

Fachhochschule Düsseldorf

Fachbereich: Maschinenbau und Verfahrenstechnik

Institut für Strömungsmaschinen I.F.S.

Prof. Dr. Ing. F. Kameier

Dipl. Ing. C. Haukap

Diplomarbeit

Numerische Simulation und experimentelle

Überprüfung von

Wanddruckschwankungsverläufen

Bearbeitet von

Younes Chlyeh

Matrikel-Nr. 316759

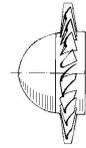
Vorwort

Meinem verehrten Prof. Dr.-Ing. F. Kameier möchte ich an dieser Stelle für die Anregung zu dieser Arbeit und für die wertvolle Unterstützung, die er mir während die ganze Arbeit gewährt hat, ganz besonders danken.

Ich danke ebenso Herrn Dipl.-Ing. C. Haucap für die intensive Betreuung bei der Durchführung und Erstellung dieser Diplomarbeit.

Dank an das ganze Team des Instituts für Strömungsmaschinen.

Auch danke ich meiner Familie und meinen Freunden für ihre Unterstützung.



**Thema einer Diplomarbeit
für
Herrn Younes Chlyeh
Matr.-Nr. 316759**

Prof. Dr.-Ing. Frank Kameier

Institut für Strömungsmaschinen
Fachbereich 4
Maschinenbau und Verfahrenstechnik
Josef-Gockeln-Str. 9
40474 Düsseldorf

Phone (0211) 4351-448
Fax (0211) 4351-509
E-Mail Frank.Kameier@fh-duesseldorf.de

Düsseldorf, den 26.06.2000

**"Numerische Simulation und experimentelle Überprüfung von
Wanddruckschwankungsverläufen"**

An Strömungsmaschinen werden Wanddruckschwankungen in unmittelbarer Nähe der rotierenden Schaufeln gemessen, um daraus Aussagen über die Geräuschenstehung oder Ursachen von Schaufelschwingungen ableiten zu können. Bei sehr schnell rotierenden Rotoren mit einer großen Anzahl an Schaufeln ist es schwierig, die Zeitverläufe der Wanddruckschwankung genügend fein abzutasten. Außerdem sind die Druckschwankungen in der Regel von einem stochastischen Rauschen überlagert, dass die Interpretation zusätzlich erschwert. Es bietet sich daher an, die Deutung der Wanddruckschwankungen in der Frequenzebene durchzuführen. Eine genügende Auflösung läßt sich auch bei hohen Drehzahlen erzielen und das Signal-Rausch-Verhältnis kann durch entsprechende Mittelung der Spektren verbessert werden. Ein Nachteil der Frequenzanalyse ist allerdings, dass die Zuordnung zu einzelnen Schaufeln verloren geht.

Im Rahmen einer Simulation soll daher untersucht werden, welche Zusammenhänge zwischen möglichen Zeitverläufen und den zugehörigen Frequenzspektren bestehen. Die Simulation soll mit Hilfe des Programmpakets MATLAB durchgeführt werden. Desweiteren sollen experimentell einzelne Simulationen an einer axialen Strömungsmaschine verifiziert werden. Zur Verfügung steht für die Experimente ein Versuchsaufbau, an dem Schaufelschwingungen einer axialen Strömungsmaschine im Rahmen eines Forschungsprojekts untersucht werden. Die Messungen sollen mit Hilfe einer Akustik-Workstation und dem Programm PAK ausgewertet werden.

VORWORT.....	1
1. EINLEITUNG.....	1
2. GRUNDLAGEN.....	2
2.1. ZIEL DER FOURIER-ANALYSE.....	2
2.1.1 <i>Harmonische Schwingungen</i>	2
2.1.2 <i>Nichtharmonische Schwingungen</i>	2
2.1.3 <i>Nichtperiodische Schwingungen</i>	4
3. MATLAB GRUNDLAGEN.....	4
3.1 EINLEITUNG ZUR SIMULATION.....	4
3.2 VEKTOR DER FOURIER FUNKTION IN MATLAB.....	5
3.3 ANWENDUNGSBEISPIEL ZUR FOURIERTRANSFORMATION.....	7
3.3.1 <i>Graphische Oberfläche und Beispiel</i>	8
3.3.2 <i>Vorgehensweise für die Benutzung des Programms</i>	9
4. ENTSTEHUNG VON ROTOR- UND BLATTFOLGEFREQUENZ.....	10
4.1 STRÖMUNGSMASCHINEN.....	10
4.2 HARMONISCHE DER ROTORFREQUENZ.....	11
5. VERSUCHSAUFBAU.....	17
5.1 VOLUMENSTROMMESSUNG.....	19
5.2 MESSUNG DER WANDDRUCKSCHWANKUNG.....	20
5.2.1 <i>Kondensatormikrofon</i>	20
6. VERGLEICH VON SIMULATIONEN UND MESSUNGEN.....	22
6.1 SIMULATION.....	22
6.2 EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN.....	28
6.2.1 <i>Vergleich von Originalbeschaufelung und einer demontierten Schaufel</i>	29
6.2.2 <i>Vergleich von Originalbeschaufelung und zwei eingebauten weicheren Schaufeln</i>	34
7. ZUSAMMENFASSUNG.....	38
8. LITERATURVERZEICHNIS.....	40
9. ANHÄNGE.....	41

1. Einleitung

Durch eine effiziente und umweltschonende Energieumsetzung in modernen Strömungsmaschinen werden mechanische Bauteile immer höher belastet. So werden rotierende Schaufeln der Maschine unter Verwendung hochwertiger Materialien immer dünner gebaut, wobei aber eine höhere Anfälligkeit gegen Schwingungen in Kauf genommen werden muss.

Aus wirtschaftlicher und technischer Sicht besteht grosser Bedarf, Merkmale zu identifizieren, anhand derer Ursachen der Schwingungen schnell und eindeutig klassifiziert werden können.

Die direkte Messung der Schaufelschwingung erfolgt üblicherweise mit Hilfe von Dehnungsmessstreifen (DMS). Da die Bestückung der Schaufeln mit Dehnungsmessstreifen sehr aufwendig, die Übertragung der gemessenen Daten ins raumfeste System mit hohen Kosten verbunden und vor allem ein Dehnungsmessstreifen sehr anfällig gegen Beschädigungen ist, sollen an einem Modellprüfstand Versuche durchgeführt werden, mit denen eine Bewertung und vor allem eine Lokalisierung der schwingenden Schaufeln allein mittels Messungen dynamischer Wanddruckschwankungen im strömenden Medium innerhalb der Arbeitsmaschine ermöglicht wird.

In dieser Arbeit ist zunächst die Simulation von Wanddruckschwankungen in der Zeit- und Frequenzebene mit Hilfe von Matlabprogrammen vorgesehen. Die Ergebnisse der Simulation werden an einem Versuchsstand überprüft und verglichen, wobei folgende Variationen vorgenommen werden:

- eine originale Messung,
- eine Messung in der eine Schaufel mit Klebeband verstärkt wird,
- eine Schaufel wird demontiert,
- eine Messung mit zwei weicheren Schaufeln.

2. Grundlagen

Zu den wichtigsten Werkzeugen der Datenanalyse auf den verschiedensten Gebieten der Wissenschaft und Technik zählt die Fouriertransformation. Sie erlaubt es beispielsweise, die Betrachtung der Zeitabhängigkeit der Übertragungseigenschaften einer Messkette durch die Darstellung in Abhängigkeit von der Signalfrequenz zu ersetzen, vgl. Weidemann (1999) [6].

2.1. Ziel der Fourier-Analyse

2.1.1 Harmonische Schwingungen

Eine elementare harmonische Schwingung setzt sich zusammen aus einer physikalischen Grösse y und einer Kreisfunktion als zeitabhängiger Term. Bei konstanter Amplitude A erhält man als reine Zeitfunktion:

$$y = A \cdot \sin \omega t . \quad (2.1)$$

Im dimensionslosen Argument ωt sind beide Variablen gleichberechtigt, so dass für einen gegebenen Zeitpunkt $t = t_0$ die Winkelgeschwindigkeit ω als unabhängige Variable aufgefasst werden kann. Die Beschreibung der beobachteten Schwingung durch die Amplitude mit der Frequenz entspricht bereits der sogenannten Fouriertransformierten der Zeitfunktion $y(t)$.

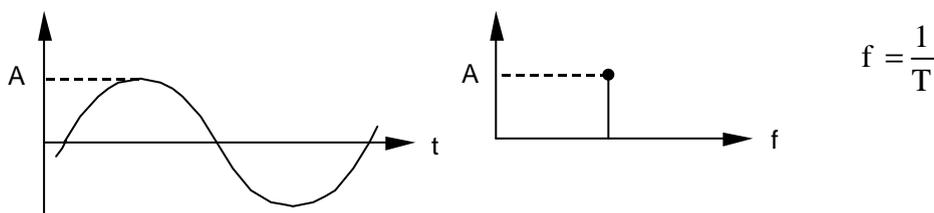


Bild 2.1: Periodische Zeitfunktion und ihre Fouriertransformierte.

2.1.2 Nichtharmonische Schwingungen

Sofern eine beliebige Funktion (z.B. Zeit-, Ortsfunktion oder Wiederholungsvorgang) streng periodisch verläuft, liefert die Reihenentwicklung dieser Funktion mit deren

arithmetischen Mittelwert $a_0/2$ harmonische Schwingungen mit ganzzahligen Vielfachen der Grundfrequenz:

$$y(x) = \frac{a_0}{2} + a_1 \cos(1x) + b_1 \sin(1x) + a_2 \cos(2x) + b_2 \sin(2x) + \dots + a_n \cos(nx) + b_n \sin(nx) \quad (2.2)$$

Hierbei stellt x ein beliebiges dimensionsloses Produkt dar, z.B. $x = \omega_0 t$ mit der Grundfrequenz ω_0 und der Periodendauer T . Die Reihe wird vereinfacht, wenn die Funktion entweder als gerade ($b_n = 0$) bzw. als ungerade ($a_n = 0$) definiert werden kann. Die Darstellung der Summanden – der sog. Fourier-Koeffizienten – in Abhängigkeit von der Frequenz ergibt ein Linienspektrum mit äquidistanten Abständen auf der Abszisse.

Jede in der Regel nichtsinusförmige Schwingung erzeugt somit eine Reihe mit den Amplituden a_n bzw. b_n bei ganzzahligen Vielfachen der Grundfrequenz.

Die Fourierkoeffizienten einer periodischen Wechselgröße berechnen sich aus folgenden Integralen:

$$a_n = 2 \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \cdot \cos(n\omega t) dt ,$$

$$b_n = 2 \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \cdot \sin(n\omega t) dt , \quad (2.3)$$

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

Der Faktor 2 berücksichtigt, dass der Scheitelwert der Wechselgröße nur der Hälfte z.B. eines Spannungssprungs entspricht. Die Bestimmung der a_n und b_n ist das Ziel der harmonischen Analyse. Mit den Beziehungen:

$$c_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad \mathbf{j}_n = \arctan \frac{a_n}{b_n} \quad \text{und} \quad \mathbf{w} = 2\mathbf{p}f = 2\mathbf{p} / T$$

lassen sich die Koeffizienten zu sogenannten Harmonischen zusammenfassen:

$$f(t) = \sum_{n=1}^{\infty} c_n \cdot \sin\left(n \frac{2p}{T} t + j_n\right). \quad (2.4)$$

Die Darstellung der Phasenwinkel φ_n in Abhängigkeit von der Ordnungszahl n nennt man das Phasenspektrum.

2.1.3 Nichtperiodische Schwingungen

Kann keine Periodizität einer Funktion erkannt werden, bezeichnet man diese regellosen Vorgänge als Rauschsignale. Um auch in diesen Fällen eine FFT durchführen zu können, lässt man in der Theorie die Periodendauer gegen unendlich streben. Damit streben aber die Frequenzabstände der Harmonischen gegen null, so dass das diskrete Linienspektrum sich zu einem kontinuierlichem Spektrum schliesst.

3. Matlab Grundlagen

3.1 Einleitung zur Simulation

Über die Jahre wurden viele numerische Methoden entwickelt, die eine 2 oder 3 dimensionale stationäre Strömung berechnen können. Für eine instationäre Näherung wurde angenommen, dass die Wanddruckschwankung durch die Anströmung der Schaufeln einen harmonischen Verlauf hat. Diese Näherung ist im Falle einer defekten Schaufel nicht anwendbar, da der Zeitverlauf nicht harmonisch ist.

Eine Simulation ermöglicht die Erstellung von Fehlersignaturen ohne die Notwendigkeit der Durchführung von Experimenten mit eingesetztem Fehler. Der Erfolg dieser Methode wird durch den Vergleich von Signalen, die zum einen durch eine Simulation erzeugt und zum anderen bei Experimenten gemessen wurden, demonstriert.

Aus diesen Gründen wurden an dem vorhandenen Axialventilator Wanddruckschwankungen in der Zeit- und Frequenzebene aufgenommen und mit dem simulierten Signal des Matlab Programms verglichen.

3.2 Vektor der Fourier Funktion in Matlab

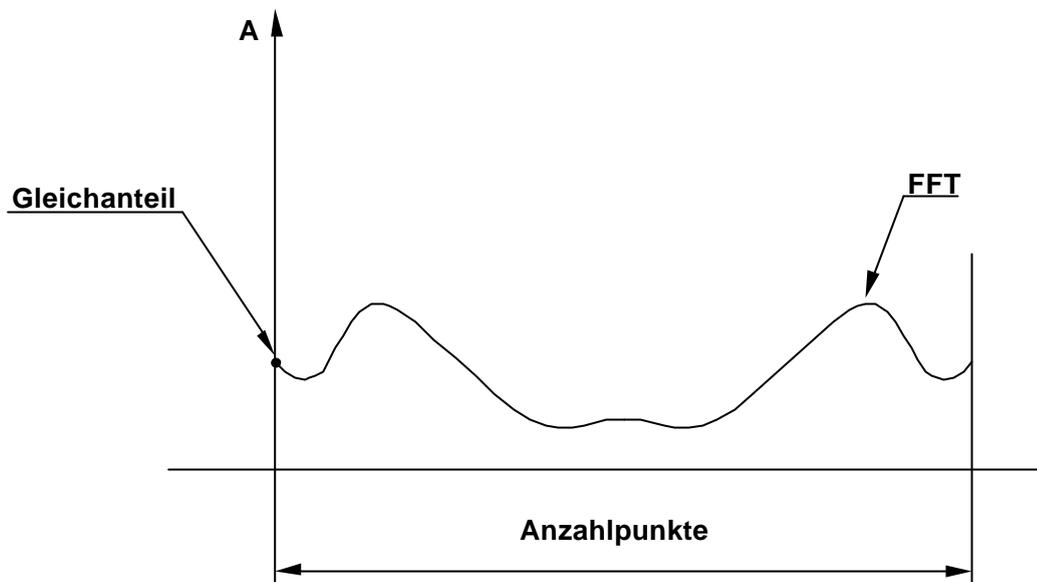


Bild 3.1: Ergebnisvektor der Fourier Transformation einer Zeitfunktion.

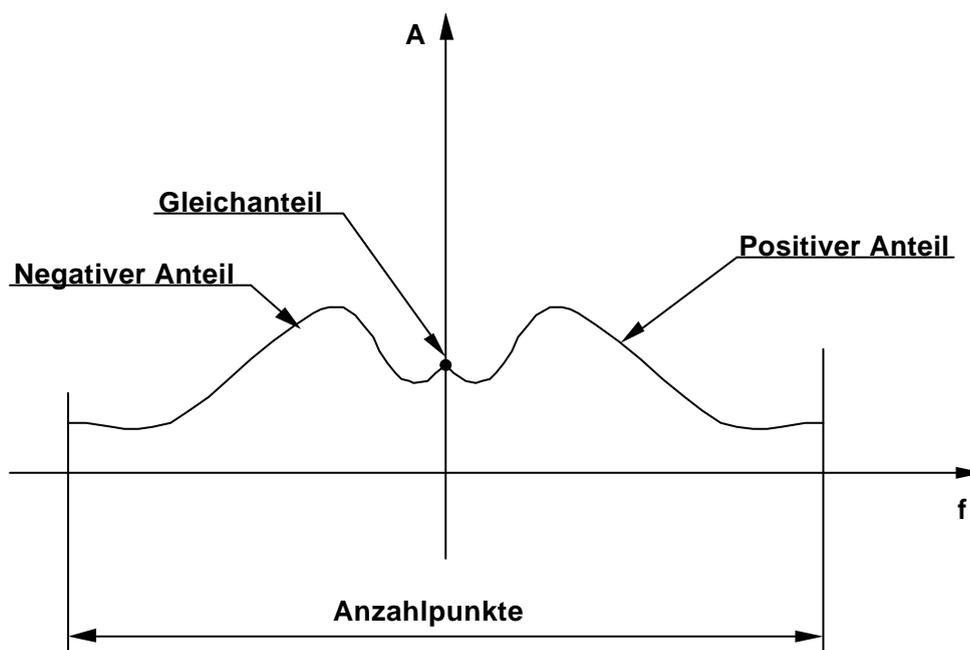


Bild 3.2: Sortierte Darstellung des Ergebnisvektors nach negativen und positiven Anteilen.

Es wird der negative Anteil vor den Positiven gehängt.

Wenn die Eingabedaten reell sind, liefert die FFT ein symmetrisches Ergebnis, (Siehe Bild 3.2). In dem Fall wäre es, mit Ausnahme des Gleichanteils, ausreichend, das FFT Ergebnis mit zwei zu multiplizieren und nur die rechte Seite aufzutragen, um ein richtiges Amplituden- Frequenz-Spektrum zu erzielen (siehe Bild 3.3).

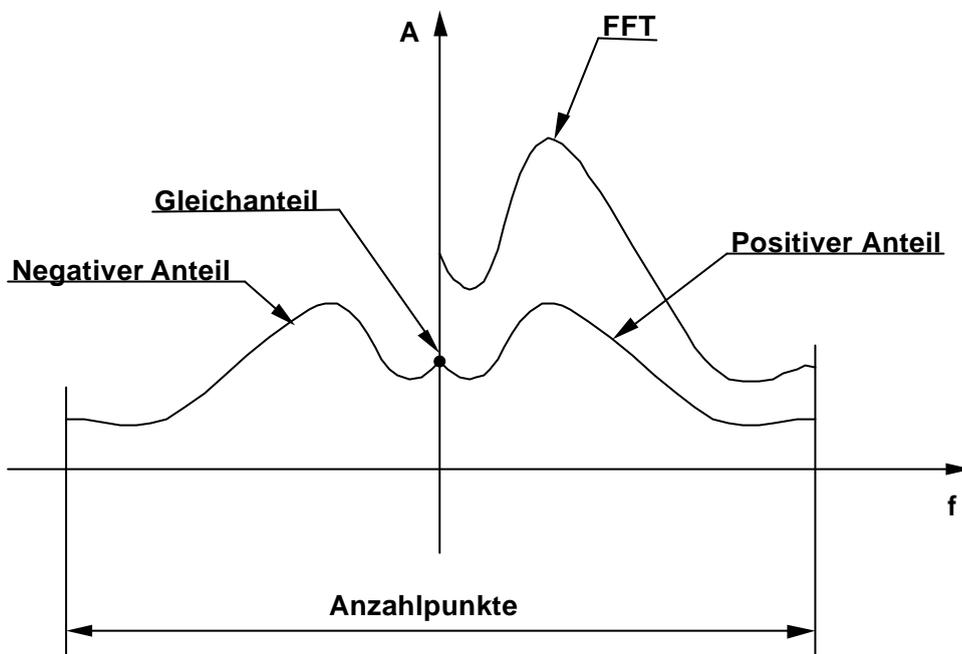


Bild 3.3: Amplituden Spektrum

Wenn es sich um komplexe Daten handelt, liefert die FFT ein unsymmetrisches Ergebnis. Deswegen muss man für die Berechnung des Amplituden-Spektrums die Amplitude der negativen und positiven Frequenzen der einzelne Punkte addieren. Das folgende Matlab-Programm **Polarplot5.m** (Zeilen 48 bis 51) führt eine Berechnung für den allgemeinen Fall durch:

```
Z=fft(y);
for i=2:(Anzahlpunkte/2);
    amp_fft(i)=abs(Z(i))+abs(Z(Anzahlpunkte-i+2));
end
```

Um den Gleichanteil zu berücksichtigen, wird die Amplitude des ersten Spektralpunktes wie folgt angegeben (**Polarplot5.m** Zeile 52):

```
amp_fft(1)=Z(1).
```

3.3 Anwendungsbeispiel zur Fouriertransformation

In diesem Anwendungsbeispiel wurden mit Hilfe des Matlabprogramms zwei sinusförmige Signale in der Form:

$$y_1 = DC_1 + Amp_1 \cdot \sin\left(2 \cdot \boldsymbol{p} \cdot f_1 \cdot x + Phi_1 \cdot \frac{\boldsymbol{p}}{180}\right), \quad (3.1)$$

$$y_2 = DC_2 + Amp_2 \cdot \sin\left(2 \cdot \boldsymbol{p} \cdot f_2 \cdot x + Phi_2 \cdot \frac{\boldsymbol{p}}{180}\right), \quad (3.2)$$

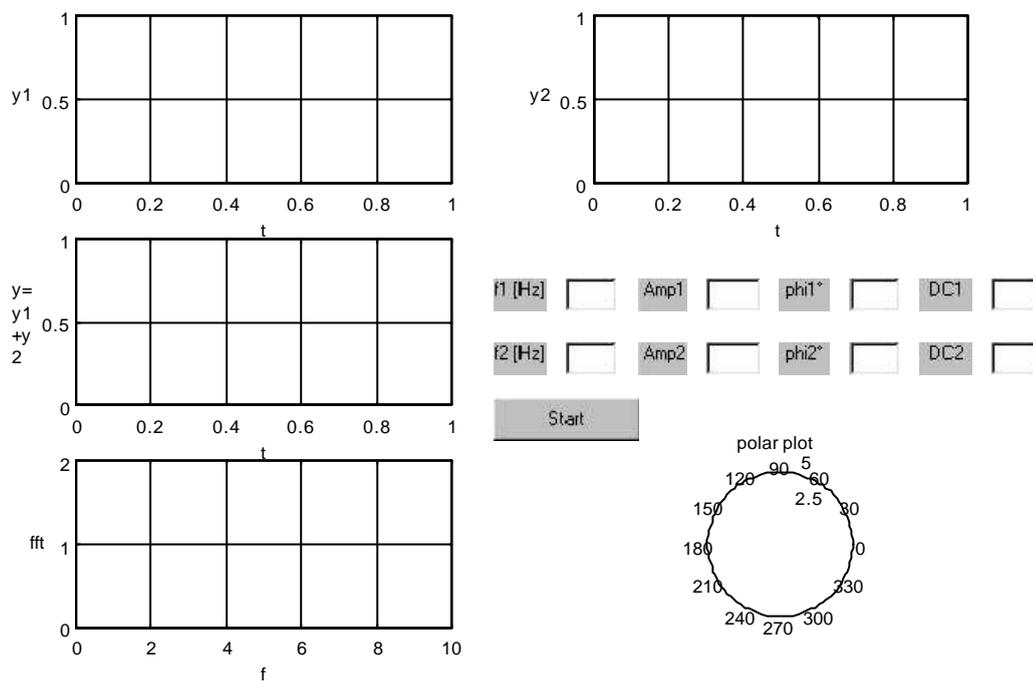
mit der Zeitfunktion y , dem Gleichanteil DC , der Amplitude Amp , der Frequenz f und der Zeitvariablen x sowie den Phasenwinkel ϕ , eingegeben und in einem kartesischen Koordinatensystem aufgetragen. Ebenso wird die Summe dieser zweier Funktionen y_1+y_2 gebildet dann kartesisch und polar dargestellt. Für die veranschaulichung der Polar Darstellung wird ein „offset“ angegeben damit die negativen Amplituden immer sichtbar sind. Im dargestellten Beispiel in Bild 3.4 ist der „offset“ auf drei gesetzt.

```
offset=3;
```

Als nächstes wird die Fast Fourier Transformation (FFT) der Summe berechnet und in einem kartesischen Koordinatensystem dargestellt.

Das Programm besteht aus einem Hauptprogramm (Anhang1) und mehreren Unterprogrammen (Anhang2). Das erste dient hauptsächlich zur graphischen Darstellung und es ruft eine Reihe von Unterprogrammen (hier Call-Programme) auf. Die eigentliche Berechnung findet in Unterprogramm Polarplot5.m statt.

3.3.1 Graphische Oberfläche und Beispiel



Beispiel

$$y1=1+2*\sin(2*\pi*1*x+45*\pi/180)$$

$$y2=2+3*\sin(2*\pi*2*x+0*\pi/180)$$

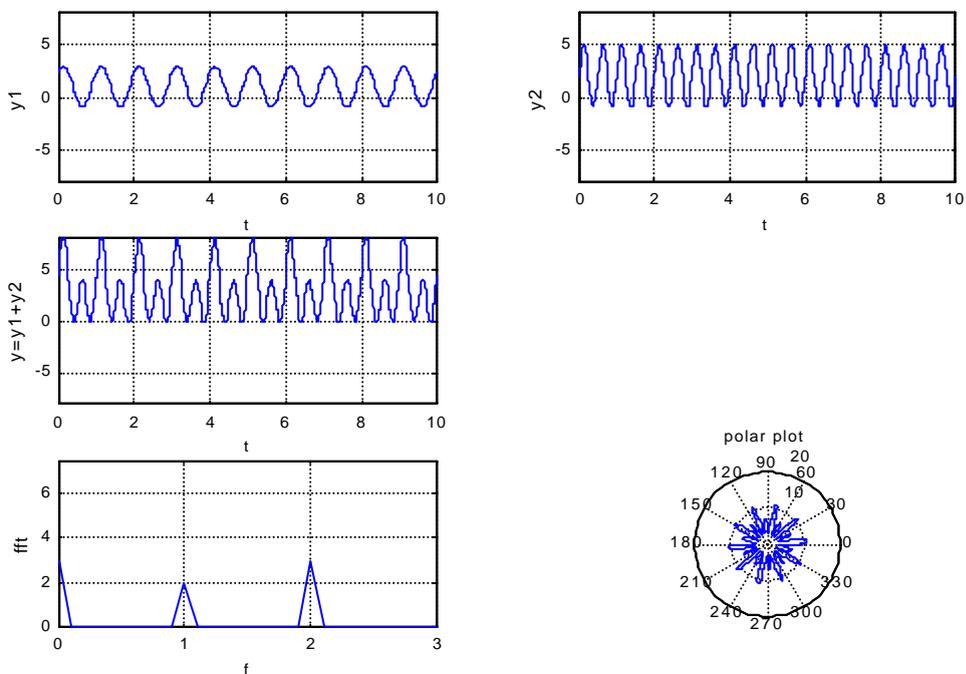


Bild 3.4 Graphische Oberfläche.

Das Ergebniss der FFT zeigt die zwei Frequenzen mit den entsprechenden Amplituden, dazu die Summe der beiden direkten Anteile der Zeitfunktionen.

3.3.2 Vorgehensweise für die Benutzung des Programms

- Die Zeitfunktion umschreiben auf die gegebene Form.
- Das Programm Simulation.m starten.
- Die Frequenz, Amplitude, Phase und den Gleichanteil eingeben.
- Startknopf drücken.

4. Entstehung von Rotor- und Blattfolgefrequenz

4.1 Strömungsmaschinen

Zu unterscheiden ist bei Strömungsmaschinen zwischen diskreten Frequenzen und Rauschen, vgl. Kameier (2000) [8]. Das Rauschen entsteht durch Verwirbelungen, die sich aerodynamisch als Verluste auswirken und durch Ablösungen oder Sekundärströmungen erzeugt werden.

Die diskreten Töne werden durch das rotierende Druckfeld der Schaufeln erzeugt. Ein feststehender Beobachter sieht die Druckunterschiede zwischen Schaufelauß- und -druckseite als Wechseldrücke. Die so entstehende Frequenz nennt man Blattfolgefrequenz:

$$BFF = n \cdot Z \quad (4.1)$$

mit der Drehzahl n in 1/s und der Schaufelzahl Z des Rotors.

Bei Axialventilatoren, Bild 4.1, verstärkt sich die Amplitude der Blattfolgefrequenz aufgrund von Wechselwirkungen zwischen Rotor und Stator oder Rotor und Stützstreben.

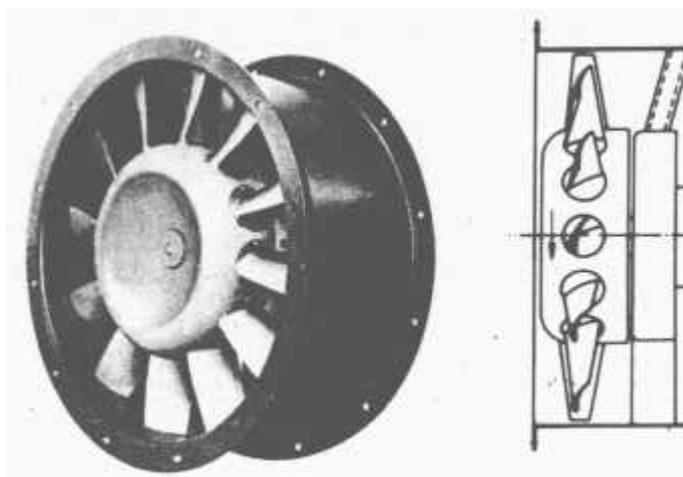


Bild 4.1 Beispiel: Axialventilator, vgl. Kameier (2000) [8].

4.2 Harmonische der Rotorfrequenz

An einem festen Ort erzeugen die Schaufeln einer Strömungsmaschine aufgrund der Druckänderung von der Saug- zur Druckseite jeder einzelnen Schaufel eine Impulsfolge. Bei einem Laufrad mit Z Schaufeln lassen sich Z Impulse unterschiedlicher Amplitude aber gleicher Zeitfolge auftragen, vgl. Kameier (2000) [8].

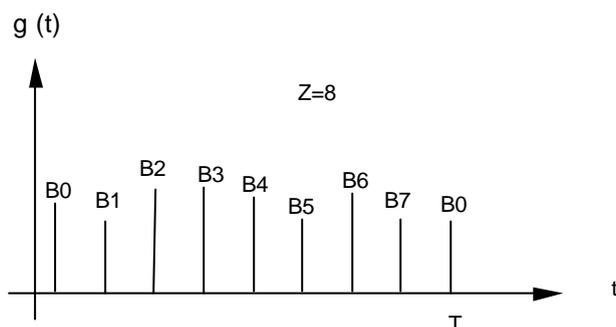


Bild 4.2 Impulsfolge von Schaufeln einer Strömungsmaschine an einem festen Ort.

Diese Zeitfunktion lässt sich mit Hilfe einer Distribution, der Deltafunktion (δ -Funktion), schreiben:

$$g(t) = \sum_{z=0}^{z-1} B_z \mathbf{d}\left(\frac{t}{T} - \frac{z}{Z}\right), \quad (4.2)$$

wobei $\mathbf{d}\left(\frac{t}{T} - \frac{z}{Z}\right) = 0$ für $\frac{t}{T} \neq \frac{z}{Z}$ und $\int_{-\infty}^{\infty} \mathbf{d}\left(\frac{t}{T} - \frac{z}{Z}\right) \frac{dt}{T} = 1$

gilt vgl. Brigham (1989) [11]. Die δ -Funktion nimmt den Wert 1 für das Argument 0 an, für jedes andere Argument verschwindet der Wert der δ -Funktion.

Die Fourier-Reihe einer periodischen Funktion setzt sich aus der Summe unendlich vieler Cosinus-Funktionen mit entsprechenden Amplituden zusammen:

$$g(t) = \sum_{j=-\infty}^{\infty} A_j e^{-i2\pi f j t}, \quad (4.3)$$

wobei $f = 1/T$ mit der Periodendauer T die Grundfrequenz der Funktion $g(t)$ ist. Die Fourierkoeffizienten A_j sind gegeben durch:

$$A_j = \frac{1}{T} \int_0^T g(t) e^{i\left(2\pi j \frac{t}{T}\right)} dt, \quad (4.4)$$

und entsprechen bei der Transformation in den Frequenzbereich den einzelnen Amplituden. Mit der Funktion $g(t)$, Gleichung 4.2, folgt für die Fourier-Koeffizienten

$$A_j = \frac{1}{T} \int_0^T \sum_{z=0}^{Z-1} B_z d\left(\frac{t}{T} - \frac{z}{Z}\right) e^{i\left(2\pi j \frac{t}{T}\right)} dt \quad (4.5)$$

und mit $\mathbf{x} = \frac{t}{T}$ unter Berücksichtigung von $\frac{d\mathbf{x}}{dt} = \frac{1}{T} \Leftrightarrow dt = T d\mathbf{x}$

$$A_j = \int_0^1 \sum_{z=0}^{Z-1} B_z d\left(\mathbf{x} - \frac{z}{Z}\right) e^{i(2\pi j \mathbf{x})} d\mathbf{x}. \quad (4.6)$$

Dieses Integral hat nur Werte, sofern die δ -Funktion nicht verschwindet, dies ist für $\mathbf{x} = \frac{z}{Z}$ oder $t = \frac{z}{Z} T$ der Fall:

$$A_j = \sum_{z=0}^{Z-1} B_z e^{i\left(2\pi j \frac{z}{Z}\right)}. \quad (4.7)$$

Ist der Summationsindex j speziell ein Vielfaches der Schaufelzahl Z , so gilt:

$$j = n \cdot Z \quad \text{mit} \quad n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (4.8)$$

Mit (4.8) folgt aus (4.7)

$$A_{j=nZ} = \sum_{z=0}^{Z-1} B_z \cos(2\pi n z) + i \sin(2\pi n z)$$

$$\Rightarrow A_{j=nZ} = \sum_{z=0}^{Z-1} B_z \quad \text{da} \quad \cos(2\pi n z) = 1 \quad \text{und} \quad i \sin(2\pi n z) = 0. \quad (4.9)$$

Für $j \neq nZ$ folgt im allgemeinen $A_j \neq 0$.

Ein Spezialfall ist, dass für die Impulse im Zeitbereich gilt:

$$B_z = B,$$

d.h., von jeder Schaufel wird der gleiche Impuls erzeugt. Aus (4.7) wird dann

$$A_j = B \sum_{z=0}^{Z-1} e^{i \left(2pj \frac{z}{Z} \right)}. \quad (4.10)$$

Nach dem Binomischen Satz folgt, vgl. Rottman (1960) [12]:

$$A_j = B \left[\frac{\sin(jp)}{\sin\left(\frac{j}{Z}p\right)} e^{i \left(\frac{Z-1}{Z} jp \right)} \right]. \quad (4.11)$$

Das Argument der e-Funktion in (4.11) entspricht immer einem ganzzahligen Vielfachen von π , so dass der Betrag des Realteils immer 1 ist und der Imaginärteil verschwindet. Entsprechend ergibt die im Zähler stehende Sinus-Funktion stets 0. Die Sinus-Funktion im Nenner ist dagegen für $j \neq nZ$ von 0 verschieden, so dass A_j dann verschwindet:

$$A_j = 0 \text{ für } j \neq nZ.$$

Für $j = nZ$ wird auch die im Zähler stehende sinus-Funktion zu 0, nach der Regel von Bernoulli- de l'Hospital gilt:

$$\lim_{x \rightarrow jp} \frac{\sin(x)}{\sin\left(\frac{x}{Z}\right)} = \lim_{x \rightarrow jp} \frac{\cos(x)}{\frac{1}{Z} \cos\left(\frac{x}{Z}\right)}. \quad (4.12)$$

Für A_j folgt entsprechend

$$A_j = B \lim_{x \rightarrow j\pi} \frac{Z \cos(x)}{\cos\left(\frac{x}{Z}\right)} e^{i\left(\frac{Z-1}{Z}x\right)}. \quad (4.13)$$

Der Grenzwert des Imaginärteils in (4.13) verschwindet, da es sich beim Argument um ganzzahlige Vielfache von π handelt. Es folgt also

$$A_j = B \lim_{x \rightarrow j\pi} \frac{Z \cos(x)}{\cos\left(\frac{x}{Z}\right)} \left(\cos(x) \cos(x) + \sin(x) \sin\left(\frac{x}{Z}\right) \right),$$

$$A_j = B \lim_{x \rightarrow j\pi} Z \cos^2(x)$$

$$A_j = BZ \quad (4.14)$$

für $j = nZ$.

Verursachen die Schaufeln gleiche Impulse, tritt also nur die Blattfolgefrequenz mit ihren Harmonischen auf, da A_j für $j = nZ$ verschwindet. Unterscheiden sich dagegen die Amplituden B_z der Impulse, ist auch die Rotorfrequenz mit ihren Harmonischen vorhanden.

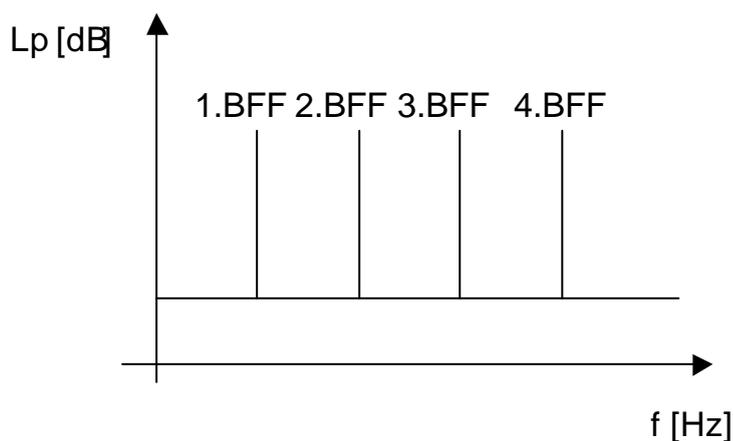


Bild 4.3 Schalldruckspektrum konstanter Impulsamplitude und Impulsfolge.

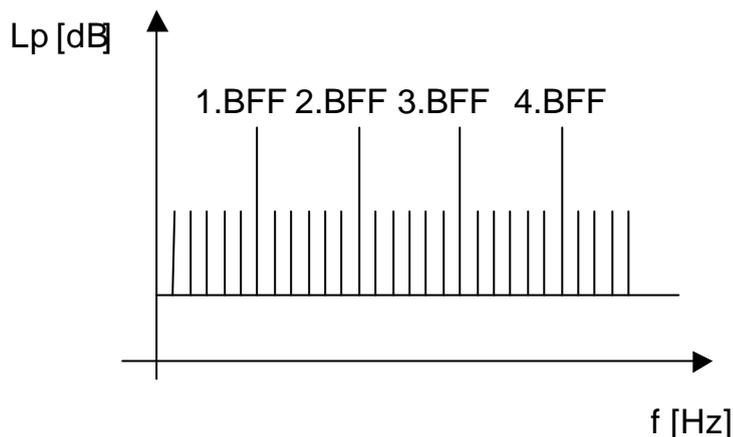


Bild 4.4 Schalldruckspektrum nicht konstanter Impulsamplitude oder nicht konstanter Impulsfolge.

Ausgehend von dieser Rechnung wurden die vier Matlab Programme (Anhang 3 bis 6) entwickelt.

Es wurde 10 Perioden mit einer Grundfrequenz von 16,66 Hz für das Laufrad mit 11 Schaufeln als einfache Peaks, als interpoliertes Polynom, als Spline und als Sägezahn simuliert. Eine Fensterung ist notwendig, damit das unperiodische Signal blockweise harmonisch ist.

Um den Zeitverlauf mit Hilfe der diskreten Abtastwerte darstellen zu können, ist es notwendig, entlang der Zeitachse die Samplingrate genügend hoch zu wählen.

Die folgenden Matlab-Programmzeilen berücksichtigen dieses:

```
clear all
Schaufelzahl=11;
Anzahlpunkte=16384;
Perioden=10;
Rotorfreq=16.6666;
fensterlaenge=Perioden/Rotorfreq;
t_max=fensterlaenge;
freq=Anzahlpunkte/(2*fensterlaenge);
t=linspace(0,t_max,Anzahlpunkte);
```

Für ein Hanning-Fenster muss die folgende Rechnung durchgeführt werden:

```
for k=1:Anzahlpunkte;
    YY(k)=Y(k)*(0.5-0.5*cos((2*pi*k)/(Anzahlpunkte+1)));
end
```

Im ersten (Prog2.m) Programm wird eine periodische Zeitfunktion, die nur aus einer Reihe von Peaks mit gleichen Amplituden besteht, eingegeben. Ein Peak der Periode wurde mit einer höheren Amplitude gewählt und soll eine defekte Schaufel darstellen. Von dieser Zeitfunktion wird die FFT gebildet und untersucht. Die gleiche Vorgehensweise wird bei Verwendung von Spline, Polynom und Sägezahn weiter durchgeführt. Durch die Verwendung der Matlab Routine Spline, Polynom sowie Sägezahn erhöht sich automatisch die Auflösung der Zeitdaten.

5. Versuchsaufbau

Für den zur Messung von strömungsinduzierten Schaufelschwingungen aufgebauten Versuchsprüfstand (Bild 5.1) wird ein Axialventilator mit einem Nenndurchmesser von 500 mm verwendet. Das vorhandene Laufrad (Bild 5.2) ermöglicht einen schnellen Auf- und Abbau der Schaufeln und damit eine einfache Variation der Schaufelgeometrie. Das Nabenverhältnis des Rotors v beträgt 0,635. Die Volumenstrommessung erfolgt über eine Ringkammerblende in Anlehnung an DIN EN 5167-1. Der Rohrdurchmesser an der Blende ist geringer als der des Ventilators. Da die Blende wie der Ventilator als vorhandene Elemente in den Prüfstand integriert wurden, ist nach dem Ventilator ein Diffusor in den Prüfstand eingebaut, was allerdings eine Beschleunigung der Strömung zur Folge hat. Nach DIN EN 5167-1 müsste zur fehlerfreien Blendenmessung eine gleichmässige Anströmung vorliegen, welche mit einem Gleichrichter oder einer ausreichend langen Rohrstrecke erreicht wird. In diesem Fall liegt aufgrund der kurzen Anströmstrecke zur Blende keine gleichmässige Anströmung vor, was zu einem Fehler bei der Bestimmung des Volumenstroms führt. Da für diese Untersuchung der Wanddruckschwankungen nur die Reproduzierbarkeit verschiedener Betriebspunkte entscheidend ist, nicht aber der exakte Volumenstrom, kann dieser Fehler in Kauf genommen werden. Zur Aufnahme der statischen Druckänderungen sind im Nachlauf, zwischen Stator und Rotor sowie im Abstand von zwei Metern im Vorlauf des Ventilators Druckbohrungen im Gehäuse angebracht. Mit einem druckseitig angebrachten Drosselkegel, der motorisch stufenlos verstellt werden kann, können verschiedene Betriebspunkte auf der Drosselkurve eingestellt werden, vgl. Wende (2000) [5].

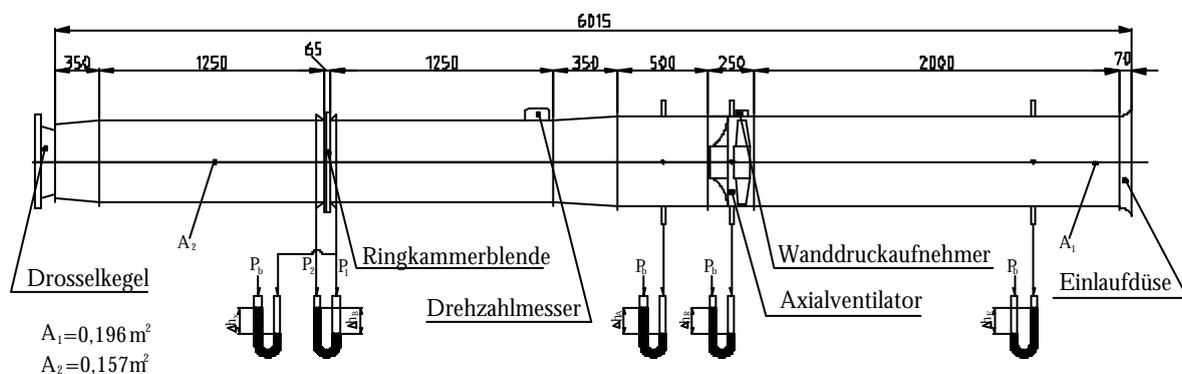


Bild 5.1 Axialventilatorprüfstand, vgl Wende (2000) [5].

Für die Messung von instationären Wanddruckverläufen befinden sich stromauf und stromab des Rotors je zwölf Aufnahmevorrichtungen in denen Miniaturdruckaufnehmer sowie ¼ Zoll Kondensatormikrofone eingesetzt werden können, mit denen sich die durch die steife oder schwingende Schaufeln hervorgerufenen Änderungen der Wanddruckverläufe erfassen lassen.

In der nachstehenden Tabelle sind die Hauptabmessungen und technischen Daten des Versuchsprüfstands zusammengefasst.

Länge des Prüfstands	6,015 [m]
Nenndurchmesser des Ventilators	500 [mm]
Schaufelzahl	11
Statorschaufeln	14
Nabenverhältnis	0,635
Blendendurchmesser	374[mm]
Öffnungsverhältnis	0,84
Maximale Motorleistung	5,5 [kW]
Maximale Drehzahl	2900 [1/min]
Momentane Schaufelgeometrie	
Material der Schaufeln	S235JR
Schaufeldicke	1 [mm]
Schaufelbreite	50 [mm]
Freie Schaufellänge	91,5 [mm]
Spaltweite	1 [mm]

Tab1: Technische Daten des Versuchsprüfstands.

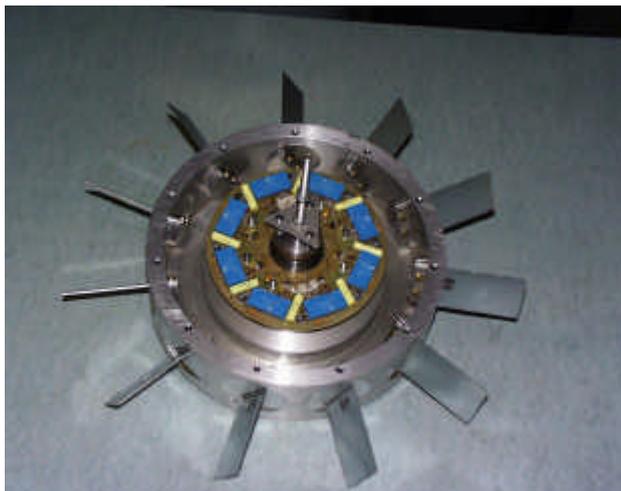


Bild 5.2 Vorhandenes Laufrad, vgl. Wende (2000) [5].

5.1 Volumenstrommessung

Zur rechnerischen Bestimmung des Massen- bzw. Volumenstroms ist auf der Druckseite des Ventilators eine Ringkammerblende in den Prüfstand integriert. Die für diesen Prüfstand verwendete Ringkammerblende, DIN EN 5167-1, hat einen Innendurchmesser von 374 mm, bezogen auf den Rohrdurchmesser von 447 mm ergibt sich somit ein Öffnungsverhältnis von $\beta=0,84$.

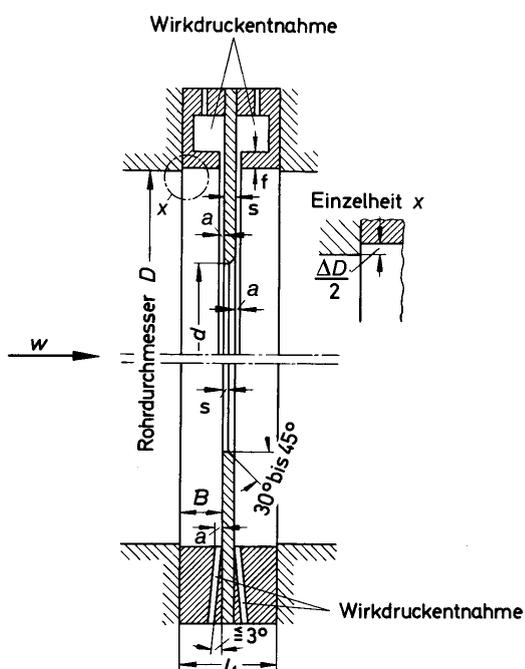


Bild 5.3 Ringkammerblende DIN EN 5167-1, vgl. Bohl (1995) [3].

5.2 Messung der Wanddruckschwankung

Für die Messung von Wanddruckschwankungen an der Gehäusewand im raumfesten System werden Miniaturdruckaufnehmer und Kondensatormikrofone vgl. Brüel & Kjaer (1989) [4], die stromauf und stromab des Laufrades angebracht sind, verwendet. Der Abstand der Aufnehmer zu den Rotorscheufeln in axialer Richtung ist von der Art der eingesetzten Schaufeln, von deren Staffelungswinkel und von der Einspannposition des Laufrades abhängig. Für die ersten Messungen sind 50 mm breite und 1 mm dicke, verzinkte Stahlschaufeln mit einem Staffelungswinkel von 60° auf den Läufer montiert worden. Mit dieser Beschau felung ist ein Abstand von einem Millimeter zu den Aufnehmern vor dem Laufrad eingestellt worden. Die Auswertung der von den Kondensatormikrofonen aufgenommenen Messdaten erfolgt mit dem PAK-System (Prüfstand-Akustik-Messsystem; Mehrkanalfrequenzanalyse software) der Firma Müller BBM-Vibroakustik GmbH, München.

Die über den Umfang verteilten Druckaufnehmer und Mikrofone im stationären System reagieren auf Druckschwankungen in der Strömung, die durch die Beschau felung hervorgerufen werden. Mit diesen Aufnehmern sollen Charakteristiken für strömungsinduzierte Schaufelschwingungen gefunden werden, welche eindeutig einer bestimmten Schaufelschwingung zugeordnet werden sollen, so dass eine Bestimmung von Schaufelschwingungen allein aus dem raumfesten System möglich wird.

5.2.1 Kondensatormikrofon

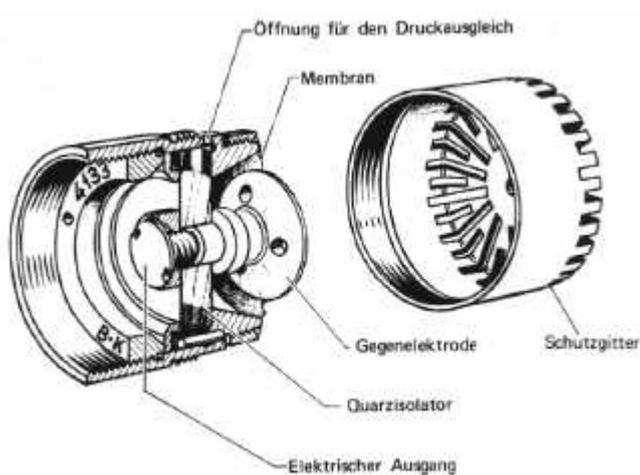


Bild 5.4 Prinzipieller Aufbau der Mikrofonkapsel, vgl. Brüel & Kjaer (1989) [4].

Bei den Mikrofonen, die zur Messung von Druckschwankungen am Umfang des Prüfstandes eingesetzt werden, handelt es sich um $\frac{1}{4}$ Zoll Mikrofone der Firma Mikrotech. Die Mikrofone haben einen Messbereich von 5 Hz- 100 kHz (± 2 dB) und können einen maximalen Schalldruckpegel von 165 dB (3,56 kPa) umsetzen. Die Energieumwandlung von Schalldruck in eine elektrische Spannung erfolgt bei einem Kondensatormikrofon durch mechanisch hervorgerufene Änderung der elektrischen Kapazität zwischen zwei gegeneinander isolierten Leiterplatten. Bild 5.4 zeigt den grundsätzlichen Aufbau der Kapsel eines Kondensatormikrofons. Eine 5 μm dicke Nickelmembran ist im Abstand von etwa 10 μm vor einer starren Gegenelektrode angebracht. Membran und Elektrode bilden den Kondensator, der wie im Schaltbild (Bild 5.5) des Mikrofons dargestellt, durch einen hohen Eingangswiderstand über einen Vorverstärker mit einer Spannungsquelle verbunden ist, so dass der Kondensator im unbelasteten Zustand eine konstante Kapazität aufweist. Wird die Membran durch auftretende Schwingungen in Bewegung versetzt, ändert sich die Kapazität des Kondensators und es wird eine Spannung erzeugt, die sich direkt proportional zum einwirkenden Schalldruckpegel verhält und am Widerstand gemessen wird. Da der Kondensator in der Mikrofonkapsel im unbelasteten Zustand eine konstante Kapazität besitzt, welche sich nur durch auftreffende Schallwellen ändert, können mit solchen Mikrofonen nur Wechseldruckanteile der Strömung erfasst werden.

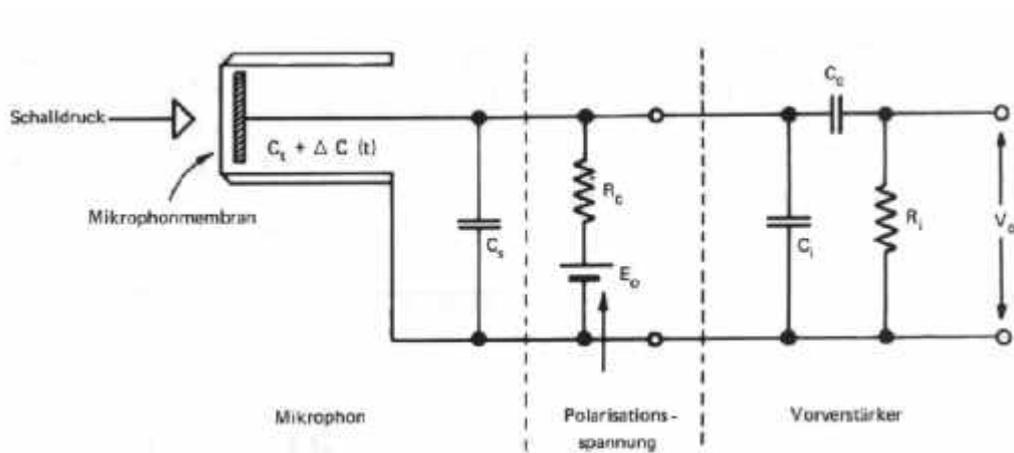


Bild 5.5 Vereinfachtes Schaltbild eines Kondensatormikrofons mit Vorverstärker, vgl. Brüel & Kjaer (1989) [4].

6. Vergleich von Simulationen und Messungen

6.1 Simulation

In einem Zeitbereich von 10 Perioden mit einer Grundfrequenz von 16,66 Hz, was einer Drehzahl von 1000 U/min entspricht, wurde das vorbeilaufende Laufrad (11 Schaufeln) als einfache Peaks im Zeitbereich simuliert und dazu das Ergebnis der Fast Fourier Transformation des Zeitverlaufes betrachtet (Bild 6.1, siehe Prog2.m, Anhang 3).

Folgende Zeilen liefern die gewünschte Zeitfunktion:

```

Y(1:Anzahlpunkte)=0;
for i=1:(Anzahlpunkte/(Perioden*Schaufelzahl)):Anzahlpunkte
    Y(i)=0.5;
end
peaks=find(Y==0.5);
for k=1:Anzahlpunkte;
    YY(k)=Y(k)*(0.5-0.5*cos((2*pi*k)/(Anzahlpunkte+1)));
end

```

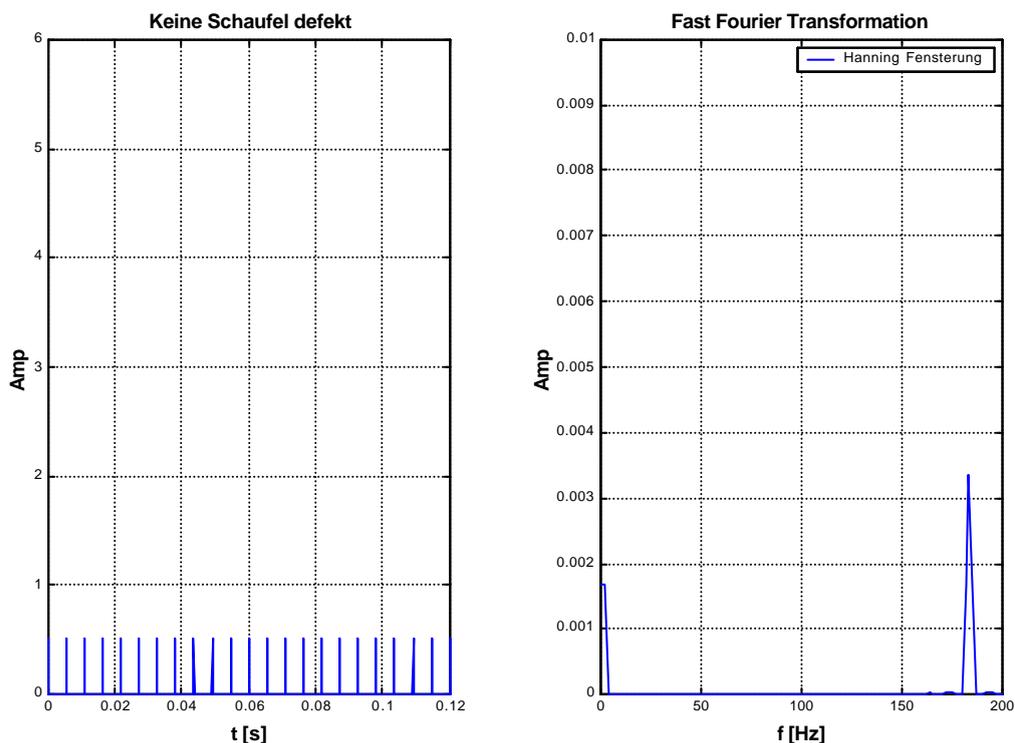


Bild 6.1 Simulierter Zeitverlauf und zugehöriges Frequenzspektrum bei konstanter Impulsamplitude.

Dem periodischen Signal des homogenen Laufrades wurde nun pro Umdrehung ein Peak mit einer wesentlich höheren Amplitude überlagert. Dieser Peak soll der Druckschwankung einer defekten Schaufel entsprechen (siehe prog3.m, Bild 6.2 Anhang 4).

Nun berechnet sich die Zeitfunktion folgendermassen:

```

Y(1:Anzahlpunkte)=0;
for i=1:(Anzahlpunkte/(Perioden*Schaufelzahl)):Anzahlpunkte
    Y(fix(i))=3;
end
peaks=find(Y==3);
for i=Schaufel1:Schaufelzahl:length(peaks)
    Y(peaks(i))=5;
end
for k=1:Anzahlpunkte;
    YY(k)=Y(k)*(0.5-0.5*cos((2*pi*k)/(Anzahlpunkte+1)));
end

```

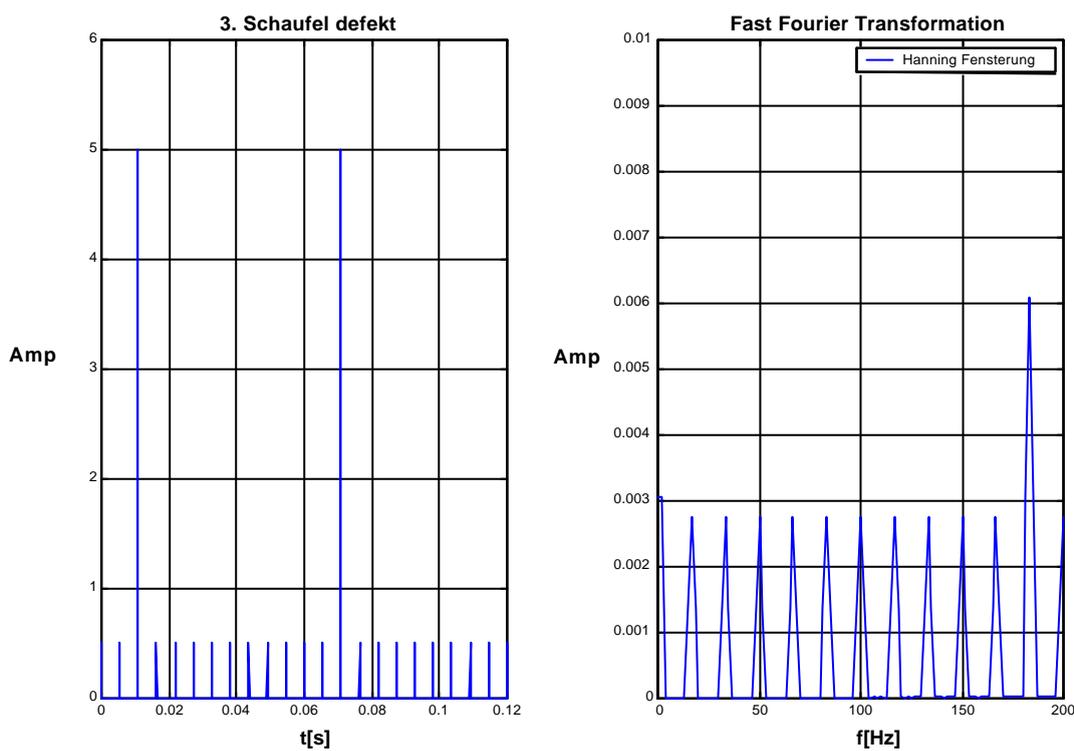


Bild 6.2 Simulierter Zeitverlauf und zugehöriges Frequenzspektrum bei nicht konstanter Impulsamplitude.

Dies wurde auf 2,3,4,5 defekte Schaufeln (prog4,...prog7, Anhang 5 bis 8) erweitert.

```

Y(1:Anzahlpunkte)=0;
for i=1:(Anzahlpunkte/(Perioden*Schaufelzahl)):Anzahlpunkte
    Y(fix(i))=0.5;
end
peaks=find(Y==0.5);
for i=Schaufel1:Schaufelzahl:length(peaks)
    Y(peaks(i))=2;
end
for i=Schaufel2:Schaufelzahl:length(peaks)
    Y(peaks(i))=3;
end
for i=Schaufel3:Schaufelzahl:length(peaks)
    Y(peaks(i))=5;
end
for i=Schaufel4:Schaufelzahl:length(peaks)
    Y(peaks(i))=6;
end
for i=Schaufel5:Schaufelzahl:length(peaks)
    Y(peaks(i))=6;
end
end

```

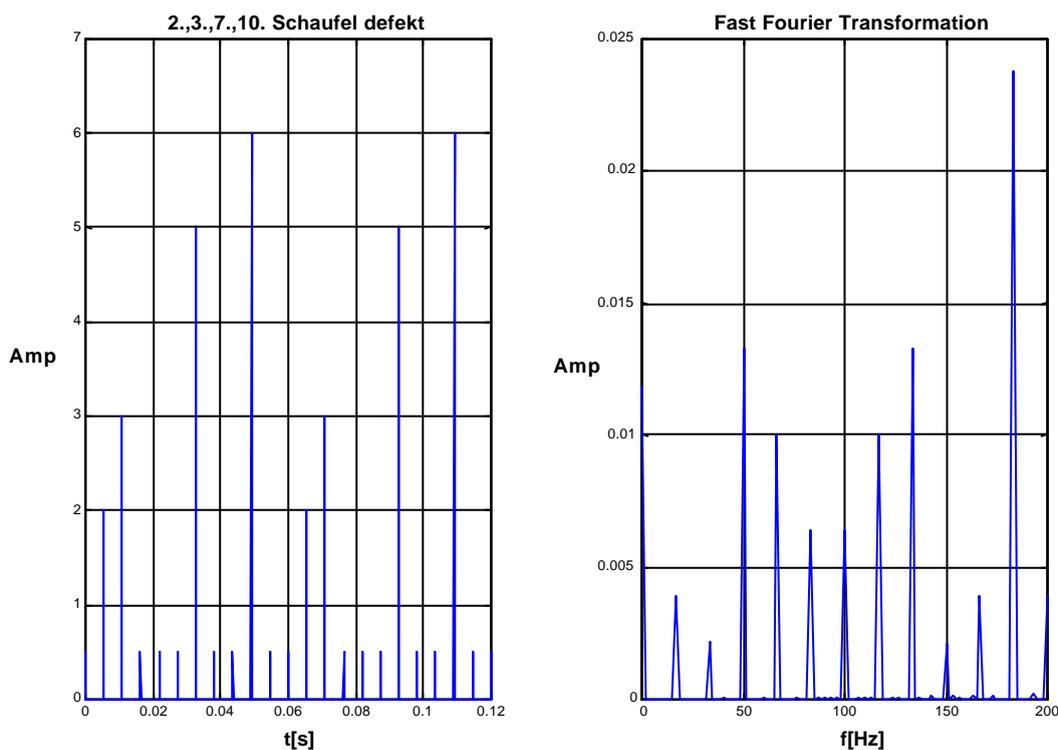


Bild 6.3 Simulierter Zeitverlauf und zugehöriges Frequenzspektrum bei mehreren unterschiedlichen Impulsamplituden.

Diese Simulation wurde mit Hilfe eines Interpolationspolynoms (Bild 6.4, siehe poly_simul1.m, Anhang 9,) und mit einem Spline (siehe splin_simul1.m, Anhang 10, Bild 6.5) als Zeitsignal wiederholt, um Einflüsse der Diskretisierung zu Untersuchen.

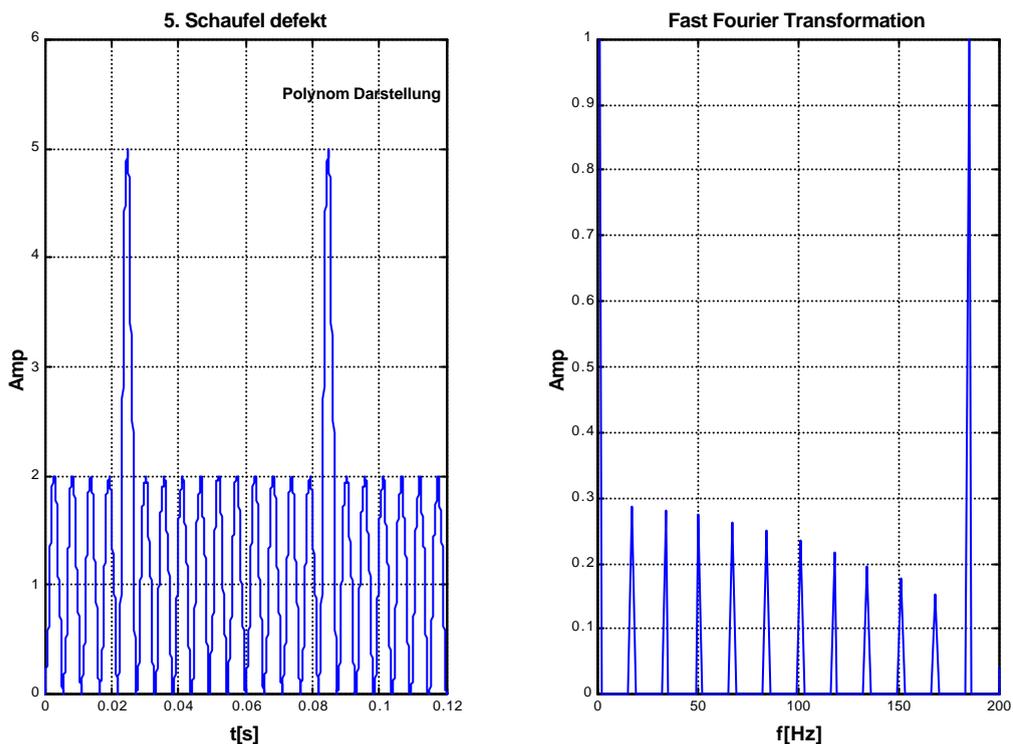


Bild 6.4 Zeitsignal als Polynominterpolation.

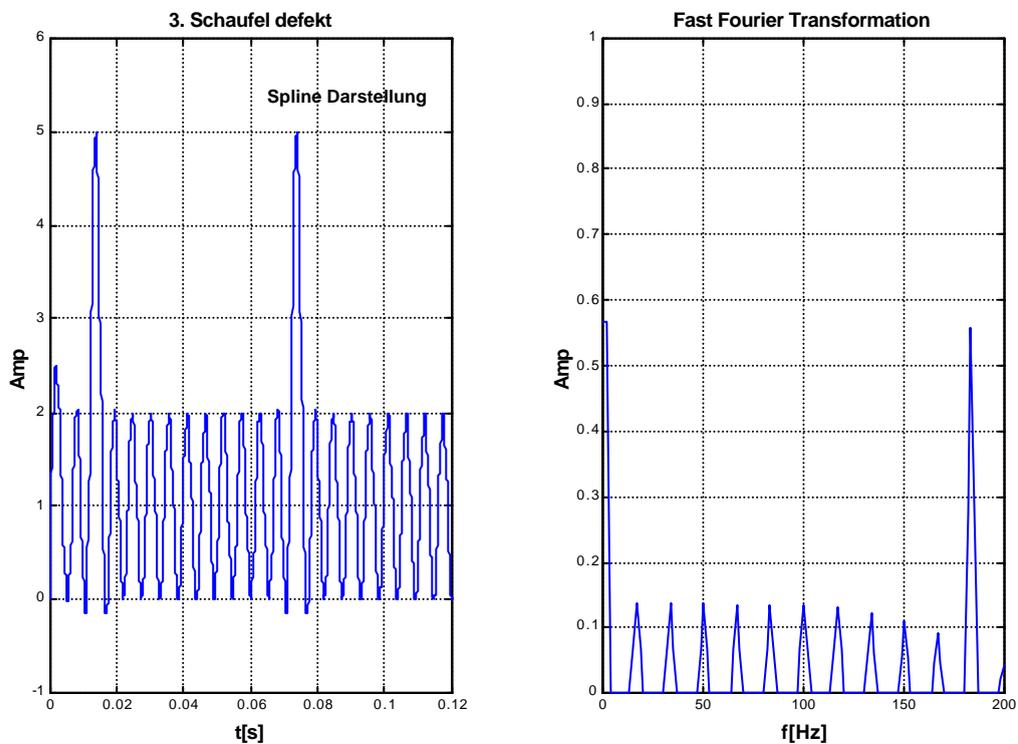


Bild 6.5 Zeitsignal als Spline.

Man kann in der FFT beider Simulationen einen Abfall der Amplituden der Rotorfrequenzen erkennen.

Aus diesem Grund wurde ein Zeitsignal programmiert, das dem praktischen Verlauf einer Wanddruckschwankung noch mehr entspricht. Bild 6.6 zeigt wie sich theoretisch der Druck über der Zeit verhält. Ein Druckaufnehmer, der direkt über dem Rotor eingebaut ist, nimmt jedesmal eine Druckerhöhung und einen schnelleren Druckabfall wahr, wenn eine Schaufel an ihm vorbeistreicht.

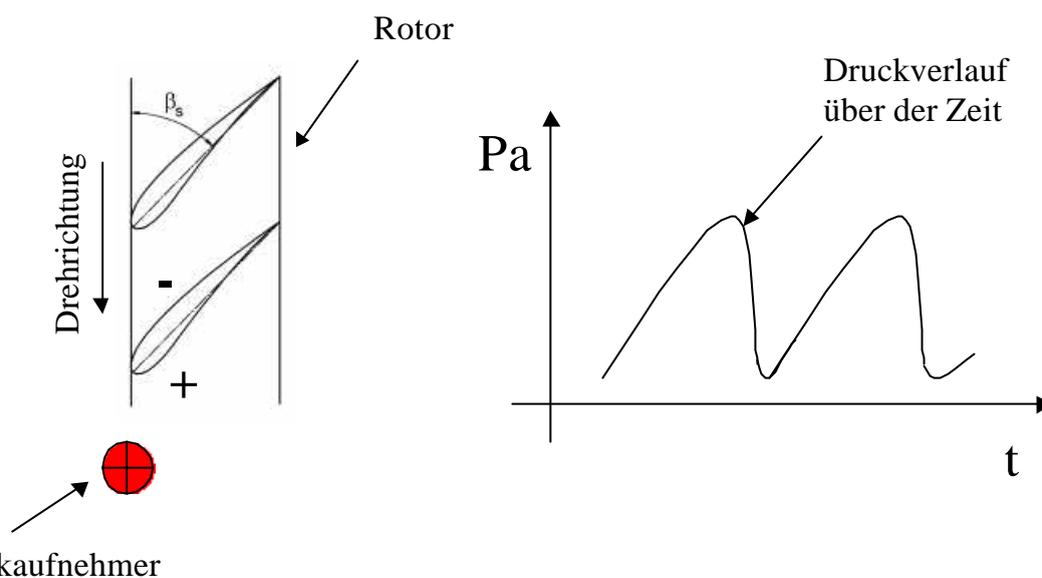


Bild 6.6 Druckverlauf über der Zeit.

Davon ausgehend wurde die Simulation mit einer Sägezahn Funktion (siehe saegezahn2.m, Anhang 11, Bild 6.7) als Zeitsignalen durchgeführt. Bild 6.8 zeigt den anderen Fall, in dem die defekte Schaufel eine niedrigere Amplitude liefert. Für die beiden Fällen ist kein Unterschied in der FFT bemerkbar.

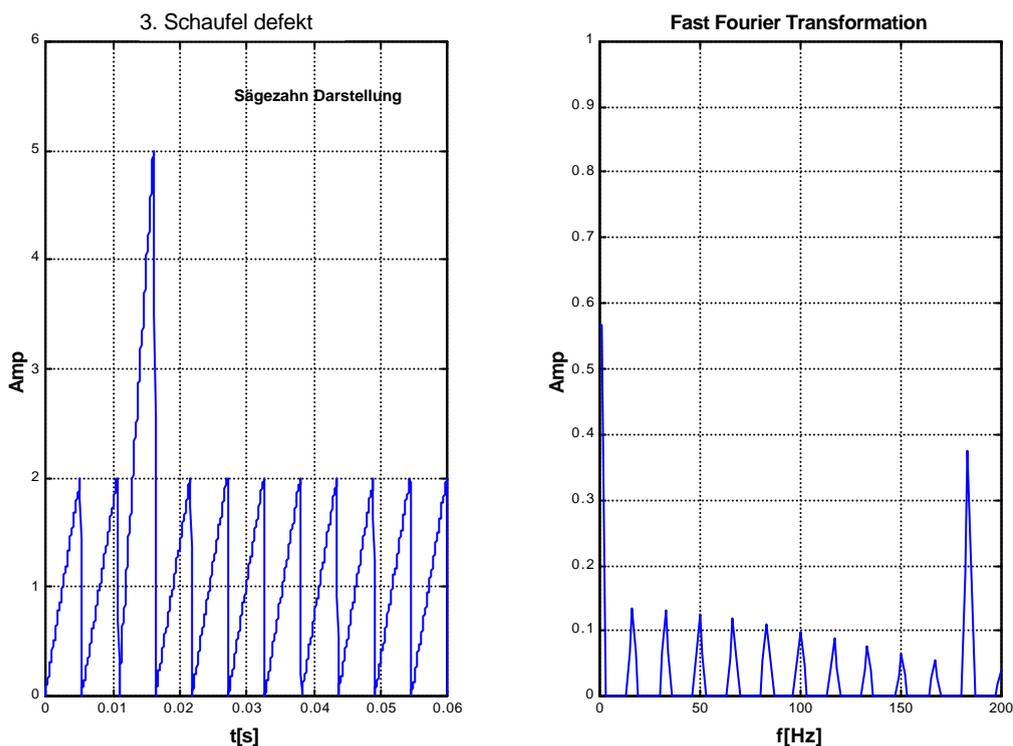


Bild 6.7 Zeitsignal als Sägezahn, defekte Schaufel erzeugt grosse Amplitude.

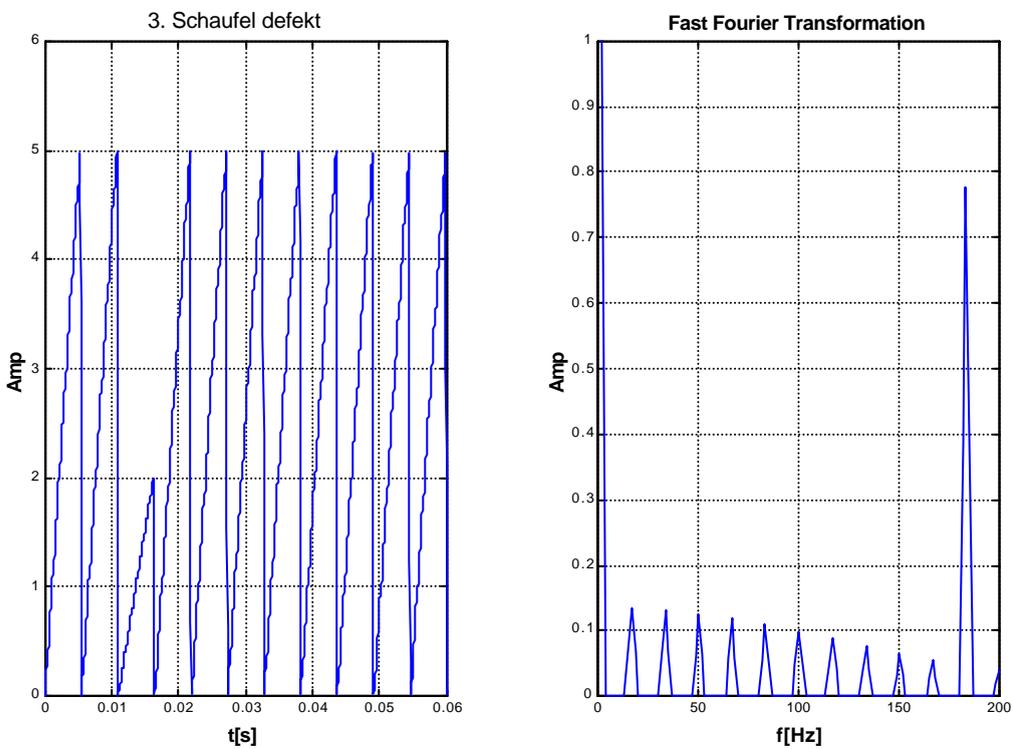


Bild 6.8 Zeitsignal als Sägezahn, defekte Schaufel erzeugt kleine Amplitude.

6.2 Experimentelle Untersuchungen

Es wurden vier Varianten untersucht:

- Originalbeschaufelung (siehe tab 1),
- Mit Klebeband auf eine Schaufel,
- Eine Schaufel wird demontiert,
- Zwei Schaufeln durch weichere ersetzt.

Um einen Vergleich durchführen zu können, sollten alle untersuchten Varianten auf dem gleichen Betriebspunkt des Ventilators (Bild 6.9) liegen. Aus diesem Grund wurden die aerodynamischen Grössen aufgenommen und ausgewertet (siehe Tab 2, Anhang 12).

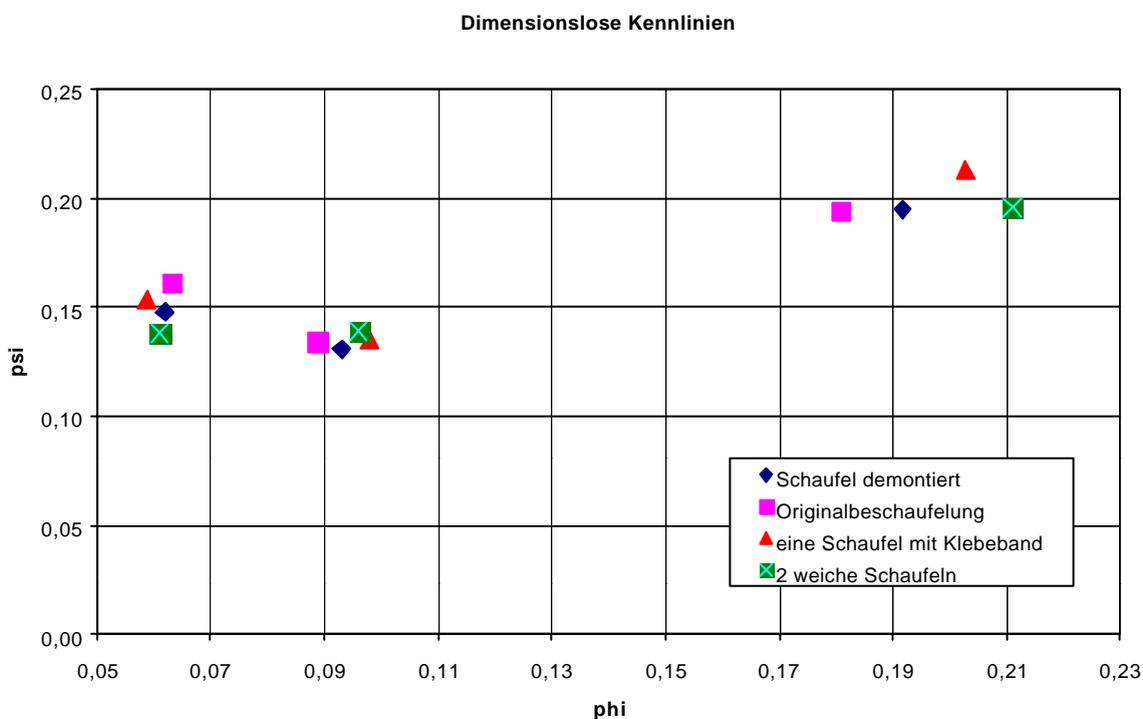


Bild 6.9 Dimensionslose Kennlinie des Ventilators bei unterschiedlicher Beschaufelung.

An dem Versuchsaufbau wurden mit Hilfe des PAK Systems die Zeit- und Frequenzdaten aufgenommen und nach Matlab exportiert.

6.2.1 Vergleich von Originalbeschaufelung und einer demontierten Schaufel

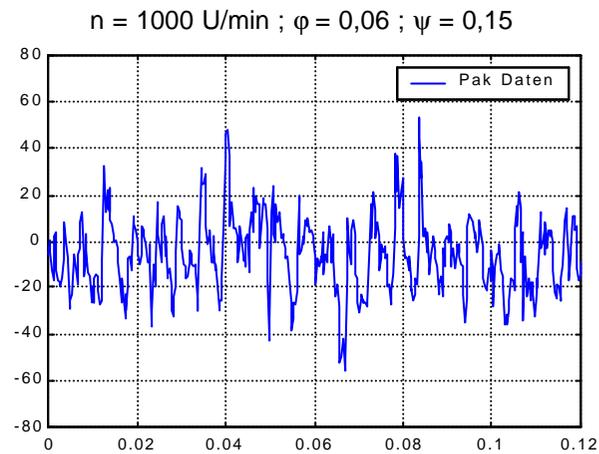
Das Bild 6.10 zeigt den ersten Vergleich zwischen gemessenen Daten und dem entsprechenden simulierten Fall. Es werden jeweils die Zeit- und Frequenzdaten der Originalbeschaufelung mit den Daten einer demontierten Schaufel im gedrosselten Zustand verglichen. Eine Druckschwankung von ca. 130 Pa bei der Originalbeschaufelung und ca. 142 Pa bei einer demontierten Schaufel ist ablesbar. Man bemerkt auch ein überlagertes Rauschen, welches nur durch viele Mittelungen verschwindet (Bild 6.11).

Eine Übereinstimmung mit dem simulierten Fall ist vorhanden, mit Ausnahme der letzten Subharmonischen der Rotorfrequenz, die nicht auftaucht. Der Grund ist die Druckschwankung zwischen den normalen Schaufeln und der defekten Stelle. Je grösser diese Differenz ist, desto deutlicher sind die Rotorfrequenzen zu sehen. Die Simulationen mit Polynom, mit Spline oder mit Sägezahn zeigen dieses Phänomen (Bild 6.4 bis 6.8) auch deutlich.

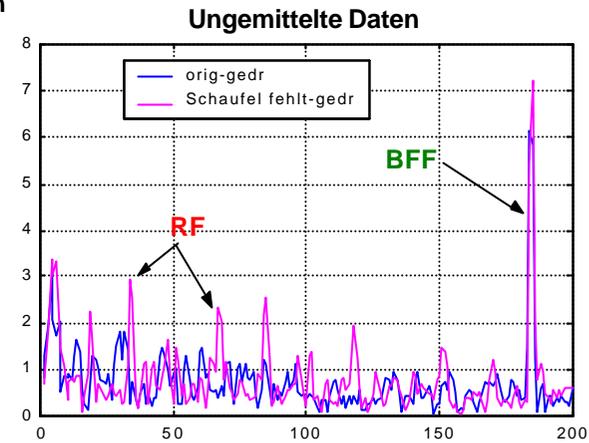
Bild 6.12 und Bild 6.13 zeigen den Vergleich zwischen Experiment und dem simulierten Fall jeweils im ungedrosselten Zustand und im Zustand mit rotierender Instabilität. Dies ist der Bereich wo rotierende Strömungszellen, die schon vor dem Erreichen der Stabilitätsgrenze auftreten. Sie sind zu unterscheiden von der rotierende Ablösung, die nach dem Überschreiten von der Stabilitätsgrenze erreicht wird. Mit zunehmender Drosselung löst die Strömung im Laufradgitter ab, dass sich rotierende Ablösezellen bilden vgl. Kameier (2000) [9].

Eine Druckschwankung von ca. 430 Pa im ungedrosselten Zustand, bzw. 110 Pa im Bereich der rotierenden Instabilität, ist bei einer demontierten Schaufel zu erkennen.

In der Frequenzebene des ungedrosselten Zustandes tauchen zwei deutlich höhere Peaks bei ca. 75 Hz auf. Diese Frequenzen sind durch die Strömung bedingt und können nicht als Druckschwankung interpretiert werden.



Messdaten



Simulation

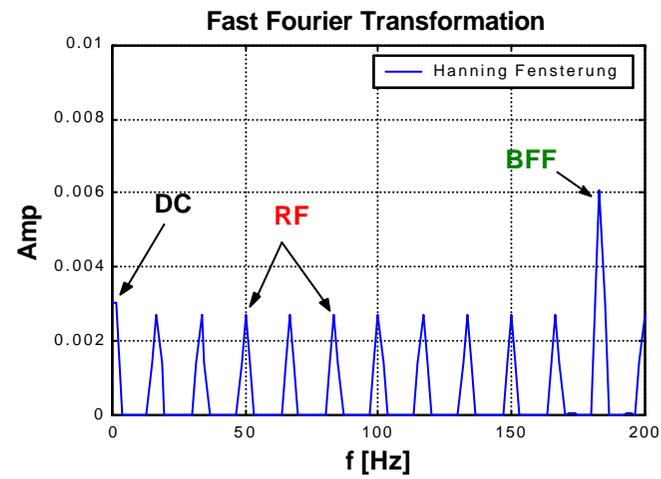
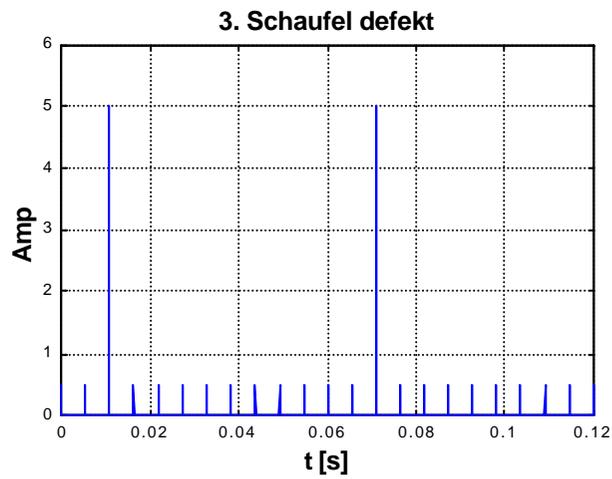


Bild 6.10 Vergleich von Experiment (ungemittelt) und Simulation im gedrosselten Zustand bei einer defekten Schaufel.

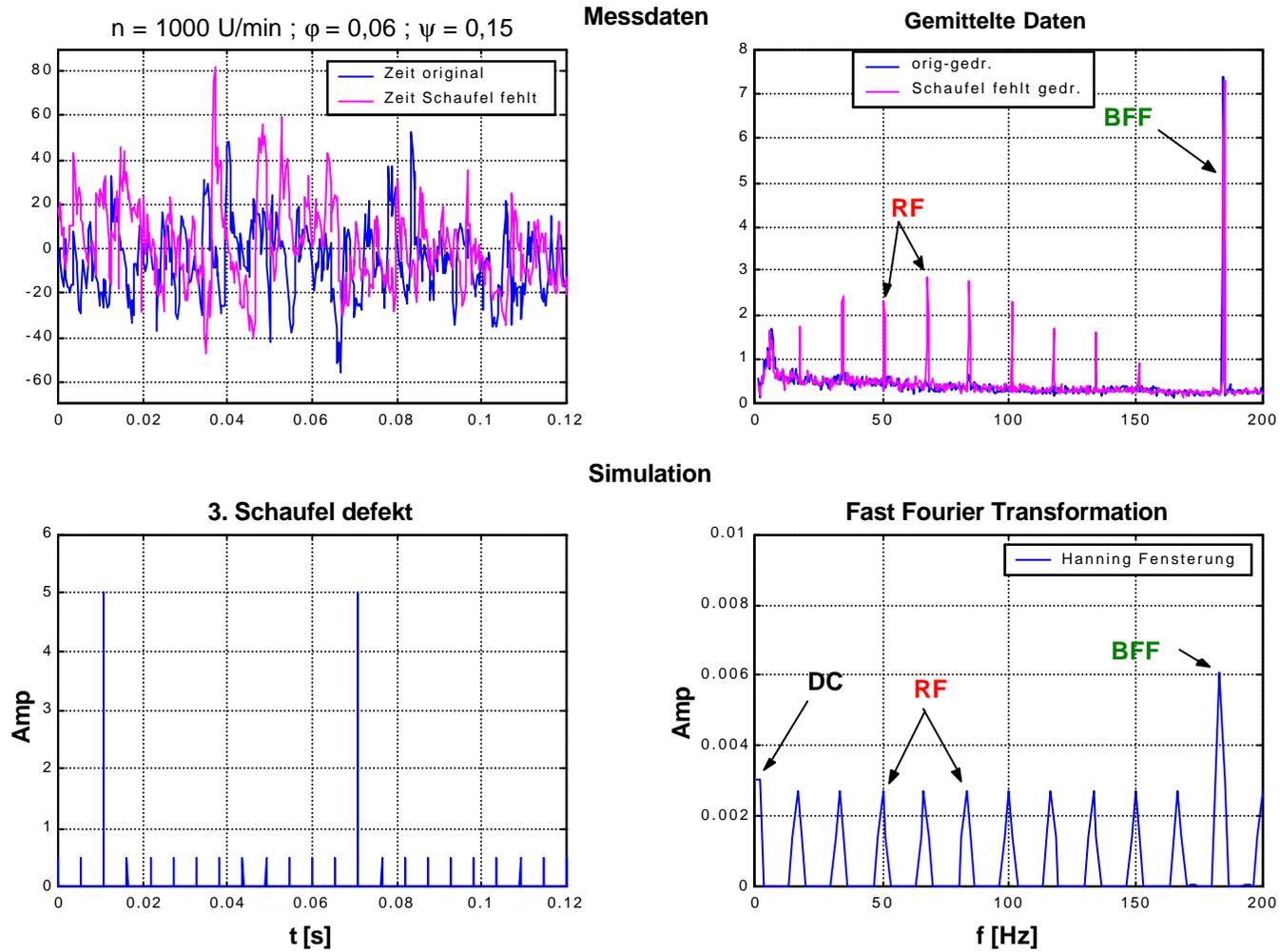


Bild 6.11 Vergleich Experiment (gemittelt) und Simulation im gedrosselten Zustand bei einer defekten Schaufel.

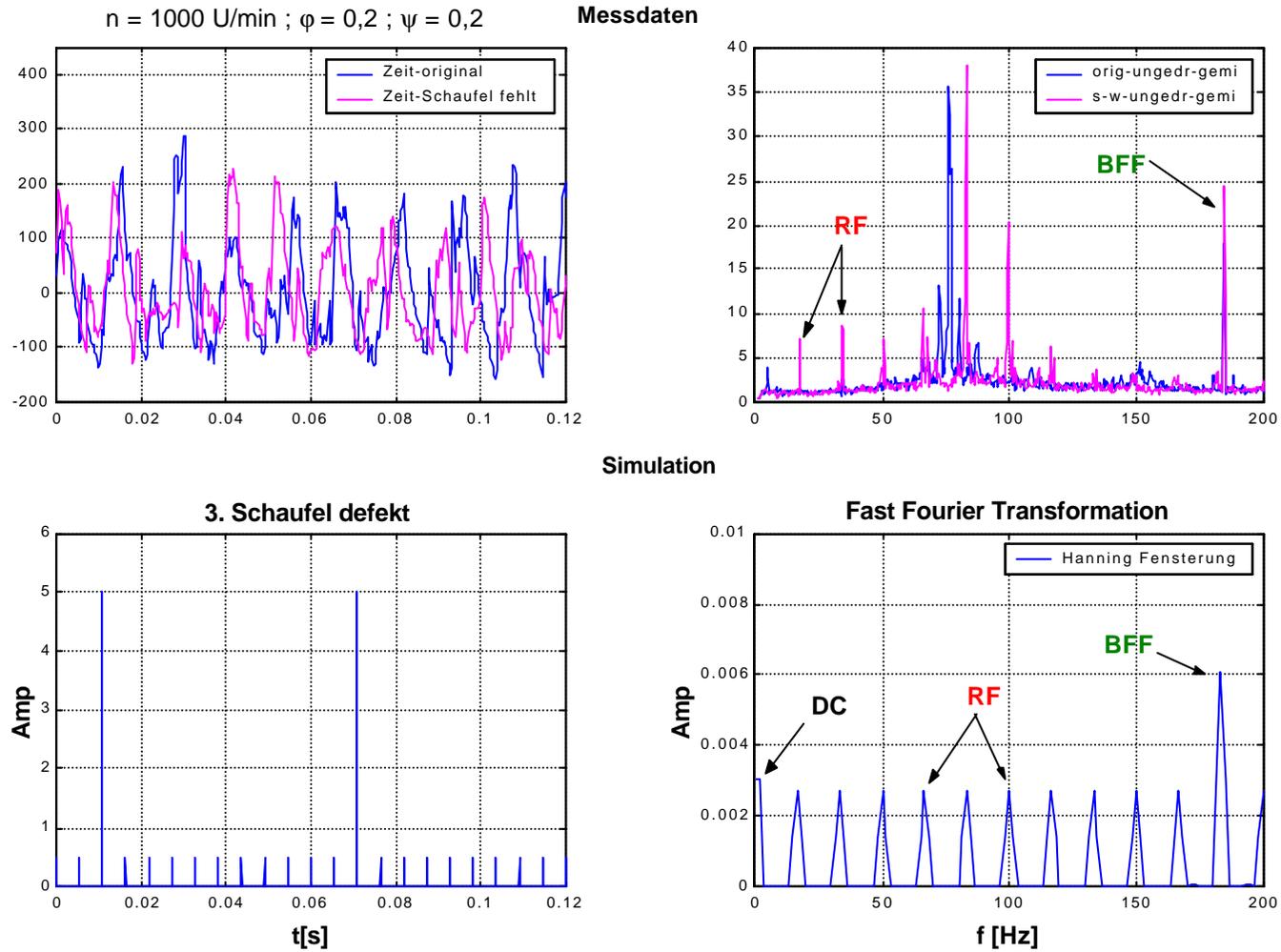


Bild 6.12 Vergleich Experiment (gemittelt) und Simulation im ungedrosselten Zustand bei einer defekten Schaufel.

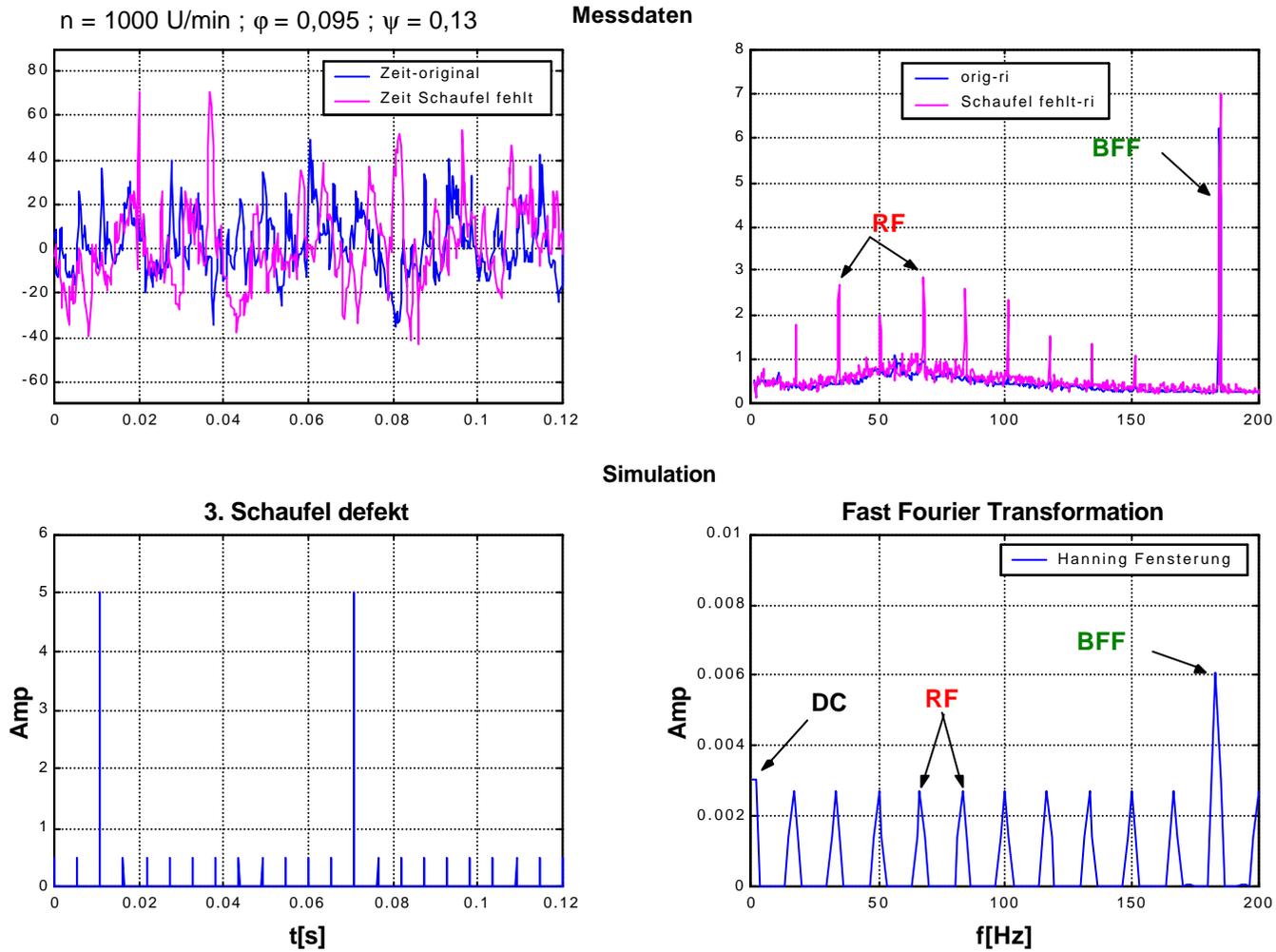


Bild 6.13 Vergleich Experiment (gemittelt) und Simulation bei rotierender Instabilität bei einer defekten Schaufel.

6.2.2 Vergleich von Originalbeschaufelung und zwei eingebauten weicheren Schaufeln

Es wurden zwei Schaufeln demontiert und durch andere ersetzt. Diese sind 0,75 mm dick (Original 1 mm dick). Theoretisch sollten sie stärker schwingen.

Die Position der defekten Schaufeln wurde in der Simulation entsprechend berücksichtigt. Zusätzlich sind bei der Simulation die Amplituden gleich eingegeben worden, da auch beim Experiment mit zwei gleichen weichen Schaufeln gleich grosse Amplituden zu erwarten sind.

Ein Vergleich in den drei Betriebspunkten (siehe Bild 6.9) wurde durchgeführt.

In Bild 6.14 sieht man dies im gedrosselten Zustand. Es gab keinen deutlichen Unterschied zu der Originalbeschaufelung. In der Frequenzebene sind ebenfalls die Rotorfrequenzen nur schwer abzulesen.

Im ungedrosselten Zustand (Bild 6.15) sind wieder die strömungsbedingten Frequenzen bei ca 75 Hz erkennbar. In Bild 6.16 wurde der Bereich der rotierenden Instabilität untersucht.

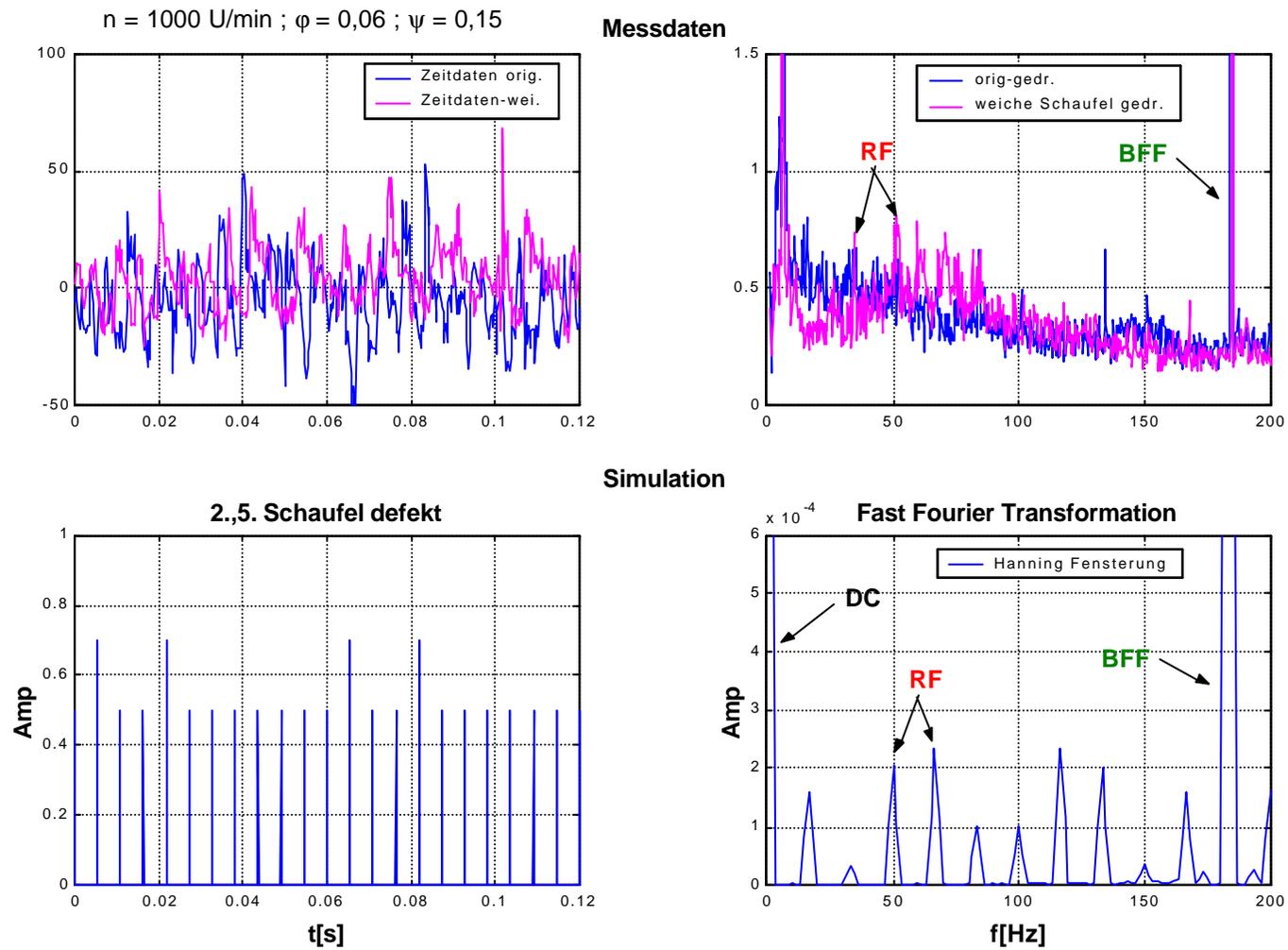
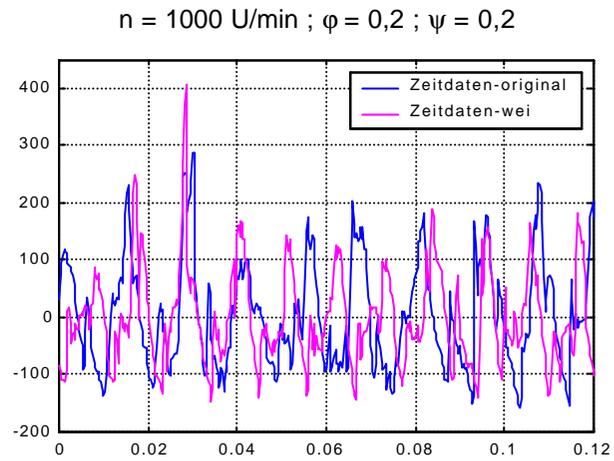
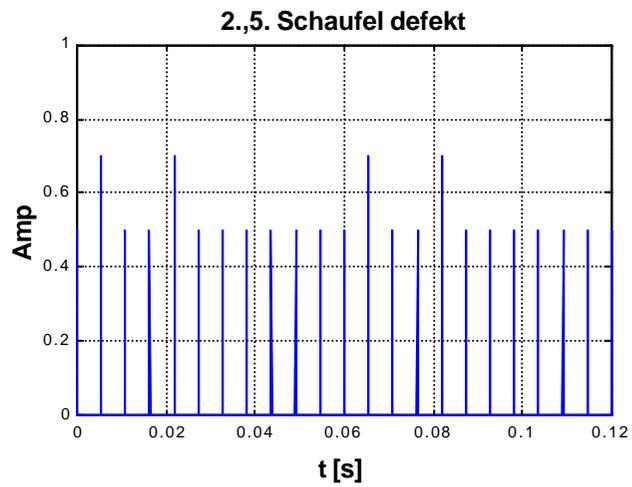
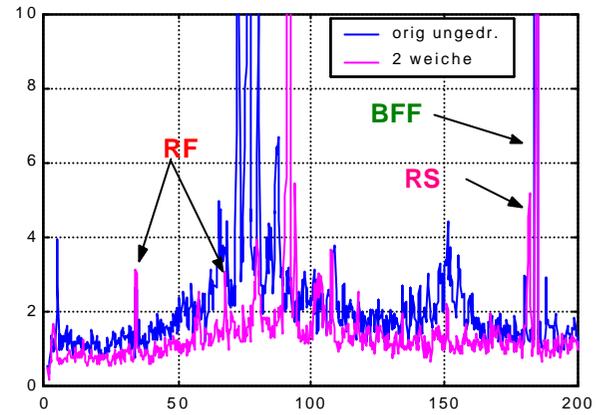


Bild 6.14 Vergleich Experiment (gemittelt) und Simulation im gedrosselten Zustand bei zwei defekten Schaufel.



Messdaten



Simulation

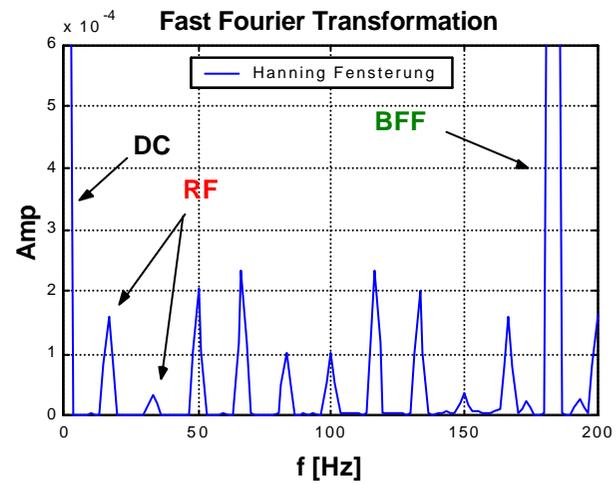
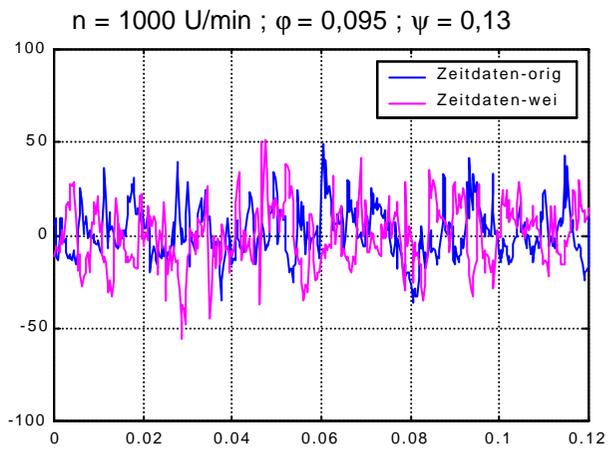
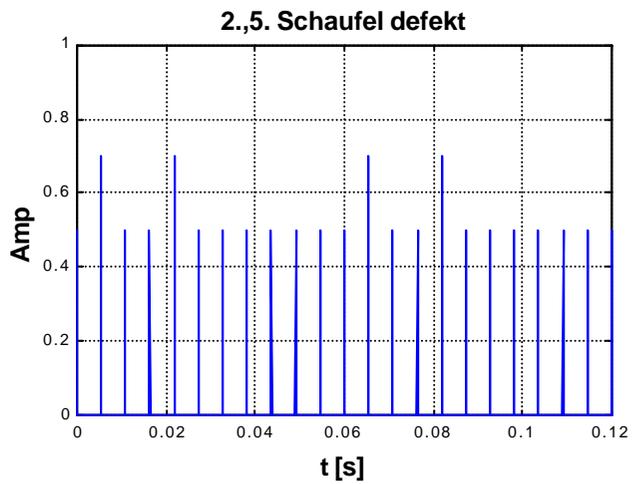
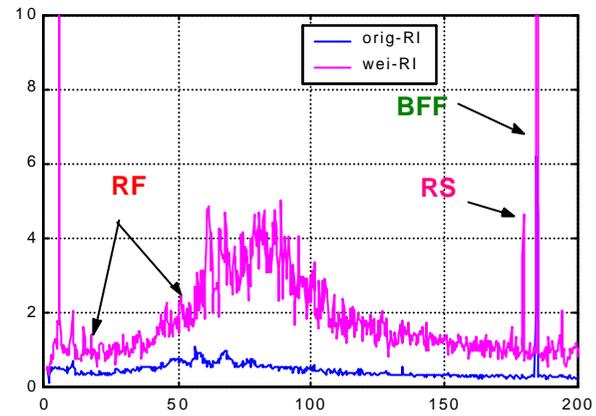


Bild 6.15 Vergleich Experiment (gemittelt) und Simulation im ungedrosselten Zustand bei zwei defekten Schaufel.



Messdaten



Simulation

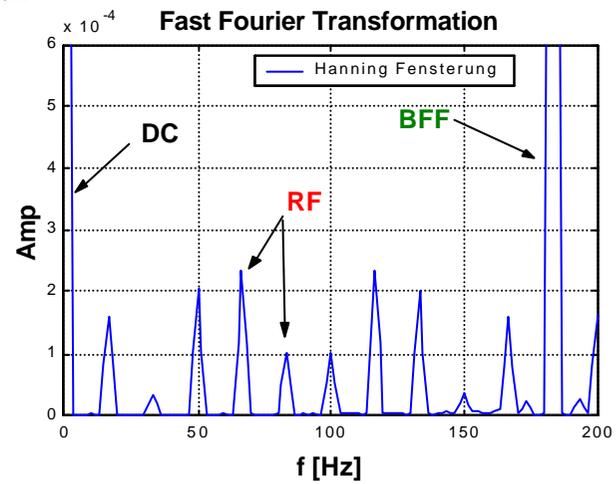


Bild 6.16 Vergleich Experiment (gemittelt) und Simulation bei rotierende Instabilität bei zwei defekten Schaufel.

7. Zusammenfassung

Die direkte Messung der Schaufelschwingung erfolgt üblicherweise mit Hilfe von Dehnungsmessstreifen (DMS). Da die Instremuntierung und die Übertragung der gemessenen Daten ins raumfeste System mit hohen Kosten verbunden sind und vor allem ein Dehnungsmessstreifen sehr anfällig gegen Beschädigungen ist, sind an einem Modellprüfstand Versuche durchgeführt, mit denen eine Bewertung der schwingenden Schaufeln allein mittels Messungen dynamischer Wanddruckschwankungen im strömenden Medium innerhalb der Arbeitsmaschine ermöglicht wird.

Um die gemessene Wanddruckschwankung bzw. ihre Amplitudenspektren interpretieren zu können, ist eine Simulation zur Erzeugung von Fehlersignaturen rotierender Schaufeln eines Axialventilators mit Hilfe des Programmpakets Matlab durchgeführt worden. Die Simulation basiert auf der Eingabe von theoretischen Zeitsignalen und der dazugehörigen berechneten Fast Fourier Transformation. Da im Zeitsignal nicht viel zu erkennen ist, besonders bei höheren Drehzahlen, wird die Interpretation in der Frequenzebene fortgesetzt.

Die Simulation ermöglicht für jeden vorstellbaren Fall, bei Vorgabe der Zeitdaten, die FFT zu ermitteln.

Die Programme sind so vereinfacht, dass man nur die Anzahl der Schaufeln, die Rotorfrequenz und die Grösse der Amplituden des Zeitsignals voreinzustellen braucht.

Die Variationen im Rahmen der vorliegenden Arbeit orientieren sich an der einfache experimentellen Möglichkeiten und sind:

- eine originale Messung,
- eine Messung in der eine Schaufel mit Klebeband verstärkt wird (nur Messung),
- eine Schaufel wird demontiert,
- eine Messung mit zwei weicheren Schaufeln.

Bei einer defekten Schaufel stimmt die Simulation und das Experiment überein, jedoch bei mehreren defekten Schaufeln in einer Periode liefert die FFT abweichende Ergebnisse der Amplituden. Das hängt offensichtlich von der Kombination der defekten Stellen ab.

Denn noch bietet die Simulation eine gute Vergleichsmöglichkeit und erlaubt die Studie verschiedensten Variationen.

Um eventuell eine Lokalisierung von defekten Schaufeln zu ermöglichen liesse sich diese Arbeit erweitern, indem die Phasenunterschiede berücksichtigt werden.

8. Literaturverzeichnis

- [1] Bronstein, Semendjajew, Musiol, Mülig: Taschenbuch der Mathematik, Harri Deutsch Verlag 1997.
- [2] Papula L.: Mathematik für Ingenieure 2, View Verlag 1991.
- [3] Bohl W.: Strömungsmaschinen 2, Vogel Buchverlag 1995.
- [4] Brüel & Kjaer, Master catalogue Electronic instruments, 1989.
- [5] Wende R., Diplomarbeit: Konstruktion und Inbetriebnahme eines Axialverdichterprüfstandes zur Messung von Schaufelschwingung und Schaufeldrücken, FH Düsseldorf W.S. 2000.
- [6] Prof. Weidemann, Labor Unterlagen zur Messtechnik W.S. 1999.
- [7] The Student Edition of Matlab, The Ultimate Computing Environment for Technical Education, User's Guide, version 4.
- [8] Prof. Kameier, Akustikskript 2000.
- [9] Prof. Kameier, Strömungsmaschinenskript 2000.
- [10] Laboratory of Thermal Turbomachines, National Technical University of Athens, Numerical simulation of blade fault signatures from unsteady wall Pressure signals.
- [11] Brigham, E.O.: FFT- Schnelle Fourier Transformation, München 1989.
- [12] Rottmann, Karl: Mathematische Formelsammlung, Mannheim, 1960

9. Anhänge

```

%-----Programmname: simulation.m -----
%Bei dem vorliegenden Programm werden die Frequenz, Amplitude und
%Phase zweier Funktionen eingegeben und in einem kartesischen
%Koordinatensystem aufgetragen.
%Ebenso wird die Summe dieser zwei Funktionen gebildet, Kartesich
%und Polar dargestellt.
%Als nächstes wird die Fast Fourier Transformation (fft) der Summe
%dargestellt.
%-----

function fig = form15()
% This is the machine-generated representation of a Handle Graphics object
% and its children. Note that handle values may change when these objects
% are re-created. This may cause problems with any callbacks written to
% depend on the value of the handle at the time the object was saved.
% This problem is solved by saving the output as a FIG-file.
%
% To reopen this object, just type the name of the M-file at the MATLAB
% prompt. The M-file and its associated MAT-file must be on your path.
%
% NOTE: certain newer features in MATLAB may not have been saved in this
% M-file due to limitations of this format, which has been superseded by
% FIG-files. Figures which have been annotated using the plot editor tools
% are incompatible with the M-file/MAT-file format, and should be saved as
% FIG-files.

load form15

h0 = figure('Color',[0.8 0.8 0.8], ...
    'Colormap',mat0, ...
    'FileName','simulation.m', ...
    'PaperPosition',[18 180 576 432], ...
    'PaperUnits','points', ...
    'Position',[216 178 754 498], ...
    'Tag','Fig1', ...
    'ToolBar','none');
h1 = axes('Parent',h0, ...
    'Box','on', ...
    'CameraUpVector',[0 1 0], ...
    'CameraUpVectorMode','manual', ...
    'Color',[1 1 1], ...
    'ColorOrder',mat1, ...
    'Position',[0.13          0.7012223431265868          0.3270231213872832
0.2237776568734131], ...
    'Tag','Axes5', ...
    'XColor',[0 0 0], ...
    'XGrid','on', ...
    'YColor',[0 0 0], ...
    'YGrid','on', ...
    'ZColor',[0 0 0], ...
    'ZGrid','on');
h2 = text('Parent',h1, ...
    'Color',[0 0 0], ...
    'HandleVisibility','off', ...
    'HorizontalAlignment','center', ...
    'Position',[0.4959349593495936          -0.2162162162162162
9.160254037844386], ...
    'String','t', ...
    'Tag','Axes5Text4', ...
    'VerticalAlignment','cap');
```

```

set(get(h2,'Parent'),'XLabel',h2);
h2 = text('Parent',h1, ...
    'Color',[0 0 0], ...
    'HandleVisibility','off', ...
    'HorizontalAlignment','center', ...
    'Position',mat2, ...
    'Rotation',90, ...
    'String','y1', ...
    'Tag','Axes5Text3', ...
    'VerticalAlignment','baseline');
set(get(h2,'Parent'),'YLabel',h2);
h2 = text('Parent',h1, ...
    'Color',[0 0 0], ...
    'HandleVisibility','off', ...
    'HorizontalAlignment','right', ...
    'Position',[-0.4024390243902439  1.324324324324324  9.160254037844386],
    ...
    'Tag','Axes5Text2', ...
    'Visible','off');
set(get(h2,'Parent'),'ZLabel',h2);
h2 = text('Parent',h1, ...
    'Color',[0 0 0], ...
    'HandleVisibility','off', ...
    'HorizontalAlignment','center', ...
    'Position',[0.4959349593495936  1.063063063063063  9.160254037844386],
    ...
    'Tag','Axes5Text1', ...
    'VerticalAlignment','bottom');
set(get(h2,'Parent'),'Title',h2);
h1 = axes('Parent',h0, ...
    'Box','on', ...
    'CameraUpVector',[0 1 0], ...
    'CameraUpVectorMode','manual', ...
    'Color',[1 1 1], ...
    'ColorOrder',mat3, ...
    'Position',[0.5779768786127169  0.7012223431265868  0.3270231213872832
0.2237776568734131], ...
    'Tag','Axes4', ...
    'XColor',[0 0 0], ...
    'XGrid','on', ...
    'YColor',[0 0 0], ...
    'YGrid','on', ...
    'ZColor',[0 0 0], ...
    'ZGrid','on');
h2 = text('Parent',h1, ...
    'Color',[0 0 0], ...
    'HandleVisibility','off', ...
    'HorizontalAlignment','center', ...
    'Position',[0.4979591836734691  -0.2162162162162162
9.160254037844386], ...
    'String','t', ...
    'Tag','Axes4Text4', ...
    'VerticalAlignment','cap');
set(get(h2,'Parent'),'XLabel',h2);
h2 = text('Parent',h1, ...
    'Color',[0 0 0], ...
    'HandleVisibility','off', ...
    'HorizontalAlignment','center', ...
    'Position',[-0.1183673469387756  0.4864864864864864
9.160254037844386], ...
    'Rotation',90, ...
    'String','y2', ...
    'Tag','Axes4Text3', ...

```

```

        'VerticalAlignment', 'baseline');
set(get(h2, 'Parent'), 'YLabel', h2);
h2 = text('Parent', h1, ...
        'Color', [0 0 0], ...
        'HandleVisibility', 'off', ...
        'HorizontalAlignment', 'right', ...
        'Position', mat4, ...
        'Tag', 'Axes4Text2', ...
        'Visible', 'off');
set(get(h2, 'Parent'), 'ZLabel', h2);
h2 = text('Parent', h1, ...
        'Color', [0 0 0], ...
        'HandleVisibility', 'off', ...
        'HorizontalAlignment', 'center', ...
        'Position', [0.4979591836734691 1.063063063063063 9.160254037844386],
        ...
        'Tag', 'Axes4Text1', ...
        'VerticalAlignment', 'bottom');
set(get(h2, 'Parent'), 'Title', h2);
h1 = axes('Parent', h0, ...
        'Box', 'on', ...
        'CameraUpVector', [0 1 0], ...
        'CameraUpVectorMode', 'manual', ...
        'Color', [1 1 1], ...
        'ColorOrder', mat5, ...
        'Position', [0.13 0.4056111715632934 0.3270231213872832
0.2237776568734131], ...
        'Tag', 'Axes3', ...
        'XColor', [0 0 0], ...
        'XGrid', 'on', ...
        'YColor', [0 0 0], ...
        'YGrid', 'on', ...
        'ZColor', [0 0 0], ...
        'ZGrid', 'on');
h2 = text('Parent', h1, ...
        'Color', [0 0 0], ...
        'HandleVisibility', 'off', ...
        'HorizontalAlignment', 'center', ...
        'Position', mat6, ...
        'String', 't', ...
        'Tag', 'Axes3Text4', ...
        'VerticalAlignment', 'cap');
set(get(h2, 'Parent'), 'XLabel', h2);
h2 = text('Parent', h1, ...
        'Color', [0 0 0], ...
        'HandleVisibility', 'off', ...
        'HorizontalAlignment', 'center', ...
        'Position', mat7, ...
        'Rotation', 90, ...
        'String', 'y=y1+y2', ...
        'Tag', 'Axes3Text3', ...
        'VerticalAlignment', 'baseline');
set(get(h2, 'Parent'), 'YLabel', h2);
h2 = text('Parent', h1, ...
        'Color', [0 0 0], ...
        'HandleVisibility', 'off', ...
        'HorizontalAlignment', 'right', ...
        'Position', [-0.4024390243902439 2.672727272727272 9.160254037844386],
        ...
        'Tag', 'Axes3Text2', ...
        'Visible', 'off');
set(get(h2, 'Parent'), 'ZLabel', h2);
h2 = text('Parent', h1, ...

```

```

        'Color',[0 0 0], ...
        'HandleVisibility','off', ...
        'HorizontalAlignment','center', ...
        'Position',mat8, ...
        'Tag','Axes3Text1', ...
        'VerticalAlignment','bottom');
set(get(h2,'Parent'),'Title',h2);
h1 = axes('Parent',h0, ...
        'CameraUpVector',[0 1 0], ...
        'CameraUpVectorMode','manual', ...
        'Color',[1 1 1], ...
        'ColorOrder',mat9, ...
        'DataAspectRatioMode','manual', ...
        'Position',[0.5779768786127169          0.11          0.3270231213872832
0.2237776568734131], ...
        'Tag','Axes2', ...
        'Visible','off', ...
        'WarpToFill','off', ...
        'WarpToFillMode','manual', ...
        'XColor',[0 0 0], ...
        'XLim',[-5 5], ...
        'XLimMode','manual', ...
        'YColor',[0 0 0], ...
        'YLim',[-5.75 5.75], ...
        'YLimMode','manual', ...
        'ZColor',[0 0 0], ...
        'DefaulttextFontAngle','normal', ...
        'DefaulttextFontName','Helvetica', ...
        'DefaulttextFontSize',10, ...
        'DefaulttextFontWeight','normal', ...
        'DefaulttextUnits','data');
h2 = patch('Parent',h1, ...
        'FaceColor',[1 1 1], ...
        'Faces',mat10, ...
        'HandleVisibility','off', ...
        'NormalMode','manual', ...
        'Tag','Axes2Patch1', ...
        'VertexNormals',mat11, ...
        'Vertices',mat12);
h2 = text('Parent',h1, ...
        'Color',[0 0 0], ...
        'HandleVisibility','off', ...
        'Position',[0.3653293900201725 2.599453680446622 0], ...
        'String',' 2.5', ...
        'Tag','Axes2Text18', ...
        'VerticalAlignment','bottom');
h2 = text('Parent',h1, ...
        'Color',[0 0 0], ...
        'HandleVisibility','off', ...
        'Position',[0.7132621424203367 5.075123852300548 0], ...
        'String',' 5', ...
        'Tag','Axes2Text17', ...
        'VerticalAlignment','bottom');
h2 = text('Parent',h1, ...
        'Color',[0 0 0], ...
        'HandleVisibility','off', ...
        'HorizontalAlignment','center', ...
        'Position',[4.763139720814413 2.75 0], ...
        'String','30', ...
        'Tag','Axes2Text16');
h2 = text('Parent',h1, ...
        'Color',[0 0 0], ...
        'HandleVisibility','off', ...

```

```
        'HorizontalAlignment','center', ...
        'Position',[-4.763139720814413 -2.75 0], ...
        'String','210', ...
        'Tag','Axes2Text15');
h2 = text('Parent',h1, ...
        'Color',[0 0 0], ...
        'HandleVisibility','off', ...
        'HorizontalAlignment','center', ...
        'Position',[2.75 4.763139720814412 0], ...
        'String','60', ...
        'Tag','Axes2Text14');
h2 = text('Parent',h1, ...
        'Color',[0 0 0], ...
        'HandleVisibility','off', ...
        'HorizontalAlignment','center', ...
        'Position',[-2.75 -4.763139720814412 0], ...
        'String','240', ...
        'Tag','Axes2Text13');
h2 = text('Parent',h1, ...
        'Color',[0 0 0], ...
        'HandleVisibility','off', ...
        'HorizontalAlignment','center', ...
        'Position',[3.367778697655222e-016 5.5 0], ...
        'String','90', ...
        'Tag','Axes2Text12');
h2 = text('Parent',h1, ...
        'Color',[0 0 0], ...
        'HandleVisibility','off', ...
        'HorizontalAlignment','center', ...
        'Position',[-3.367778697655222e-016 -5.5 0], ...
        'String','270', ...
        'Tag','Axes2Text11');
h2 = text('Parent',h1, ...
        'Color',[0 0 0], ...
        'HandleVisibility','off', ...
        'HorizontalAlignment','center', ...
        'Position',[-2.749999999999999 4.763139720814413 0], ...
        'String','120', ...
        'Tag','Axes2Text10');
h2 = text('Parent',h1, ...
        'Color',[0 0 0], ...
        'HandleVisibility','off', ...
        'HorizontalAlignment','center', ...
        'Position',[2.749999999999999 -4.763139720814413 0], ...
        'String','300', ...
        'Tag','Axes2Text9');
h2 = text('Parent',h1, ...
        'Color',[0 0 0], ...
        'HandleVisibility','off', ...
        'HorizontalAlignment','center', ...
        'Position',[-4.763139720814413 2.75 0], ...
        'String','150', ...
        'Tag','Axes2Text8');
h2 = text('Parent',h1, ...
        'Color',[0 0 0], ...
        'HandleVisibility','off', ...
        'HorizontalAlignment','center', ...
        'Position',[4.763139720814413 -2.75 0], ...
        'String','330', ...
        'Tag','Axes2Text7');
h2 = text('Parent',h1, ...
        'Color',[0 0 0], ...
        'HandleVisibility','off', ...
```

```

        'HorizontalAlignment','center', ...
        'Position',[-5.5 6.735557395310443e-016 0], ...
        'String','180', ...
        'Tag','Axes2Text6');
h2 = text('Parent',h1, ...
        'Color',[0 0 0], ...
        'HandleVisibility','off', ...
        'HorizontalAlignment','center', ...
        'Position',[5.5 -6.735557395310443e-016 0], ...
        'String','0', ...
        'Tag','Axes2Text5');
h2 = text('Parent',h1, ...
        'Color',[0 0 0], ...
        'HandleVisibility','off', ...
        'HorizontalAlignment','center', ...
        'Position',[-0.05227272727272947
76.85213074469699], ... 6.481818181818184
        'String','polar plot', ...
        'Tag','Axes2Text4', ...
        'VerticalAlignment','bottom');
set(get(h2,'Parent'),'Title',h2);
h2 = text('Parent',h1, ...
        'Color',[0 0 0], ...
        'HandleVisibility','off', ...
        'HorizontalAlignment','center', ...
        'Position',[-0.05227272727272947
76.85213074469699], ... -8.259090909090908
        'Tag','Axes2Text3', ...
        'VerticalAlignment','cap', ...
        'Visible','off');
set(get(h2,'Parent'),'XLabel',h2);
h2 = text('Parent',h1, ...
        'Color',[0 0 0], ...
        'HandleVisibility','off', ...
        'HorizontalAlignment','center', ...
        'Position',mat13, ...
        'Rotation',90, ...
        'Tag','Axes2Text2', ...
        'VerticalAlignment','baseline', ...
        'Visible','off');
set(get(h2,'Parent'),'YLabel',h2);
h2 = text('Parent',h1, ...
        'Color',[0 0 0], ...
        'HandleVisibility','off', ...
        'HorizontalAlignment','right', ...
        'Position',[-58.49318181818182 40.35454545454546 76.85213074469699],
...
        'Tag','Axes2Text1', ...
        'Visible','off');
set(get(h2,'Parent'),'ZLabel',h2);
h1 = axes('Parent',h0, ...
        'Box','on', ...
        'CameraUpVector',[0 1 0], ...
        'CameraUpVectorMode','manual', ...
        'Color',[1 1 1], ...
        'ColorOrder',mat14, ...
        'Position',[0.13 0.11 0.3270231213872832 0.2237776568734131], ...
        'Tag','Axes1', ...
        'XColor',[0 0 0], ...
        'XGrid','on', ...
        'XLim',[0 10], ...
        'XLimMode','manual', ...
        'YColor',[0 0 0], ...

```

```

        'YGrid','on', ...
        'YLim',[0 2], ...
        'YLimMode','manual', ...
        'ZColor',[0 0 0], ...
        'ZGrid','on');
h2 = text('Parent',h1, ...
        'Color',[0 0 0], ...
        'HandleVisibility','off', ...
        'HorizontalAlignment','center', ...
        'Position',[4.959349593495935 -0.4363636363636356 9.160254037844386],
...
        'String','f', ...
        'Tag','Axes1Text4', ...
        'VerticalAlignment','cap');
set(get(h2,'Parent'),'XLabel',h2);
h2 = text('Parent',h1, ...
        'Color',[0 0 0], ...
        'HandleVisibility','off', ...
        'HorizontalAlignment','center', ...
        'Position',[-0.7317073170731705 0.9818181818181815
9.160254037844386], ...
        'Rotation',90, ...
        'String','fft', ...
        'Tag','Axes1Text3', ...
        'VerticalAlignment','baseline');
set(get(h2,'Parent'),'YLabel',h2);
h2 = text('Parent',h1, ...
        'Color',[0 0 0], ...
        'HandleVisibility','off', ...
        'HorizontalAlignment','right', ...
        'Position',[-4.024390243902439 8.018181818181818 9.160254037844386],
...
        'Tag','Axes1Text2', ...
        'Visible','off');
set(get(h2,'Parent'),'ZLabel',h2);
h2 = text('Parent',h1, ...
        'Color',[0 0 0], ...
        'HandleVisibility','off', ...
        'HorizontalAlignment','center', ...
        'Position',[4.959349593495935 2.127272727272727 9.160254037844386],
...
        'Tag','Axes1Text1', ...
        'VerticalAlignment','bottom');
set(get(h2,'Parent'),'Title',h2);
h1 = uicontrol('Parent',h0, ...
        'Units','points', ...
        'BackgroundColor',[0.752941176470588 0.752941176470588
0.752941176470588], ...
        'HorizontalAlignment','left', ...
        'ListboxTop',0, ...
        'Position',[280 199.5 25 15.75], ...
        'String','f1 [Hz]', ...
        'Style','text', ...
        'Tag','StaticText1');
h1 = uicontrol('Parent',h0, ...
        'Units','points', ...
        'BackgroundColor',[0.752941176470588 0.752941176470588
0.752941176470588], ...
        'HorizontalAlignment','left', ...
        'ListboxTop',0, ...
        'Position',[280 168 25 15.75], ...
        'String','f2 [Hz]', ...
        'Style','text', ...

```

```
'Tag', 'StaticText1');
h1 = uicontrol('Parent',h0, ...
    'Units','points', ...
    'BackgroundColor',[1 1 1], ...
    'Callback','call_f1', ...
    'ListboxTop',0, ...
    'Position',[315 199.5 25 15.75], ...
    'Style','edit', ...
    'Tag','f1');
h1 = uicontrol('Parent',h0, ...
    'Units','points', ...
    'BackgroundColor',[1 1 1], ...
    'Callback','call_f2', ...
    'ListboxTop',0, ...
    'Position',[315 168 25 15.75], ...
    'Style','edit', ...
    'Tag','f2');
h1 = uicontrol('Parent',h0, ...
    'Units','points', ...
    'BackgroundColor',[1 1 1], ...
    'Callback','call_Amp1', ...
    'ListboxTop',0, ...
    'Position',[385 199.5 25 15.75], ...
    'Style','edit', ...
    'Tag','Amp1');
h1 = uicontrol('Parent',h0, ...
    'Units','points', ...
    'BackgroundColor',[1 1 1], ...
    'Callback','call_Amp2', ...
    'ListboxTop',0, ...
    'Position',[385 168 25 15.75], ...
    'Style','edit', ...
    'Tag','Amp2');
h1 = uicontrol('Parent',h0, ...
    'Units','points', ...
    'BackgroundColor',[0.752941176470588
0.752941176470588], ...
    'ListboxTop',0, ...
    'Position',[350 199.5 25 15.75], ...
    'String','Amp1', ...
    'Style','text', ...
    'Tag','StaticText2');
h1 = uicontrol('Parent',h0, ...
    'Units','points', ...
    'BackgroundColor',[0.752941176470588
0.752941176470588], ...
    'ListboxTop',0, ...
    'Position',[350 168 25 15.75], ...
    'String','Amp2', ...
    'Style','text', ...
    'Tag','StaticText3');
h1 = uicontrol('Parent',h0, ...
    'Units','points', ...
    'BackgroundColor',[0.752941176470588
0.752941176470588], ...
    'ListboxTop',0, ...
    'Position',[420 199.5 25 15.75], ...
    'String','phil°', ...
    'Style','text', ...
    'Tag','StaticText4');
h1 = uicontrol('Parent',h0, ...
    'Units','points', ...
```

```
'BackgroundColor',[0.752941176470588
0.752941176470588], ...
'ListboxTop',0, ...
'Position',[420 168 25 15.75], ...
'String','phi2°', ...
'Style','text', ...
'Tag','StaticText5');
h1 = uicontrol('Parent',h0, ...
'Units','points', ...
'BackgroundColor',[1 1 1], ...
'Callback','call_phi1', ...
'ListboxTop',0, ...
'Position',[455 199.5 25 15.75], ...
'Style','edit', ...
'Tag','phi1');
h1 = uicontrol('Parent',h0, ...
'Units','points', ...
'BackgroundColor',[1 1 1], ...
'Callback','call_phi2', ...
'ListboxTop',0, ...
'Position',[455 168 25 15.75], ...
'Style','edit', ...
'Tag','phi2');
h1 = uicontrol('Parent',h0, ...
'Units','points', ...
'BackgroundColor',[0.752941176470588
0.752941176470588], ...
'ListboxTop',0, ...
'Position',[490 199.5 25 15.75], ...
'String','DC1', ...
'Style','text', ...
'Tag','StaticText6');
h1 = uicontrol('Parent',h0, ...
'Units','points', ...
'ListboxTop',0, ...
'Position',[490 168 25 15.75], ...
'String','DC2', ...
'Style','text', ...
'Tag','StaticText7');
h1 = uicontrol('Parent',h0, ...
'Units','points', ...
'BackgroundColor',[1 1 1], ...
'Callback','call_dc1', ...
'ListboxTop',0, ...
'Position',[525 199.5 25 15.75], ...
'Style','edit', ...
'Tag','DC1');
h1 = uicontrol('Parent',h0, ...
'Units','points', ...
'BackgroundColor',[1 1 1], ...
'Callback','call_dc2', ...
'ListboxTop',0, ...
'Position',[525 168 25 15.75], ...
'Style','edit', ...
'Tag','DC2');
h1 = uicontrol('Parent',h0, ...
'Units','points', ...
'BackgroundColor',[0.752941176470588
0.752941176470588], ...
'Callback','polarplot5', ...
'ListboxTop',0, ...
'Position',[280 135 70 20], ...
'String','Start', ...
```

```
        'Tag', 'Start');  
if nargout > 0, fig = h0; end
```

```

%-----Programmname: Polarplot5-----

%clear all % *** WICHTIG!! Variablen dürfen _NICHT_ gelöscht werden!!*

perioden=4;
Anzahlpunkte=2048;
offset=3;
fensterlaenge=10;
x_max=fensterlaenge;
freq=perioden/fensterlaenge;
f_max=freq*Anzahlpunkte/(2*perioden);
x=linspace(0, fensterlaenge, Anzahlpunkte);
f=linspace(0, f_max, Anzahlpunkte/2);

%   Eingabe der ersten Zeitfunktion y1

y1=DC1+Amp1*sin(2*pi*f1*x+phi1*pi/180);
subplot(3,2,1),plot(x,y1);
xlabel('t');ylabel('y1');
axis([0 x(length(x)) -(DC1+DC2+Amp1+Amp2) (DC1+DC2+Amp1+Amp2)]);
grid;

%   Eingabe der zweiten Zeitfunktion y2

y2=DC2+Amp2*sin(2*pi*f2*x+phi2*pi/180);
subplot(3,2,2)
plot(x,y2);
xlabel('t');ylabel('y2');
axis([0 x(length(x)) -(DC1+DC2+Amp1+Amp2) (DC1+DC2+Amp1+Amp2)]);
grid;

%   summierung der beiden Funktionen

y=y1+y2;
subplot(3,2,3)
plot(x,y);
xlabel('t');ylabel('y=y1+y2');
axis([0 x(length(x)) -(DC1+DC2+Amp1+Amp2) (DC1+DC2+Amp1+Amp2)]);
grid;

%   polarplot

subplot(3,2,6)
polar((x*2*pi)/x_max,offset+y);
title('polar plot');
grid;

%   fouriertransformation

Z=fft(y);
for i=2:(Anzahlpunkte/2);
    amp_fft(i)=abs(Z(i))+abs(Z(Anzahlpunkte-i+2));
%   amp_fft(i)=(Z(i))+Z(Anzahlpunkte-i+2));
end
amp_fft(1)=Z(1);
amp_fft=amp_fft/Anzahlpunkte;

%amp_fft=Z*2/Anzahlpunkte;
%amp_fft(1)=amp_fft(1)/2;

subplot(3,2,5)
plot(f,abs(amp_fft(1:Anzahlpunkte/2)))

```

```
if f1>f2
    limf=1.5*f1;
else
    limf=1.5*f2;
end

if (DC1+Amp1)>(DC2+Amp2)
    limA=1.5*(Amp1+DC1);
else
    limA=1.5*(Amp2+DC2);
end

axis([0 limf 0 limA]);
xlabel('f');ylabel('fft');
grid;
```

```
%-----Programmname: call_Amp1 -----  
Amp1=str2num(get(gco,'string'));  
%-----Programmname: call_Amp2 -----  
Amp2=str2num(get(gco,'string'));  
%-----Programmname: call_phi1-----  
phi1=str2num(get(gco,'string'));  
%-----Programmname: call_phi2-----  
phi2=str2num(get(gco,'string'));  
%-----Programmname: call_f1-----  
f1=str2num(get(gco,'string'));  
%-----Programmname: call_f2-----  
f2=str2num(get(gco,'string'));  
%-----Programmname: call_DC1-----  
DC1=str2num(get(gco,'string'));  
%-----Programmname: call_DC2-----  
DC2=str2num(get(gco,'string'));
```

```
%x:\Studenten\chlyeh\fft_hanning_fenster\prog2_hanning.m

% Keine schaufel defekt

clear all
Schaufelzahl=11;
Anzahlpunkte=16384;
Perioden=10;
Rotorfreq=16.6666;
fensterlaenge=Perioden/Rotorfreq;
t_max=fensterlaenge;
freq=Anzahlpunkte/(2*fensterlaenge);
t=linspace(0,t_max,Anzahlpunkte);

Y(1:Anzahlpunkte)=0;
for i=1:(Anzahlpunkte/(Perioden*Schaufelzahl)):Anzahlpunkte
    Y(fix(i))=0.5;
end
peaks=find(Y==0.5);
for k=1:Anzahlpunkte;
    YY(k)=Y(k)*(0.5-0.5*cos((2*pi*k)/(Anzahlpunkte+1)));
end

figure;
subplot(1,2,1);
plot(t,Y);
axis([0 0.12 0 6]);
xlabel('t [s]');ylabel('Amp');
title('Kein Schaufel defekt');
grid;

%fourier Transformation

f=linspace(0,freq,Anzahlpunkte/2);
Z=fft(YY);
for i=2:(Anzahlpunkte/2);
    amp_fft(i)=abs(Z(i))+abs(Z(Anzahlpunkte-i+2));
end
amp_fft(1)=Z(1);
amp_fft=amp_fft/Anzahlpunkte;
subplot(1,2,2);
plot(f,abs(amp_fft(1:Anzahlpunkte/2)));
legend('Hanning Fensterung');
axis([0 200 0 0.01]);
xlabel('f [Hz]');ylabel('Amp');
title('Fast Fourier Transformation');
grid;
```

```
%x:\Studenten\chlyeh\fft_hanning_fenster\prog3_hanning.m

% 1 schaufel defekt

clear all
Schaufelzahl=11;
Schaufell=3;
Anzahlpunkte=16384;
Perioden=10;
Rotorfreq=16.6666;
fensterlaenge=Perioden/Rotorfreq;
t_max=fensterlaenge;
freq=Anzahlpunkte/(2*fensterlaenge);

t=linspace(0,t_max,Anzahlpunkte);

Y(1:Anzahlpunkte)=0;
for i=1:(Anzahlpunkte/(Perioden*Schaufelzahl)):Anzahlpunkte
    Y(fix(i))=3;
end
peaks=find(Y==3);
for i=Schaufell:Schaufelzahl:length(peaks)
    Y(peaks(i))=5;
end
for k=1:Anzahlpunkte;
    YY(k)=Y(k)*(0.5-0.5*cos((2*pi*k)/(Anzahlpunkte+1)));
end

figure;
subplot(1,2,1);
plot(t,Y);
axis([0 t_max 0 6]);
xlabel('t');ylabel('Amp');
title('3. Schaufel defekt');
grid;

%fourier Transformation

f=linspace(0,freq,Anzahlpunkte/2);
Z=fft(YY);
for i=2:(Anzahlpunkte/2);
    amp_fft(i)=abs(Z(i))+abs(Z(Anzahlpunkte-i+2));
end
amp_fft(1)=Z(1);
amp_fft=amp_fft/Anzahlpunkte;
subplot(1,2,2);
plot(f,abs(amp_fft(1:Anzahlpunkte/2)));
legend('Hanning Fensterung');
axis([0 200 0 0.01]);
xlabel('f');ylabel('FFT');
title('Fast Fourier Transformation');
grid;
```

```
%x:\Studenten\chlyeh\fft_hanning_fenster\prog4_hanning.m

% 2 schaufeln defekt

clear all
Schaufelzahl=11;
Schaufel1=3;
Schaufel2=10;
Anzahlpunkte=16384;
Perioden=10;
Rotorfreq=16.6666;
fensterlaenge=Perioden/Rotorfreq;
t_max=fensterlaenge;
freq=Anzahlpunkte/(2*fensterlaenge);

t=linspace(0,t_max,Anzahlpunkte);

Y(1:Anzahlpunkte)=0;
for i=1:(Anzahlpunkte/(Perioden*Schaufelzahl)):Anzahlpunkte
    Y(fix(i))=0.5;
end
peaks=find(Y==0.5);
for i=Schaufel1:Schaufelzahl:length(peaks)
    Y(peaks(i))=3;
end
for i=Schaufel2:Schaufelzahl:length(peaks)
    Y(peaks(i))=2;
end
for k=1:Anzahlpunkte;
    YY(k)=Y(k)*(0.5-0.5*cos((2*pi*k)/(Anzahlpunkte+1)));
end

figure;
subplot(1,2,1);
plot(t,Y);
axis([0 0.12 0 4]);
xlabel('t');ylabel('Amp');
title('3.,10. Schaufel defekt');
grid;

%fourier Transformation

f=linspace(0,freq,Anzahlpunkte/2);
Z=fft(YY);
for i=2:(Anzahlpunkte/2);
    amp_fft(i)=abs(Z(i))+abs(Z(Anzahlpunkte-i+2));
end
amp_fft(1)=Z(1);
amp_fft=amp_fft/Anzahlpunkte;
subplot(1,2,2);
plot(f,abs(amp_fft(1:Anzahlpunkte/2)));
legend('Hanning Fensterung');
axis([0 200 0 0.006]);
xlabel('f');ylabel('FFT');
title('Fast Fourier Transformation');
grid;
```

```
%x:\Studenten\chlyeh\fft_hanning_fenster\prog5_hanning.m

% 3 schaufeln defekt
clear all
Schaufelzahl=11;
Schaufel1=3;
Schaufel2=6;
Schaufel3=7;
Anzahlpunkte=16384;
Perioden=10;
Rotorfreq=16.6666;
fensterlaenge=Perioden/Rotorfreq;
t_max=fensterlaenge;
freq=Anzahlpunkte/(2*fensterlaenge);
t=linspace(0,t_max,Anzahlpunkte);

Y(1:Anzahlpunkte)=0;
for i=1:(Anzahlpunkte/(Perioden*Schaufelzahl)):Anzahlpunkte
    Y(fix(i))=0.5;
end
peaks=find(Y==0.5);
for i=Schaufel1:Schaufelzahl:length(peaks)
    Y(peaks(i))=5;
end
for i=Schaufel2:Schaufelzahl:length(peaks)
    Y(peaks(i))=3;
end
for i=Schaufel3:Schaufelzahl:length(peaks)
    Y(peaks(i))=2;
end
for k=1:Anzahlpunkte;
    YY(k)=Y(k)*(0.5-0.5*cos((2*pi*k)/(Anzahlpunkte+1)));
end
figure;
subplot(1,2,1);
plot(t,Y);
axis([0 0.12 0 6]);
xlabel('t [s]');ylabel('Amp');
title('3.,6.,7. Schaufel defekt');
grid;

%fourier Transformation

f=linspace(0,freq,Anzahlpunkte/2);
Z=fft(YY);
for i=2:(Anzahlpunkte/2);
    amp_fft(i)=abs(Z(i))+abs(Z(Anzahlpunkte-i+2));
end
amp_fft(1)=Z(1);
amp_fft=amp_fft/Anzahlpunkte;
subplot(1,2,2);
plot(f,abs(amp_fft(1:Anzahlpunkte/2)));
legend('Hanning Fensterung');
axis([0 200 0 0.01]);
xlabel('f [Hz]');ylabel('Amp');
title('Fast Fourier Transformation');
grid;
```

```
%x:\Studenten\chlyeh\fft_hanning_fenster\prog6_hanning.m

% 4 schaufeln defekt

clear all
Schaufelzahl=11;
Schaufel1=2;
Schaufel2=3;
Schaufel3=7;
Schaufel4=10;
Anzahlpunkte=16384;
Perioden=10;
Rotorfreq=16.6666;
fensterlaenge=Perioden/Rotorfreq;
t_max=fensterlaenge;
freq=Anzahlpunkte/(2*fensterlaenge);
t=linspace(0,t_max,Anzahlpunkte);

Y(1:Anzahlpunkte)=0;
for i=1:(Anzahlpunkte/(Perioden*Schaufelzahl)):Anzahlpunkte
    Y(fix(i))=0.5;
end
peaks=find(Y==0.5);
for i=Schaufel1:Schaufelzahl:length(peaks)
    Y(peaks(i))=2;
end
for i=Schaufel2:Schaufelzahl:length(peaks)
    Y(peaks(i))=3;
end
for i=Schaufel3:Schaufelzahl:length(peaks)
    Y(peaks(i))=5;
end
for i=Schaufel4:Schaufelzahl:length(peaks)
    Y(peaks(i))=6;
end
for k=1:Anzahlpunkte;
    YY(k)=Y(k)*(0.5-0.5*cos((2*pi*k)/(Anzahlpunkte+1)));
end

figure;
subplot(1,2,1);
plot(t,Y);
axis([0 t_max 0 8]);
xlabel('t');ylabel('Amp');
title('5.,6.,7.,8. Schaufel defekt');
grid;

%fourier Transformation

f=linspace(0,freq,Anzahlpunkte/2);
Z=fft(YY);
for i=2:(Anzahlpunkte/2);
    amp_fft(i)=abs(Z(i))+abs(Z(Anzahlpunkte-i+2));
end
amp_fft(1)=Z(1);
amp_fft=amp_fft/Anzahlpunkte;
s2=subplot(1,2,2);
plot(f,abs(amp_fft(1:Anzahlpunkte/2)));
legend('Hanning Fensterung');
axis([0 200 0 0.01]);
xlabel('f');ylabel('FFT');
title('Fast Fourier Transformation');
grid;
```

```
%x:\Studenten\chlyeh\fft_hanning_fenster\prog7_hanning.m

% 5 schaufeln defekt

clear all
Schaufelzahl=11;
Schaufel1=1;
Schaufel2=3;
Schaufel3=5;
Schaufel4=9;
Schaufel5=10;
Anzahlpunkte=16384;
Perioden=10;
Rotorfreq=16.6666;
fensterlaenge=Perioden/Rotorfreq;
t_max=fensterlaenge;
freq=Anzahlpunkte/(2*fensterlaenge);

t=linspace(0,t_max,Anzahlpunkte);

Y(1:Anzahlpunkte)=0;
for i=1:(Anzahlpunkte/(Perioden*Schaufelzahl)):Anzahlpunkte
    Y(fix(i))=0.5;
end
peaks=find(Y==0.5);
for i=Schaufel1:Schaufelzahl:length(peaks)
    Y(peaks(i))=2;
end
for i=Schaufel2:Schaufelzahl:length(peaks)
    Y(peaks(i))=3;
end
for i=Schaufel3:Schaufelzahl:length(peaks)
    Y(peaks(i))=5;
end
for i=Schaufel4:Schaufelzahl:length(peaks)
    Y(peaks(i))=6;
end
for i=Schaufel5:Schaufelzahl:length(peaks)
    Y(peaks(i))=6;
end
for k=1:Anzahlpunkte;
    YY(k)=Y(k)*(0.5-0.5*cos((2*pi*k)/(Anzahlpunkte+1)));
end
figure;
subplot(1,2,1);
plot(t,Y);
axis([0 t_max 0 8]);
xlabel('t');ylabel('Amp');
title('1.,3.,5.,9.,10. Schaufel defekt');
grid;

%fourier Transformation

f=linspace(0,freq,Anzahlpunkte/2);
Z=fft(YY);
for i=2:(Anzahlpunkte/2);
    amp_fft(i)=abs(Z(i))+abs(Z(Anzahlpunkte-i+2));
end
amp_fft(1)=Z(1);
amp_fft=amp_fft/Anzahlpunkte;
s2=subplot(1,2,2);
plot(f,abs(amp_fft(1:Anzahlpunkte/2)));
legend('Hanning Fensterung');
```

```
axis([0 200 0 0.01]);  
xlabel('f');ylabel('FFT');  
title('Fast Fourier Transformation');  
grid;
```

%in diesem Programm wurde die Graphik der Zeiten (t) polynomial dargestellt.

%prog_name:%x:\Studenten\chlyeh\fft_hanning_fenster\poly_simul1.m

clear all

Schaufelzahl=11;

Schaufel=5; % Eingabe der Nummer der defekten Schaufel

Anzahlpunkte=16384;

Perioden=10;

Rotorfreq=16.6666; %Das entspricht einen drehzahl von 1000 U/min

fensterlaenge=Perioden/Rotorfreq;

t_max=fensterlaenge;

freq=Anzahlpunkte/(2*fensterlaenge);

t=[];

Y=[];

for s=1:Schaufelzahl*Perioden;

 t1=(s-1)/(Rotorfreq*Schaufelzahl);

 t2=(2*s-1)/(2*Rotorfreq*Schaufelzahl);

 t3=s/(Rotorfreq*Schaufelzahl);

 A1=0;

 if rem(s,Schaufelzahl)==Schaufel;

 A2=5;

 else

 A2=2;

 end

 A3=0;

A=[t1^5 t1^4 t1^3 t1^2 t1 1; ...
t2^5 t2^4 t2^3 t2^2 t2 1; ...
t3^5 t3^4 t3^3 t3^2 t3 1; ...
5*t1^4 4*t1^3 3*t1^2 2*t1 1 0; ...
5*t2^4 4*t2^3 3*t2^2 2*t2 1 0; ...
5*t3^4 4*t3^3 3*t3^2 2*t3 1 0];

B=[A1; ...

A2; ...

A3; ...

0; ...

0; ...

0];

a=inv(A)*B;

tA=linspace(t1,t3, ...
1+fix(Anzahlpunkte/(Schaufelzahl*Perioden)));

YA=[a(1)*tA.^5 + ...
a(2)*tA.^4 + ...
a(3)*tA.^3 + ...
a(4)*tA.^2 + ...
a(5)*tA + ...
a(6)];

t=[t tA];

t(length(t))=[];

Y=[Y YA];

Y(length(Y))=[];

```
clear tA,YA;

end

figure;
subplot(1,2,1);
plot(t,Y);
%axis([0 t_max 0 10]);
axis([0 2*0.06 0 6]);
xlabel('t[s]');ylabel('Amp');
title('5. Schaufel defekt');
grid;

%fourier Transformation

f=linspace(0,freq,length(t)/2);
Z=fft(Y);
for i=2:(length(t)/2);
    amp_fft(i)=abs(Z(i))+abs(Z(length(t)-i+2));
end
amp_fft(1)=Z(1);
amp_fft=amp_fft/Anzahlpunkte;
subplot(1,2,2);
plot(f,abs(amp_fft(1:length(t)/2)));
axis([0 200 0 1]);
xlabel('f[Hz]');ylabel('Amp');
title('Fast Fourier Transformation');
grid;
```

```

%in diesem Programm wurde die Graphik der Zeiten (t) mit
%einem Spline dargestellt.
%prog_pfad:%x:\Studenten\chlyeh\fft_hanning_fenster\splin_simull.m

clear all
Schaufelzahl=11;
Schaufel=3; % Eingabe der Nummer der defekten Schaufel
Anzahlpunkte=16384;
Perioden=10;
Rotorfreq=16.6666; %Das entspricht einen drehzahl von 1000 U/min
fensterlaenge=Perioden/Rotorfreq;
t_max=fensterlaenge;
freq=Anzahlpunkte/(2*fensterlaenge);

t=[];
Y=[];

XS=[];
YS=[];
for s=1:Schaufelzahl*Perioden;

    t1=(s-1)/(Rotorfreq*Schaufelzahl);
    t2=(2*s-1)/(2*Rotorfreq*Schaufelzahl);
    t3=s/(Rotorfreq*Schaufelzahl);

    A1=0;
    if rem(s,Schaufelzahl)==Schaufel;
        A2=5;
    else
        A2=2;
    end
    A3=0;

    XS=[XS t1 t2];
    YS=[YS A1 A2];
end

XS=[XS t3];
YS=[YS A3];

t=linspace(0,t_max,Anzahlpunkte);
Y=spline(XS,YS,t);

for k=1:Anzahlpunkte;
    YY(k)=Y(k)*(0.5-0.5*cos((2*pi*k)/(Anzahlpunkte+1)));
end

figure;
subplot(1,2,1);
plot(t,Y);
%axis([0 t_max 0 10]);
axis([0 2*0.06 -1 6]);
xlabel('t[s]');ylabel('Amp');
title('9. Schaufel defekt');
grid;

%fourier Transformation

f=linspace(0,freq,Anzahlpunkte/2);
Z=fft(YY);

```

```
for i=2:(Anzahlpunkte/2);
    amp_fft(i)=abs(Z(i))+abs(Z(Anzahlpunkte-i+2));
end
amp_fft(1)=Z(1);
amp_fft=amp_fft/Anzahlpunkte;
subplot(1,2,2);
plot(f,abs(amp_fft(1:Anzahlpunkte/2)));
axis([0 200 0 1]);
xlabel('f[Hz]');ylabel('Amp');
title('Fast Fourier Transformation');
grid;
return
subplot(1,3,3);
plot(angle(Z));
axis([0 Anzahlpunkte -3.2 3.2]);
title('Darstellung der Phase');
grid;
```

```

%in diesem Programm wurde die Graphik der Zeiten (t)
%als saegezahn dargestellt.
%prog_pfad:%x:\Studenten\chlyeh\fft_hanning_fenster\saegezahn2.m

clear all
Schaufelzahl=11;
Schaufel=3; % Eingabe der Nummer der defekten Schaufel
Anzahlpunkte=16384;
Perioden=10;
Rotorfreq=16.6666; %Das entspricht einen drehzahl von 1000 U/min
fensterlaenge=Perioden/Rotorfreq;
t_max=fensterlaenge;
freq=Anzahlpunkte/(2*fensterlaenge);

t=[];
Y=[];

XS=[];
YS=[];
for s=1:Schaufelzahl*Perioden;

    t1=(s-1)/(Rotorfreq*Schaufelzahl);
    t3=s/(Rotorfreq*Schaufelzahl);
    t2=t3-0.0002;
    A1=0;
    if rem(s,Schaufelzahl)==Schaufel;
        A2=2;
    else
        A2=5;
    end
    A3=0;

    XS=[XS t1 t2];
    YS=[YS A1 A2];
end

XS=[XS t3];
YS=[YS A3];

t=linspace(0,t_max,Anzahlpunkte);
Y=interp1(XS,YS,t);

for k=1:Anzahlpunkte;
    YY(k)=Y(k)*(0.5-0.5*cos((2*pi*k)/(Anzahlpunkte+1)));
end

figure;
subplot(1,2,1);
plot(t,Y);
axis([0 0.06 0 6]);
xlabel('t[s]');ylabel('Amp');
title('9. Schaufel defekt');
grid;

%fourier Transformation

f=linspace(0,freq,Anzahlpunkte/2);
Z=fft(YY);
for i=2:(Anzahlpunkte/2);
    amp_fft(i)=abs(Z(i))+abs(Z(Anzahlpunkte-i+2));
end

```

```
amp_fft(1)=Z(1);
amp_fft=amp_fft/Anzahlpunkte;
subplot(1,2,2);
plot(f,abs(amp_fft(1:Anzahlpunkte/2)));
axis([0 200 0 1]);
xlabel('f[Hz]');ylabel('Amp');
title('Fast Fourier Transformation');
grid;
```

Konstanten		
d 1	0.374	[m]
d 2	0.447	[m]
kappa	1.40	
beta	0.8367	
R	287.2	[J/kg*K]
d lauf	0.494	[m]
d r	0.5	[m]

Messwerte

	[1/s]	[°C]	[mbar]	[mbar]	[mbar]	[mbar]
	n	t 1	p b	dp aus	dp 1	dp bl
chly_Sch_weg_gedr	1002	20.3	1022.5	0.58	0.57	0.07
chly_Sch_weg_RI	1002	20.5	1022.5	0.48	0.52	0.16
chly_Sch_weg_ungedr	1001	20.5	1022.5	0.57	0.7	0.69
ch_Or_gedr	1001	20.8	988.6	0.61	0.6	0.07
ch_Or_RI	1001	21.2	987.7	0.48	0.52	0.14
ch_Or_ungedr	1000	21	988.1	0.57	0.69	0.59
ch_kl_gedr	1001	21	983	0.58	0.57	0.06
ch_kl_RI	1001	21.4	983.6	0.47	0.52	0.17
ch_kl_ungedr	1000	21.2	983.4	0.59	0.71	0.74

Auswertung

[kg/m ³]	[kg/s m]	[m ² /s]			[m ³ /s]	[m/s]		[kg/s]		
rho 1	eta 1	nue 1	epsilon	C koef	qv bl	c bl	Re d2	qm bl	phi bl	psi bl
1.21391	1.812E-05	1.492E-05	0.9999716	0.58873541	0.3076	1.96	58704.7	0.3734	0.062	0.148
1.21302	1.813E-05	1.494E-05	1.000	0.585	0.4619	2.9	88054.5	0.5603	0.093	0.131
1.21324	1.813E-05	1.494E-05	1.000	0.580	0.9511	6.1	181332.9	1.1539	0.192	0.195
1.17173	1.814E-05	1.548E-05	1.000	0.589	0.3132	2.0	57618.9	0.3670	0.063	0.161
1.16897	1.816E-05	1.554E-05	1.000	0.585	0.4408	2.8	80810.9	0.5152	0.089	0.134
1.17044	1.815E-05	1.551E-05	0.9997522	0.58035019	0.8962	5.71	164620.0	1.0490	0.181	0.194
1.16427	1.815E-05	1.559E-05	1.000	0.590	0.2914	1.9	53233.3	0.3392	0.059	0.154
1.16333	1.817E-05	1.562E-05	0.9999282	0.58459395	0.4862	3.10	88660.3	0.5656	0.098	0.135
1.16411	1.816E-05	1.560E-05	1.000	0.580	1.0054	6.4	183573.3	1.1704	0.203	0.213
									0.061	0.138
									0.096	0.139
									0.211	0.196

Beilage zur Diplomarbeit

Name: Chlyeh
Vorname: Younes
Matr.-Nr: 316759

Erklärung

Ich erkläre hiermit an Eides Statt, daß ich die vorgelegte Diplomarbeit selbständig angefertigt und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel und ausschließlich die im Literaturverzeichnis angegebenen Schriften benutzt habe.

Datum:.....

Unterschrift:.....