

GfM Gesellschaft für Maschinendiagnose mbH

# Messbericht

Auftraggeber: ###-GmbH  
Ansprechpartner: ###  
Maschine: 4. Presse PM  
Messobjekte: ###  
Inspektionsart: Drehmoment- und Schwingungsmessung  
Messdatum: ###  
Messtechnik: PeakStore und Zubehör, Famos®, datatel®, PCB  
Sachbearbeiter GfM: ###  
GfM Nr.: Q0131  
Anzahl Seiten.: ###

Berlin, den ###

*(Dipl.-Ing. Axel Haubold)*

---

Hinweise zu Messverfahren und Abkürzungen finden Sie unter [www.maschinendiagnose.de/diagnosebericht](http://www.maschinendiagnose.de/diagnosebericht) oder kann angefordert werden.

Alle im Bericht getroffenen Aussagen basieren ausschließlich auf einem der Messzeit entsprechenden Zeitfenster des Schwingungssignals. Somit sind Unregelmäßigkeiten nachweisbar, welche entsprechend der Bauart und Wirkungsweise der Anlage untypische Schwingungen hervorrufen. Unregelmäßigkeiten an Verzahnungen sind lediglich bei ausreichendem Kraftfluss nachweisbar. Der Nachweis von Lagerunregelmäßigkeiten gelingt, wenn diese lokalen Charakter besitzen und ausreichend kraftschlüssig von den Wälzkörpern überrollt werden.

Zu den nachgewiesenen Unregelmäßigkeiten werden allein auf Basis des Schwingungssignals Empfehlungen getroffen und soweit möglich eine Ausfallwahrscheinlichkeit angegeben. Für die genauere Quantifizierung von Unregelmäßigkeiten sind ggf. weitere Prüfverfahren anzuwenden.

---

## 0 Inhalt

1	Ausgangssituation .....	3
2.	Herangehensweise .....	3
2.1	Kinematische Zusammenhänge .....	3
2.2	Datenerfassung .....	4
2.3	Drehzahl .....	7
3	Messergebnisse .....	8
3.1	Zeitbereich .....	8
3.2	Frequenzselektive Analyse .....	11
4	Zusammenfassung und Interpretation .....	13
4.1	Leistungsaufnahme .....	13
4.2	Torsionsschwingungen, Getriebegehäuseschwingungen .....	13
5	Anlagenverzeichnis .....	13

Musterbericht

# 1 Ausgangssituation

Befestigungsschrauben des Getriebes (des Zahnrades im Walzenmantel) der unteren Walze der 4. Presse weisen einen Dauerbruch auf. Mit einer Drehmomentmessung soll die Belastung am Getriebeeingang (Gelenkwelle) erfasst werden.

## 2. Herangehensweise

### 2.1 Kinematische Zusammenhänge

Die frequenzselektive Schwingungsdiagnose beruht im Wesentlichen darauf, daß die Frequenzspektren der Schwingungssignale auf Fehlermerkmale untersucht werden. Insofern muss die Kinematik der Maschine zuvor bekannt sein. Die theoretischen Bewegungsverhältnisse (Kinematik) sind daher in der Tabelle 1 und 2 im Überblick dargestellt. Die Tabellen enthalten die Darstellung der Kinematik für die Papiergeschwindigkeitsstufe, in denen die Maschine zur Messzeit gefahren wurde.

Tabelle 1: Kinematik (theoretisch). Gelb - Eingaben, fett - Frequenzen in Hz, Papiergeschw. ca.1545 m/min,

Zähnezahl Ritzel	42
Zähnezahl Rad	80
Drehzahl Ritzel:	1075
Drehzahl Rad:	564,375
Drehfr. Ritzel i.Hz:	<b>17,9167</b>
Drehfr. Rad i.Hz:	<b>9,4063</b>
Zahneingriff in Hz	<b>752,500</b>

Papiergeschwindigkeit  
1544,775

Tabelle 2: Kinematik (theoretisch). Gelb - Eingaben, fett - Frequenzen in Hz, Papiergeschwindigkeit ca.1810 m/min,

Zähnezahl Ritzel	42
Zähnezahl Rad	80
Drehzahl Ritzel:	1260
Drehzahl Rad:	661,500
Drehfr. Ritzel i.Hz:	<b>21,0000</b>
Drehfr. Rad i.Hz:	<b>11,0250</b>
Zahneingriff in Hz	<b>882,000</b>

Papiergeschwindigkeit  
1810,62

Tabelle 3: Kinematik (theoretisch). Gelb - Eingaben, fett - Ordnungen

Zähnezahl Ritzel	42
Zähnezahl Rad	80
Drehzahl Ritzel:	60
Drehzahl Rad:	31,500
Drehfr. Ritzel i.Hz:	<b>1,0000</b>
Drehfr. Rad i.Hz:	<b>0,5250</b>
Zahneingriff in Hz	<b>42,000</b>

## 2.2 Datenerfassung

### 2.2.1 Gehäuseschwingungen

Die Messung der Gehäuseschwingungen erfolgt mit magnetisch befestigten Beschleunigungsaufnehmern am Walzengetriebe, rechts neben der Eingangswelle in axialer, horizontaler und vertikaler Richtung. Der Frequenzbereich beträgt 0,7 bis 2000 Hz (-3dB).

### 2.2.2 Drehmoment

Die Messung des Drehmoments erfolgt mittels Dehnmessstreifen (DMS) in Vollbrückenschaltung an der Gelenkwelle zwischen Motor und Getriebe des Nipcowalzenantriebs. Die DMS vom Typ CEA-06-187UV-350 (Fa. Measurement Group) werden gegenüberliegend so angeordnet (siehe Bild 2) und elektrisch verschaltet, dass sich thermische, Biege-, Druck- und Zugspannungen kompensieren.

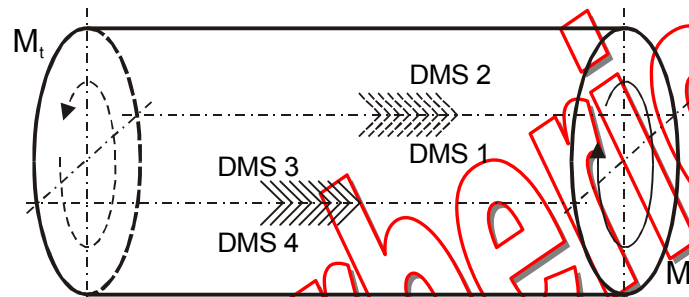


Bild 1: Anordnung der DMS auf der Welle

Das Verhältnis von Brückenausgangsspannung und Drehmoment lässt sich bei der Vollbrücke wie folgt angeben:

$$\frac{U_M}{U_0} = \frac{8 \cdot k \cdot d_A}{G \cdot \pi \cdot (d_A^4 - d_I^4)} M_t \quad \text{mit}$$

$U_M$  - Messspannung

$U_0$  - Brückenspeisespannung

$k$  -  $k$ -Faktor des DMS

$G$  - Schubmodul (Gleitmodul) des Wellenwerkstoffes

$d_A$  - Außendurchmesser der Welle

$d_I$  - Innendurchmesser der Welle.

Die Kalibrierung der gesamten Messkette erfolgt mittels Dehnungssimulation durch eine Änderung des elektrischen Widerstands der Messbrücke. Dazu wird jedem Dehnmessstreifen ein Präzisionswiderstand parallel geschaltet (Shunten). Der Zusammenhang zwischen Widerstand und Drehmoment ergibt sich wie folgt:

$$R_p = \frac{G \cdot \pi \cdot (d_a^4 - d_i^4)}{32 \cdot d_a \cdot k \cdot M_t} \cdot R + R.$$

mit

$R_p$  - Shunt,

$R$  - elektrischer Widerstand des DMS.

Die Messbrücke wird auf ein positives Signal bei treibender rechtsdrehender Messwelle kalibriert. Die bei der Kalibrierung verwendeten physikalischen Größen und die Annahmen zur Messbereichsbestimmung sind in Tabelle 4 zusammengefasst.

Die Messsignalübertragung erfolgt berührungslos mit einer Telemetrie. Der Frequenzbereich beträgt 0 - 1000 Hz. Die Spannungsversorgung der Messbrücke und des Senders wird mit Batterien realisiert. Die Daten werden mit 5 kHz digitalisiert und von einem Mess-PC aufgezeichnet.

Musterbericht

## Kalibrierprotokoll für Drehmomentmeßbrücken mit 4 aktiven DMS

Kunde:  
Anlage:

### Meßobjektdaten

Nennleistung	P_nenn =	550,0000	KW
Nenndrehzahl	n_1 =	1240,0000	1/min
Nennmoment	T_nenn =	4,2356	KNm
Stoßfaktor	M_max/M_nenn =	5,0000	
Maximalmoment	M_max =	21,1779	KNm
Festigkeit	G =	80000,0000	N/mm <sup>2</sup>
Außendurchmesser	D =	217,0000	mm
Innendurchmesser	d =	187,1000	mm

### Brückenparameter

DMS-Widerstand	R_DMS =	350,0000	Ohm
DMS-K-Faktor	K =	2,0650	
Brückenspannung	U_0 =	5,0000	V
Meßspannung	U_M =	0,3045	mV
maximale Meßspannung	U_M_max =	1,5227	mV
normierte max. Meßspg.	U_M_max / U_0 =	0,3045	mV/V

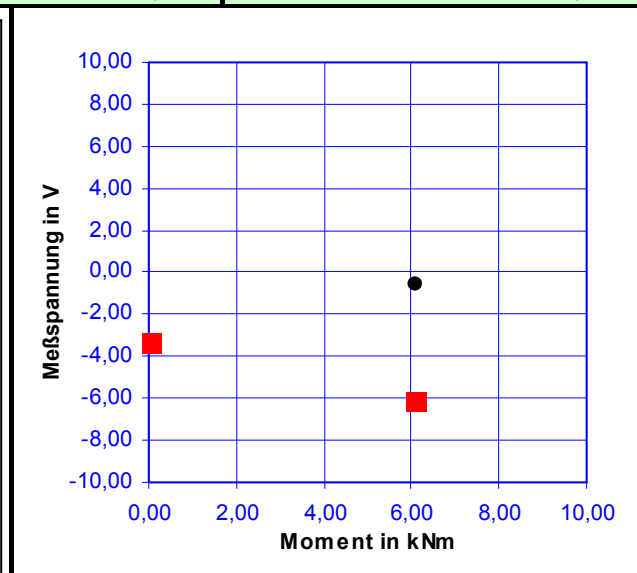
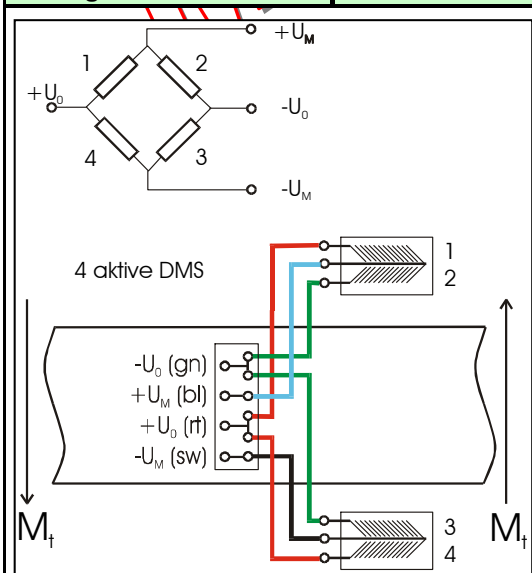
### Shunten

Moment	0,0000	T_nenn/2	T_nenn	2*T_nenn
R_soll in Ohm	0,0000	2873958,2345	1436979,1172	718489,5586
R_ist in Ohm	0,0000	1000000,0000	1000000,0000	680000,0000
Moment in kNm	0,0000	6,0828	6,0828	8,9439
in % von T_nenn	0,0000	143,6126	143,6126	211,1603

### Kalibrierspannungen

1 (bl-rt)	-3,3300		-0,5450	
2 (gn-bl)	-3,3300		-6,1000	
3 (gn-sw)	-3,3300		-0,5460	
4 (sw-rot)	-3,3300		-6,1100	
Mittelwerte	-3,3300	3,3300	2,7798	3,3300

**Anzeigenkorrektur:** Faktor: **2,1883** Offset: **7,2869**



### 2.3 Drehzahl

Die Drehzahl wird optisch an der Gelenkwelle erfasst. Die Papiergeschwindigkeit entspricht bei einem Walzendurchmesser von  $d = 871 \text{ mm}$ ,  $v_{\text{Papier}} = 1,437 * n_{\text{Motor}}$ .

### 2.4 Datenanalyse

Die Beurteilung von Hochlauf- und Auslaufvorgängen an Maschinen erfolgt mittels Wasserfalldarstellungen (Frequenzspektren, Ordnungsspektren über der Zeit). Der zweidimensionalen Darstellungsmöglichkeit folgend wird das Spektrfeld in der Frequenz-Zeit-Ebene abgebildet. Die Amplituden (dritte Dimension) werden teilweise logarithmisch skaliert und eingefärbt. Die Auflösung der Frequenz-Zeit-Ebene muss für den Vergleich verschiedener Messungen identisch sein. Das ergibt sich insbesondere aus der Auflösung und Amplitudenskalisierung der FFT. Die FFT wird aus einem endlichen Schwingungssignal gebildet. Die Amplitude im Frequenzbereich repräsentiert den Mittelwert der entsprechenden Amplitude im Zeitsignal während der Messdauer. Da bei Hoch- und Auslaufvorgängen die Erregerschwingungen variieren, verteilt sich der Energieinhalt der Schwingung über mehrere Peaks im Spektrum. Und ein Peak repräsentiert in Abhängigkeit von der Auflösung möglicherweise zwei Erregerfrequenzen. Die logarithmische Amplitudenskalisierung entspricht dem Bereich vom Rauschen zum maximalen Peak im Darstellungsbereich.

Eine zweite Möglichkeit der Beurteilung von Erregerordnungen bietet die Darstellung des gleitenden Effektivwerts der Ordnung relativ zu einer Referenz. Beispielweise in Abhängigkeit der Drehzahl. Die Berechnung der Ordnungen erfolgt durch Filtern des Zeitsignals und der Bildung des gleitenden Effektivwertes zum Beispiel über eine Sekunde. Die Filter werden mit der Drehzahländerung neu berechnet. Durch die Verwendung von Filtern ergibt sich eine bestimmte Trennschärfe. Aus den Wasserfalldarstellungen im Anhang kann entnommen werden, ob mit Amplitudenverfälschungen durch nebenliegende Erregerordnungen zu rechnen ist.

### 3 Messergebnisse

#### 3.1 Zeitbereich

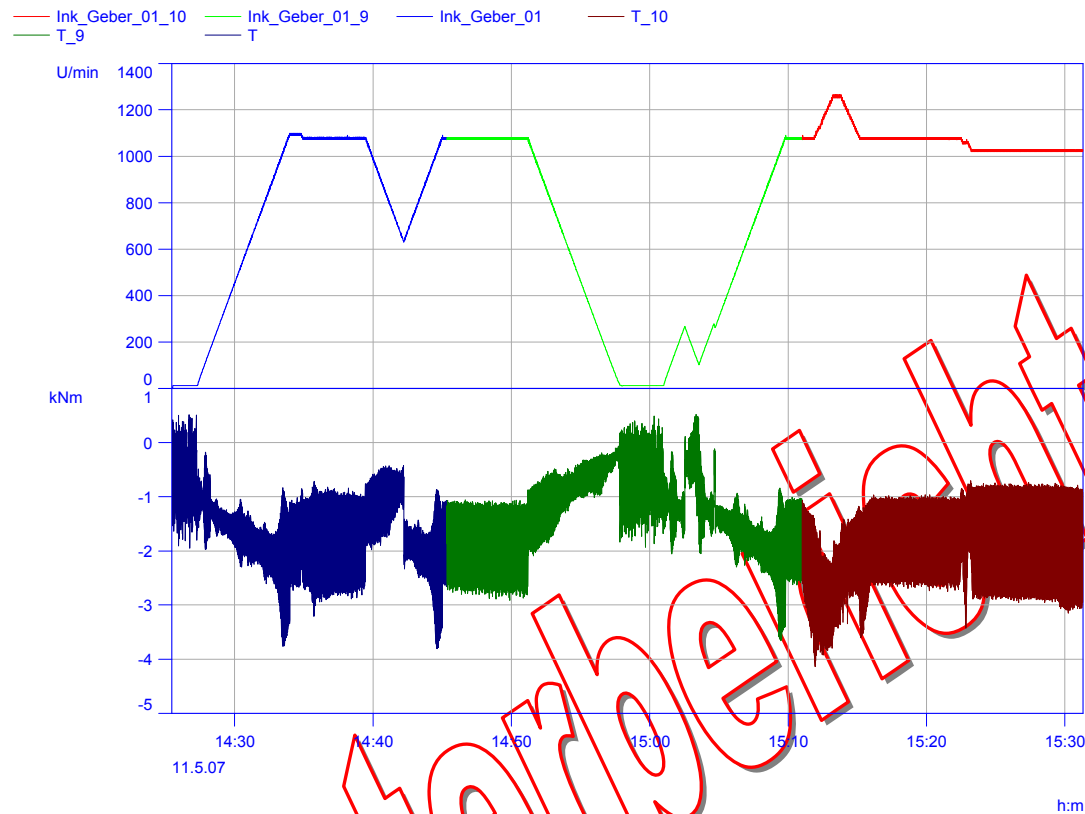


Bild 2: Drehmoment und Drehzahl, Hochlauf auf 1545 und 1810 m/min

In Bild 2 ist ein Hochlauf, ein Auslauf und ein erneuter Hochlauf auf 1550 m/min, sowie ein anschließender Hochlauf auf 1810 m/min Papiergeschwindigkeit zu sehen. Auffällig ist die relativ hohe Dynamik im Kriechen und bei 1020 U/min.

Beim Kriechen treten Wechselbelastungen mit dem halben Nennmoment (2000 Nm über Null) auf, die durch die Motorsteuerung eingeleitet werden.

Beim Durchfahren der 1020 min<sup>-1</sup> treten schwellende Belastungen mit 3000 Nm auf.



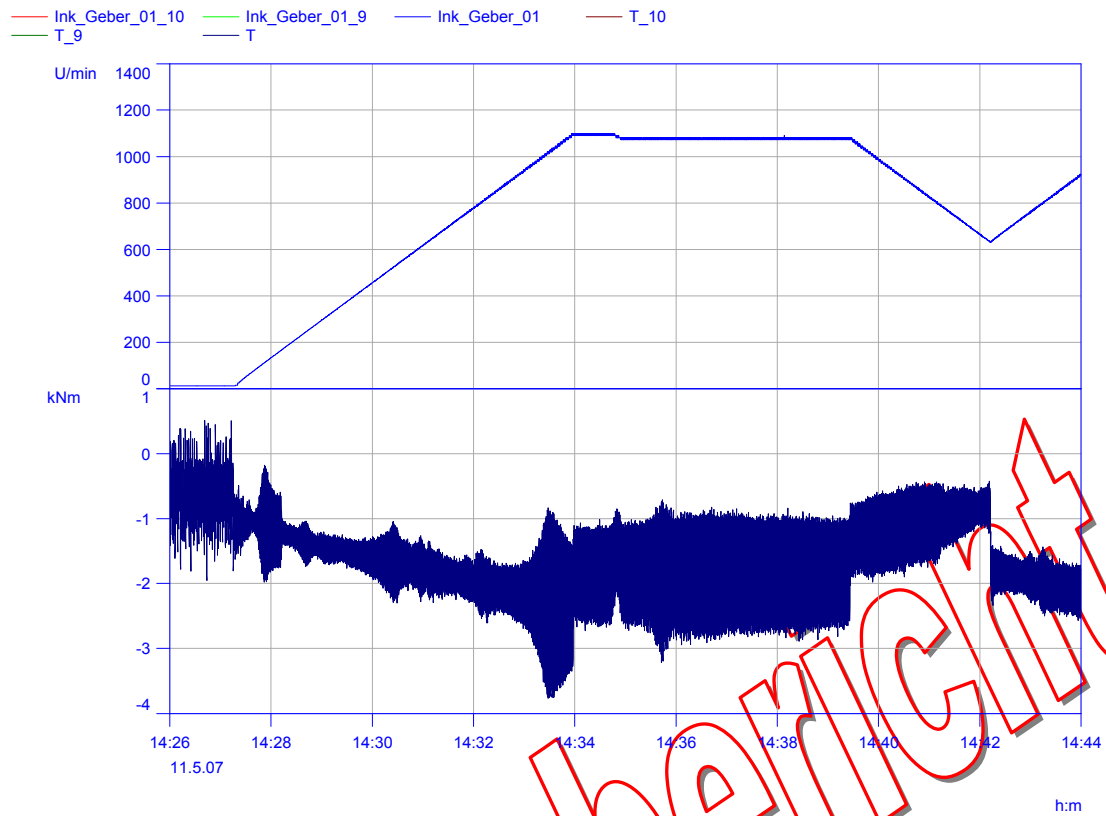


Bild 3: Ausschnitt aus Bild 2: Drehmoment und Drehzahl, Hochlauf auf 1545 m/min

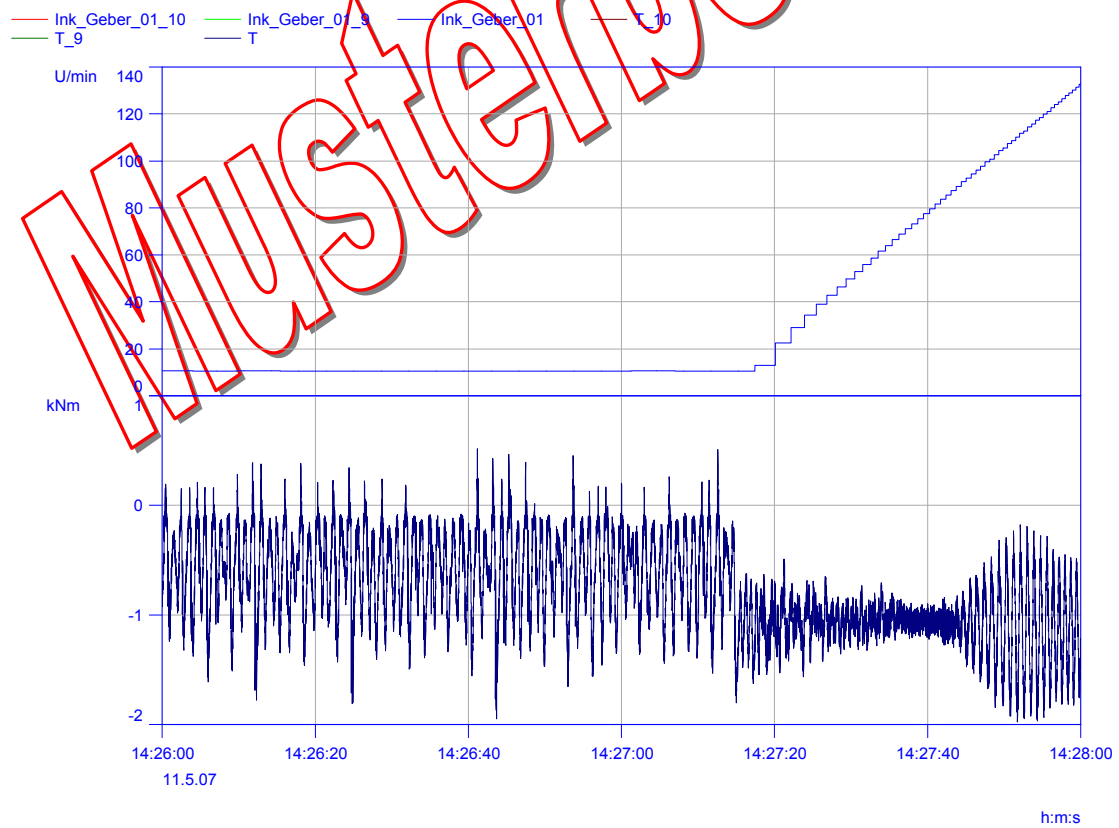


Bild 4: Ausschnitt aus Bild 3: Drehmoment und Drehzahl, Hochlauf auf 1545 m/min

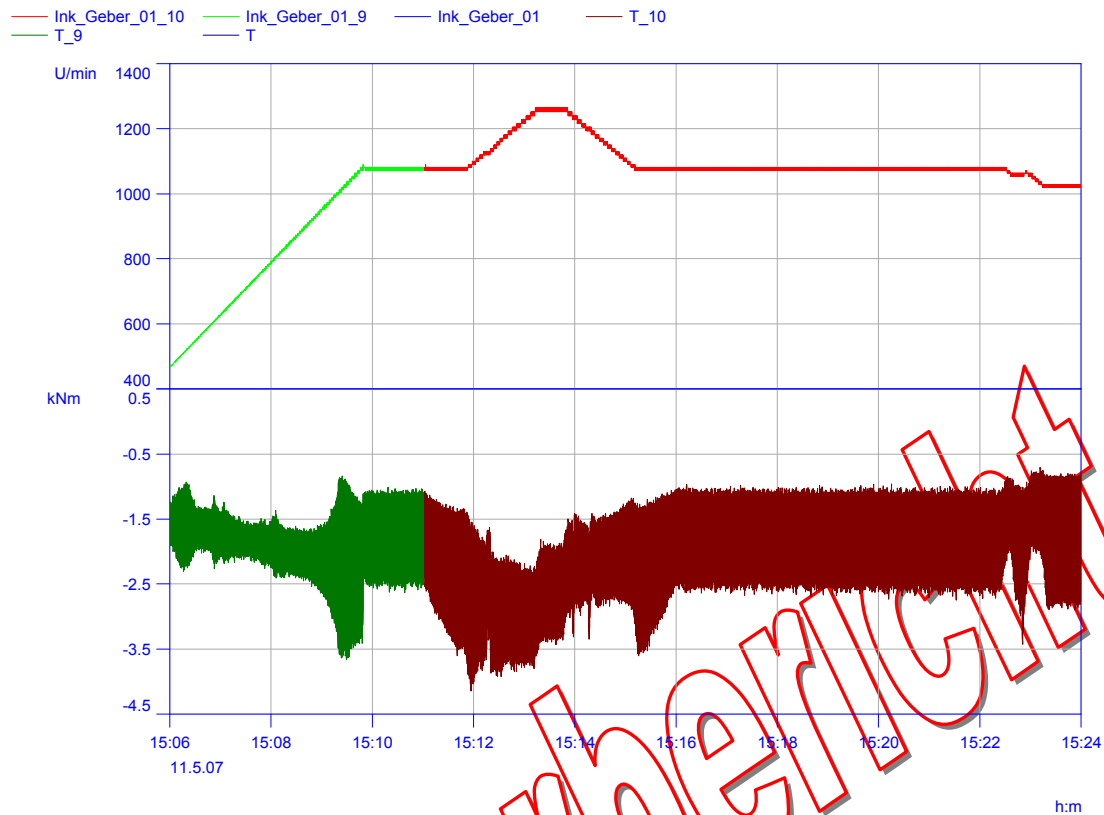


Bild 5: Ausschnitt aus Bild 2: Drehmoment und Drehzahl, Hochlauf auf 1545 und 1810 m/min

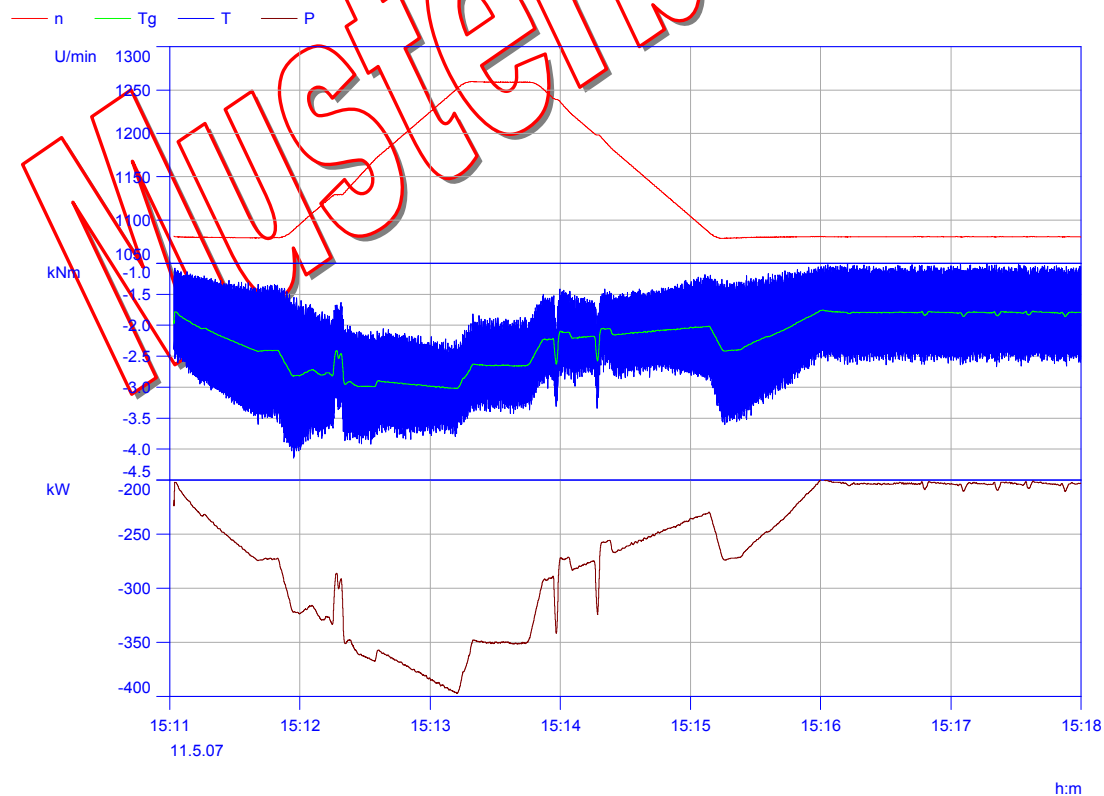


Bild 6: Drehm., Drehz. und Leistung. geglättet;  
Ablauf: Nip belasten, Hochlauf auf 1810 m/min, Auslauf, Nip entlasten

### 3.2 Frequenzselektive Analyse

Wasserfalldarstellungen (Spektralfelder) aller Messpunkte sind in der Anlage 1 abgebildet.

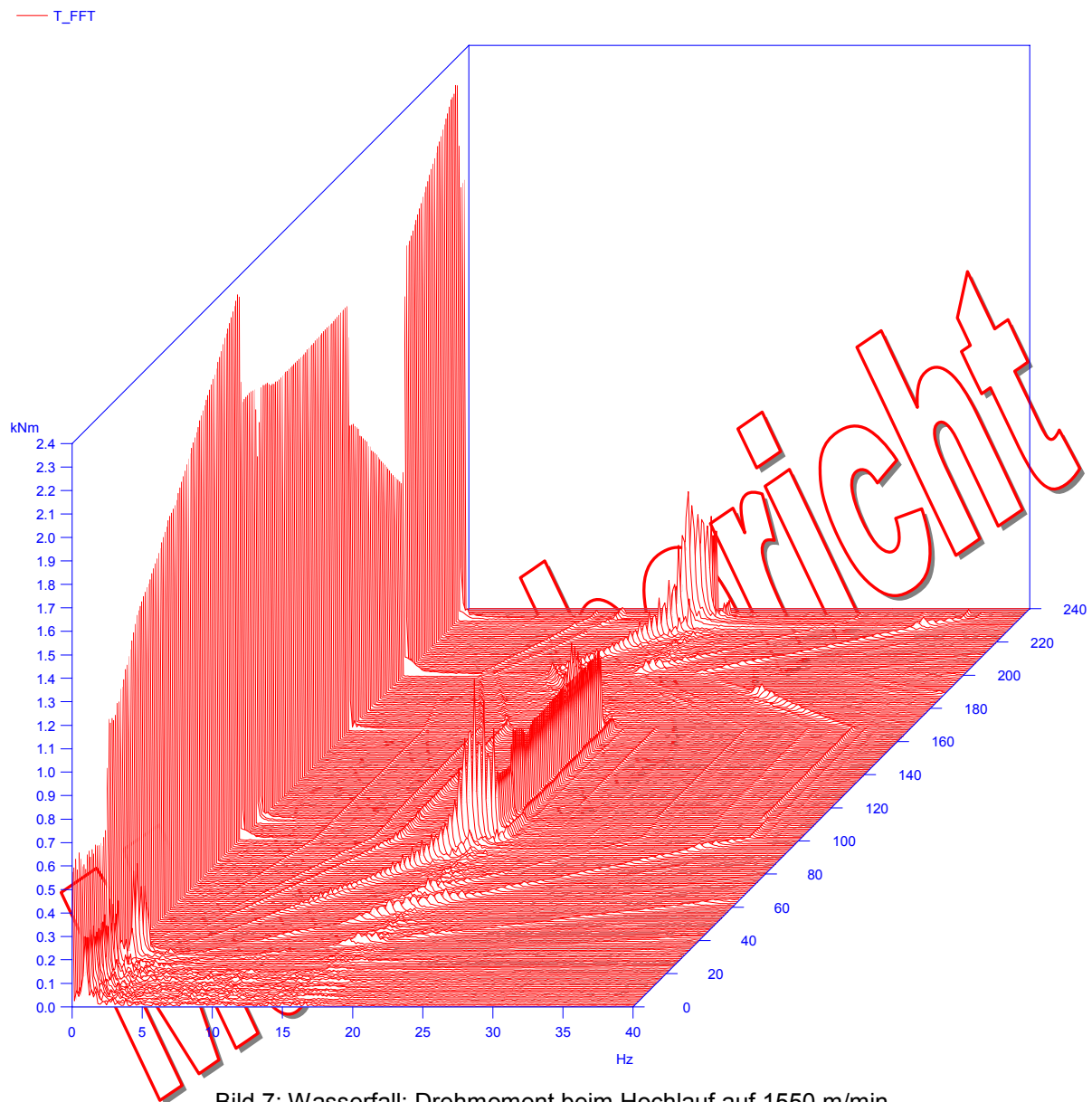


Bild 7: Wasserfall: Drehmoment beim Hochlauf auf 1550 m/min

T\_FFT

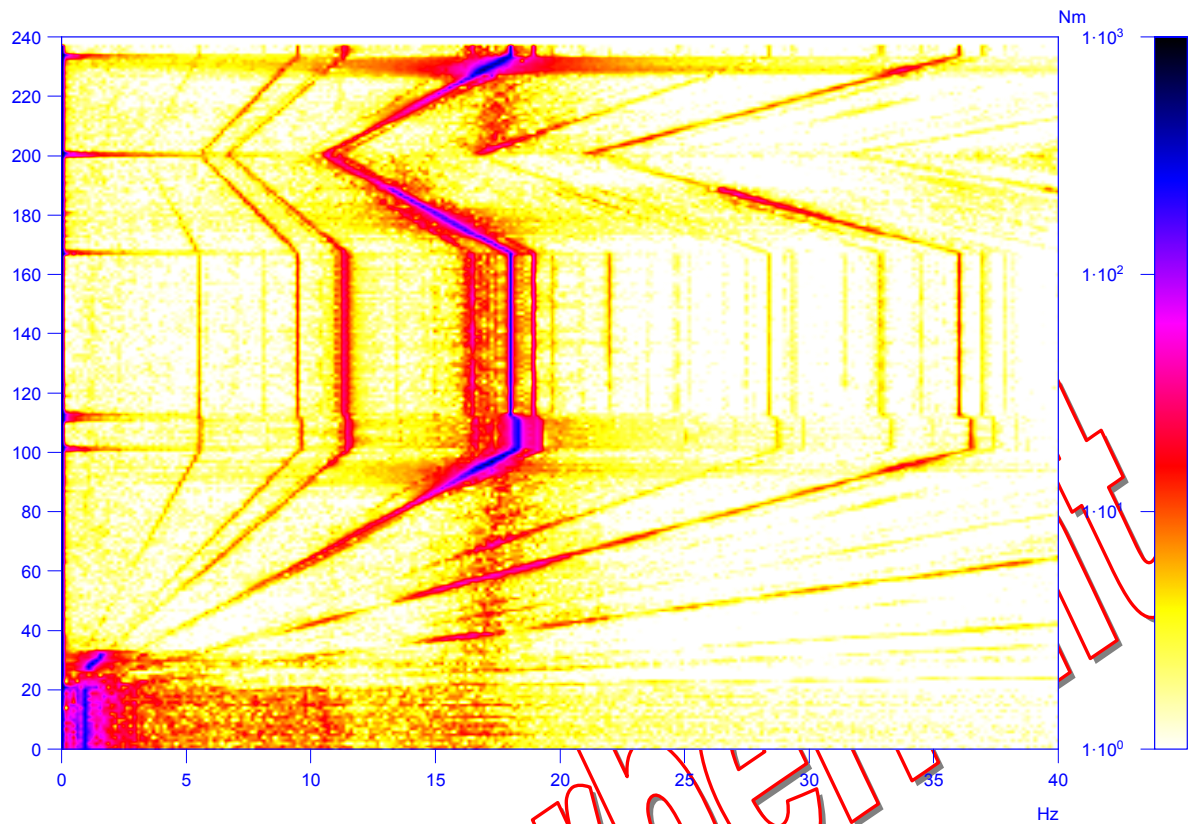


Bild 8: Farbkarte: Drehmoment beim Hochlauf auf 1550 m/min

T\_OTR

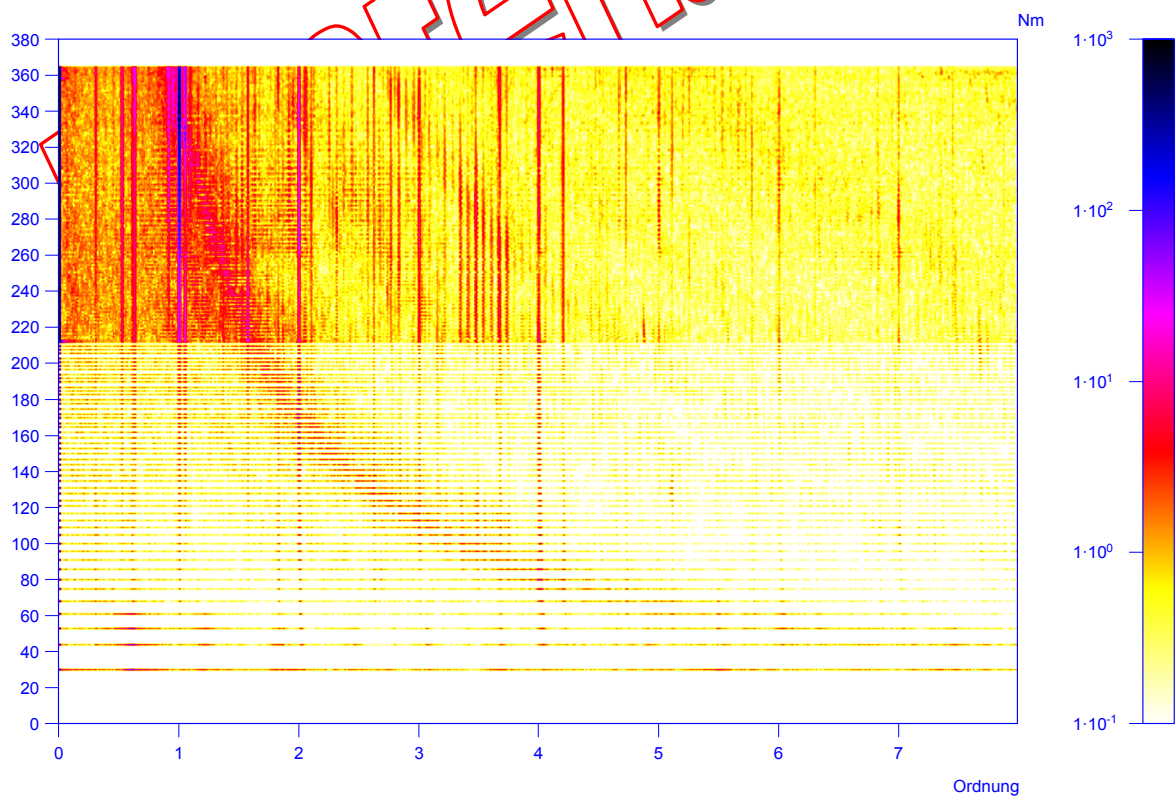


Bild 9: Farbkarte: Drehmoment beim Hochlauf auf 1550 m/min in Ordnungen

In Bild 7, 8 und 9 ist ein Aufklingen der Gelenkwelldrehfrequenz bei 17 Hz bzw. der 1. Ordnung zu erkennen. Der Auslauf unterscheidet sich im Schwingungsverhalten wesentlich vom Hochlauf (Bild 7 und 8). In Bild 9 ist die 1. Ordnung (Gelenkwelldrehfrequenz) mit den Harmonischen gut zu erkennen.

## 4 Zusammenfassung und Interpretation

### 4.1 Leistungsaufnahme

Die Gelenkwelle dreht entgegen dem Uhrzeigersinn und hat daher ein negatives Drehmoment bei positiver Leistung.

Die höchste Leistungsaufnahme im Messzeitraum beträgt bei einer Gelenkwelldrehzahl von  $1252 \text{ min}^{-1}$  und einem Drehmoment von ca. 3020 Nm, 396 kW (Bild 3), bei geschlossenem und belastetem Nip.

### 4.2 Torsionsschwingungen, Getriebegehäuseschwingungen

Die Ursache für die Dauerbrüche an den Befestigungsschrauben des Getrieberades sind sehr wahrscheinlich eine Folge der hohen Dynamikanteile im Drehmoment beim Kriechen (ca.  $10 \text{ min}^{-1}$ ) und bei  $1465 \text{ m/min}$  ( $1020 \text{ min}^{-1}$ ). Die Dynamik von 500 ... 2000 Nm beim Kriechen (ca.  $14 \text{ m/min}$ ) wird durch die Steuerung verursacht. Die Dynamik von 800 ... 3800 Nm bei  $1465 \text{ m/min}$  bei unbelastetem Nip ist eine Folge einer Resonanz zwischen Gelenkwelldrehfrequenz und einer Eigenfrequenz. Die Torsionseigenfrequenz des Antriebs liegt rechnerisch deutlich höher als 17 Hz. Es handelt sich also um eine andere Eigenfrequenz, eine starke Absenkung der Torsionseigenfrequenz oder (siehe Kriechen) um einen Einfluss der Motorsteuerung.

## 5 Anlagenverzeichnis

Anlage 1: Farbkarten und Wasserfalldarstellungen des Drehmoments und der Beschleunigungssensoren