ( int j = 0; j<nrnd; j++ ) {                                 16
     h4->Fill(gRandom->Gaus());                                     17
   }                                                                18
   if ( logl ) { // likelihood fit                                  19
     h4->Fit("gaus","lq");                                          20
   }                                                                21
   else {    // Chi2 fit                                           22
     h4->Fit("gaus","q");                                           23
   }                                                                24
   //       h4->Draw();                                           25
   // get sigma from fit                                           26
   TF1 *fit = h4->GetFunction("gaus");                              27
   sig = fit->GetParameter(2);                                      28
   sigma->Fill(sig);                                                29
}                                                                   30
sigma->Draw();                                                      31
   }                                                                32
```

6.6 Fits (II)

1. **Mitteln von korrelierten Messungen**
   In avMinu.C wird mit Hilfe von Minuit der Mittelwert von 2 korrelierten Messungen bestimmt. Im Beispiel sind die Werte 8.0 und 8.8, mit korreliertem Fehler von 10 %.

   Führen Sie die Mittelung aus

   (a) mit unabhängigem Fehler von 20 % (`stat = 0.2 `)

   (b) mit unabhängigem Fehler von 2 % (`stat = 0.02 `)

   Diskutieren Sie die Ergebnisse.

2. **Unbinned likelihood Fit**
   In fAsyMn.C wird ein Maximum Likelihood Fit für die Winkelasymmetrie (s.vorher) durchgeführt.

   Machen Sie den Fit für die beiden Datensätze.

   Erweitern Sie das Programm so dass Sie Ensembletests machen können, d.h. mit den erhaltenen Fitparametern würfeln Sie N-Mal entsprechend verteilte Werte, wiederholen den Fit, und speichern den log-likelihood Wert ab.

   Sind beide Datensätze kompatibel mit der angenommenen Verteilung ?

3. **Z0 Fit und Korrelationen**

   Untersuchen Sie die Effekte der Korrelationen beim Z0 Fit (bwfitmnce.C) auf die Fitparameter, Fehler und ihre Korrelationen.

   Was ändert sich wenn Sie systematische Effekte auf y bzw $E_{CM} = x$ einschalten?

   Die Messung von E_{CM} hat neben einer voll korrelierten Unsicherheit von 7 GeV noch einen unabhängigen Fehler (Punkt-zu-Punkt) von 5 GeV.

   Führen Sie einen entsprechenden Term in die Kovarianzmatrix ein, wie ändern sich die Ergebnisse?

6.7 Hypothesen

1. **Hypothesen Tests I**

   Folgende Tabelle zeigt die Gewinner in Pferderennen sortiert nach der Startbox.

Startbox	1	2	3	4	5	6	7	8
Gewinner	29	19	18	25	17	10	15	11

   Teste die Hypothese, daß die Startbox *keinen* Einfluß auf die Gewinnwahrscheinlichkeit hat mit einem χ^2 Test. Definiere eine Konfidenz von z.B. 95% oder 99% vor Durchführung des Tests.

2. **Hypothesen Tests II**

   Geladene Teilchen, die durch ein Gasvolumen fliegen, erzeugen ionisierte Ladungen, deren mittlere erzeugte Menge vom Teilchentype abhängen. Nehme an, daß eine Teststatistik t anhängig von der Ionisationmessung erzeugt wurde, die einer Gauß-Verteilung mit Mittelwert 0 für Elektronen und Mittelwert 2 für sog. Pionen folgt. Die Standardabweichung für beide Verteilung sei 1. Ein Test für die Selektion von Elektronen verlangt $t < 1$.

   - Wie groß ist the Elektron-Selektionseffizienz, d.h. wie groß ist die Wahrscheinlichkeit ein Teilchen zu akzeptieren, wenn es ein Elektron ist ?
   - Wie groß ist die Wahrscheinlichkeit ein Pion als Elektron zu selektieren ?
   - Nehme an, ein Datensatz besteht aus 99% Pionen und zu 1% aus Elektronen. Wie groß ist die

Reinheit der Elektronen-Selektion mit $t < 1$?

3. **Testen von Hypothesen**

   - Ist es signifikant wenn in einer Untersuchung 10 Patienten auf ein Medikament positiv reagieren und in der Kontrollgruppe nur 7 Patienten?
   - Wie signifikant ist es wenn in der Umgebung eines AKW 4 Patienten an einer Krankheit leiden, wenn man im Mittel nur 2 Fälle erwartet? Hier muss man berücksichtigen dass es mehr als ein AKW gibt.
   - Kann man ein Modell (z.b. ein Higgs mit Masse < 110 GeV) ausschließen wenn man 10 Untergrund Ereignisse erwartet, das Modell weitere 5 Ereignisse vorhersagt und man 11 in den Daten sieht? (Was ist wenn man nur 9 sieht?)
   - Kann man eine neue Entdeckung verkünden wenn man vom Untergrund 10 Ereignisse erwartet aber in den Daten 15 sieht?

6.8 TMVA

1. **TMVA I**

   TMVA ist ein Toolkit für die Multivariate Daten Analyse integriert in ROOT.

   - **Die TMVA Projekt-Homepage**
   - **die TMVA Wiki Seite**

   TMVA bietet die Möglichkeit verschiedene Algorithmen anzuwenden und komfortabel miteinander zu vergleichen, wie z.B.:

   - Rechteckige Schnitt-Optimierung
   - Künstliche Neuronale Netzwerke
   - Entscheidungsbäume
   - etc..

   Anleitung für ein kurzes TMVA Tutorial: Trainieren Sie automatisch mit verschiedenen Algorithmen (kann ja nach Algorithmus etwas länger dauern):

   ```
   mkdir tmva
   cd tmva
   ```

```
root -l \$ROOTSYS/tmva/test/TMVAClassification.C\(\"Cuts,Likelihood,Fisher\"\)
```

Nach einer kurzen Trainingsphase erscheint ein kleines Fenster mit verschiedenen Menüs. Benutzen Sie dieses für die weiteren Aufgaben:

- Welche Eingabevariablen sind miteinander korreliert ?
- Versuchen sie die verschiedenen Algorithmen miteinander zu vergleichen. Welcher Algorithums zeigt die beste Leistung und warum ?
- Welchen Arbeitspunkt (Signal Effizienz gegen Untergrund-Unterdrückung) würden sie wählen ?

Alle Ergebnisse sind in der Datei TMVA.root gespeichert. Betrachten sie diese mit:

```
root TMVA.root
```

```
TBrowser b
```

Dies öffnet ein Browser Fenster in dem Sie auf der linken Fensterhälfte auf “ROOT files” klicken und dann auf der rechten Seite per Doppelklick durch die Datei “TMVA.root” navigieren können.

Alternativ können Sie auch mit dem TMVAGUI navigieren, falls die Datei “TMVA.root” existiert:

```
root -l \$ROOTSYS/tmva/test/TMVAGui.C
```

2. **TMVA II**

Erweitern Sie vorherigen TMVA Übung, indem sie zusätzlich ein Neuronales Netz und ein Boosted Decision Tree trainieren. Benutzen sie hierzu: MLP (Multi Layer Perceptron ist eine Implemenation eines Neuronalen Netzes) und BDT:

```
root -l \$ROOTSYS/tmva/test/TMVAClassification.C\(\"Cuts,Likelihood,Fisher,MLP,
```

- Welcher Algorithmus zeigt nun die beste Leistung ?
- Welche Variable trägt man meistes zur Netzwerkarchitektur bei ?

6.9 Data Mining

1. **Data Mining**

   Achtung: code nicht mehr aktuell !

   Jedes Jahr findet ein sog. Data Mining Cup statt (**http://www.data-mining-cup.de**). Bei diesem Wettbewerb soll man z.B. an Hand von Kundendaten, Vorhersagen auf ein bestimmtes Kundenverhalten treffen.

   Diese Daten sind ein idealer Kandidat, um Multi-Variate Analysetechniken auszuprobieren.

   ```
   cd ../examples
   cp /home/Johannes.Elmsheuser/mining/2002.tar.gz .
   tar xzf 2002.tar.gz
   export LD_LIBRARY_PATH=$LD_LIBRARY_PATH:$HOME/TMVA/lib
   make
   ```

   Die Aufgabe aus dem Jahr 2002 steht in der Datei `de_Aufgabe_DMC2002.txt`. Es sollen Stromkunden klassifiziert werden, die zu einem anderen Anbieter wechseln oder nicht.

   Die verschiedenen Variable der Trainingsdatei `data_dmc2002_train.txt` sind in `de_Merkmale_DMC2002.txt` beschrieben. Die Daten wurden in verschiedene ROOT Datei umgewandelt: `train.root` enthält alle 10000 Datensätze aus `data_dmc2002_train.txt`, während `train_yes.root` 1000 ,,canceler" und `train_no.root` die 9000 ,,nicht-canceler"

enthält.

Machen Sie sich mit den verschiedenen Variablen vertraut, in dem ROOT mit den gesamten Eingabedaten starten: `root train.root` und anschließend mit dem `TBrowser b` die Variablen anzeigen lassen.

Als nächstes können Sie das Makro `plot.C` verwenden, um sich verschiedene Variablen simulant anzuschauen. Fügen Sie weitere Variablen in der Anzeigen vonn `plot.C` hinzu. Welche Variablen eignen sich voraussichtlich am besten zu Trennung zwischen ,,canceler" und ,,nicht-canceler" ?

Verwenden sie TMVA, um verschiedene Multi-Variate Classifier, zu trainieren. Verwenden sie zunächst nur die Fisher Methode

```
./TMVAnalysis Fisher
```

Vergleichen sie die verschiedenen Signal und Background Verteilungen mit:

```
root -l ../macros/TMVAGui.C
```

In der Bildschirm-Ausgabe von TMVA werden auch die Classfier nach ihrer Qualität Signal von Untergrund zu trennen aufgeführt. Welches sind die besten Variablen für die Fisher Methode ?

Anschliessend trainieren sie weitere Classifier für Neuronale Netze (MLP - Multi Layer Perceptron) und Boosted Decision Trees (BDT) mit:

```
./TMVAnalysis Fisher MLP BDT
```

Dieses Training dauert je nach CPU Leistung mehrere Minute. Vergleichen sie auch hier die Leis-

tung der verschiedenen Classifier. Welche Variablen eigenen sich hier am besten zur Signal und Untergrundtrennung ?

Wenden Sie die trainierten Classifier auf die ,,echten" zu klassifizierenden Daten an mit:

```
./TMVApplication
```

Öffnen Sie anschließend die erzeugte Datei `TMVApp.root` und schätzen Sie erfolgte Klassifierung der Daten mit Hilfe der verschiedenen Algorithmen ein.

6.10 Optimierung

1. **Function Sampling mit Markov Chain MC**

   Experimentieren Sie MCMC für Funktionen, das Beispielprogramm aus der Vorlesung ist mcmc-fun.C

2. **Fitten mit MCMC**

   Das Makro HGamGam.C erzeugt das gezeigte (low-statistic) $H \to \gamma\gamma$ Massenspektrum.

   mcmchgg.C ist der zugehörige MCMC Fit.

   Testen Sie verschiedene Startwerte für die Parameter, variieren Sie Schrittweiten, etc.

3. **Traveling Salesman Problem**

   tspm.C enthält das Programm zur Generierung einer TSP-Städteanordnung und der Optimierung mit MCMC und Simulated Annealing.

   Experimentieren Sie mit den verschiedenen Möglichkeiten zur Weg-Sequenz-Änderung, Temperatur, Abkühlgeschwindigkeit, etc.

   Eine interessante Variante ist TSP mit Grenzübertritt: nehmen Sie an dass zwischen linker und rechter Hälfte eine Grenze ist, die sehr aufwendig zu passieren ist $(BRD \leftrightarrow DDR)$, und man die Zahl der Grenzübertritte möglichst minimieren will. Das kann man dem Programm einfach beibringen indem man noch einen zusätzlichen Kostenfaktor einführt bei Übergang von links nach rechts und v.v., der zur Weglänge hinzugefügt wird.