

Frequenzanalyse

Praktischer Leitfaden zur Anwendung der
Frequenzanalyse

Ordnungsanalyse

Ordnungsanalyse

- Definition Ordnungsanalyse
- Beispiel
- Drehzahlerfassung
- Methode FFT
- Methode Ordnungs-FFT
- Methode Filter
- Zusammenfassung



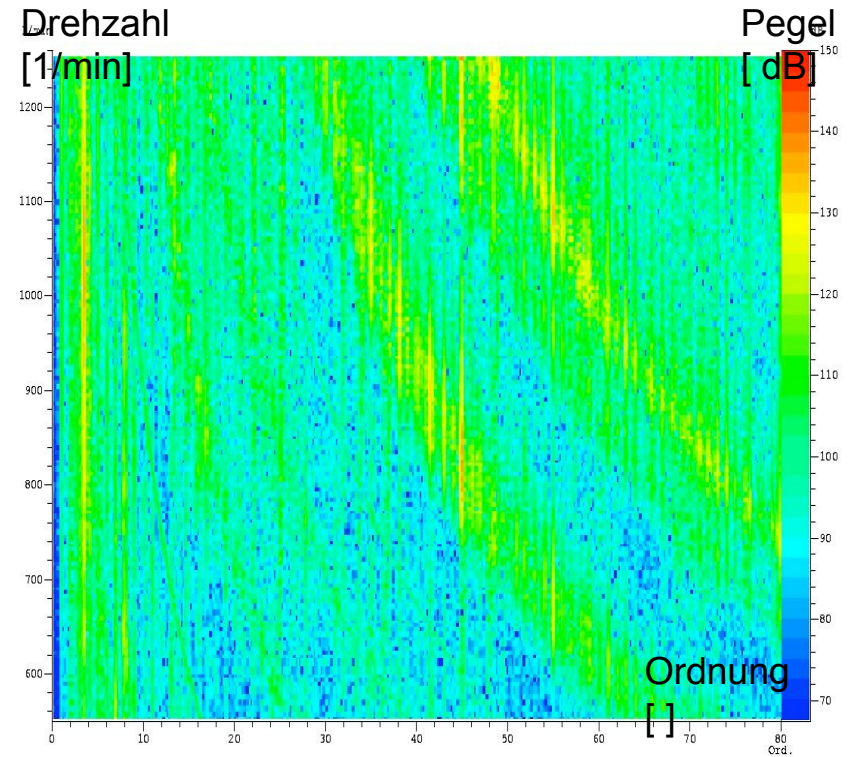
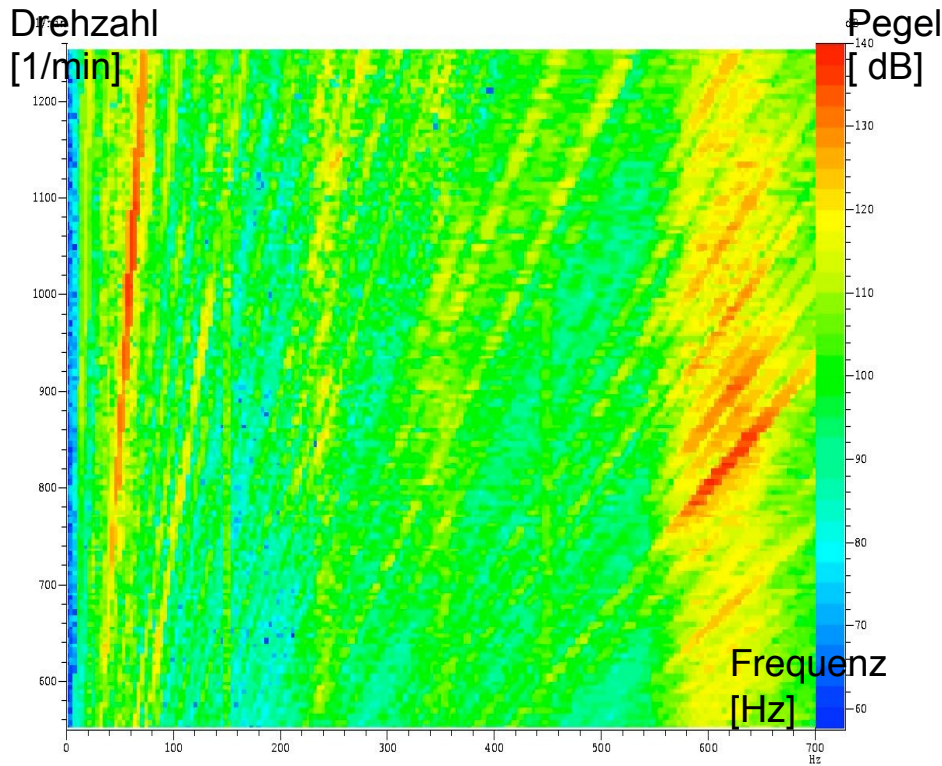
Ordnungsanalyse

Unter Ordnungsanalyse versteht man die Analyse von Drehfrequenzen und deren Vielfache.

Dabei handelt es sich um die Transformation der Frequenzanalyse aus der zeitlichen Ebene in die rotatorische Ebene.



Ordnungsanalyse



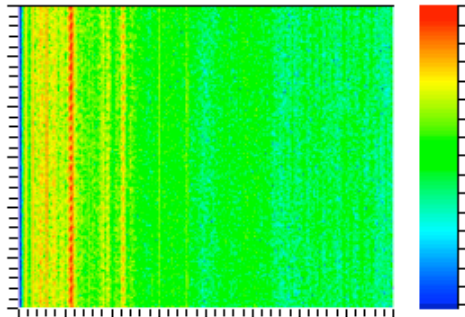
$$\text{FFT} * 1/ \text{Drehfrequenz} = \text{Ordnungs-FFT}$$

Frequenzanalyse \longrightarrow Ordnungsanalyse



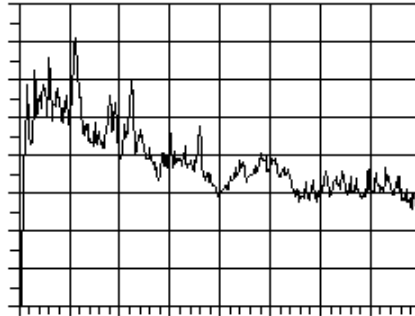
Ordnungsanalyse

Ordnungsspektrum (APS)
Mikrophon

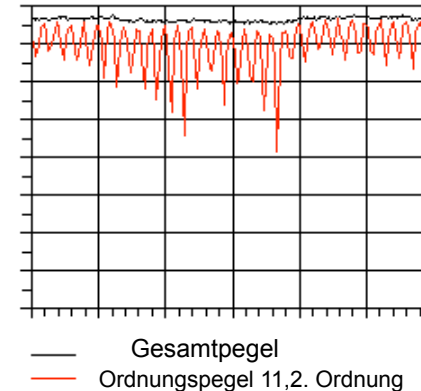


↑
22,4.
Ordnung
↑
11,2.
Ordnung

gemitteltetes Ordnungsspektrum
(APS) Mikrophon



zeitlicher Verlauf -
Mikrophon



Versuchsdaten:

- Konstantfahrt bei ca. 1600/min Motordrehzahl
- Fahrzeug auf einem Akustik-Rollenprüfstand mit Fahrmassensimulation
- Schalldruck gemessen mit einem Mikrophon an Beifahrerposition
- Motordrehzahlimpulse entnommen am Fahrzeugdiagnosestecker (OBDII)
- Prüfer fährt das Fahrzeug auf dem Prüfstand

Ergebnis:

Beanstandung bei 11,2. Ordnung



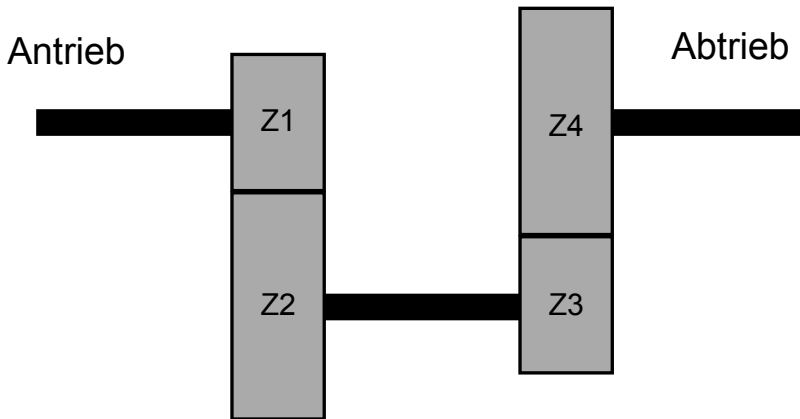
Ordnungsanalyse

11,2. Ordnung ?



Ordnungsliste

Bezogen auf die Antriebsdrehzahl (im Beispiel 1600 /min)



1. Ordnung (Drehfrequenz im Beispiel 26,67 Hz)
-> Unwucht Antriebswelle

24. Ordnung
(Zähnezahl Antriebsrad, 24fache Drehfrequenz i.B. 640 Hz)
-> Verzahnungsordnung

0,533. Ordnung (Drehfrequenz Zwischenwelle i.B. 14,2 Hz)
-> Unwucht / Exzentrizität der Zwischenwelle

11,2. Ordnung
(Drehfrequenz Zwischenwelle * Zähnezahl i.B. 298,67 Hz)
-> Verzahnungsordnung der 2. Getriebestufe

0,26. Ordnung (Drehfrequenz Abtriebswelle i.B. 6,9 Hz)
-> Unwucht / Exzentrizität Abtriebswelle

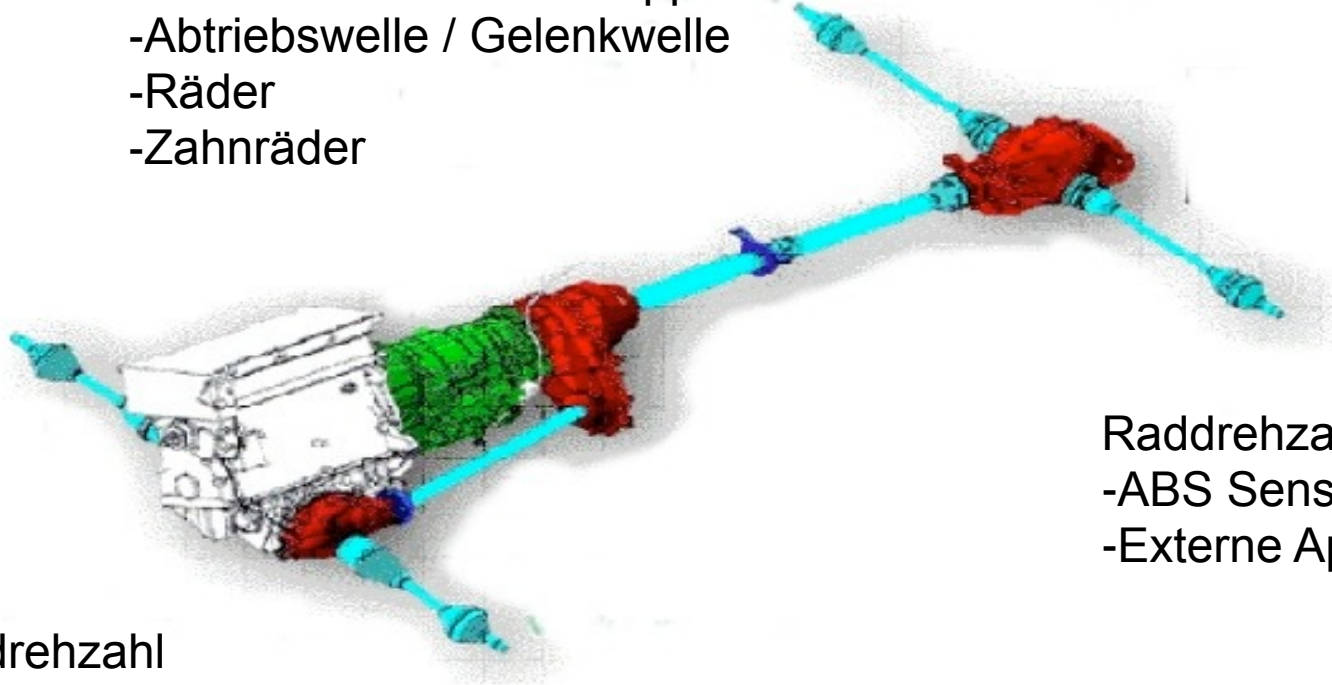
Zahnrad	Z1	Z2	Z3	Z4
Nr. Zähne	24	45	21	43



Drehzahlerfassung

Drehzahl aus externer Applikation

- Abtriebswelle / Gelenkwelle
- Räder
- Zahnräder



Raddrehzahlsignal

- ABS Sensoren
- Externe Applikation

Motordrehzahl

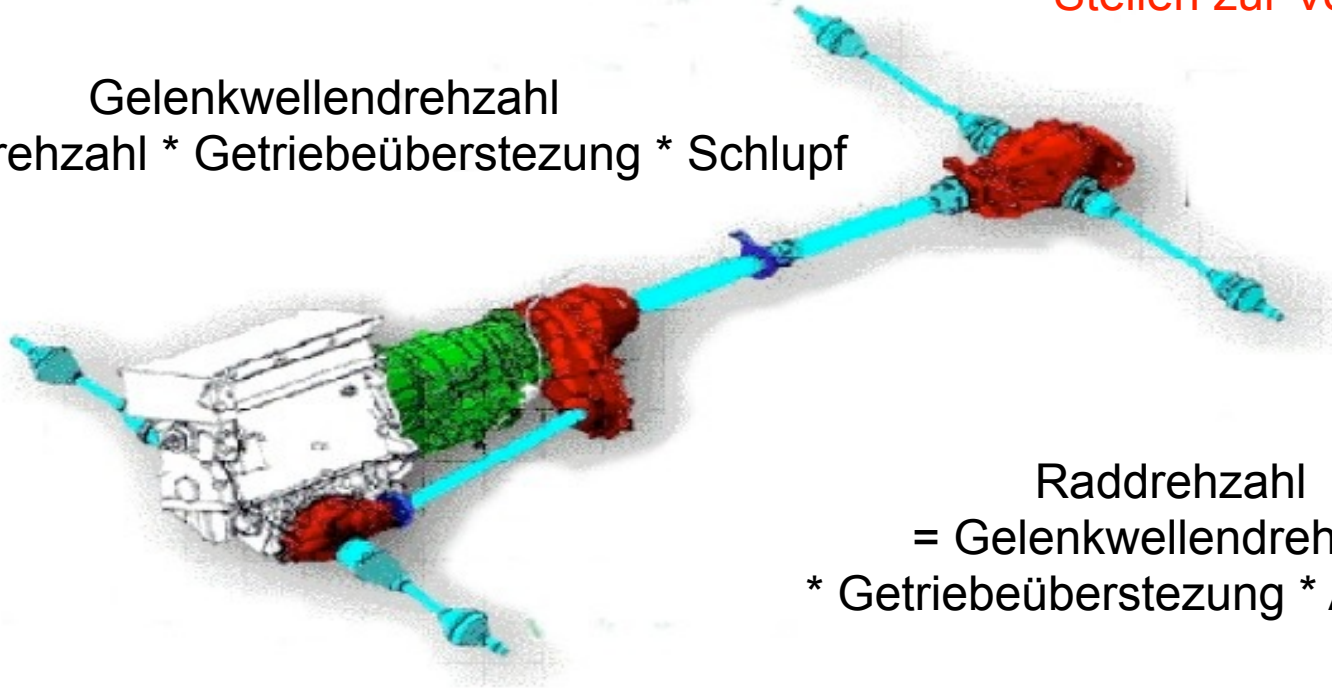
- OBDII Stecker
- CAN Bus



Drehzahlerfassung

Es stehen nur in wenigen Fällen gute Drehzahlmessstellen zur Verfügung

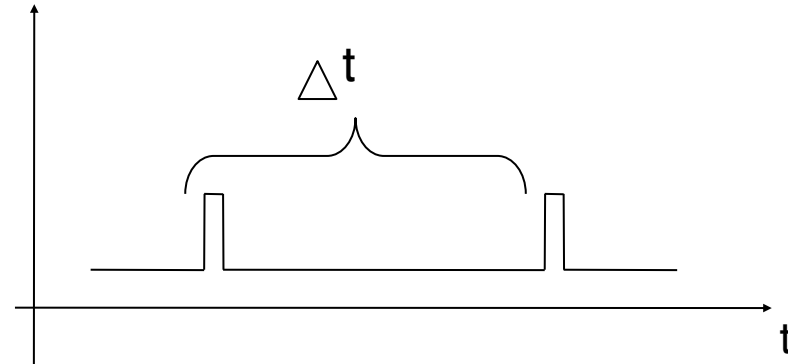
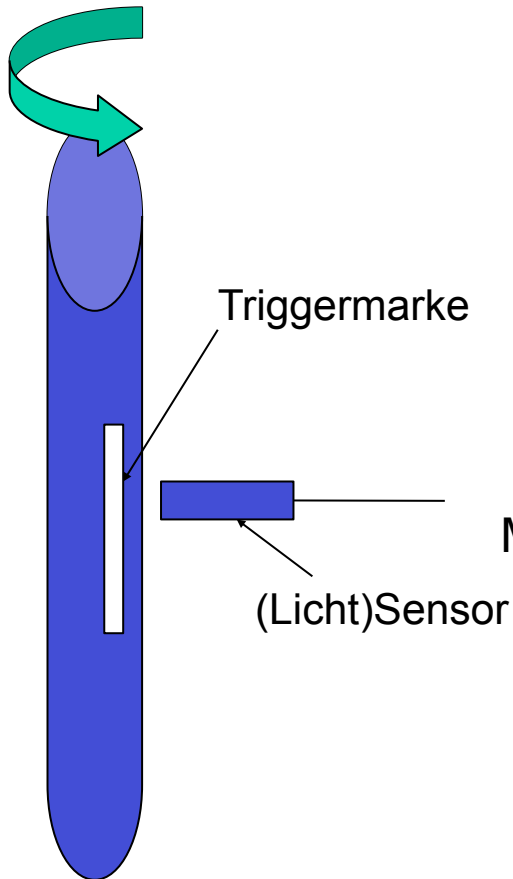
Gelenkwellendrehzahl
= Motordrehzahl * Getriebeüberstezung * Schlupf



Raddrehzahl
= Gelenkwellendrehzahl
* Getriebeüberstezung * Ausgleich



Drehzahlerfassung



Messung der Periodenzeit zwischen zwei Impulsen

(Drehfrequenz) $f = \text{Impulsanzahl} / \text{Periodenzeit}$



Drehzahlerfassung / Fehlerbetrachtung

Stationär (keine Drehzahlveränderung)

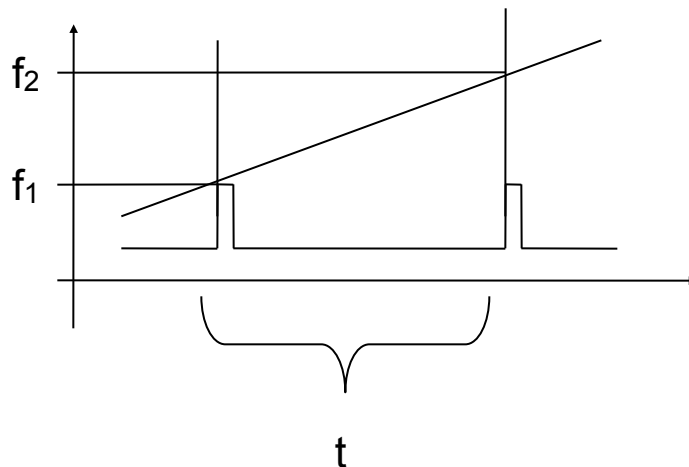
- Fehler proportional der Zeitmessgenauigkeit
- Mit mehr als 1 Impuls / Umdrehung
zzgl. Teilungsfehler der Impulsmarken



Drehzahlerfassung / Fehlerbetrachtung

Instationär (mit Drehzahlveränderung)

$$f_2 = f_1 + t * df/dt$$



Drehzahlerfassung / Fehlerbetrachtung

Instationär (mit Drehzahlveränderung)

Tendenziell wird im instationären Fall die Drehzahl zu niedrig bzw. zu hoch berechnet, da zum Zeitpunkt des Stopimpulses die Drehzahl höher/niedriger ist als zum Startimpuls.

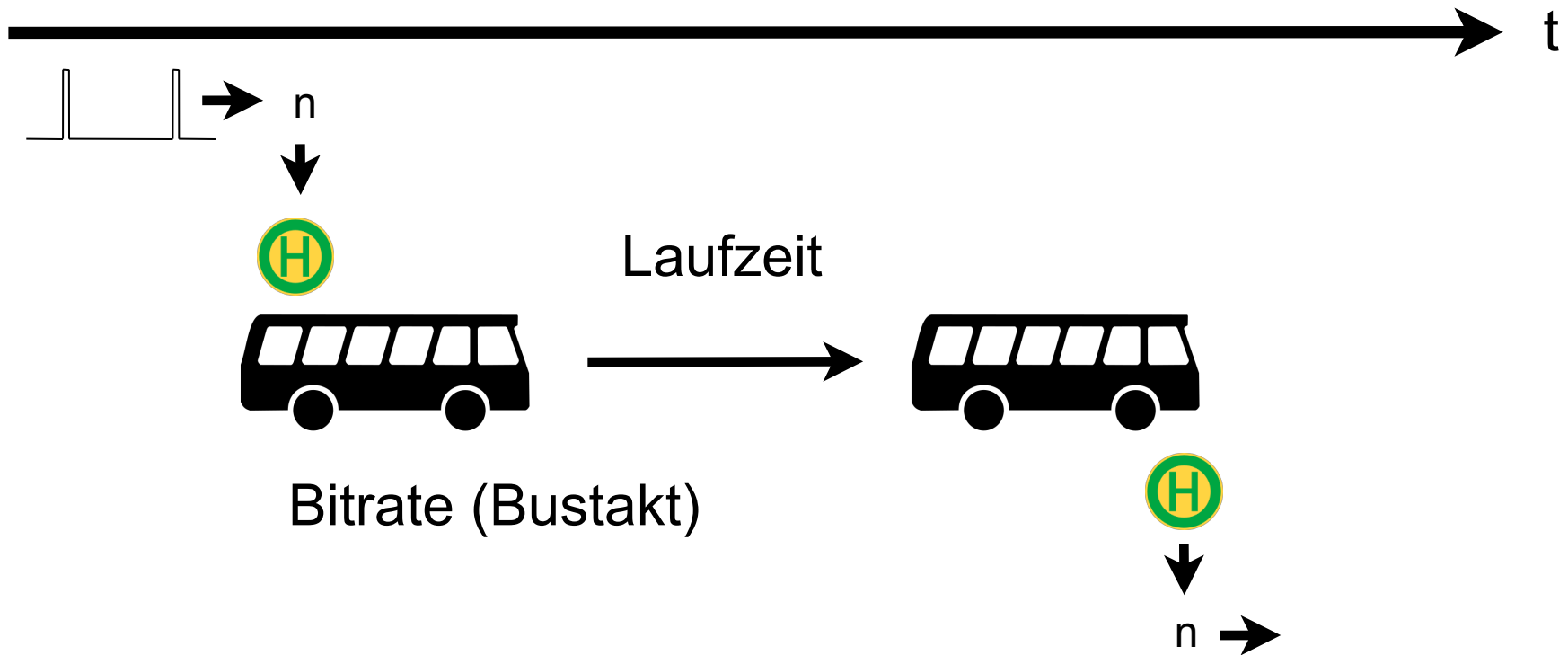
Bei beschleunigten Vorgängen ist die Drehzahl tendenziell zu niedrig, bei verzögerten zu hoch.

Der Drehzahlfehler ist umgekehrt proportional zur Anzahl der Impulsmarken.



Drehzahlerfassung / CAN-Bus

Messdatenüberlassung



Drehzahlerfassung / Fehlerbetrachtung

Fehlermöglichkeiten:



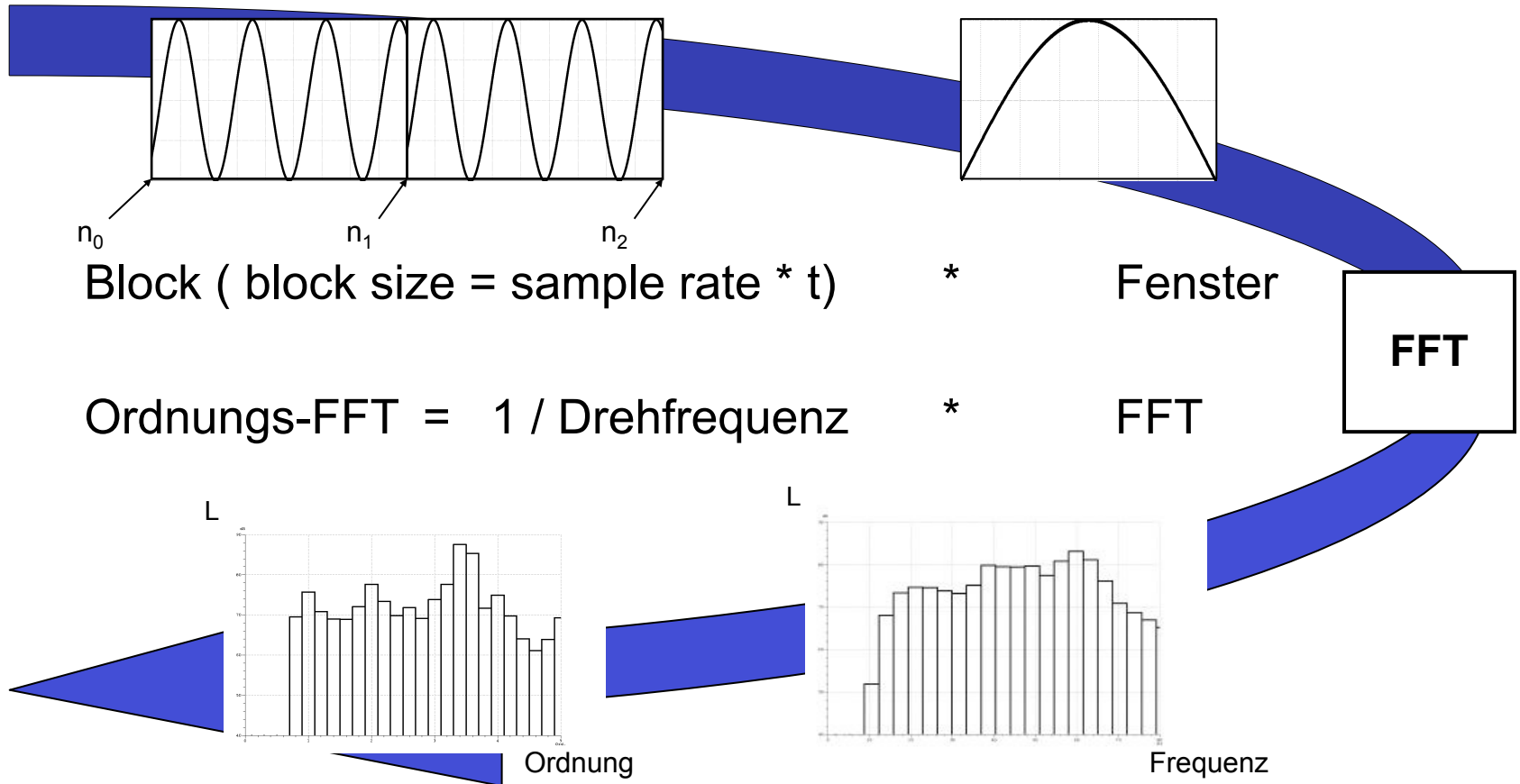
Drehzahlerfassung / Fehlerbetrachtung

Fehlermöglichkeiten:

- Teilungsfehler der Impulsmarken
- Impulslücken
- Doppelimpulse
- Drehfrequenzänderung während der Zeitmessung zwischen den Impulsmarken
- Delay zwischen Drehzahlmessung und Zuordnung zum Messdatenstrom
- Schlupf
- Ausgleich zweier gekoppelter Wellen (Fahrzeugantrieb)



Ordnungsanalyse: Methode FFT



Ordnungsanalyse: Methode FFT

(quasi) stationärer Fall

n_0 nahe n_1 → keine oder nur geringe Drehfrequenzänderung

FFT * 1 / Drehfrequenz → Ordnungs FFT

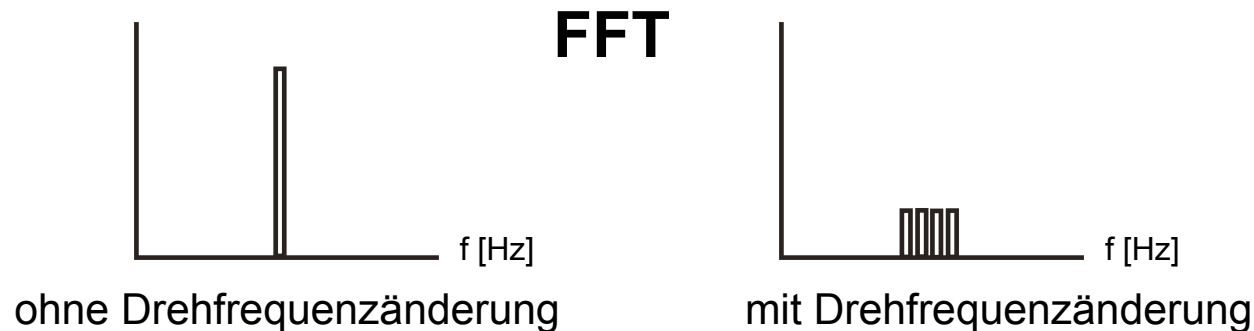


Ordnungsanalyse: Methode FFT

instationärer Fall

$n_0 \neq n_1$ → Drehfrequenzänderung

→ Frequenzänderung der zu betrachtenden Ordnung
(Ordnungsnummer * Drehfrequenzänderung)



Ordnungsanalyse: Methode FFT

Frequenzbandbreiten und die dazu erforderlichen Blockgrößen der FFT am Beispiel 20. Ordnung

Ordnungsauflösung	900 /min = 15 Hz 20.Ord = 300 Hz	6000/min = 100 Hz 20.Ord = 2000 Hz
0,1	1,5 Hz Blockzeit 667 ms	10 Hz Blockzeit 100 ms
0,2	3 Hz Blockzeit 333 ms	20 Hz Blockzeit 50 ms
0,5	7,5 Hz Blockzeit 133 ms	50 Hz Blockzeit 20 ms
1	15 Hz Blockzeit 67 ms	100 Hz Blockzeit 10 ms



Ordnungsanalyse: Methode FFT

Annahme:

Um (einigermaßen) pegelrichtige Analysewerte zu erhalten, sollte die Frequenzänderung des zu analysierenden Signals max. die Hälfte der Linienbreite der FFT betragen.

Selbst diese Annahme stellt nicht sicher, dass es zu keiner Signalverteilung auf mehrere FFT-Linien kommen kann. Diese Annahme stellt lediglich eine Mininalforderung dar.



Ordnungsanalyse: Methode FFT

Berechnung der erforderlichen FFT-Linienbreite für eine Ordnungsanalyse auf Basis der FFT

Frequenzänderung für eine gegebene kontinuierliche Rampe z.B. Drehzahlhochlauf

$$df = (n_2 - n_1) / 60t \text{ in } 1/s^2$$

Frequenzänderung der Ordnung

$$df_{\text{Ord.}} = n_{\text{Ord.}} * (n_2 - n_1) / 60t \text{ in } 1/s^2$$



Ordnungsanalyse: Methode FFT

Berechnung der erforderlichen FFT-Linienbreite für eine Ordnungsanalyse auf Basis der FFT

Mit Δf der FFT-Linienbreite in 1/s, Δt der Blocksize in s und der Annahme, dass $\Delta f/2 > \Delta t * df_{\text{Ord.}}$ sowie dem Zusammenhang $\Delta f = 1/\Delta t$

$$df_{\text{Ord.}} < \Delta f^2/2$$

bzw.

$$\Delta f > \sqrt{2 * df_{\text{Ord.}}}$$



Ordnungsanalyse: Methode FFT

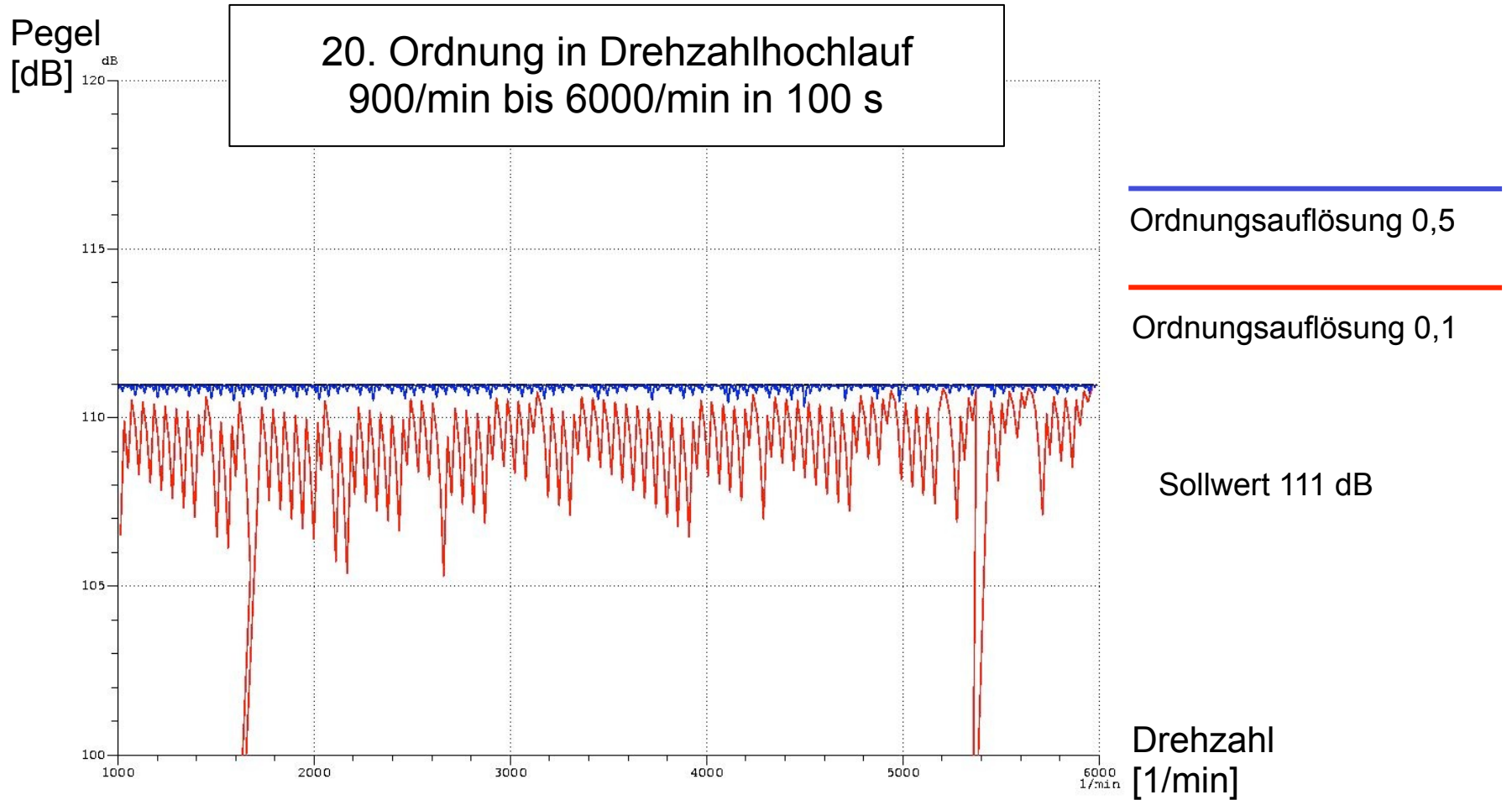
Drehzahländerung am Beispiel einer 20. Ordnung

- Drehzahlhochlauf 900/min bis 6000/min in 100s
- Drehfrequenzänderung $0,85 \text{ s}^{-2}$
- Frequenzänderung der 20. Ordnung 17 s^{-2}
- Drehzahlsignal mit 2 Impulse / Umdrehung

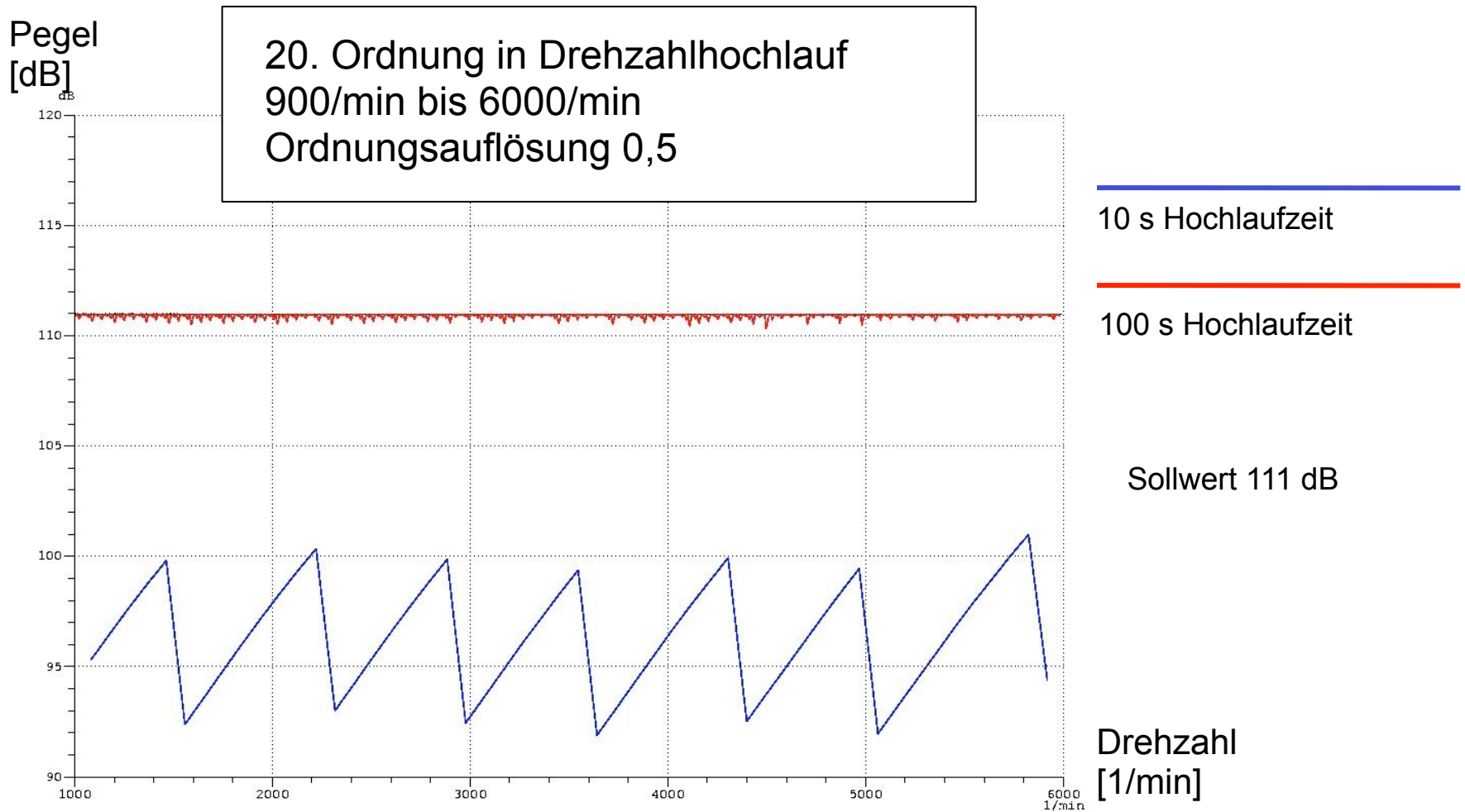
$$\text{s}^{-2} \blacktriangleright \text{Hz/s}$$



Ordnungsanalyse: Methode FFT



Ordnungsanalyse: Methode FFT



Ordnungsanalyse: Methode FFT

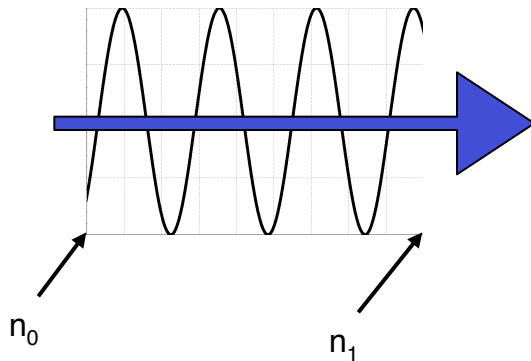
Zusammenfassung

- Für den stationären Fall ergibt die Multiplikation der FFT mit $1 / \text{Drehfrequenz}$ ein gültiges Ergebnis.
- Für den instationären Fall ist dies nicht gegeben. Es ist von Fall zu Fall abzuwägen, ob die erreichbare Genauigkeit und Reproduzierbarkeit ausreichend ist.

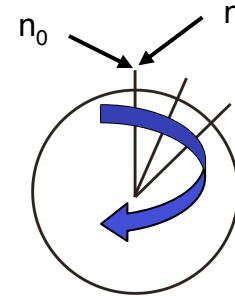


Ordnungsanalyse: Methode Ordnungs - FFT

Bei der Ordnungs-FFT oder Ordertracking werden die einzelnen Samples so verteilt bzw. gemessen, dass sie einen festen Drehwinkelbezug haben.



Blocklänge [s]



Blocklänge[Umdrehung]

Mathematisch ist die Methode Ordnungs-FFT und die Methode FFT gleich.

Aufgrund der Drehwinkelsynchronität ist das FFT-Ergebnis der Ordnungs-FFT die vielfache der Drehfrequenz.



Ordnungsanalyse: Methode Ordnungs - FFT

Drehsynchronität der Samples

- externes Sampling
 - Impulsgeber der für jeden Sample dem A/D Wandler einen Trigger gibt.
- internes Resampling
 - Der Datenstrom des A/D Wandlers (Samples / s) wird mittels Resampling auf Drehsynchronität (Samples / φ) gebracht.

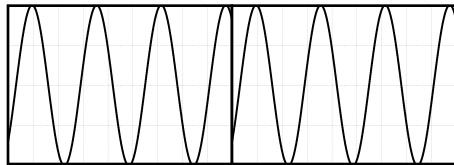
Beide Verfahren erfordern eine entsprechend genaue Drehwinkelinformation.



Ordnungsanalyse: Methode Ordnungs - FFT

Fensterung

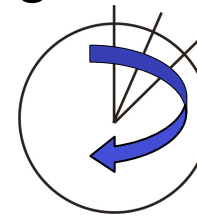
FFT



Blocklänge = Vielfache der Zeit

Fensterung:
Hanning, Flattop, ...

Ordnungs-FFT

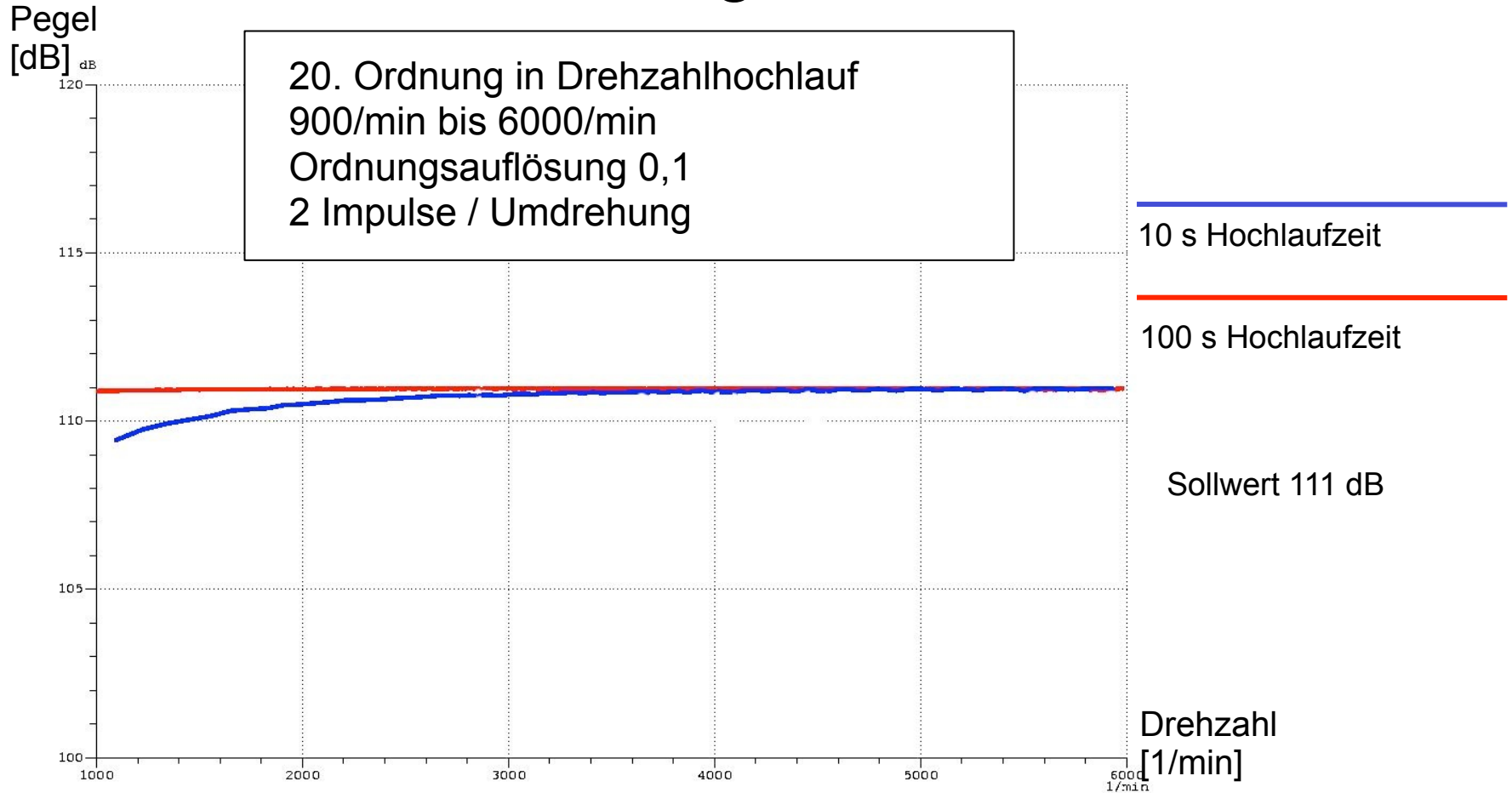


Blocklänge = Vielfache der Umdrehung

Fensterung:
Rechteck (bei direktem Drehwinkelbezug)
Hanning, Flattop, ...



Ordnungsanalyse: Methode Ordnungs - FFT



Ordnungsanalyse: Methode Ordnungs - FFT

Zusammenfassung

- Hohe Genauigkeit in der Drehsynchronität der einzelnen Samples vorausgesetzt, ergibt die Methode Ordnungs-FFT stationär wie instationär ein gültiges Ergebnis.
- Auch hier hat die Drehfrequenzänderung einen Einfluß auf das Ergebnis.
 - wenn die Drehwinkelinformation mit wenigen Impulsen je Umdrehung ermittelt wird
 - wenn ein zu großer Teilungsfehler vorliegt



Ordnungsanalyse: Methode Filter

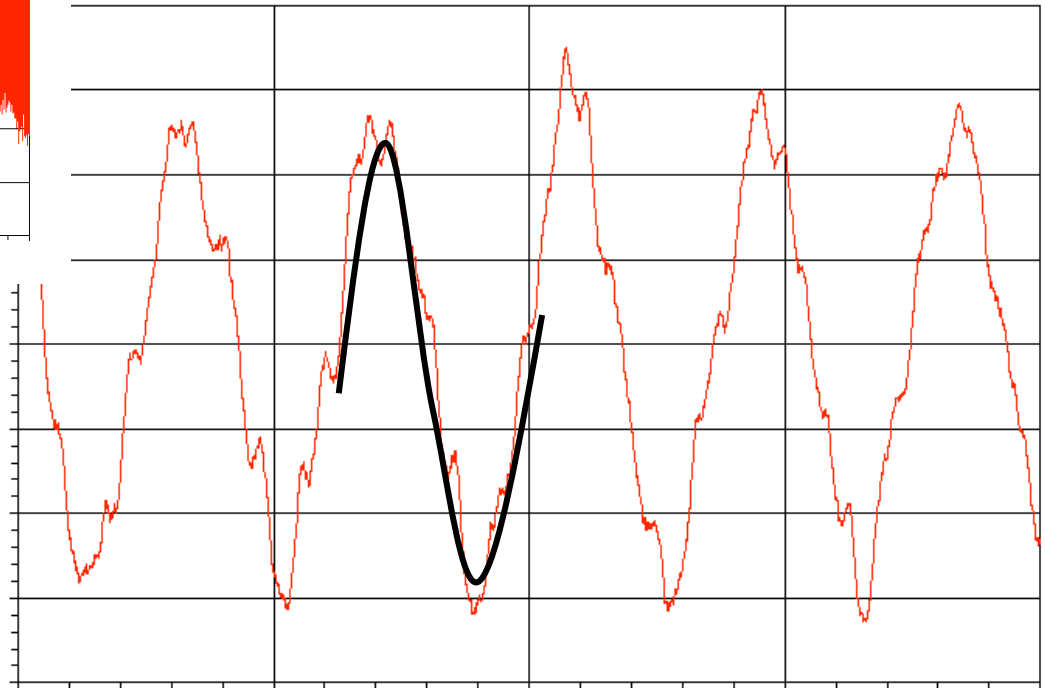
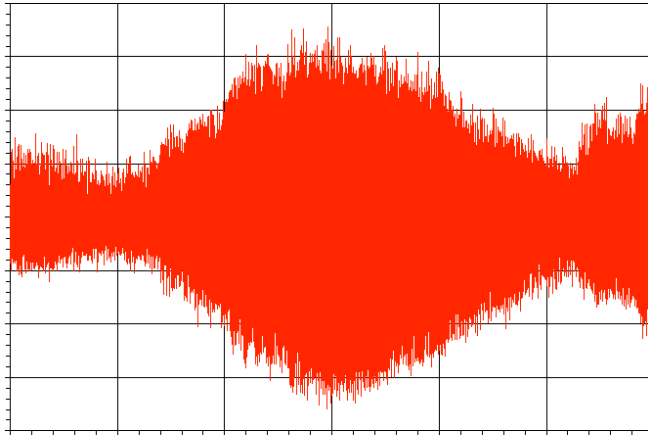
Kalmanfilter

Sinus / Cosinus Approximation des Zeitsignals
Methode ähnelt dem analogen Mitlauffilter

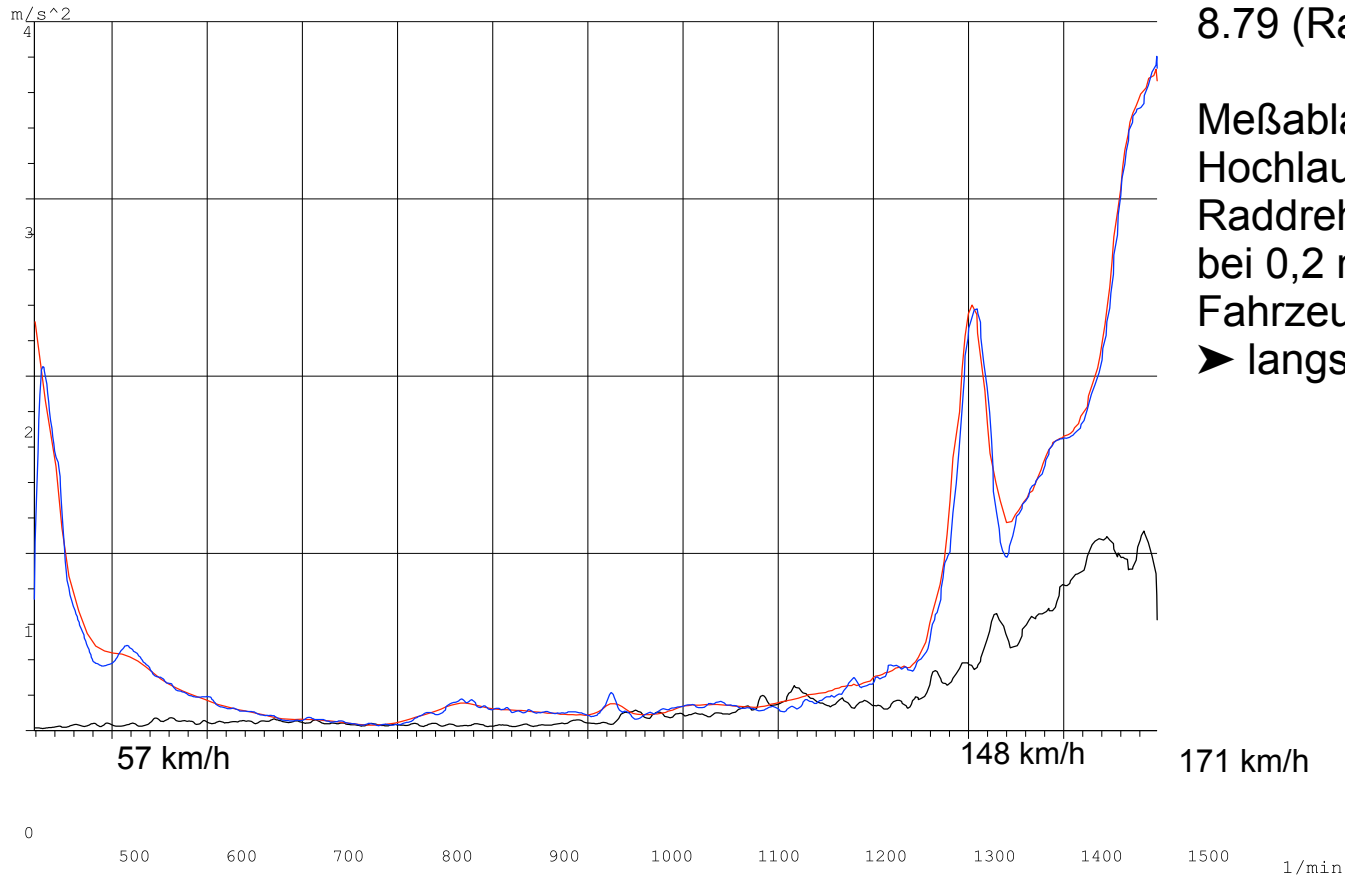
Vorteil	Nachteil
schneller Algorithmus geeignet auch für sehr schnelle Drehfrequenzänderungen	Bandbreite die zu analysierende Ordnung muss dominant sein



Ordnungsanalyse: Methode Filter



Zusammenfassung



Körperschallsignal
8.79 (Rad)Ordnung

Meßablauf:
Hochlauf 0 bis 1500/min
Raddrehzahl
bei 0,2 m/s^2
Fahrzeugbeschleunigung
► langsame Beschleunigung

FFT 6HZ Bandbreite

Ordnungs-FFT
0.1 Ord. Bandbreite

Kalman Filter
0.1 Ord. Bandbreite

