1. Zeitbereichsanalyse(Diskrete Datenpunkte)

Um die Merkmale der Signale in einem Zeitraum zu bewerten, werden einige Kennwerte gezielt definiert. Diese Kennwerte haben oft eine intuitive physikalische Bedeutung.

Die Signalanalyse im Zeitbereich basiert normalerweise auf dem errechneten Kennwert aus Quellsignalen. In diesem Teil werden einige Kennwerte aus Schwingungssignalen errechnet, um die Zeitbereichsanalyse durchzuführen.

Kennwerte: Grenzwert(**max**. und **min**.), Durchschnittswert(**mean**), Standardabweichung(**std**).

Die Berechnungsformeln der Kennwerte sind wie folgt:

$$\mathrm{max}(k) = \mathrm{max}(x_1(t), x_2(t), \ldots, x_k(t)), k \geq 1$$

$$\mathrm{min}\,(k) = \mathrm{min}(x_1(t), x_2(t), \ldots, x_k(t)), k \geq 1$$

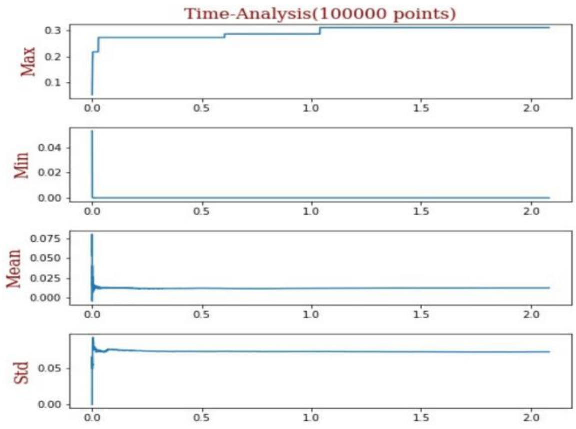
$$\mathrm{mean}(k) = \frac{1}{k}\sum_{i=1}^{k} x_i(t), k \geq 1$$

$$\mathrm{std}(k) = \sqrt{\frac{1}{k}\sum_{i=1}^{k} [x_i(t) - \mathrm{mean}(k)]^2, k \geq 1}$$

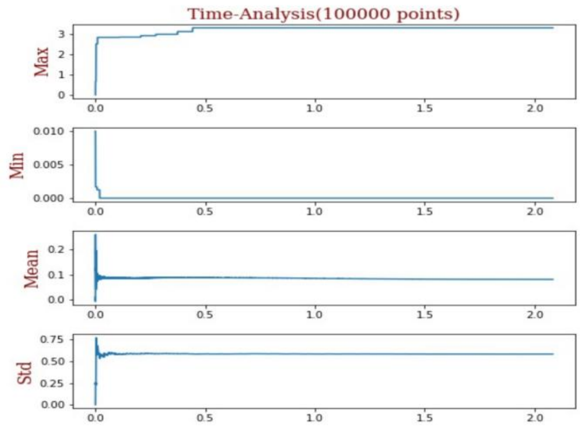
Dataset: CWRU(IR,OR,NO,BA)

1.1 Nur ungleiche Fehlertypen

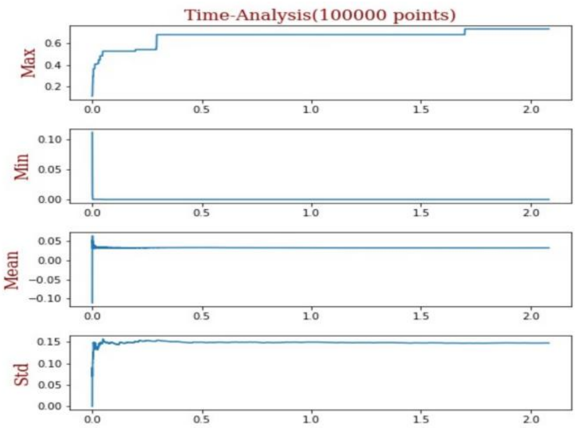
Die ausgewählte Analysedaten haben gleiche Umdrehungsgeschwindigkeit und ungleiche Lage des Fehlers.



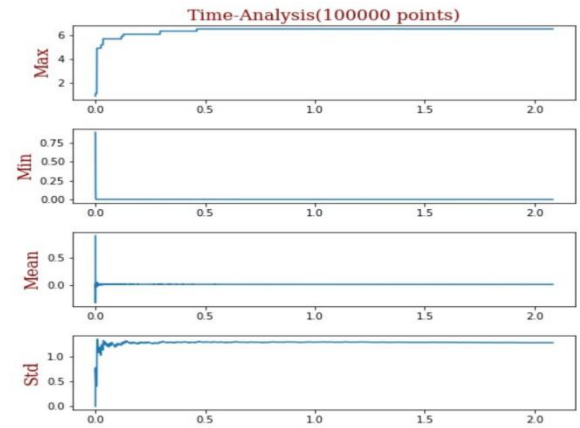
Fehlertyp: NO



Fehlertyp: IR



Fehlertyp: BA



Fehlertyp: OR

Bild 1 Die Kennwerte im Zeitbereich(NO-Normal, IR-Inner race, BA- Ball, OR-Outer race)

Das Ergebnis zeigt auf:

In gleichen Arbeitsbedingungen sind die Kennwerte unterschiedlicher Fehlertypen auch ungleich. Die Größe der Kennwerte ist relativ stabil. Aber dadurch ist es noch nicht

unbedingt, die Fehlertypen durch die Kennwerte beurteilt werden können.

1.2 Ungleiche Umdrehungsgeschwindigkeit

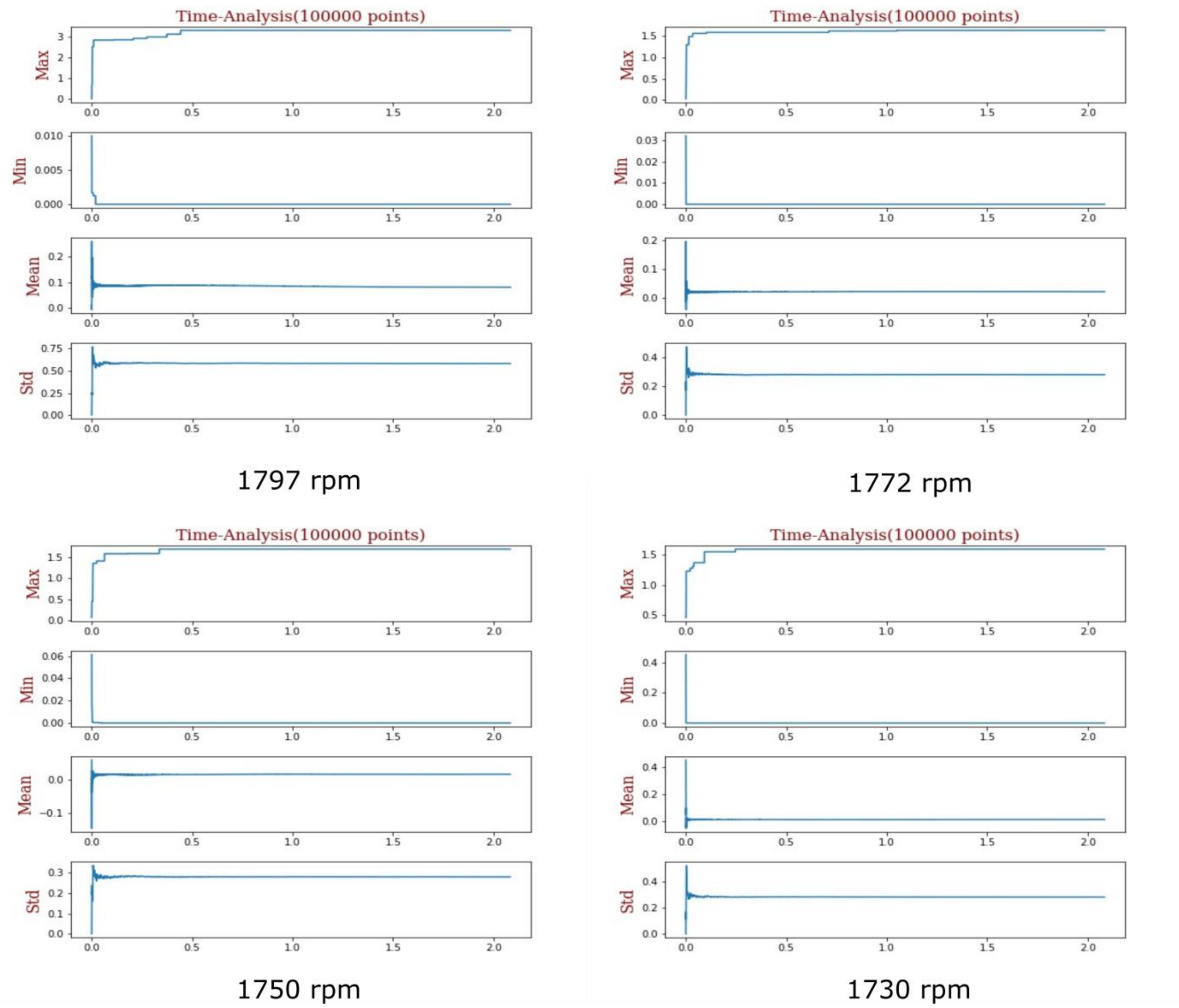


Bild 2 Die Kennwerte im Zeitbereich(unterschiedliche Umdrehungsgeschwindigkeit)

In unterschiedlichen Umdrehungsgeschwindigkeiten ändern sich die Kennwerte. Die Arbeitsbedingunen haben den Einfluss auf die Kennwerte der Schwingungssignale. **Deswegen können die Kennwerte in der Zeitbereichsanalyse nicht zur Fehlerdiagnose angewendet. Außerdem dauert der**

Verarbeitungsprozess eine relativ lange Zeit.

2. Frequenzbereichsanalyse（FFT）

Die Ergebnisse aus der Zeitbereichsanalyse beweisen die Schwierigkeit der Anwendung von Kennwertanalyse in die praktische Fehleranalyse, weil die Merkmale unterschiedlicher Fehlertypen nicht dadurch deutlich und stabil getrennt werden können. Deswegen versuchen viele Analysemethode die Merkmale aus Signalen im Frequenzbereich herauszufinden. Dafür spielt die Fourier-Transformation eine wichtige Rolle.

Die Fourier-Transformation ist wie eine Brücke zwischen dem Zeitbereich und dem Frequenzbereich, welche die Frequenzteile eines zeitlich veränderlichen harmonischen Signals darstellen kann.[#] Durch die Fourier-Transformation wird ein Signal in viele Frequenzkomponenten zerlegt. Im Frequenzbereich können dabei die Amplitudenänderungen unterschiedlicher Frequenzkomponenten verfolgt werden.[#] Die Fourier-Transformation ergibt sich aus dem folgenden mathematischen Zusammenhang[#]:

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cdot e^{-j2\pi ft} dt$$

$$X(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(f) \cdot e^{+j2\pi ft} df$$

Die Formeln weisen deutlich auf, dass die Fourier-Transformation nur die im Zeitbereich unendliches Signal verarbeiten kann. Allerdings können die Messungen in der Realität diskrete Wertefolgen endlicher Genauigkeit liefern.

Dafür ist die Diskrete Fourier-Transformation (DFT) eine Lösung. Dadurch wird ein längeres diskrete Signal in viele Frequenzkomponenten umwandelt. Die DFT wird als Reihe definiert:

$$X(f_n) = \frac{1}{N} \sum_{n=\frac{-N}{2}}^{\frac{N}{2}} x(t_n) \cdot e^{-j2\pi f_n t_n}$$

So ist das unendliche Signal nicht mehr nötig in der praktischen Anwendung von Fourier-Transformation. Aber in der Praxis hat die DFT noch eine hohe Anforderung an die Rechenleistung. Dann tritt die Fast-Fourier-Transformation (FFT) ein. Es ist ein neue Algorithmus zur Optimierung der DFT. Für n diskrete Messpunkte wird der Rechenaufwand dadurch von n^2 Operationen (DFT) auf $n \times \log_2(n)$ Operationen (FFT).

Als Beispiel einer Frequenzanalyse wird im Folgenden näher auf die Fast-Fourier-Transformation eingegangen.

2.1 Nur ungleiche Fehlertypen

Um die Beziehungen zwischen dem Merkmal und dem Fehlertyp herauszufinden, werden die aus unterschiedlichen Fehlertypen aber im gleichen Zeitraum Signale gemessen und durch die FFT analysiert. Die Anzahl der zu verarbeitenden Datenpunkte ist 10240.

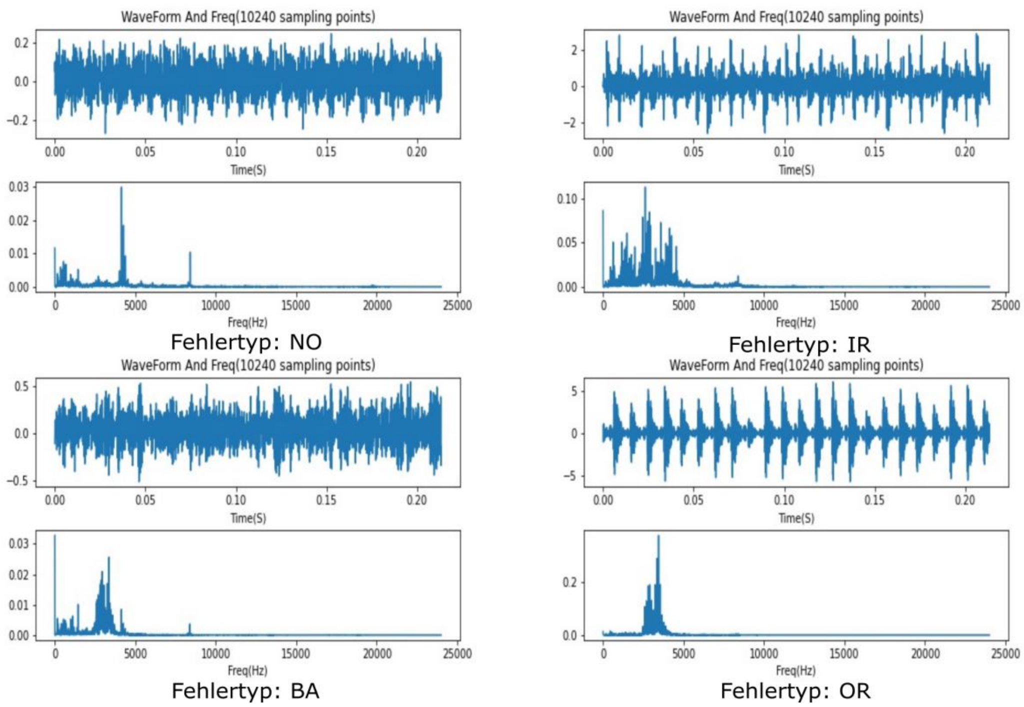


Bild 3 Ergebnis der FFT (4 Fehlertypen, NO-Normal, IR-Inner race, BA-Ball, OR-Outer Race)

Die Ergebnis zeigt auf:

Im Frequenzbereich haben die 4 Fehlertypen unterschiedliche Merkmale. Aber dadurch können die Fehler noch nicht einfach und deutlich erkannt werden. Außerdem verteilen sich die Frequenzkomponenten nicht getrennt. Dazu führt vielleicht der unstabile Arbeitszustand des Lagers.

2.2 Ungleiche Probenumfang

Um die Veränderung der Frequenzkomponenten im Zeitlauf zu forschen, werden die Signale in unterschiedlichen Zeiträumen gemessen und mit der FFT verarbeitet. Die Proben bestehen aus 4 Gruppen: 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 Sekunden. Alle Proben kommen aus dem gleichen Fehlertyp (IR- Inner race).

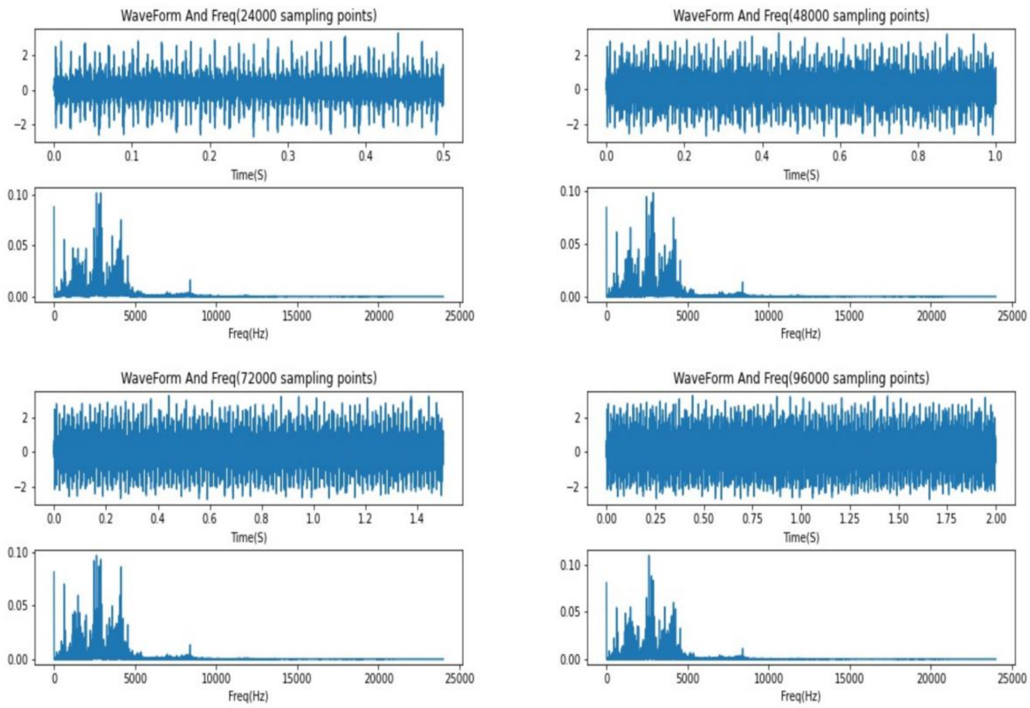


Bild 4 FFT in unterschiedlichen Zeiträumen

Die Ergebnis zeigt auf:

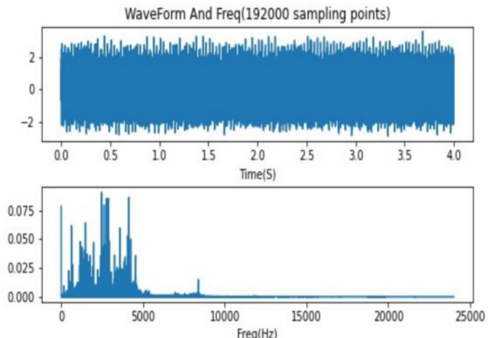
Die Frequenzkomponente des Schwingungssignals sind nicht ganz gleich in unterschiedlichen Zeiträumen. Das bedeutet, das Schwingungssignal des in Betrieb Lagers ist nicht periodisch und stabil. Die Ursache dafür ist vielleicht die veränderliche äußere Arbeitsbedingungen (Belastung,

Temperatur usw.). So kommt die FFT in der Realität nicht direkt in der Fehlerdiagnose zum Einsatz.

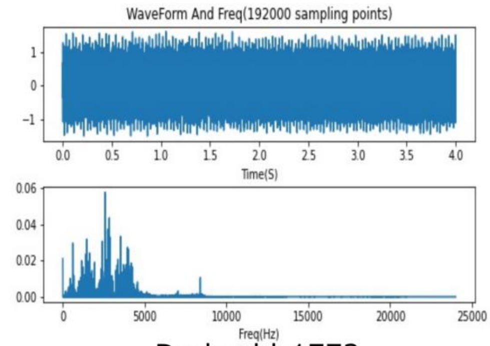
2.3 Ungleiche Umdrehungsgeschwindigkeit

Nicht nur die äußere Arbeitsbedingungen, sondern auch die Systemparameter haben den Einfluss auf die Verteilung der Frequenzkomponenten. Die Systemparameter einiger Maschinen sind oft nicht stabil in Betrieb (z. B. die veränderliche Drehzahl). Um die Fehlerdiagnose dafür zu ermöglichen, muss der Einfluss aus Systemparametern vermindert werden.

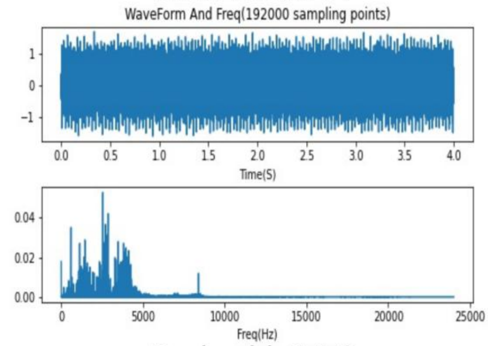
Die Ergebnisse der FFT von Systemen mit ungleicher Drehzahl sind wie folgt:



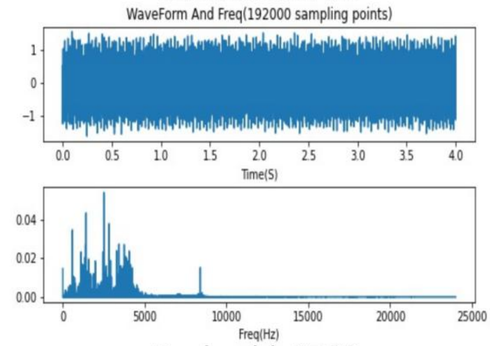
Drehzahl:1797



Drehzahl:1772



Drehzahl:1750



Drehzahl:1730

Bild 5 FFT unterschiedlicher Drehzahlen (gleiche Fehlertyp IR)

In unterschiedlichen Drehzahlen verändern sich die Frequenzkomponenten. Aber der Einfluss aus der Drehzahl spielt nur als Störungssignal.(Das Hauptmerkmal der Frequenzkomponenten ist noch nicht verdeckt.)

3. Zeit-Frequenz-Analyse(STFT)

Aufgrund der komplexen Umgebungsbedingungen und des veränderlichen Arbeitszustands ist das Schwingungssignal der Maschinen normalerweise instationär. Durch die oben genannte Frequenzbereichsanalyse ist es bekannt, die Frequenzanalyse auf Basis der Fourier-Transformation ist ungeeignet für präzise Auswertungen zeitlich veränderlicher Signale. Durch die Fourier-Transformation geht die zeitliche Information eines Signals verloren.[#]

Deshalb sollen die Analysen im Zeit-Frequenz-Bereich durchgeführt werden. Dazu liefert die Kurzzeit-Fourier-Transformation (STFT - Short Time Fourier Transform) eine Lösung. Die STFT verwendet ein zeitlich begrenztes Fenster, welches über das zu analysierende Signal verschoben wird. Dieses gleitende Analysefenster erzeugt fortlaufend die Fourier-Transformierten kurzer sich überlappender Signalabschnitte. Innerhalb der Signalabschnitte sind die Frequenzänderungen minimal. Durch die Berechnung der FT kleiner hintereinanderliegender Abschnitte können Signalanteile nun über Zeit und Frequenz beschrieben werden. So kann ein zeitlich veränderliches Schwingungssignal als Zeit-Frequenz-Verteilung, beispielsweise in Form eines Spektrogrammes, dargestellt werden. [#]

Die STFT basiert auf der DFT. Die direkte DFT eines instationären Signals liefert keine zeitliche Informationen über die Signaländerungen, während die STFT die Änderungen des Signals im Laufe der Zeit widerspiegelt, indem jeweils ein kleiner Teil des Signals entnommen, ein Fenster hinzugefügt und eine DFT durchgeführt wird. Ein Bild ist ein Abschnitt des Signals, der während der STFT herausgenommen wird. Durch Zusammenfügen der Ergebnisse der DFT für jedes Einzelbild kann ein Spektrogramm erstellt werden; je länger das Einzelbild ist, desto genauer sind die Informationen im Frequenzbereich.(Bild 6)

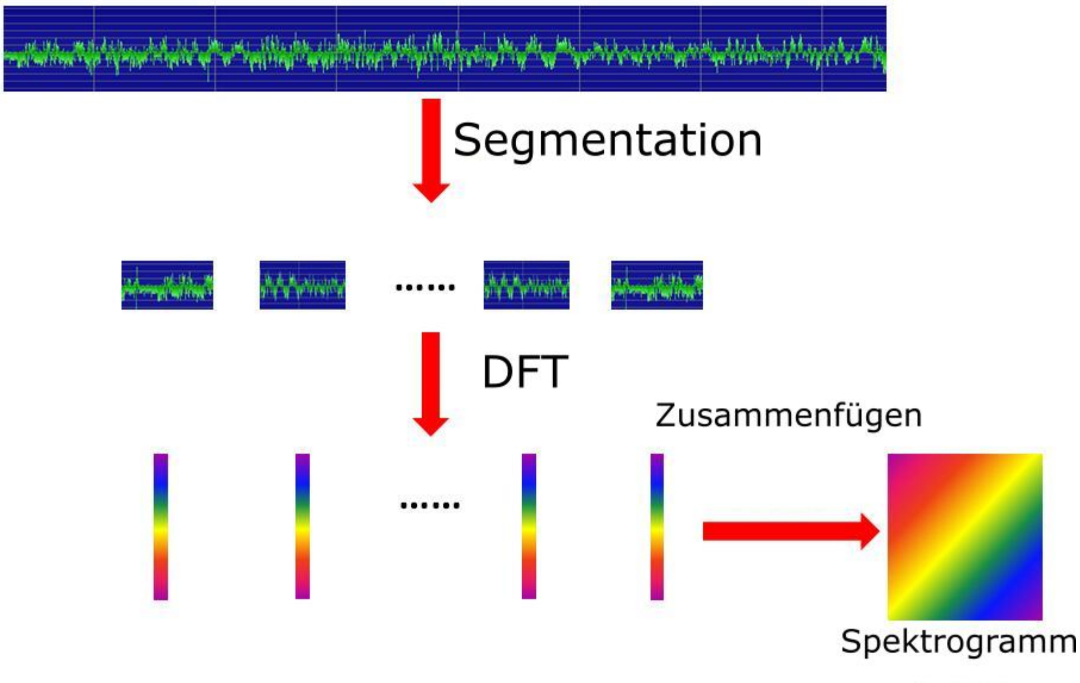


Bild 6 Die Funktionsweise der STFT

In folgender Analyse besteht jedes Einzelbild aus 512 Datenpunkten.

3.1 Ungleiche Fehlertypen

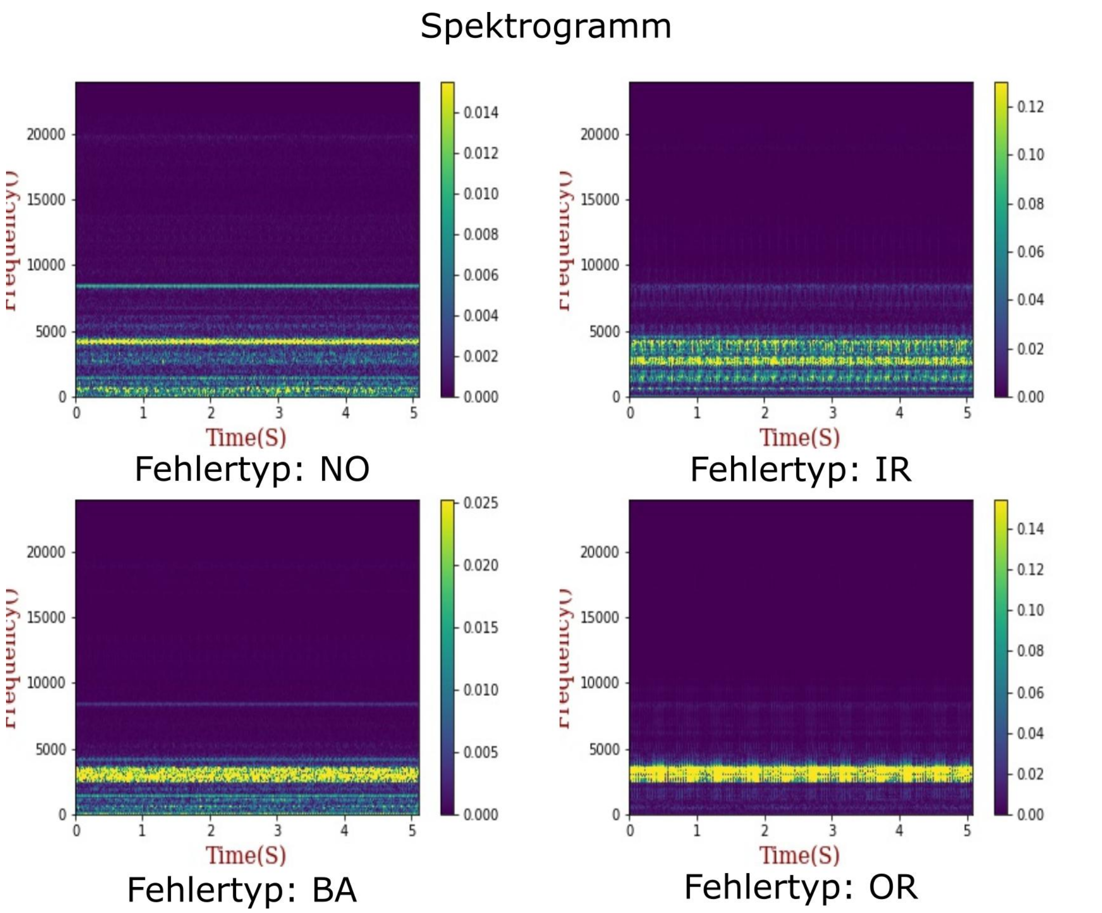


Bild 7 Ergebnis der STFT(Fehlertypen, NO-Normal, IR-Inner race, BA-Ball, OR-Outer race)

Das Spektrogramm zeigt auf:

Die Frequenzkomponenten des Schwingungssignals sind abhängig von dem Fehlertyp. Außerdem ändern sich die Frequenzkomponenten des Schwingungssignals vom Lager nicht deutlich.(ungefähr konstant)

3.2 Ungleiche Drehzahl

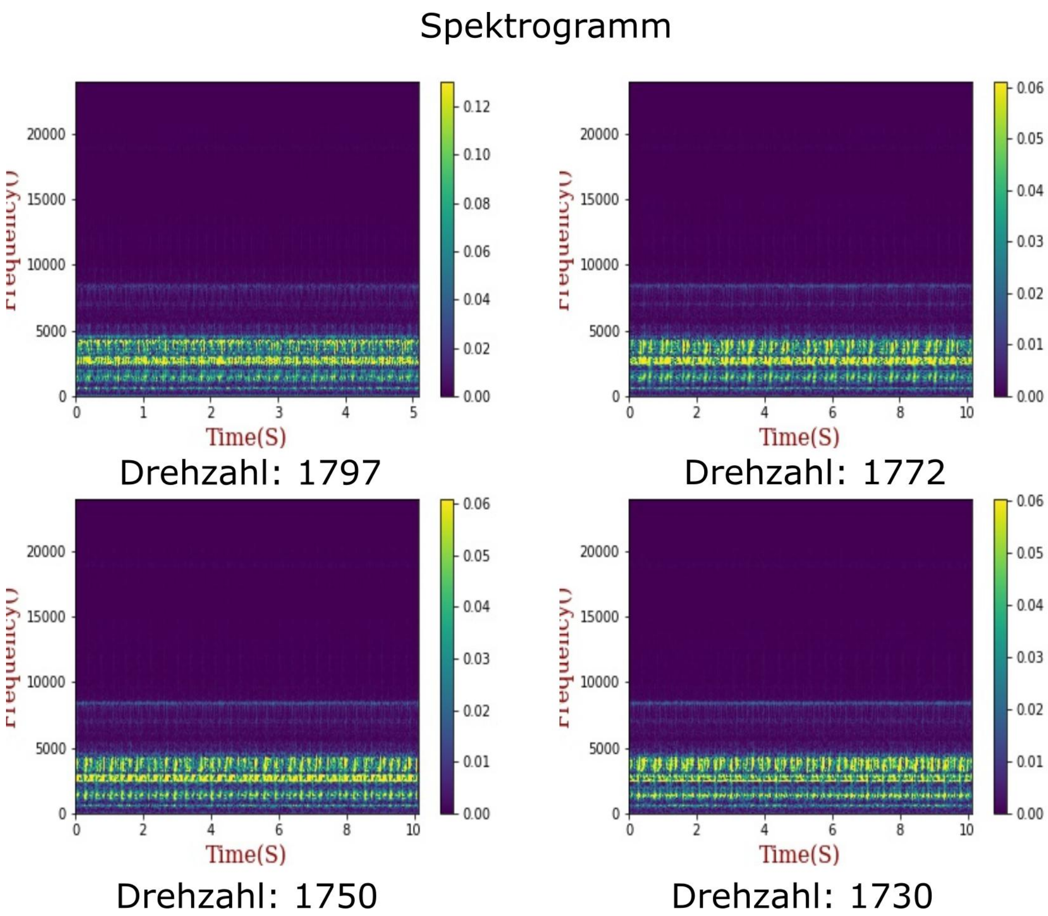


Bild 8 STFT unterschiedlicher Drehzahlen (gleiche Fehlertyp: IR)

Das Spektrogramm zeigt auf:

Die Frequenzkomponenten sind ähnlich in unterschiedlichen Drehzahlen. Die Zeit-Frequenzanalyse kann den Einfluss von der Drehzahl vermindern oder vermeiden.

3.3 Ungleiche Fehlerdurchmesser

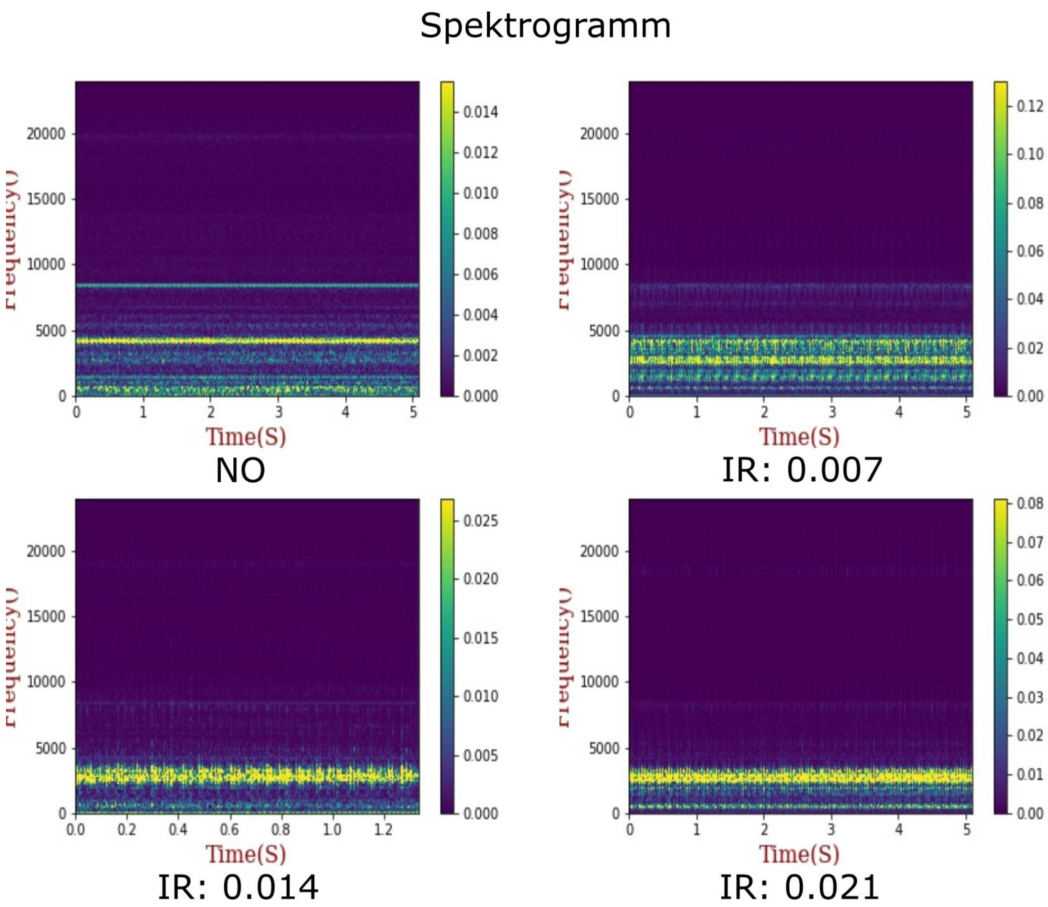


Bild 9 STFT der Fehler mit unterschiedlichen Durchmesser(NO-Normal, IR-Inner race)

Das Spektrogramm zeigt auf:

In gleicher Fehlertyp variieren die Frequenz-Merkmale unterschiedlicher Fehlerausmaße auch stark. Deshalb wird die Fehlerdiagnose mit dem Spektrogramm durch diesen Faktor gestört.

4. Zusammenfassung

Für einfaches Schwingungssignal mit kleiner Datenmenge funktioniert die Zeitbereichsanalyse sehr gut. Üblicherweise ist der Verarbeitungsprozess schnell und die Ergebnisse sind offensichtlich. Aber in der Praxis steigern sich die Komplexität mechanisches Systems und die Menge der zu verarbeitenden Signale sehr stark. Der Einsatz von der Zeitbereichsanalyse ist unmöglich.

Im Vergleich zu der Zeitbereichsanalyse ist der Verarbeitungsprozess der Frequenzanalyse effizienter und kann mehr Daten behandeln. Teilweise berücksichtigt die Frequenzanalyse die ganzheitliche Verteilung des Schwingugnssignals. Aber der zeitliche Faktor wird noch nicht in Betracht gezogen. Deshalb ist es nicht geeignet für die Analyse des zeitlich veränderlichen harmonischen Signals.

Die Zeit-Frequenz-Analyse kann die Verteilung der Frequenzkomponenten im Laufe der Zeit aufweisen. Die Schwingungssignale von meisten Fehlertypen können dadurch eingeteilt werden. Obwohl das Spektrogramm in verschiedenen Fehlertypen sich deutlich variiert, kann man den Fehlertyp noch schwierig mit bloßem Auge erkennen. Um die Fehlerdiagnose zu ermöglichen, wird die Zeit-Frequenz-Analyse deshalb normalerweise mit dem maschinellen Lernen kombiniert, welches eine Stärke in die Bilderkennung hat.

Zum Schluss kann das Ausmaß des Fehlers auch die

Zeit-Frequenz-Analyse basierende Fehlerdiagnose beeinflussen. Vielleicht kann der Einfluss durch das Deep-Learning vermindert oder vermieden. (das Fehlerausmaß durch die Ähnlichkeit unterschiedlicher Spektrogramme festlegen.)