

## Troubleshooting

Troubleshooting oder Fehlersuche ist ein systematischer Ansatz zur Behebung von Problemen, die z. B. bei Anlagen, Stahltragwerken, Maschinen usw. auftreten können. Die Fehlersuche und deren Beseitigung gliedert sich generell in folgende Schritte:

- Sammlung von Informationen
- Bewertung der Informationen und der weiteren Vorgehensweise
- Durchführung von Untersuchungen zur Eingrenzung der Probleme
- Bewertung der Probleme und Vorschläge zu deren zukünftiger Vermeidung

Beanspruchungen im Stahlbau infolge dynamischer Zusatzlasten aus dem Betrieb der Anlagen können über die allgemeine Statik hinaus zu Schwingungsproblemen führen, die einer Bewertung hinsichtlich der Betriebssicherheit bzw. der Tragfähigkeit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerfestigkeit der Stahltragwerke erfordern.

Hierzu zwei Beispiele

**Stahlbau einer Aufbereitungs- u. Klassier- Anlage ( AKA )  
Statik, Dynamik und Dauerfestigkeit**

**Problemstellung**

In dem Stahlbau der AKA sind diverse Siebanlagen zur Aufbereitung und Klassierung installiert. Beim Betrieb der AKA treten in Stahlbau in verschiedenen Stützen und Bühnenbereichen subjektiv sehr deutlich spürbare Schwingungen auf, ebenso an einigen Fassadenflächen des Stahltragwerkes. Vereinzelt hatten sich Scheiben aus der Fassade gelöst und auch noch im etwa 50m entfernt gelegenen Verwaltungsgebäude waren Vibrationen wahrnehmbar.

Ursprünglich vorgesehene Maßnahmen – basierend auf älteren Messungen und Bewertungen von anderer Seite – sahen vor, die derzeit festen Verbindungen zwischen den Bühnen des Stahlbaues mit den Siebmaschinen und den Stützen des Hallen-gebäudes durch neue schwingungsisolierende Anbindungen zu entkoppeln.

Die statische Überprüfung hatte aber gezeigt, dass dann mit statischen Problemen beim Gesamtsystem Stahlbau und Halle zu rechnen wäre.

**Aufgabenstellung**

Auf Wunsch des Anlagenbetreibers sollte nun durch unsere Untersuchungen geprüft werden, ob die Notwendigkeit einer schwingungstechnischen Sanierung tatsächlich erforderlich ist oder ob durch gezielte Einzelmaßnahmen usw. zu erreichen wäre.

## **Konzept der Untersuchungen nach Absprache**

- Begehung der AKA, Sichtung und Bewertung der Unterlagen zur aufgestellten Statik und des vorgefundenen Berichtes.
- Schwingungsmessungen in der Stahlbaustruktur beim Betrieb der Klassieranlage unter hoher Last
- Bewertung des Stahlbaues unter Berücksichtigung der Messergebnisse hinsichtlich statischer und dynamischer Gebrauchstauglichkeit anhand eines zu entwickelnden statischen und dynamischen Rechenmodells des Stahlbaues
- Ausarbeitung von gegebenenfalls erforderlichen Maßnahmen zur Reduzierung von kritischen Beanspruchungszuständen.
- Abschließende Bewertung und Zusammenfassung der wesentlichen Ergebnisse in einem Bericht.

## Sichtung und Bewertung bisheriger Untersuchungen

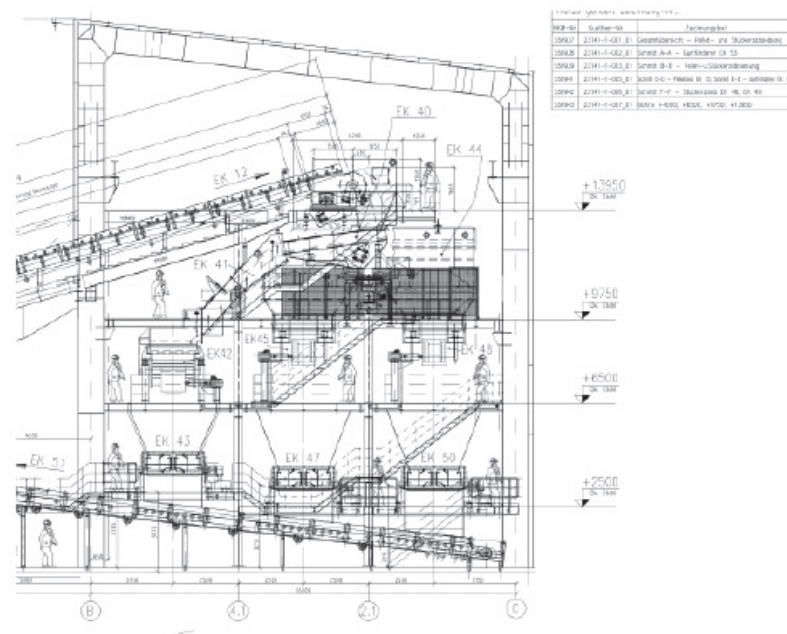
Die vorgenommene Begehung, die geführten Gespräche und die Sichtung der aufgestellten Statik älterer Messungen und Bewertungen führten zu folgenden Ergebnissen:

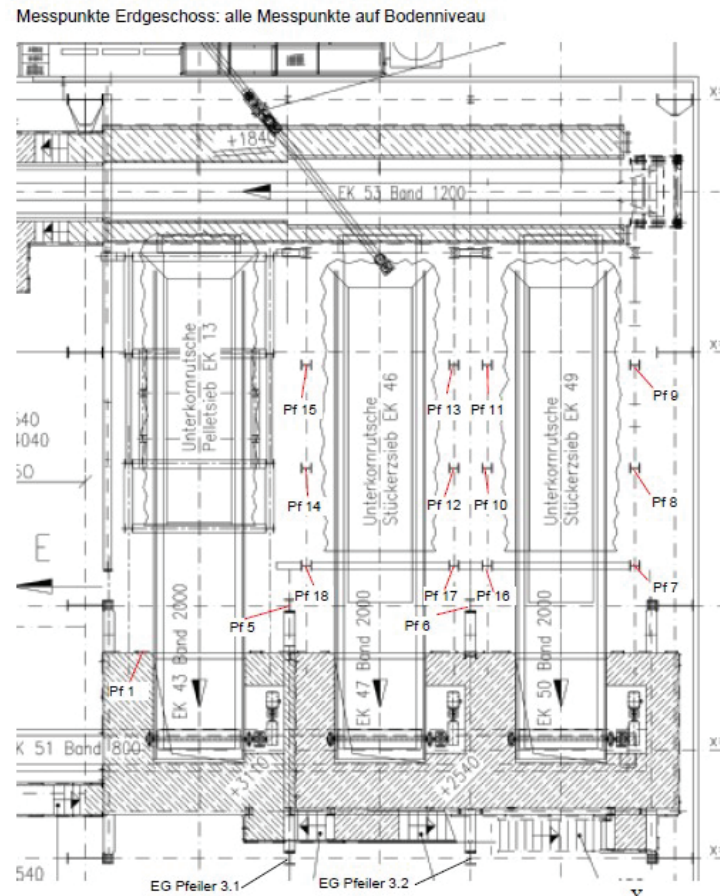
- Hinsichtlich der statischen und dynamischen Beanspruchung und der Bauausführung entspricht der Stahlbau einer vergleichsweise stabilen Ausführung, so die eigene vielfältigen Erfahrung.
- Siebe der vorgefundenen Bauarten müssen zur Erfüllung ihrer bestimmungsgemäßen Aufgabe entsprechende Schwingungen ausführen. Ein Teil dieser Schwingungen wird naturgemäß auf den Stahlbau übertragen, der dafür entsprechend dimensioniert sein muss, was zu prüfen war.
- Die im vorgefundenen Bericht zur Bewertung der Schwingungen herangezogene Norm DIN ISO 10816-1 gilt für die Beurteilung von Absolut- Schwingungen an den Lagerstellen von Maschinen mit Rotoren wie Turbinen, Kompressoren usw. Sie kann nicht auf Stahlbaukonstruktionen angewandt werden, ergo lassen sich aus dieser Norm auch keine Beurteilungen und Maßnahmen für den Stahlbau und die Siebe ableiten.
- Die ebenfalls herangezogene Norm DIN 4150-Teil 3 Erschütterungen im Bauwesen gibt nur sehr grobe und pauschale Anhaltswerte. Eine spezielle Norm zur Beurteilung von Schwingungen in statisch und dynamisch beanspruchten Stahlkonstruktionen gibt es nicht.

## Durchführung der Untersuchungen

Es war also erforderlich, über die Messung der Siebreaktionsschwingungen sich rechnerisch den dynamischen Beanspruchungszuständen von Balken und Stützen des Stahlbaues über entsprechende Rechenmodelle zu nähern und so zu einer Beurteilung der Ausnutzung der Dauerfestigkeit des Baustahles S 235 zu kommen.

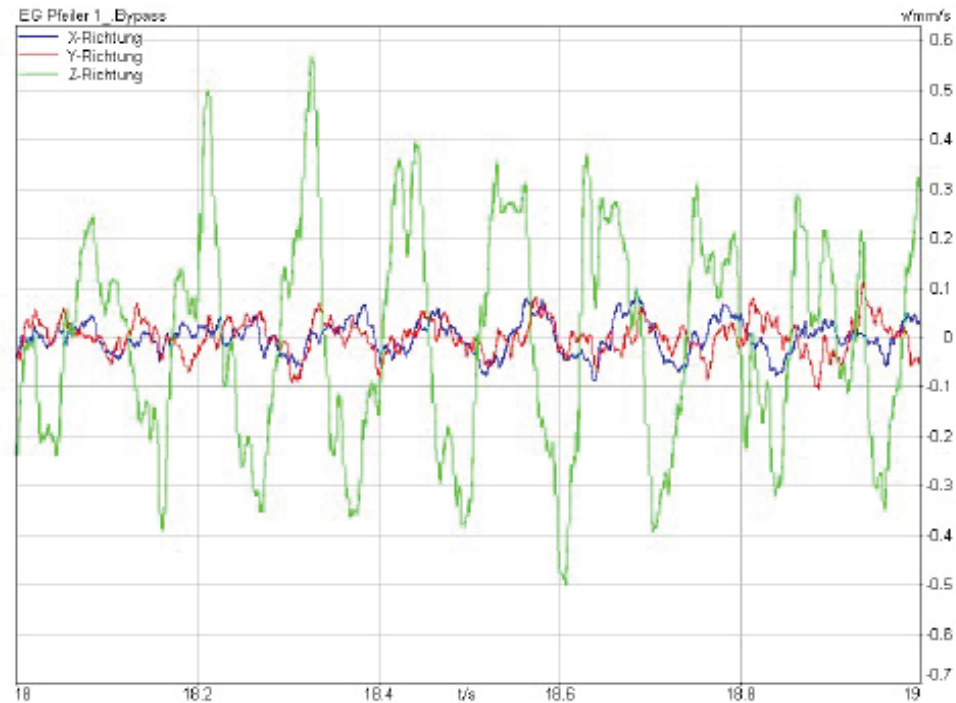
## Meßstellen (Auswahl)

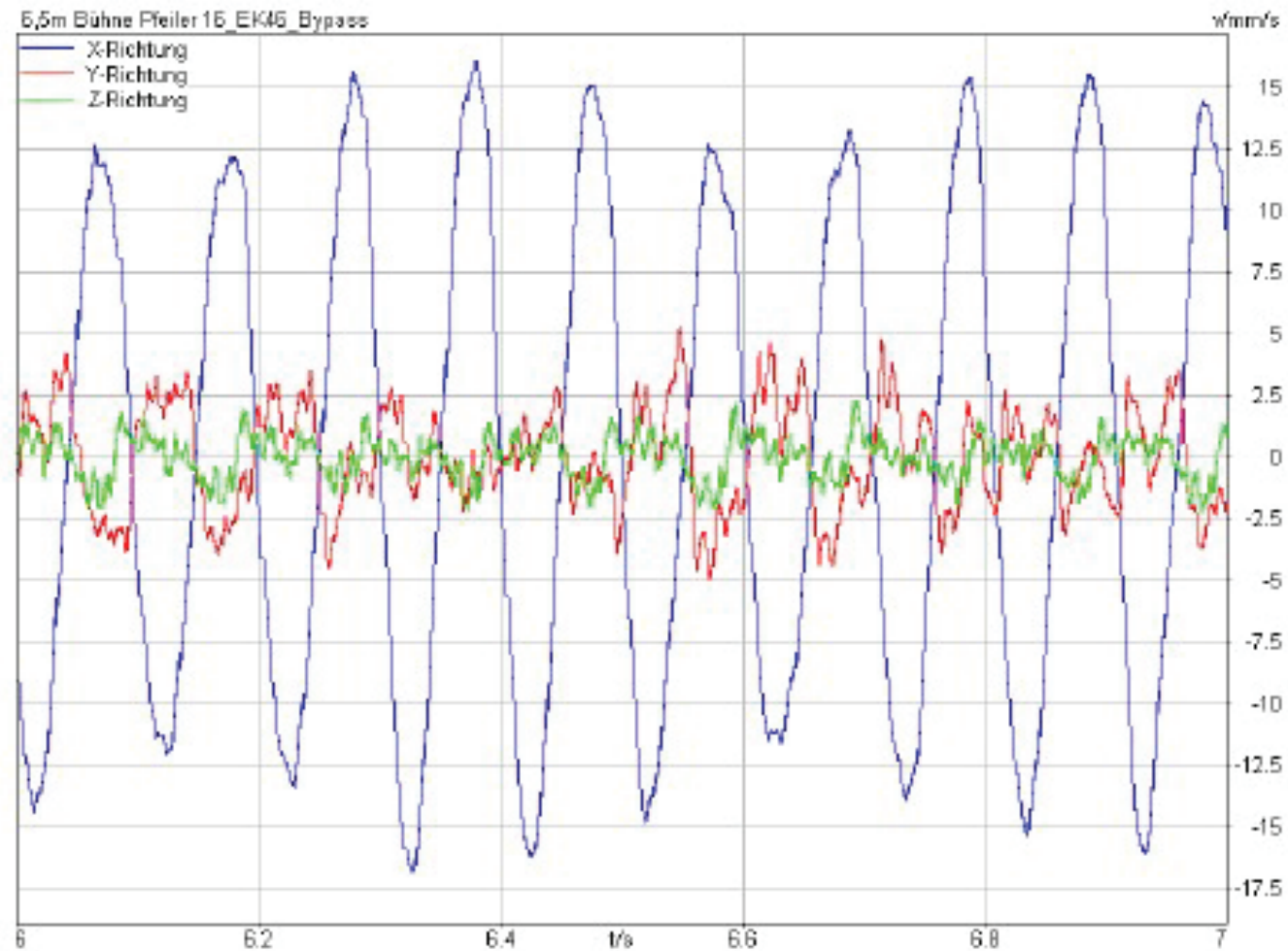




## Ergebnisse der Untersuchungen

### Meßergebnisse, Auswahl







## 4.3 Bereiche der Bühnen 4,4 m, 6,5 m, 9,75 m und 13,975 m

Bühnen	Messpunkt	Frequenz in Hz	Spitzenwert der Schwinggeschwindigkeit in mm/s aus den Frequenzspektren		
			X-Richtung	Y-Richtung	Z-Richtung
4,4m Bühne Pfeiler 22		10,25	15,25	0,58	1,08
4,4m Bühne Pfeiler 23		10,25	11,84	0,73	1,06
6,5m Bühne Pfeiler 0.0 Höhe 1,35m		10,25	10,20	1,39	1,52
6,5m Bühne Pfeiler 0.1 Höhe 1,35m		11,72	9,54	3,73	3,40
6,5m Bühne Pfeiler 1.0 Höhe 1,35m		11,72	9,62	6,53	1,04
6,5m Bühne Pfeiler 1.1 Höhe 1,35m		11,72	7,36	3,94	0,45
6,5m Bühne Pfeiler 14 EK49		10,25	13,53	6,56	2,55
6,5m Bühne Pfeiler 15 EK49		10,25	12,47	4,71	1,05
6,5m Bühne Pfeiler 16 EK48		10,25	14,63	2,32	0,91
6,5m Bühne Pfeiler 17 EK48		10,25	11,41	3,67	0,87
6,5m Bühne Pfeiler 18 EK49		10,25	10,93	2,97	2,39
6,5m Bühne Pfeiler 19 EK49		10,25	9,28	3,29	2,30
6,5m Bühne Pfeiler 20 EK48		10,25	10,82	2,26	2,52
6,5m Bühne Pfeiler 21 EK48		10,25	7,59	4,66	1,77
6,5m Bühne Querträger 1		11,72	6,26(10,25)	5,53	0,47
6,5m Bühne Querträger 2		11,72	6,09(10,25)	5,30	1,26
6,5m Bühne Querträger 3		11,72	7,53	5,62	2,10
6,5m Bühne Querträger 4		11,72	8,64	6,05	2,39
6,5m Bühne Querträger 5		11,72	10,90	4,76	2,02
6,5m Bühne Querträger 6		11,72	11,75	4,51	6,00
6,5m Bühne Querträger 7		11,72	13,80	5,29	8,05
6,5m Bühne Querträger 8		11,72	11,08	5,80	8,16
6,5m Bühne Querträger 9		11,72	7,99	6,03	4,05
6,5m Bühne Querträger 10		11,72	14,89	5,47	18,16
6,5m Bühne Querträger 11		11,72	19,50	5,21	14,89
6,5m Bühne Querträger 12		11,72	14,30	5,46	20,22
6,5m Bühne Querträger 13		11,72	5,01	6,06	4,48
6,5m Bühne Querträger 24		11,72	13,89	1,02	2,59
6,5m Bühne Querträger 25		11,72	20,81	1,59	5,84

6,5m Bühne zwischen Pfeiler III-II Fensterrahmen Mitte	11,72	2,54	21,52	0,47
6,5m Bühne zwischen Pfeiler III-II Scheibe Rand	11,72	1,50	45,90	1,54
9,75m Bühne Querträger 26	11,72	4,44	5,97	2,95
	16,11	1,10	0,73	4,12
	23,44	0,70	0,88	6,49
	33,89	0,94	0,71	6,11
9,75m Bühne Querträger 27	10,25	6,93	3,77	7,02/11,72)
9,75m Bühne Querträger 28	11,72	8,94(10,25)	6,85	1,19
9,75m Bühne Querträger 29	11,72	6,58(10,25)	6,17	6,48
9,75m Bühne Querträger 30	11,72	10,39	7,32	2,05
9,75m Bühne Querträger 31	7,32	15,14	8,62	9,27
14m Bühne Pfeiler 1.0_Höhe 0m	10,25	2,04	10,28	3,92
14m Bühne Pfeiler 1.1_Höhe 0m	10,25	7,23	4,31	1,22
	16,11	4,67	0,40	0,87
	24,90	7,76	0,63	0,64

Tabelle 4-3 Messergebnisse an Trägern und Stützen im Bereich der Bühnen  
 Z = vertikal, X = horizontal parallel u. Y = horizontal senkrecht zu den Achsen A, B, C  
 Messung 9,75m Bühne Querträger 32: Meßfehler, nicht auswertbar

## Statische Beanspruchung aus Eigengewicht, Maschinen, Siebgut usw.

Für die stabförmigen Träger und Stützen des Stahlbaues nach dem Verfahren „Elastisch- Elastisch“:  
Spannungen infolge äußerer Kräfte und Momente:

$$\sigma_d = \frac{N_d}{A} \Rightarrow \text{Nachweis } \frac{\sigma_d}{\sigma_{R,d}} \qquad \tau_d = \frac{Q}{A_{Steg}} \Rightarrow \text{Nachweis } \frac{\tau_d}{\tau_{d,R}}$$

$$\sigma_d = \frac{M}{W_b} \Rightarrow \text{Nachweis } \frac{\sigma_d}{\sigma_{d,R}} \qquad \tau_d = \frac{T}{W_t} \Rightarrow \text{Nachweis } \frac{\tau_d}{\tau_{R,d}}$$

$$\sigma_V = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} \Rightarrow \text{Nachweis } \frac{\sigma_V}{\sigma_{R,d}}$$

Hier zeigen die Fertigungs- u. Konstruktionszeichnungen sowie die aufgestellte Statik recht gut bemessene Stahltragwerke.

## Dynamische Beanspruchung aus Siebreaktionskräften

Generell gilt für die dynamischen Beanspruchungen, dass sie aus den gemessenen Schwinggeschwindigkeiten berechnet werden können. Dazu werden in dem Rechenmodell dynamische Kräfte eingeführt, die zu den gemessenen Amplituden der Schwinggeschwindigkeiten passen. Mit diesen dynamischen Ersatzlasten werden dann die in der Stahlstruktur auftretenden dynamischen Wechsellasten ermittelt.

Am Beispiel einer vertikal Stütze HEB 320 mit einer Bauhöhe von 10 m sollen die Zusammenhänge verdeutlicht werden.

Für den Schwingweg  $s$  gilt mit  $\omega = 2\pi f$   $s = \hat{s} \cdot \sin \omega \cdot t$

und für dessen Ableitung nach der Zeit gilt  $\frac{ds}{dt} = \hat{v} = \omega \cdot \hat{s} \cdot \cos \omega \cdot t$

Damit ergibt sich die Spitzenamplitude des Schwingweges aus der gemessenen Spitzenamplitude

der Schwinggeschwindigkeit zu  $\hat{s} = \frac{\hat{v}}{\omega}$ .

Die Zug oder Druckspannung in einem Stab der Länge  $l$ , dem Querschnitt  $A$  und dem E-Modul  $E$  ergibt aus dem Hooke'schen Gesetz zu:

$$\sigma_{dyn} = \varepsilon \cdot E = \frac{\Delta l}{l} \cdot E$$

Es kann gesetzt werden  $\Delta l = \hat{s}$

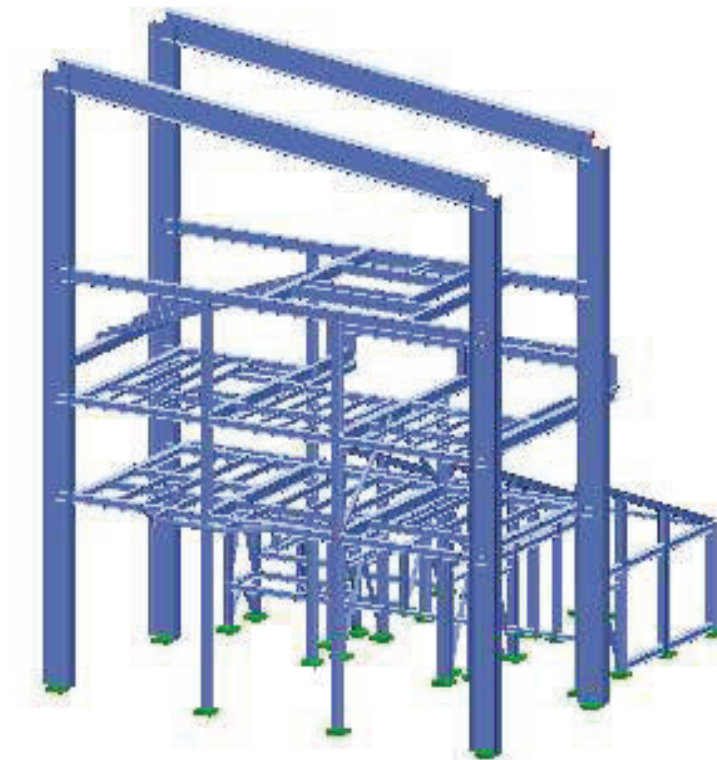
als dynamische Längenänderung des Stabes  
und somit gilt:

$$\sigma_{dyn}(\hat{s}) = \frac{\hat{v}}{\omega} \cdot \frac{E}{l}$$

Für 20 mm/s vertikaler Schwinggeschwindigkeit mit einer Frequenz von 10 Hz im Bereich des oberen Stützenkopfes beträgt dann mit  $E = 2,1 \cdot 10^5 \text{ N/mm}^2$  die dynamische Wechsellast

$$\sigma_{dyn}(s) = \frac{20 \text{ mm/s}}{62,8} \cdot \frac{2,1 \cdot 10^5 \text{ N/mm}^2}{10000 \text{ mm}} = 6,7 \text{ N/mm}^2$$

## Rechenmodell zum Stahlbau

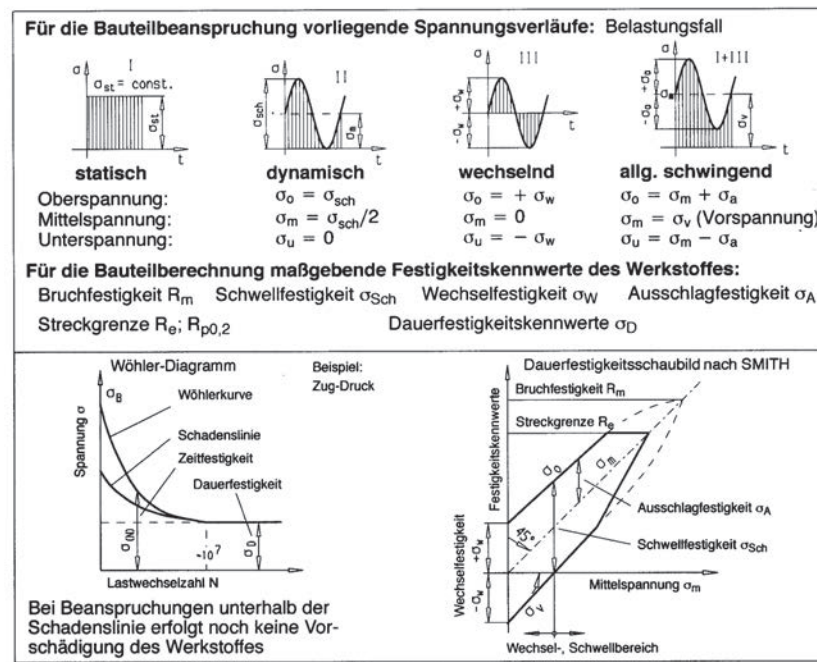


## Gesamtbeanspruchung

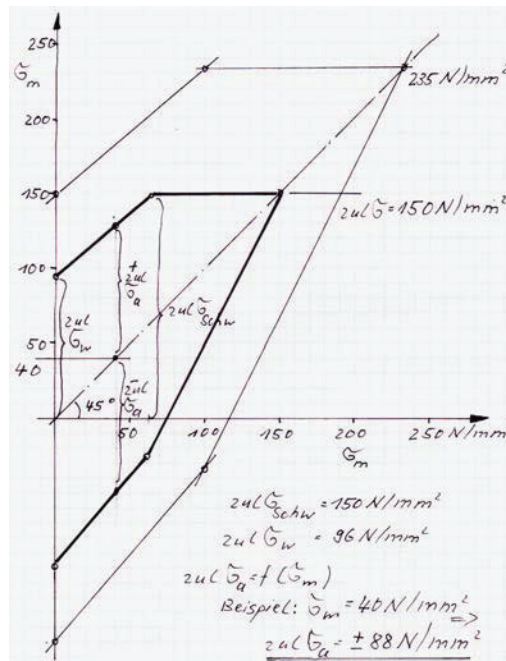
Die dynamische Beanspruchung resultiert aus den Reaktionskräften der Siebe usw. die in den Stahlbau geleitet werden, sie sind den statischen Beanspruchungen zu überlagert.

Es gilt also für die hier zu betrachtende Gesamtbeanspruchung die Kombination aus „statisch“ und „wechselnd“ I + II

$$\sigma_V = \sigma_{Vm} + -\sigma_{Va}$$



Für den hier verwendeten Baustahl S 235 mit einer Zugfestigkeit von  $R_m = 360 \text{ N/mm}^2$  und einer Streckgrenze von  $R_e = 235 \text{ N/mm}^2$  wird in Anlehnung an die alte Fassung der DIN 18800 der Wert von  $150 \text{ N/mm}^2$  als zulässig angesehen und als Obergrenze der zulässigen Beanspruchung benutzt. Damit ergibt sich für das normierte Smith- Diagramm anstelle von  $R_e$  ein Wert von  $R_{zul} = 150 \text{ N/mm}^2$ , was einem Faktor von  $150 / 235 = 0,638$  entspricht.





## Nachweis der Dauerfestigkeit

Die Durchsicht der Unterlagen zur den aufgestellten Statiken für das Gebäude und den Stahlbau mit den Sieben usw. sowie statische Überschlagsrechnungen im Rechenmodell zeigen, dass die statischen Spannungen  $\sigma_{Vm}$  - auch mit Rücksicht auf zulässige Verformungen – deutlich unter 100 N/mm<sup>2</sup> liegen, was für die zulässige Ausschlagsspannung ein Wert um

$$zul\sigma_{Va} = f(\sigma_{Vm}) = 80 \text{ N/mm}^2$$

Der Nachweis der Dauerfestigkeit des Stahlbaus erfolgt in 3 Schritten:

1. Ermittlung von Wechselkräften (Amplitude und Frequenz) als Fremderregungen im Modul DYNAMIK des Rechenmodells, die zu den aus den Messungen bekannten Amplituden der Schwinggeschwindigkeiten passen.
2. Berechnung von  $\sigma_{Va}$  für die ermittelten Wechselkräfte im Statikmodell mittels des Moduls STAHL.
3. Der Nachweis gilt als erfüllt mit der Bedingung

$$\frac{\sigma_{Va}}{zul\sigma_{Va} = 80 \text{ N/mm}^2} \leq 1$$

## Bewertung der Dauerfestigkeit, einige Ergebnisse

Bereich	$\hat{V}(f)$ in mm/s	$\sigma_{Va}$ in N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_{Va} / 80$
Keller	0,04..0,33	30	0,38
Erdgeschoss	0,06...0,83	10	0,13
4,4m Bühne	0,6...15,3	40	0,5
6,5m Bühne	0,5...21,5	15	0,19
9,75m Bühne	0,7...11,7	15	0,19
13,9m Bühne	0,4...7,7	15	0,19

## Zusammenfassung der Ergebnisse

- Die Begehung der Anlage, die Durchsicht der Unterlagen der Statik und die Ergebnisse der Messungen und Rechnungen zeigen, eine nach den Regeln der Technik geplante und gebaute Stahlbau mit Sieben usw., der den statischen und insbesondere auch den dynamischen Anforderungen - Dauerfestigkeit - gerecht wird.
- Die Wahrnehmung von geringen Vibrationen im Verwaltungsgebäude ist nicht ungewöhnlich. Sollte als geringe Komforteinbuße hingenommen werden.
- Dem Herausfallen einzelner Scheiben aus den Fensterbereichen der Fassaden kann leicht durch die Verwendung von dauerelastischem Kitt und gegebenenfalls schmalen Haltestreifen aus Flachstahl begegnet werden.

**Untersuchung des Stahlbaus  
einer  
Aufbereitung mit Bandförderung, Zentrifugen und Sieben  
hinsichtlich  
Statik, Dynamik und Dauerfestigkeit**

**Problemstellung**

Die in einer Aufbereitungsanlagen in Komponenten der mechanischen Verfahrenstechnik auftretenden Schwingungsbelastungen im Stahlbau infolge des Betriebes von Siebmaschinen, Zentrifugen und Bandantrieben gaben in Teilen Anlass zur Besorgnis, insbesondere im Hinblick auf auftretende Schwingungsbelastungen.

**Konzept der Untersuchungen**

Aufbauend auf bereitgestellt Information, Sichtung der Statik und zugehöriger Zeichnungen wurde entschieden, im Rahmen einer Begehung einer Einschätzung der geschilderten Schwingungsprobleme vorzunehmen, unterstützt durch entsprechende Messungen vor Ort und gegebenenfalls auch anhand erforderlicher dynamischen Berechnungen für Teile der Stahlskelettstruktur.

## Durchführung der Untersuchungen

Bei der Begehung erfolgte eine visuelle und taktile Überprüfung – „anschauen und anfassen“- der in Rede stehenden Maschinen und der relevanten Anlagenteile des Stahlbaues, ergänzt durch entsprechende Schwingungs- und Luftschallmessungen.

Zur Begrenzung des Aufwandes erfolgten die Schwingungsmessungen mit einem gängigen Handmessgerät direkt während der Begehung der Anlagen, ebenso die Schallmessungen.

Die zur weiteren Beurteilung notwendigen ergänzenden dynamischen und statischen Berechnungen erfolgten mit den Programmen, die statische, dynamische Berechnungen sowie Untersuchungen zur Festigkeit und Stabilität ermöglichen.

## Ergebnisse der Untersuchungen

### Bandantrieb

Der auf dem Stahlbau verankerte Bandantrieb besteht aus 2 Antrieben, mit E-Motor 75 kW (1500/min), Getriebe  $n_A = 68,5/\text{min}$  und einer in Stehlagern gelagerte Antriebsstrommel. Für die Beurteilung des Schwingungszustandes darf einer „weichen Aufstellung“ ausgegangen werden. Bewertung wurde die Schwingstärke als  $v_{\text{eff}}$  in mm/s gemäß DIN ISO 10816-3 „Industrielle Maschinen mit Nennleistungen über 15 kW“ gemessen.

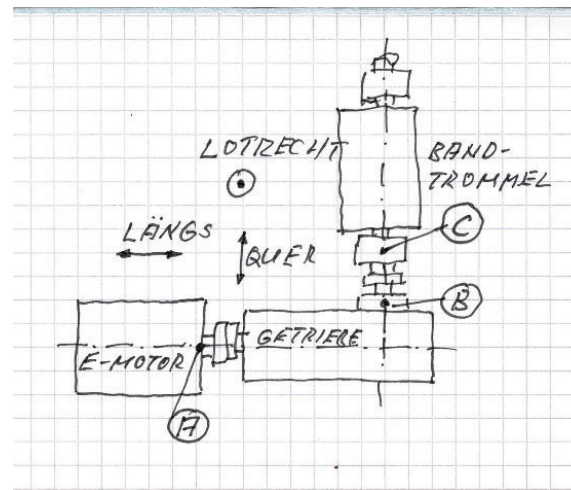


Bild 1 Teile des Bandantriebes mit Messpunkten

Die Ergebnisse der Messungen sind in der nachstehenden Tabelle wiedergegeben.

Messpunkt	Schwingstärke $v_{\text{eff}}$ in mm/s		
	Lotrecht	Quer	Längs
A, E-Motor abtriebsseitig	1,9	2,2	1,8
B, Getriebeausgang	1,2	2,2	1,5
C, Stehlagergehäuse	1,2	1,5	1,8

## Verein für Technische Sicherheit und Umweltschutz e. V.

Der Vergleich der Werte mit den in Bild 2 wiedergegebenen Stufengrenzwerte für „Fundament weich“ zeigt, dass die Schwingstärken des Antriebes gut im „grünen Bereich“ liegen und der Dauerbetrieb ohne Einschränkungen möglich ist.

	Maschinentyp	Große Maschinen mit 300 kW bis 50 MW Leistung		Mittelgroße Maschinen mit 15 bis 300 kW Leistung		
		Elektromotoren mit Wellenhöhen über 315 mm		Elektromotoren mit Wellenhöhen zwischen 160 und 315 mm		
	Fundament	weich	starr	weich	starr	
V <sub>eff</sub> 10 – 1000 Hz	> 11 mm/s	D	D	D	D	
	> 7,1 mm/s	C	D	D	D	
	> 4,5 mm/s	B	C	C	D	
	> 3,5 mm/s	B	B	B	C	
	> 2,8 mm/s	A	B	B	C	
	> 2,3 mm/s	A	B	B	B	
	> 1,4 mm/s	A	A	A	B	
	< 1,4 mm/s	A	A	A	A	
		D	Risiko eines Maschinenschadens			
		C	begrenzter Weiterbetrieb			
		B	Dauerbetrieb ohne Einschränkung möglich			
		A	neu in Betrieb genommene Maschinen			

Bild 2: Klassifizierung der Schwingstärke nach DIN ISO 10816-3

Ergänzend sei noch darauf hingewiesen, dass im allgemeinen Teil 1 der DIN ISO 10816 eine etwas weniger spezifizierte Einteilung der Beurteilungszonen dargestellt ist. Eine Einteilung nach starrer und weicher Aufstellung ist dort nicht gegeben, siehe Bild 3. Es gibt dort den Hinweis, dass kleinere Maschinen bis etwa 15 kW eher an der unteren Zonengrenze liegen sollten.

v <sub>eff</sub> 10 – 1000 Hz	45 mm/s			
	28 mm/s			
	18 mm/s			
	14,7 mm/s			Zone C/D 4,5 – 14,7 mm/s
	11,2 mm/s			
	9,3 mm/s		Zone B/C 1,8 – 9,3 mm/s	
	7,1 mm/s			
	4,5 mm/s	Zone A/B 0,71 – 4,5 mm/s		
	2,8 mm/s			
	1,8 mm/s			
	1,12 mm/s			
	0,71 mm/s			
	0,45 mm/s			
	0,28 mm/s			
D	Risiko eines Maschinenschadens			
C	begrenzter Weiterbetrieb			
B	Dauerbetrieb ohne Einschränkung möglich			
A	neu in Betrieb genommene Maschinen			

Bild 3: Typische Zonengrenzwerte für die Schwingstärke nach DIN ISO 10816-1



## Stahlbau mit Zentrifugen

Formalisierte Mess- und Beurteilungsverfahren – z. B. Normen o. ä. - gibt es für die Einschätzung und Beurteilung der dynamischen Belastung des Stahlbaus infolge von Maschinen, hier jetzt z. B. die elastisch gelagerten Zentrifugen, in diesem Sinn nicht.

Bei der Vorgehensweise zur Beurteilung der Beanspruchung des Stahlbaues muss die statische und die dynamischen Belastung als resultierende Beanspruchungen im Sinne der Dauerfestigkeit betrachtet werden, siehe hierzu auch den Anhang. Um einen ersten Eindruck der dynamischen Belastungen zu erhalten, erfolgen daher Schwingungsmessungen – bevorzugt auch Schwinggeschwindigkeiten in mm/s – oberhalb und unterhalb der Aufstellungsrahmen der Zentrifugen, siehe Bild 4.

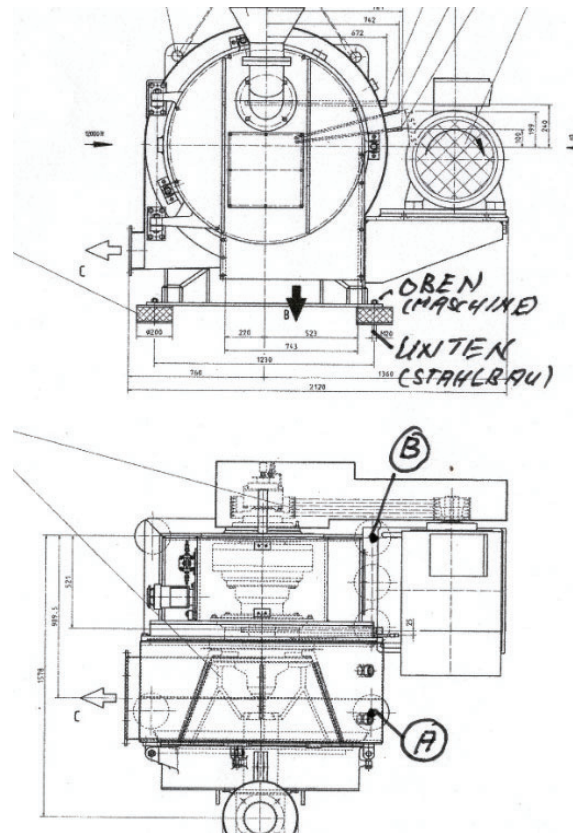


Bild 4: Anordnung der Messpunkte für Übersichtsmessungen.

Die Anordnung der Zentrifugen auf dem Stahlbau der Bühnenkonstruktion ist der dem Rechenmodell entnommenen Darstellung in Bildern 5 wiedergegeben.

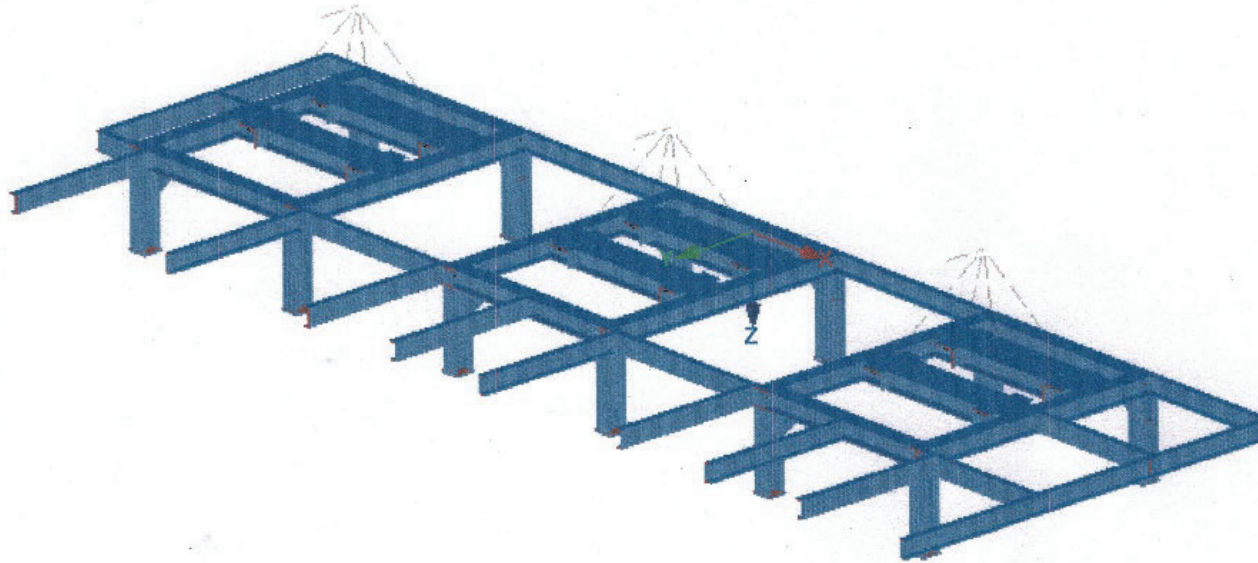


Bild 5: Stahlbau des Bühnenbodens der Anlage drei Zentrifugen

Nachstehend sind die Messwerte der Schwinggeschwindigkeiten wiedergegeben. Mit Blick auf die primäre Beanspruchung des Stahlbaues wurden die lotrechten Schwingungen im hinteren Bereich beim Riementrieb ( B ) und im vorderen Bereich beim rotierenden Kratzerkegel ( A ) gemessen. Alle gemessenen Zentrifugen liefen mit etwa  $n = 660 \text{ min}^{-1}$ , was einer Schwingungsfrequenz von ca.  $f = 11 \text{ Hz}$  entspricht.

Anlage / Zentrifuge Messpunkte	Iotrechte Schwinggeschwindigkeitswerte $v_{\text{eff}}$ in mm/s	
	oben ( Maschine )	unten ( Stahlbau )
Zentrifuge Links		
A	4 – 8	1 – 2
B	2 – 3	1 – 2
Zentrifuge Mitte		
A	3 – 5	1 – 2
B	4 – 8	1 – 2
Zentrifuge Rechts		
A	55 – 66	30 – 33
B	17 – 19	14 – 15

Bei diesen Zentrifugen mit ca. 4200 kg Eigengewicht ohne Unterraum kann bei optimaler Auswuchtung bei  $n = 1100 \text{ min}^{-1}$  eine maximale Unwucht der Siebtrommel von  $U_{\text{max}} = 12 \text{ kN}$  infolge des Füllgutes auftreten. Über die isolierenden 6 Gummi- Metall- Puffer werden lt. Angaben nur geringe Kräfte in den Unterbau weitergeleitet:

- horizontal 5%, also eine Kraft von 0,6 kN
- vertikal 10%, als eine Kraft von 1,2 kN.

Bei den Zentrifugen Links und Mitte liegt offenbar ein guter Auswuchtzustand vor, die auftretenden Amplituden von 4 bis 8mm/s und unterhalb 1 bis 2 mm/s sind vergleichsweise gering und gelten als „guter Betriebszustand“.

Die Werte von 55 bis 66 mm/s im Bereich der Trommel an der Maschinenrahmenkante weisen offenbar auf einen derzeit schlechten Wuchtzustand hin, der primär wohl dem Verschleiß im rotierenden Siebkegel geschuldet ist.

Die dynamische Beanspruchung des Stahlbaues durch die Zentrifugen Links und Mitte ist augenscheinlich anhand der gemessenen Werte vernachlässigbar.

Bei der rechts stehenden Zentrifuge liegen die lotrechten Schwingungsamplituden auf dem Stahlbau mit ca. 33 mm/s um den Faktor 15 bis 30 höher als unter dem Stahlbau der beiden übrigen Zentrifugen. Bei einer dominierenden Frequenz von ca. 11 Hz beträgt der Spitzenwert ca.  $v_s = 47$  mm/s, was einem Schwingweg von ca.  $s_s = 0,7$  mm entspricht.

Die vorgenommenen dynamischen Berechnungen zeigen, dass dies einer dynamischen Anregung in diesem Bereich - Knoten 192 im Rechenmodell – von etwa 38 kN entspricht, siehe hierzu die Bilder 6 und 7.

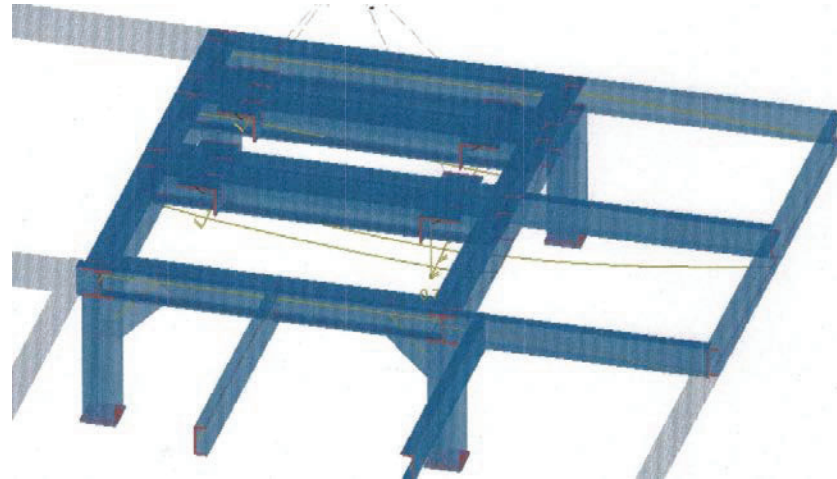


Bild 6: Ausschnitt Bereich einer Zentrifuge mit Darstellung der Verformung, 0,71mm

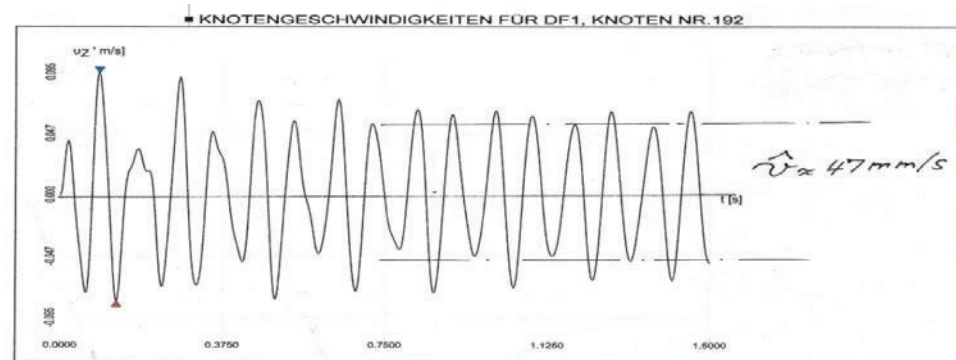
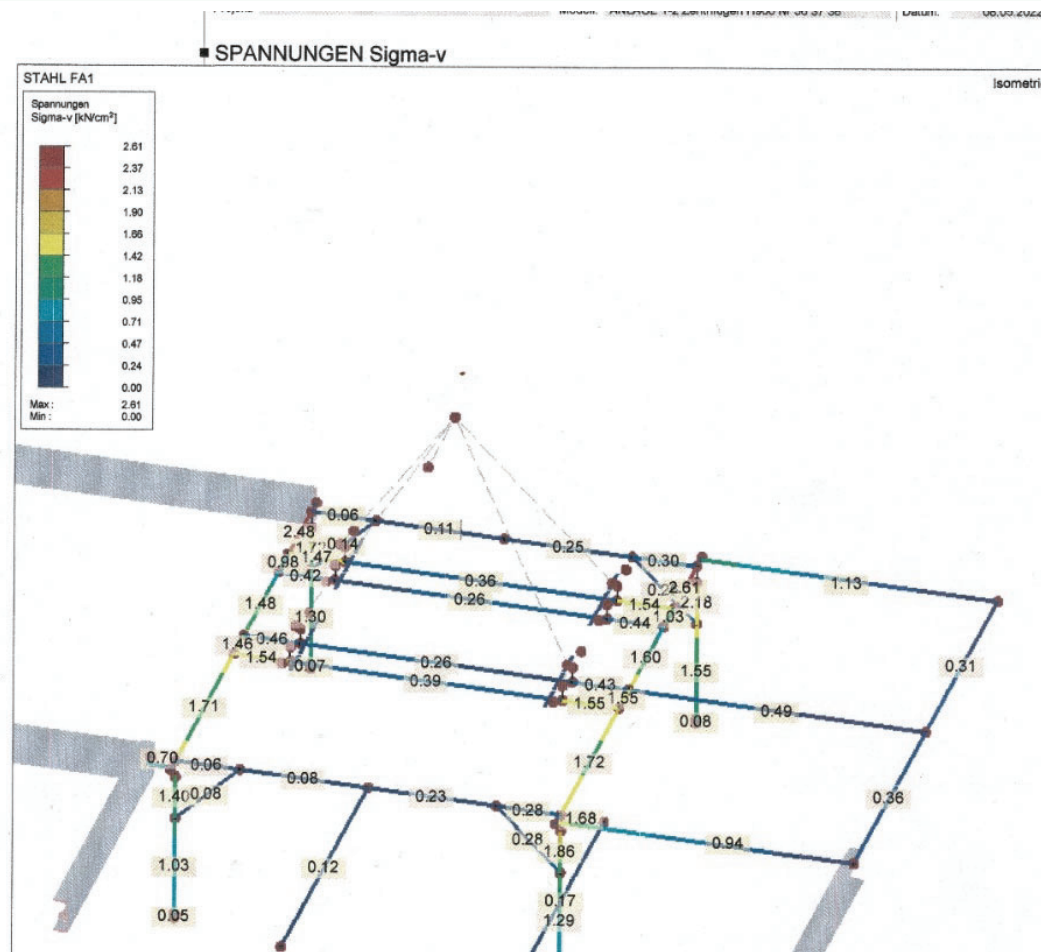
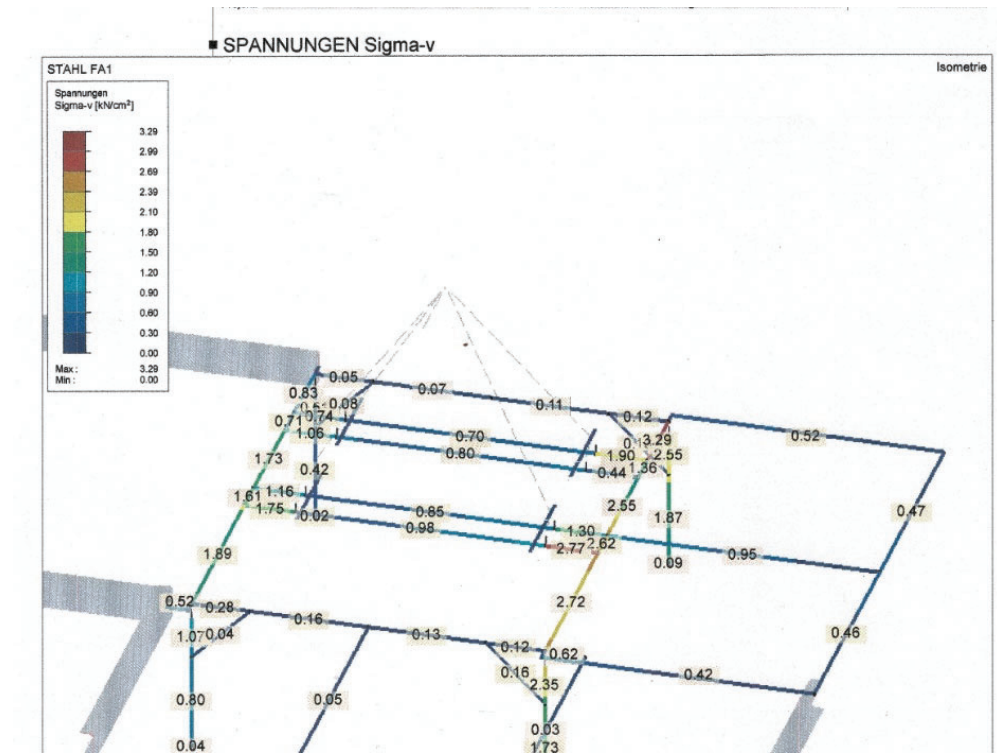


Bild 7: Spitzenwerte der Schwinggeschwindigkeit im Rechenmodell bei lotrechter dynamischer Anregung mit 38 kN bei 11 Hz im stationären Zustand



Statische Belastung Querträger HEB 160  
STATIK- Spannung 17 N/mm<sup>2</sup>



Dynamische Belastung Querträger HEB 160  
DYNAMIK- Spannung 28 N/mm<sup>2</sup>

Bild 8: Spannungen im Querträger HEB 160, oben STATIK, unten DYNAMIK



Die im Bild 8 wiedergegebenen Ergebnisse der beiden Berechnungen STATIK ( Gewicht Stahlbau und Zentrifugen ) und DYNAMIK ( dynamische Kraft ) zeigen also eine Mittelspannung von etwa  $17 \text{ N/mm}^2$  aus der statischen Belastung und ca.  $28 \text{ N/mm}^2$  als dynamisch überlagerte Ausschlagspannung.

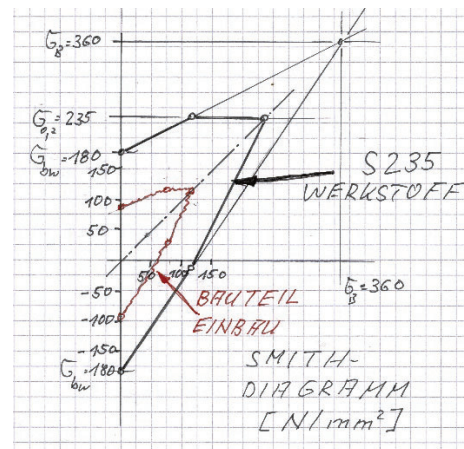


Bild 9: Smith- Diagramm für S 235, Werkstoff und Näherung für Stahlprofil infolge Baugößeneinfluss, Kerbwirkung ( Walzhaut, Korrosion, Risse ) usw.

Gemessen an den Werten im Smith- Diagramm für den Baustahl S 235 in der Einbausituation sind dies vergleichsweise geringe Werte. Die Belastungen im Bereich dieser Bühne aus den statischen und dynamischen Lasten sind unbedenklich, wesentliche Anregungen in Eigenformen um die Betriebsdrehzahl – Stichwort Resonanz - sind nicht gegeben.

## Stahlbau mit Siebmaschine SI und SII

Die beim Betrieb der Siebe gemessenen Schwinggeschwindigkeiten erfolgten im Frequenzbereich um 15 bis 17 Hz. In nachstehender Tabelle sind von den gemessenen Schwingungen exemplarisch die vertikal auftretenden Werte wiedergegeben. Beim unteren Sieb SII sind die Schwingungen auf dem Stahlbau mit bis zu 4 mm/s gering.

Beim oberen Sieb SI werden auf den Stahlbau Amplituden von ca. 58 mm/s übertragen, was auch körperlich sehr gut spürbar ist.

### Anlage / Sieb lotrechte Schwinggeschwindigkeitswerte $v_{\text{eff}}$ in mm/s

<u>Messpunkte</u>	<u>oben ( Maschine )</u>	<u>unten ( Stahlbau )</u>
Sieb SI		
A	105	7 - 13
B	105	58
Sieb SII		
A	117	1 - 2
B	117	3 - 4

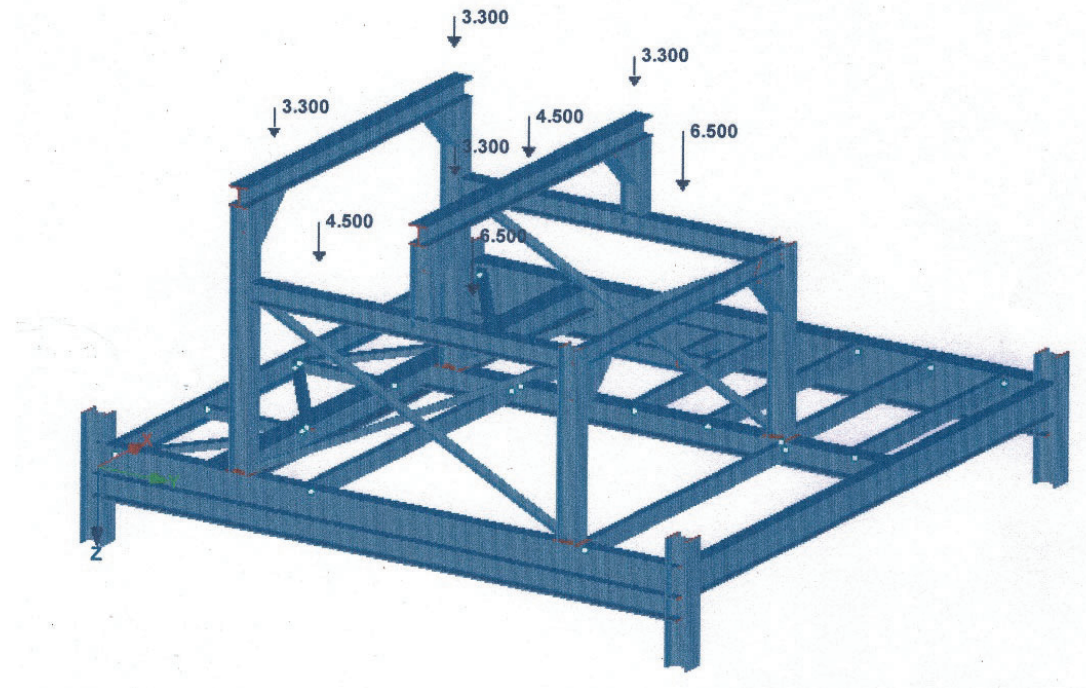
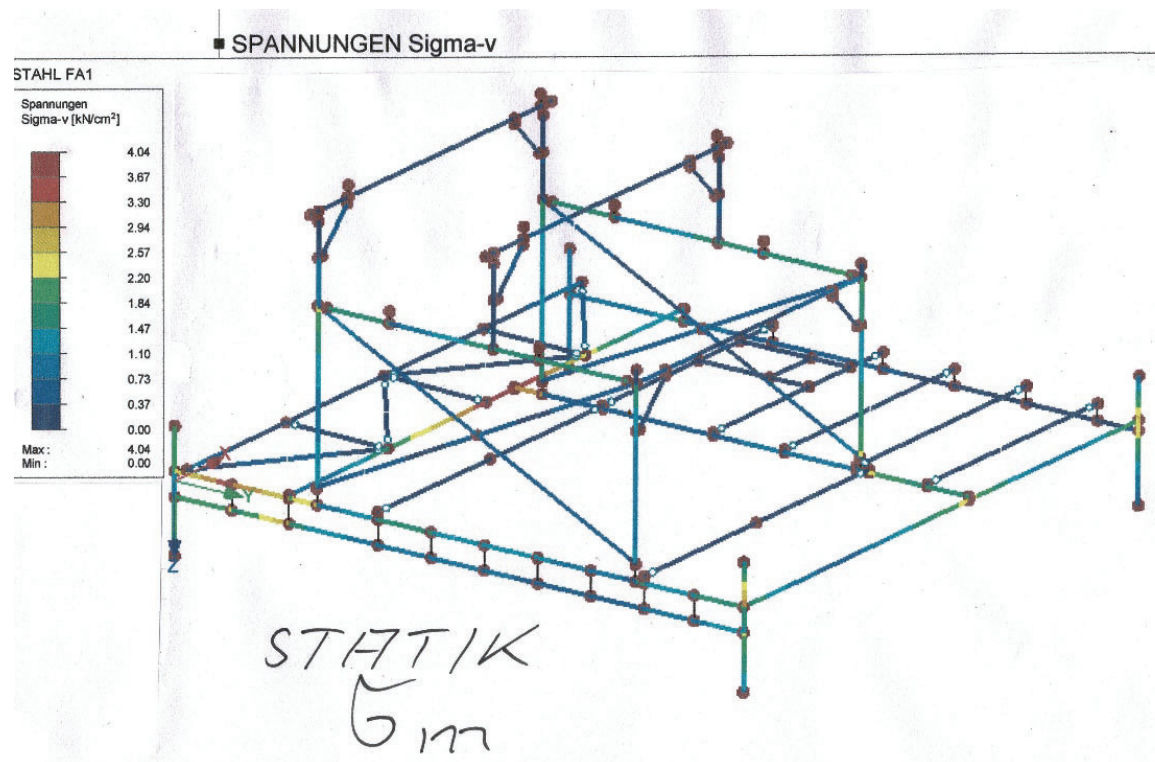


Bild 10: Anordnung des Stahlbaues für die Siebe SI (oben) und SII (unten) auf der Bühne 15m

Eine wesentliche Anregung einer Eigenform bei den berechneten Eigenfrequenzen ( 11,1 14,6 18,2 18,5 19,8 20,1 ) in der Nähe der Siebfrequenzen liegt nicht vor. Die berechneten Spannungen, siehe Bild 11, im unteren Träger HEB 180 – im wesentlichen statische Biegespannungen und dynamisch

ausgelöste Biegespannungen liegen bei ca. 40 N/mm<sup>2</sup> als Mittelspannung und 11 N/mm<sup>2</sup> als Ausschlagspannung.

Verstärkungsmaßnahmen im Bereich der 15m- Bühne ergeben sich aus den vorliegenden Ergebnissen im nicht zwingend.



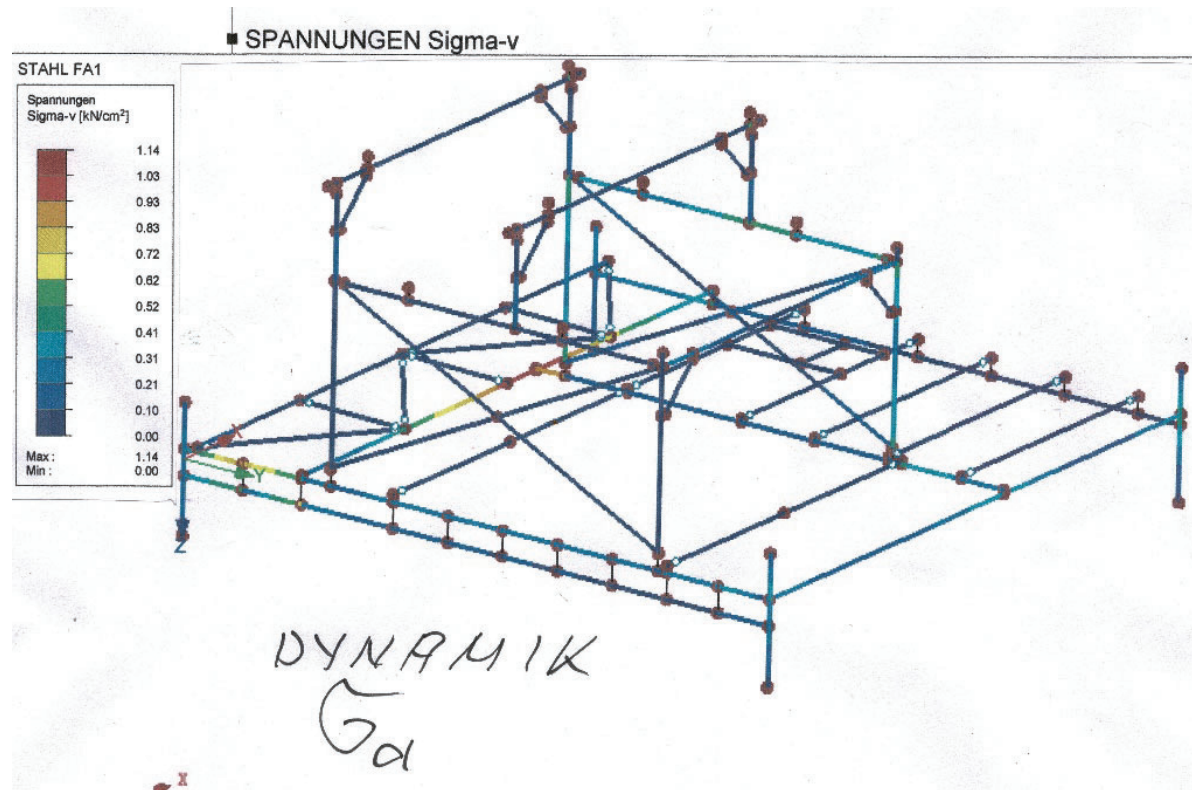


Bild 11: Berechnete Spannungen, oben aus statischen Gewichtlasten, unten aus der dynamischen Beanspruchung gemäß den Messwerten

## Fensterfront im Bereich der Siebe SI und SII

Der im Bereich der Siebe auftretende Schallpegel ist bestimmt durch die tieffrequenten Anregungen, die von den Siebflächen ausgehen, siehe folgende Tabelle.

<u><math>f_{\text{okt}}</math></u>	<u><math>L_p</math> (A) in dB(A)</u>	<u><math>L_p</math>(lin) in dB</u>
31,5	64	104
63	72	98
125	74	90
250	78	87
500	80	83
1k	80	80
2k	74	73
4k	68	67
8k	60	61
<b>Gesamt</b>	<b>86</b>	<b>105</b>

Die Luftdruckamplituden unterhalb der Oktave 31,5 Hz im Bereich der Siebfrequenz dürfte im Bereich von  $L_p = 110$  dB liegen, siehe hierzu ein typisches Beispiel des Autors von einer Kohle-Aufbereitungsanlage.

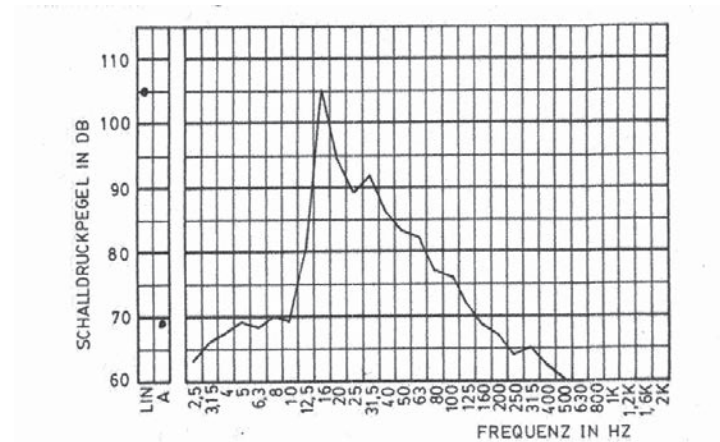


Bild 12: lineares Spektrum des Luftschalles bei einer Siebfrequenz im Bereich von 16 Hz  
/1/ Reiser, et al.: Tieffrequente Schallemissionen von Aufbereitungsanlagen. Aufbereitungstechnik Jahrgang 27, Heft 1, Seiten 37-43

Wie auch in anderen Fällen ist das Mauerwerk unterhalb der Fensterfront ruhig, ein Luftdruck von z. B.  $p = 6,3$  N/m<sup>2</sup>, was einem Schallpegel von 110 dB entspricht, genügt nur zur Anregung der vergleichsweise leichten Plexiglasfront. Eine elastische Fixierung bzw. Ausbesserung der Fensterfront in unteren Bereich genügt, um weitere Schäden an der Fensterfront zu vermeiden.

### Empfehlungen zur weiteren Vorgehensweise

Der Bandantrieb ist entsprechend dem derzeitigen Schwingungsbild uneingeschränkt für den Dauerbetrieb geeignet.

Der Stahlbau im Bereich der Zentrifugen wird weder statisch noch dynamisch über Gebühr beansprucht. Maßnahmen zur Ertüchtigung des Stahlbaues sind nicht erforderlich.

Der Vergleich der Schwingungen der Zentrifugen macht deutlich, dass zunehmende Schwingungen in der Regel den Auswuchtzuständen der jeweiligen Rotoren geschuldet sind. Hier erfolgen in der Alltagsroutine des Betriebes integrierte Austauschaktionen usw., so dass die Funktionalität der Zentrifugen erhalten bleibt.

Die im Bereich der Siebe im Stahlbau auftretenden Schwingungsbelastungen sind an einer Stelle subjektiv empfunden recht hoch, was zur Sorge Anlass gegeben hatte. Die Messungen und Berechnungen haben aber gezeigt, dass die auftretenden Dauerbelastungen nicht als kritisch anzusehen sind und zusätzliche Versteifungsmaßnahmen nicht erforderlich sind. Eine Stabilisierung gegenüber der tieffrequenten Luftschallanregung durch die Siebe, insbesondere des unteren Bereiches der Fensterfront mittels Ausbesserung und elastischer Fixierung ist angezeigt.