

Spektralanalyse

May 25, 2016

1 Spektralanalyse

Die Betrachtung von Zeitreihen im Frequenzraum ermöglicht die Bestimmung von periodischen Zyklen, z.B. dem Gezeitsignal. Die Zerlegung der Zeitreihe in ihre Frequenzanteile wird auch Harmonische Analyse genannt.

1.1 Fourier-Reihen

Gegeben sei eine periodische Funktion mit der Grundperiode T bzw. Grundfrequenz $f_0 = \frac{1}{T}$

$$x(t) = x(t \pm nT)$$

mit $n = 1, 2, 3, \dots$

Mit einigen Ausnahmen lassen sich solche periodischen Daten in Fourier-Reihen entwickeln

$$x(t) = \frac{a_o}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos(2\pi n f_0 t) + b_n \sin(2\pi n f_0 t))$$

Die Fourier-Koeffizienten a_n, b_n erhält man durch Integration über ein Periode T , z.B. $-\frac{T}{2}$ bis $\frac{T}{2}$ oder von 0 bis T

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \cos(2\pi n f_0 t) dt$$
$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \sin(2\pi n f_0 t) dt$$

Zu beachten ist, dass $\frac{a_o}{2} = \int_0^T x(t) dt$ der Mittelwert μ_x von $x(t)$ ist. Die Gleichungen können auch in anderer Form, z.B. mit der Kreisfrequenz $\omega = 2\pi f$ und $d\omega = 2\pi df$ geschrieben werden.

1.1.1 Amplituden- und Phasendarstellung

Durch trigonometrische Umformung lässt sich die Fourier-Reihe auch formulieren als

$$x(t) = \frac{a_o}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\underbrace{A_n}_{=\sqrt{a_n^2 + b_n^2}} \cos(2\pi n f_0 t - \underbrace{\Phi_n}_{=\tan^{-1}(\frac{b_n}{a_n})}) \right)$$

1.1.2 Darstellung mit komplexen Zahlen

Mittels der Euler-Beziehung $e^{-i\Theta} = \cos \Theta - i \sin \Theta$ folgt die Darstellung

$$x(t) = \frac{a_o}{2} + \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_n e^{i\pi n f_0 t}$$

mit $A_n = \frac{1}{2}(a_k - i b_k)$ und

$$A_n = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) e^{i\pi n f_0 t} dt$$

wobei $n = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$ nun auch negative Werte annimmt.

Auch wenn $x(t)$ eine reellwertige Zeitreihe ist, kann sie durch komplexwertige negative und positive Frequenzkomponenten beschrieben werden. Dabei gilt der Zusammenhang

$$A_n = |A_n| e^{-i\Theta_n}$$

mit $|A_n| = \frac{1}{2} \sqrt{a_n^2 + b_n^2} = \frac{x_n}{2}$ und $\Theta_n = \tan^{-1}(\frac{b_n}{a_n})$.

Für reelle $x(t)$ gelten die Symmetrien

$$|A_{-n}| = |A_n|$$

$$\Theta_{-n} = -\Theta_n$$

$$A_{-n} = |A_{-n}| e^{-i\Theta_{-n}} = |A_n| e^{i\Theta_n} = A_n^*$$

1.2 Fourier-Transformation

Gegeben sei eine Zeitreihe $x(t)$. Die Fourier-Reihe lässt sich erweitern zu dem Fourier-Integral

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-i2\pi f t} dt$$

$X(f)$ wird auch direkte Fourier-Transformierte oder (Amplituden-)Spektrum genannt und existiert für die Bedingung

$$\int_{-\infty}^{\infty} |x(t)| dt < \infty$$

Die inverse Fourier-Transformation

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} X(f) e^{i2\pi f t} df$$

ist i.A. eine komplexwertige Funktion

$$X(f) = X_R(f) - i X_I(f)$$

mit Real- und Imaginärteil X_R und X_I

$$X_R(f) = |X(f)| \cos(\Theta(f)) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cos(2\pi f t) dt$$

$$X_I(f) = |X(f)| \sin(\Theta(f)) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \sin(2\pi f t) dt$$

bzw.

$$X(f) = \underbrace{|X(f)|}_{\text{Magnitudenspektrum}} e^{-i \underbrace{\Theta(f)}_{\text{Phasenspektrum}}}$$

Das quadrierte Magnitudenspektrum wird auch Leistungsspektrum genannt. Die graphische Darstellung, meist in logarithmischer Form, wird als Periodogramm bezeichnet.

1.3 Diskrete Fourier-Transformation

Für eine stationäre Zeitreihe von theoretisch unendlicher Länge existiert die Fourier-Transformation nicht, denn es gilt

$$\int_{-\infty}^{\infty} |x(t)| dt = \infty$$

Allerdings liegen tatsächlich gemessene Zeitreihen nur über ein endliches Zeitintervall T vor, und die bestimmte Fourier-Transformation

$$X_T(f) = X(f, T) = \int_0^T x(t) e^{-i2\pi f t} dt$$

existiert immer. Für diskrete Frequenzen $f_n = \frac{n}{T}$ mit $n = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$ ergibt sich die diskrete Fouriertransformation zu

$$X(f_n, T) = T A_n$$

mit

$$A_n = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) e^{-i2\pi f_n t} dt$$

Die Fourier-Transformation für diskrete Frequenzen f ist tatsächlich eine Fourier-Reihe.

1.3.1 Nyquist-Frequenz

Wird die Zeitreihe $x(t)$ an N -Punkten im Abstand Δt gemessen (abgetastet), so beträgt die längste Periode

$$T = N \Delta t$$

Dies führt zu der Grundfrequenz $f_0 = \frac{1}{T}$ und der Nyquist-Frequenz (Grenzfrequenz)

$$f_{\text{Nyquist}} = \frac{1}{2\Delta t}$$

Bei der Berechnung wird die Zeitreihe so behandelt, als wäre es eine zyklische Zeitreihe mit der Periode T .

1.4 Rechenregeln für die Fouriertransformation

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-i2\pi f t} dt$$

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} X(f) e^{i2\pi f t} df$$

Eigenschaft	Zeit-Raum	Frequenz-Raum
Linearität	$ax(t) - by(t)$	$aX(f) - bY(f)$

Eigenschaft	Zeit-Raum	Frequenz-Raum
Zeitversatz	$x(t - t_0)$	$X(f)e^{2\pi i f t_0}$
Frequenzversatz	$x(t)e^{2\pi i f_0 t}$	$X(f - f_0)$
Differentiation	$\frac{dx(t)}{dt}$	$2\pi i f X(f)$
n-mal Differentiation	$\frac{d(x(t))^n}{dt^n}$	$(2\pi i f)^n X(f)$

1.4.1 Beispiel: Lösung einer DGL im Frequenzraum

Die bekannte Differentialgleichung für ein eindimensionales mechanisches System

$$m \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + c \frac{dy(t)}{dt} + ky(t) = F(t)$$

lässt sich für die anregende Kraft $F(t) = \delta t$ im Frequenzraum einfach lösen. Durch Fouriertransformation auf beiden Seiten erhält man

$$[-(2\pi)^2 m + i2\pi f c + k]Y(f) = 1$$

$$Y(f) = \frac{1}{k - (2\pi)^2 m + i2\pi f c}$$

2 Periodogramm

Gegeben sei eine Zeitreihe $x(t)$. Das Fourier-Integral

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-i2\pi f t} dt$$

wird auch Amplitudenspektrum genannt. Das quadratische Amplitudenspektrum

$$P_{xx}(f) = |X(f)|^2$$

wird auch das Leistungsspektrum genannt. Die graphische Darstellung des Leistungsspektrums wird als Periodogramm bezeichnet.

Für zeitlich diskrete Zeitreihen sind Fourier-Integral und Fourier-Reihe identisch. Die Berechnung der Fourier-Reihe geschieht üblicherweise durch einen schnellen Algorithmus, der FFT (Fast Fourier Transform).

3 Abtasttheorem und Aliasing

Gegeben sei ein Signal welches Informationen mit einer maximalen Frequenz f_{max} enthält. Dieses Signal soll zeitdiskret gemessen (Sampling) und aus den diskreten Messpunkten rekonstruiert werden.

Das Abtasttheorem (Nyquist-Theorem) besagt, dass dieses Signal mindestens mit der doppelten Frequenz $f_N = 2f_{max}$ abgetastet werden muss, um eine exakte Rekonstruktion zu ermöglichen. In der praktischen Anwendung liefert eine Abtastung mit etwa 3 bis 6 Abtastwerten pro Wellenlänge gute Ergebnisse.

Ist das Abtasttheorem nicht erfüllt (Unterabtastung), gibt es Fehler. Diese werden als Aliasing-Fehler oder Aliasing-Effekte bezeichnet.

4 FFT Algorithmus

4.1 Diskrete Fouriertransformation (DFT)

DFT eines Vektors \hat{x} der Länge N

$$\hat{x}(k) = \sum_{j=0}^{N-1} X(j) \underbrace{W_N^{jk}}_{e^{\frac{2\pi i}{N}jk}}$$

Inverse DFT

$$x(j) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \hat{x}(k) W_N^{-jk}$$

Beachte: Inverse kann als DFT der Funktion $\frac{1}{N}\hat{x}(-k)$ berechnet werden.

4.2 Ansatz für schnelle Lösung

Wenn $N = N_1 N_2$ ist, dann kann die DFT 1D-Gleichung als 2D-Gleichung beschrieben werden mit einer Umbenennung der Variablen

$$j = j(a, b) = aN_1 + b, 0 \leq a < N_2, 0 \leq b < N_1$$

$$k = k(c, d) = cN_2 + d, 0 \leq c < N_2, 0 \leq d < N_1$$

Nun wird die Eigenschaft $W_N^{m+n} = W_N^m W_N^n$ ausgenutzt und wir erhalten

$$\hat{x}(c, d) = \sum_{b=0}^{N_1-1} W_N^{b(cN_2+d)} \sum_{a=0}^{N_2-1} X(a, b) W_{N_2}^{ad}$$

Zur Berechnung benötigt man zwei Schritte, zunächst wird die innere Summe berechnet (für alle d)

$$\tilde{x}(b, d) = \sum_{a=0}^{N_2-1} X(a, b) W_{N_2}^{ad}$$

Dazu sind maximal $N_1 N_2^2$ arithmetische Rechenoperationen notwendig. Danach wird die Transformation

$$\sum_{b=0}^{N_1-1} W_N^{b(cN_2+d)} \tilde{x}(b, d)$$

berechnet, was mit $N_1 N_1^2$ Rechenschritten möglich ist.

Der FFT-Algorithmus kann effizient durch in-place Berechnungen kodiert werden, um Rechenschritte und Speicherplatz einzusparen.

4.2.1 Literatur zur FFT

- Cooley, James W., and John W. Tukey, 1965, An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series, *Math. Comput.* 19: 297-301
- Computing in Science and Engineering Jan/Feb 2000, The FFT: An Algorithm the Whole Family Can Use, Daniel N. Rockmore
- E. Oran Brigham, FFT - Schnelle Fourier-Transformation, Einführung in die Nachrichtentechnik, Oldenbourg Verlag, 1982

5 Beispiele

5.1 Amplitudenspektrum

Wir erzeugen ein Test-Signal bestehend aus zwei überlagerten Sinusschwingungen und berechnen das Amplitudenspektrum mittels FFT.

Eine “Frequenz-Verschmierung” ergibt sich dadurch, dass das Signal nicht exakt periodisch ist und Sprünge an den Rändern auftreten.

```
In [3]: %pylab inline
        %config InlineBackend.figure_format = 'svg'

        M=1000

        t = linspace(0, 2*pi, M, endpoint=True)
        f1 = 4.0 # Frequenz in Hz
        f2 = 5.0 # Frequenz in Hz

        A1 = 100.0 # Amplitude
        A2 = 70.0 # Amplitude

        y = A1 * sin(2*pi*f1*t)+ A2 * sin(2*pi*f2*t) # Signal

        plot(t,y)
        title('Testsignal')
        #####
        dt = t[1] - t[0] # Abtast-Periode
        fa = 1.0/dt # Abtast-Frequenz

        Y = fft.fft(y)
        N = len(y)/2+1

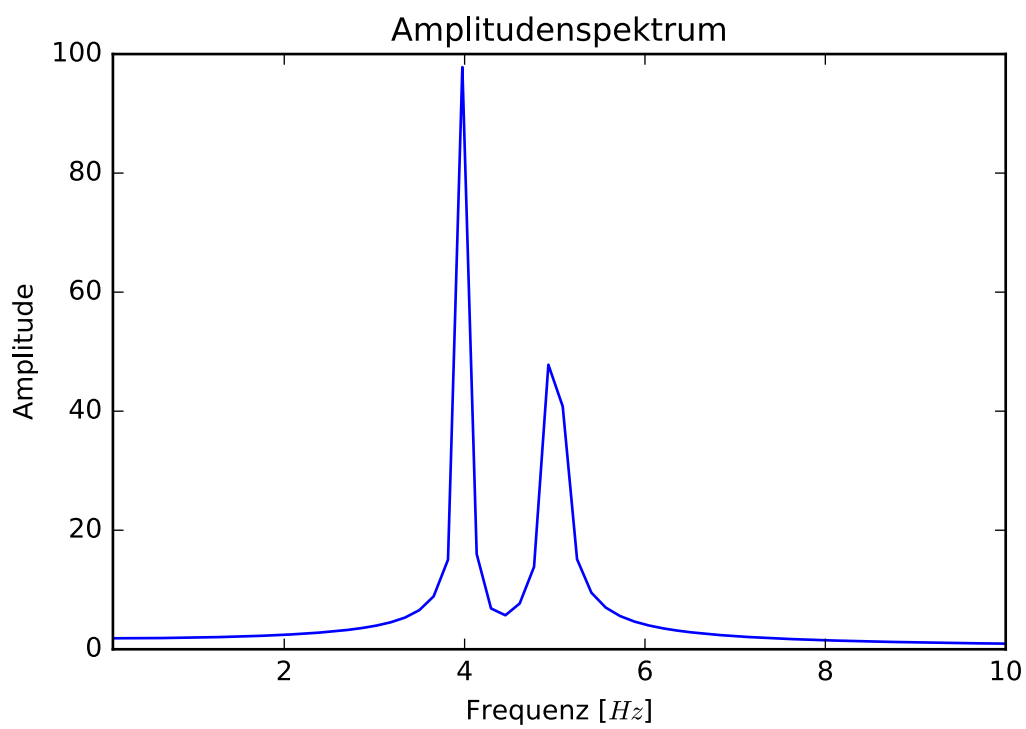
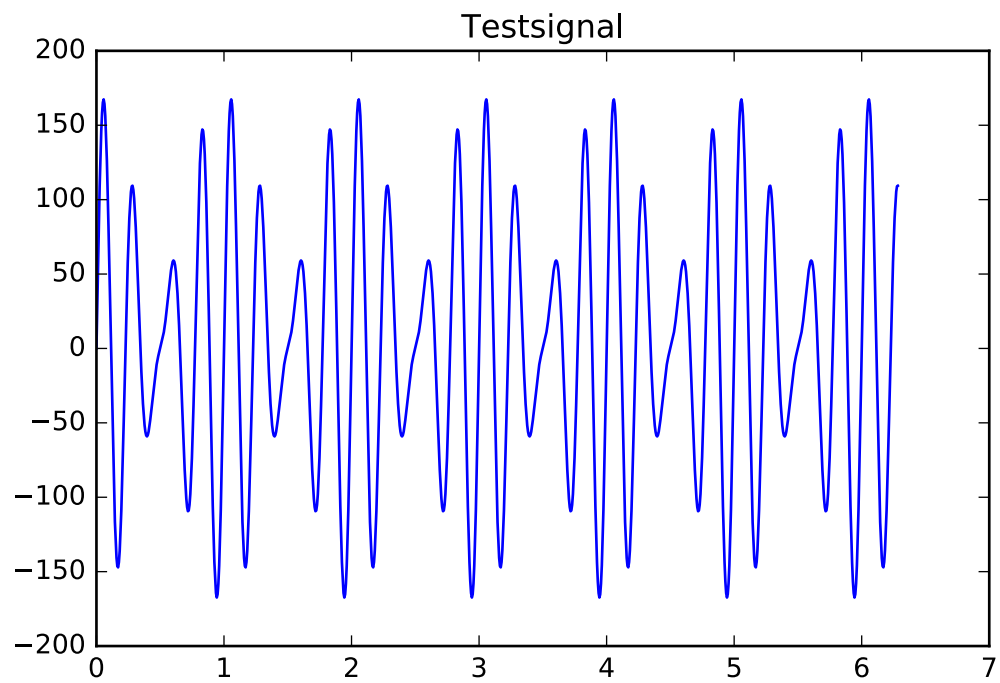
        X = linspace(0, fa/2, N, endpoint=True)

        figure()
        plot(X,abs(Y[:N])/N)
        xlabel('Frequenz [Hz]')
        ylabel('Amplitude')
        xlim([0.1,10])
        title('Amplitudenspektrum')
```

Populating the interactive namespace from numpy and matplotlib

/usr/local/lib/python3.4/dist-packages/ipykernel/_main_.py:27: DeprecationWarning: using a non-integer

Out[3]: <matplotlib.text.Text at 0x7fea2a51a400>

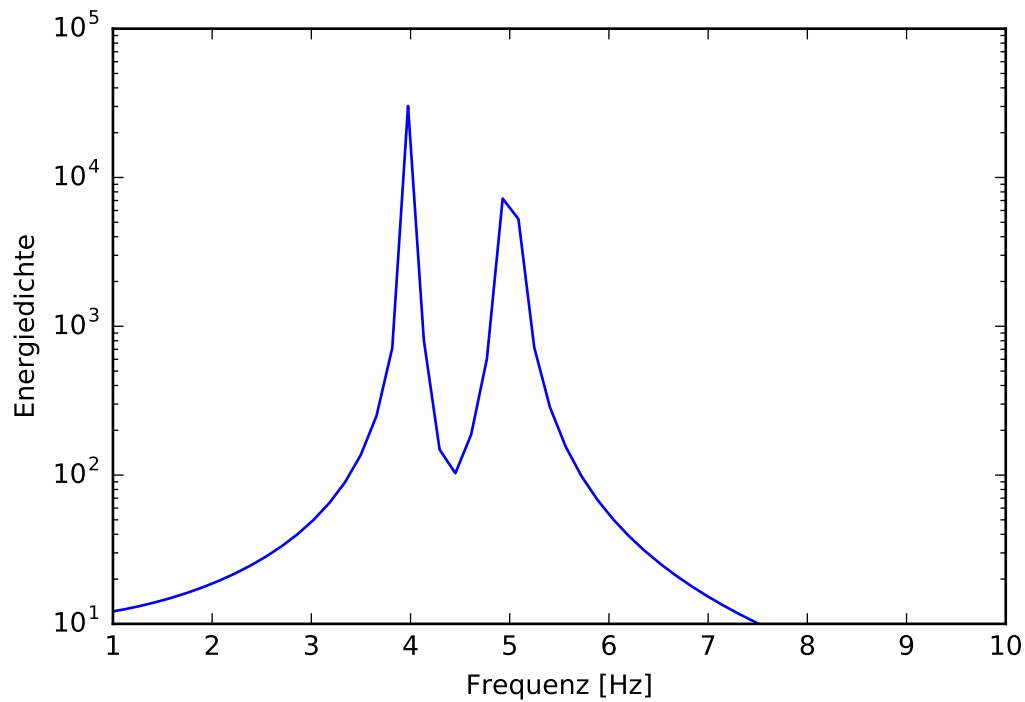


5.2 Periodogramm / Leistungsspektrum

```
In [6]: from scipy.signal import periodogram
f, Pxx = periodogram(y, fa)
figure()
semilogy(f, Pxx)
xlabel('Frequenz [Hz]')
ylabel('Energiedichte')

ylim([1e1, 1e5])
xlim([1, 10])
```

Out[6]: (1, 10)

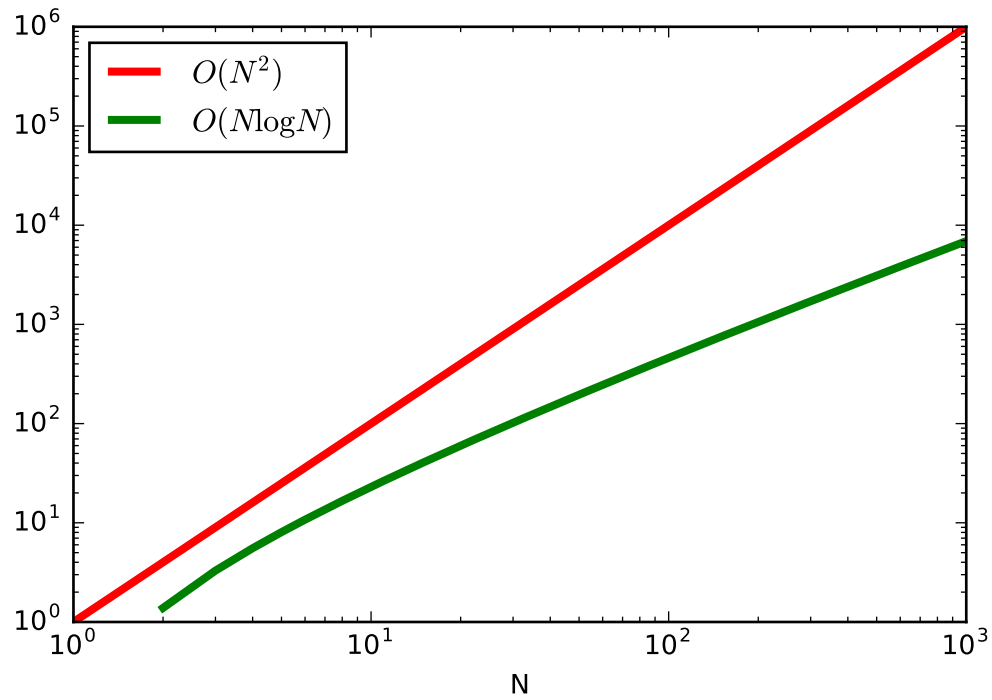


5.3 Komplexität

Der große Vorteil der FFT wird deutlich, wenn man die Anzahl der notwendigen Rechenschritte als Funktion der Vektorlänge N betrachtet.

```
In [51]: N=1000
n=linspace(1,N,N)
loglog(n,n**2,'r-',linewidth=3,label='$O(N^2)$')
loglog(n,n*log(n),'g-',linewidth=3,label='$O(N \log N)$')
xlabel('N')
legend(loc=2)
```

Out[51]: <matplotlib.legend.Legend at 0x7fc1a078a0f0>



5.4 Alias-Problem

```
In [52]: T=1.0
         f=5.0/T
         fN=f*2
         print(fN)

         N1=10 # Anzahl Abtast-Punkte
         N2=1000
         #####

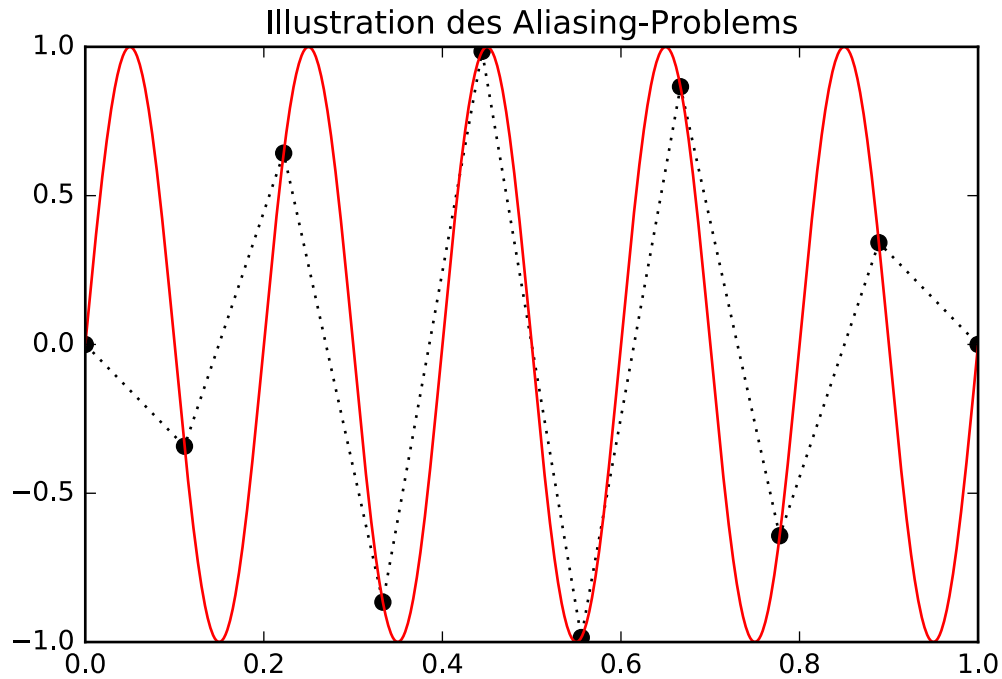
         t1=linspace(0,T,N1)
         y1=sin(2*pi*f*t1)

         t2=linspace(0,T,N2)
         y2=sin(2*pi*f*t2)

         plot(t1,y1,'ko:')
         plot(t2,y2,'r-')
         title('Illustration des Aliasing-Problems')
```

10.0

Out[52]: <matplotlib.text.Text at 0x7fc1a08f5a90>



5.5 Berechnung der Fourier-Reihe zu Fuss

```
In [12]: def x(t):
    case=3 # Beispiele
    if case==1:
        y=sin(t*2*pi) # Reiner Sinus
    if case==2:
        y=sin(t*2*pi) + 0.5*sin(t*8*pi)
    if case==3: # Sprungfunktion
        y=ones(t.size)-2
        y[t>0.5]=1
    return y

N=50
T=1.0

t=linspace(0,T,N)
k=arange(1,N+1)
f_k=k/T

k_max=10 # Nutze Anzahl k_max Fourier-Koeffizienten

ak=zeros(k_max)
bk=zeros(k_max)

# Berechnung der Fourier-Koeffizienten
for i in range(k_max):
```

```

ak[i]=2/T*sum(x(t)*cos(2*pi*f_k[i]*t))
bk[i]=2/T*sum(x(t)*sin(2*pi*f_k[i]*t))

figure()
plot(t,x(t),'ko-',label='Original Zeitreihe $x_t$')

# Berechnung der Fourier-Reihe (Rekonstruktion)
for i in range(k_max):
    ak[i]=2/T*sum(x(t)*cos(2*pi*f_k[i]*t))/(N-1) # Integral durch Summation approximiert
    bk[i]=2/T*sum(x(t)*sin(2*pi*f_k[i]*t))/(N-1)

t2=linspace(0,T,100) # Neue (größere) Anzahl von Zeitschritten (=Interpolation)

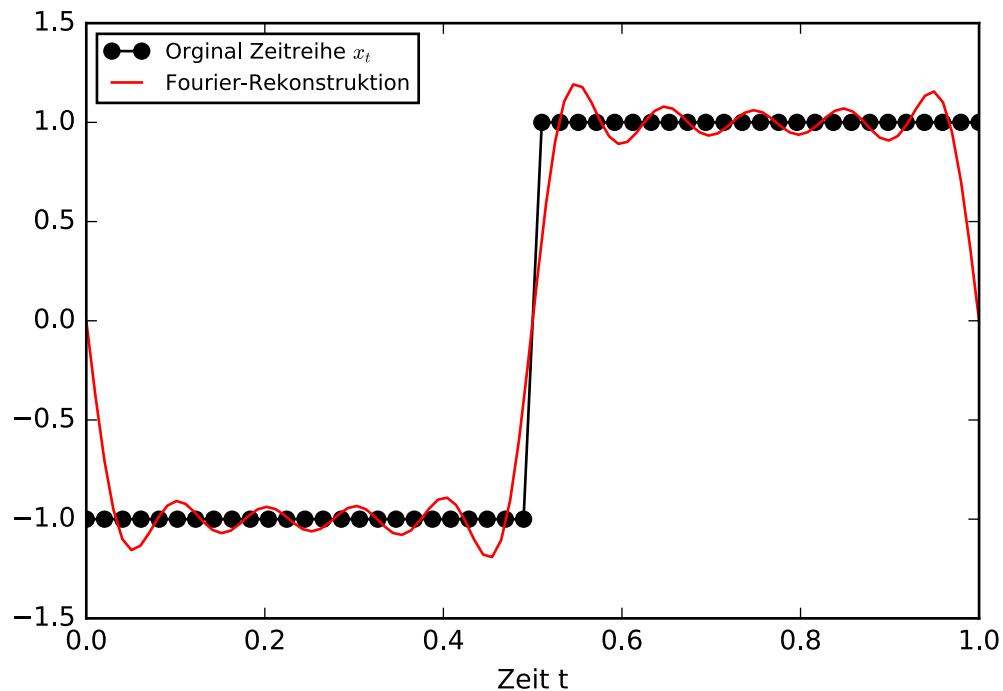
N2=t2.size
x2=zeros(N2)
x2=x2+ak[0]/2
for i in range(k_max):
    x2=x2+ak[i]*cos(2*pi*f_k[i]*t2)+bk[i]*sin(2*pi*f_k[i]*t2)

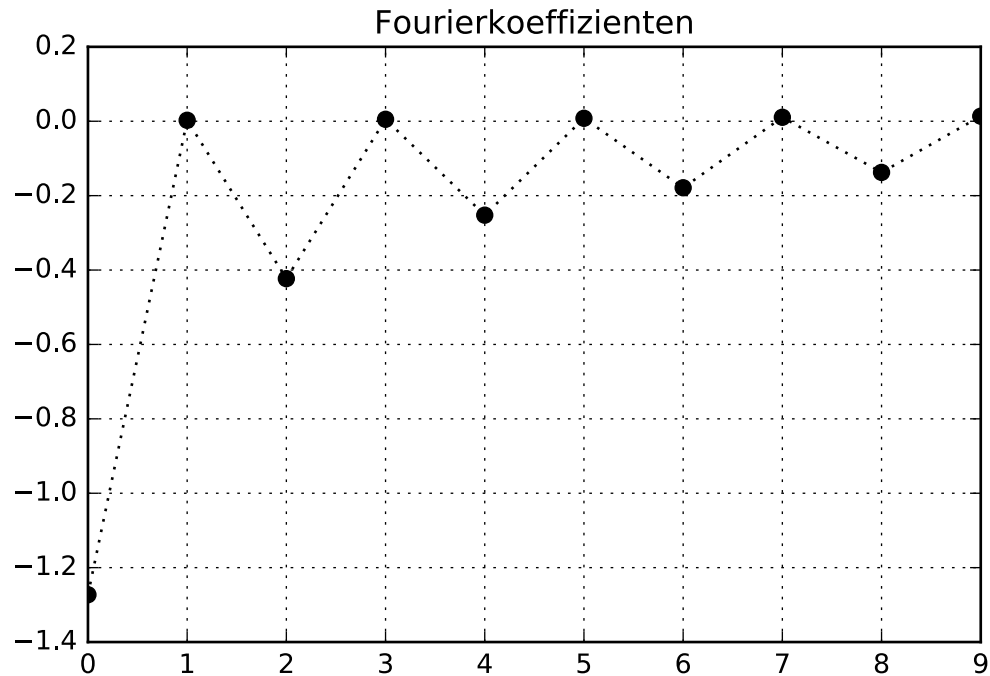
plot(t2,x2,'r-',label='Fourier-Rekonstruktion')
xlabel('Zeit t')

legend(loc=2,fontsize=8)
figure()

plot(bk,'ko:')
title('Fourierkoeffizienten')
grid()

```





6 Matlab/Octave-Versionen

In [1]: M=1000;

```
t = linspace(0, 2*pi, M);
f1 = 3.0; % Frequenz in Hz
f2 = 6.0; % Frequenz in Hz

A1 = 100.0; % Amplitude
A2 = 70.0; % Amplitude

y = A1 * sin(2*pi*f1.*t)+ A2 * sin(2*pi*f2.*t);% Signal

plot(t,y);
title('Testsignal');

dt = t(2) - t(1); % Abtast-Periode
fa = 1.0/dt; % Abtast-Frequenz

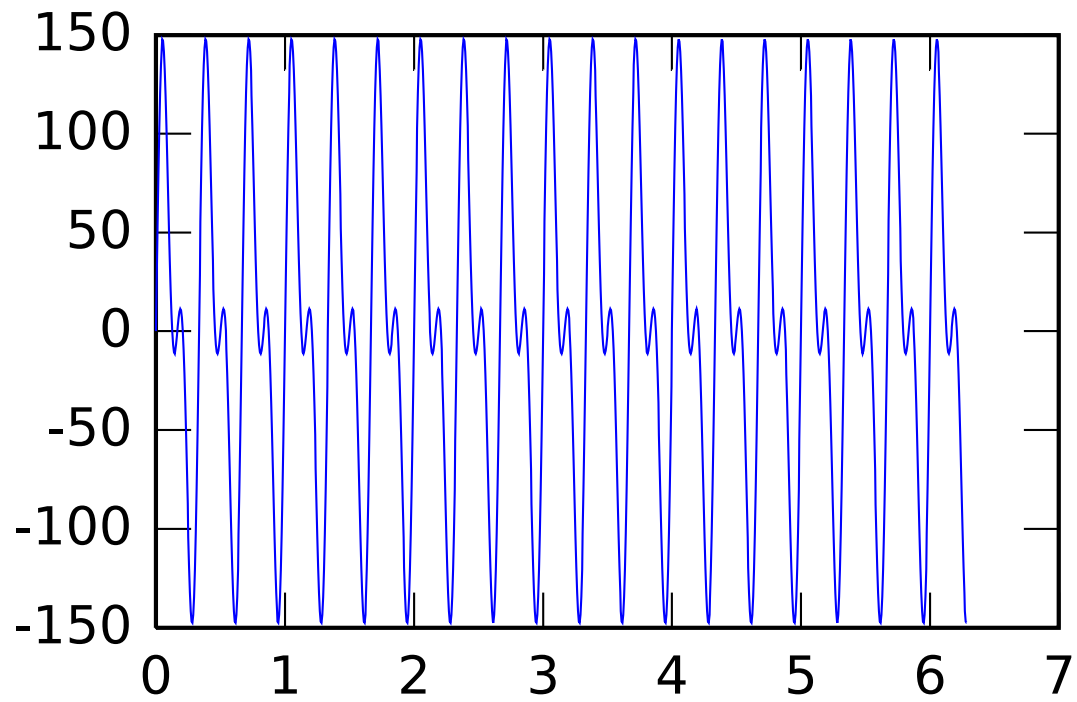
Y = fft(y);
N = size(y)(2)/2+1;

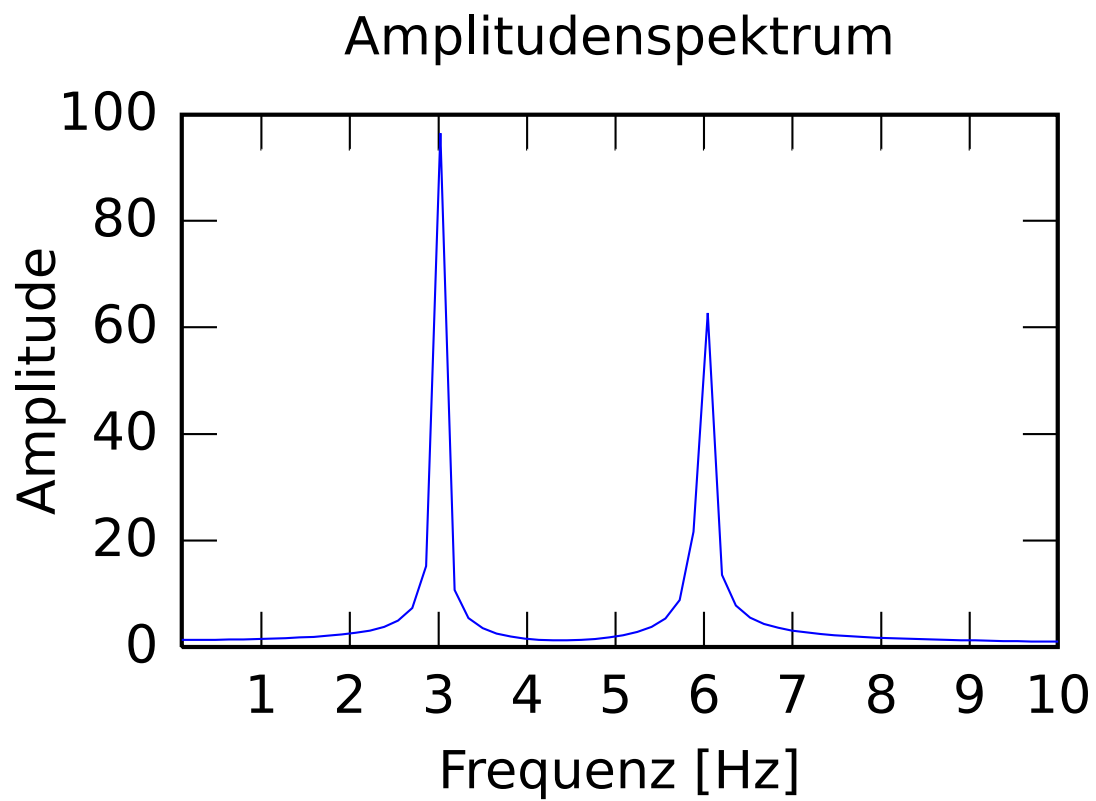
X = linspace(0, fa/2, N);

figure();
plot(X,abs(Y(1:N)/N));
xlabel('Frequenz [Hz]');
```

```
ylabel('Amplitude');  
xlim([0.1,10]);  
title('Amplitudenspektrum');
```

Testsignal





```
In [2]: [Pxx,f] = periodogram(y,1,512,fa);  
        figure();  
        semilogy(f, Pxx);  
        xlabel('Frequenz [Hz]');  
        ylabel('Energiedichte');  
  
        ylim([1e2, 1e7]);  
        xlim([1, 10]);
```

