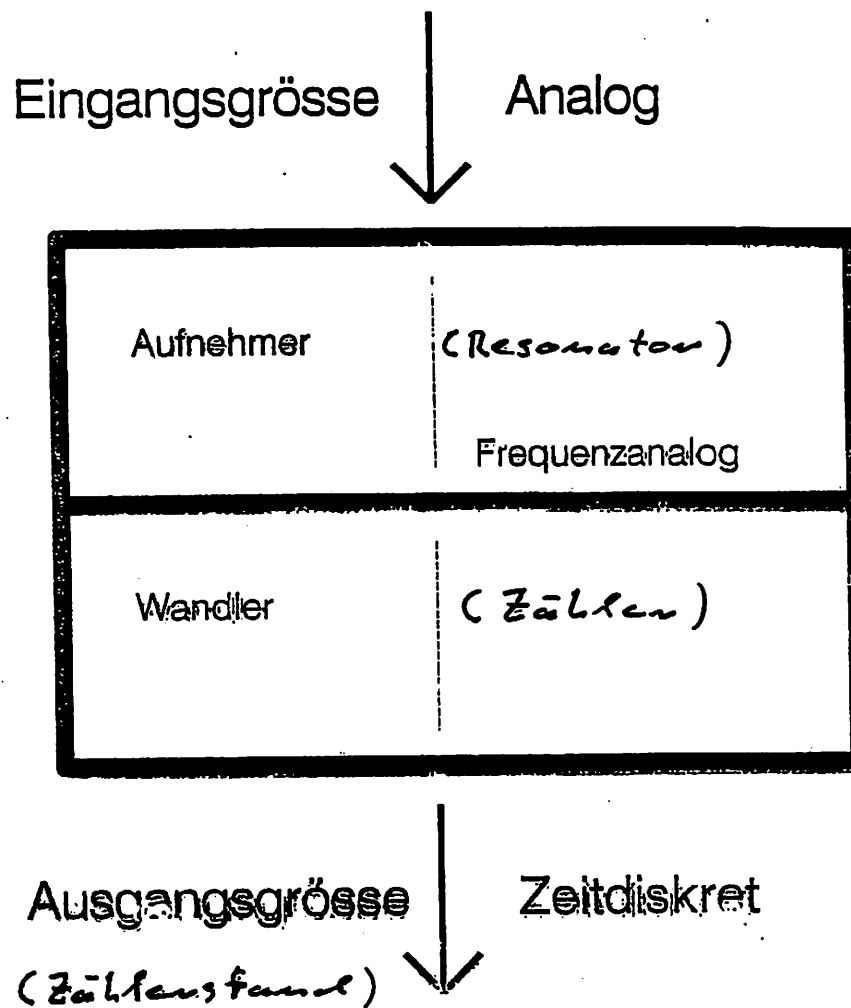


# Wägetechnik mit frequenzanalogen Sensoren

Zusammenstellung des Vortrags  
anlässlich der Abschlusspräsentation  
am 21.12.92

# Kraftaufnehmer mit Resonatoren als Sensorelemente

1. Grundsätzliche Betrachtungen
2. Verfahren der Messwertverarbeitung
3. Versuche mit Quarzresonatoren
4. Versuche mit Siliziumresonatoren
5. Weitere Anwendungen
6. Funktionsmuster

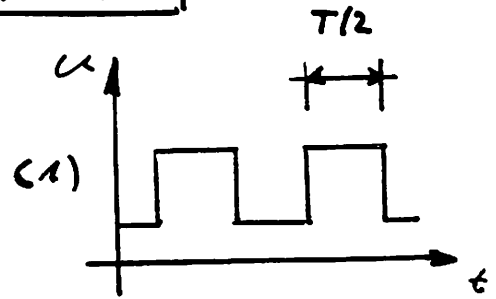


## Grundsätzlicher Zusammenhang

- Auflösung (Schrittigkeit)
- Messzeit

# Auflösung und Messzeit

$$Z = f_0 \cdot \frac{T}{2} = \frac{f_0}{2 \cdot f}$$



Die Änderung  $dZ$  ist

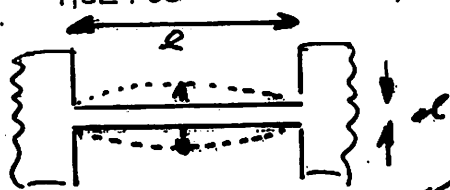
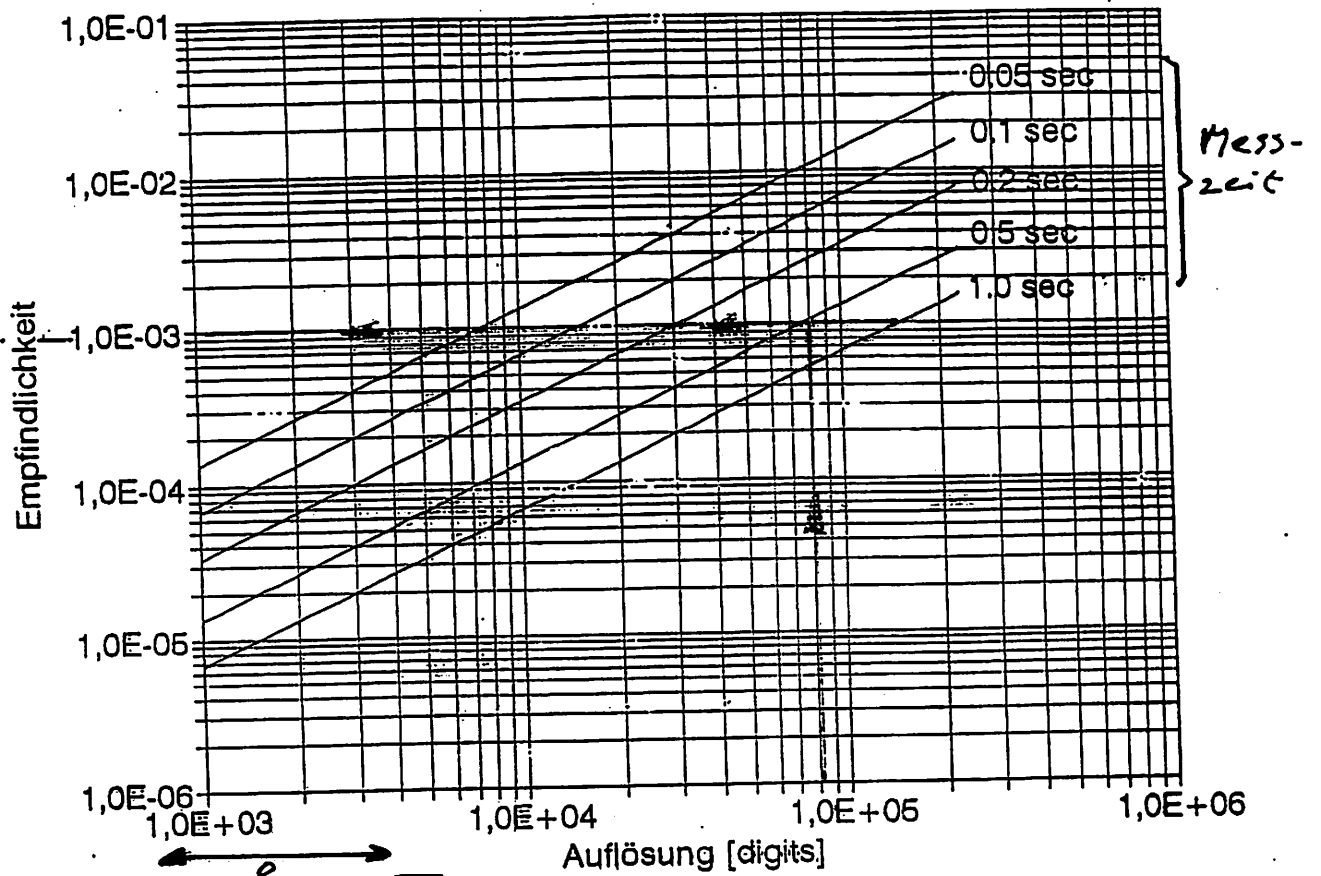
$$dZ = \frac{\partial Z}{\partial f} df = - \frac{f_0}{2 \cdot f^2} df \quad (2)$$

Mit der Empfindlichkeit

$$S = \frac{1}{f} \cdot \frac{df}{d\sigma} \quad \text{folgt} \quad (3)$$

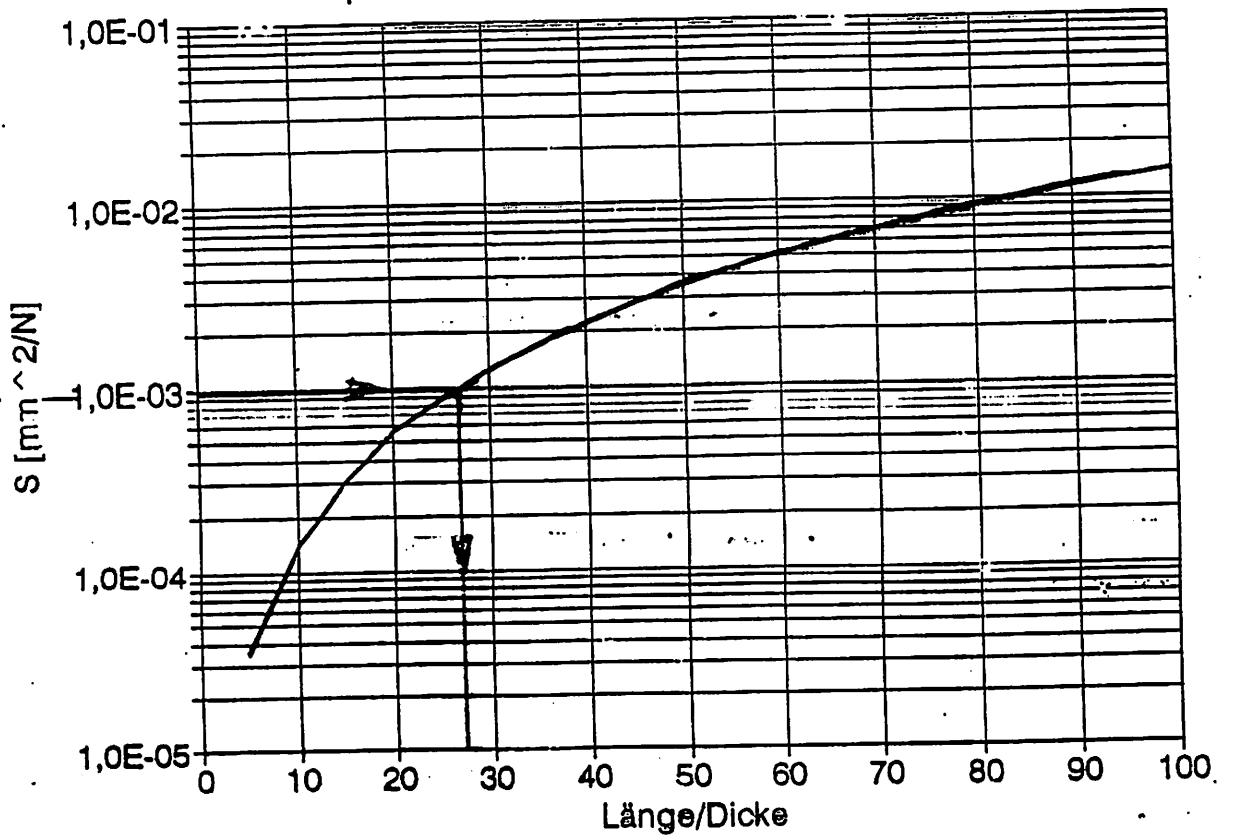
$$dZ = \frac{1}{2} \cdot f_0 \cdot S \cdot \underbrace{n \cdot T}_{\text{Messzeit}} \cdot d\sigma \quad (4)$$

$$\frac{\text{Auflösung}}{\text{Messzeit}} = k \cdot \text{Empfindlichkeit} \quad (5)$$



$$S = \frac{1}{l} \cdot \frac{dx}{dF}$$

Empfindlichkeit eines Balkenschwingers



# Auflösung und Messzeit eines Aufnehmers

## Zahlenbeispiel für Resonator-Kraftaufnehmer

### Vorgaben

- Taktfrequenz : 10 MHz
- Max. Spannung : 30 N/qmm
- Dloke in Schwingungsr. : 0.2 mm
- Dloke senkrecht dazu : 0.5 mm
- Länge : 10 mm



### Eigenschaften

- Grundfrequenz : 18.7 kHz
- Empfindlichkeit :  $0.0035 \text{ mm}^2/\text{N}$
- Messzeit : 0.2 sec
- Auflösung : 100000
- Max. Kraft : 3 N

# Verfahren der Messwertverarbeitung

1. Linearisierung ←
2. Automatische Nullung
3. Temperaturgang Nullpunkt
4. Temperaturgang Empfindlichk.
5. Filterung

BIZERBA

1992

# Verfahren zur Linearisierung

## 1. Ganzrationale Polynome

- ☐ Koeffizienten aus eindeutig best. Gleichungssystem
- ☐ Least squares aus überbestimmtem Gleichungssystem
- ☐ Minimierung der max. Abweichung (Tschebyscheff)

$$y = A + Bx + Cx^2 + Dx^3$$

## 2. Abschnittsweise Approximation durch Polynome

- ☐ Kubische Splinepolynome

$$y_k(x) = A_k + B_k(x-x_k) + C_k(x-x_k)^2 + D_k(x-x_k)^3$$

Stetigkeit von  $y$  und  $y'$  an Bereichsgrenzen

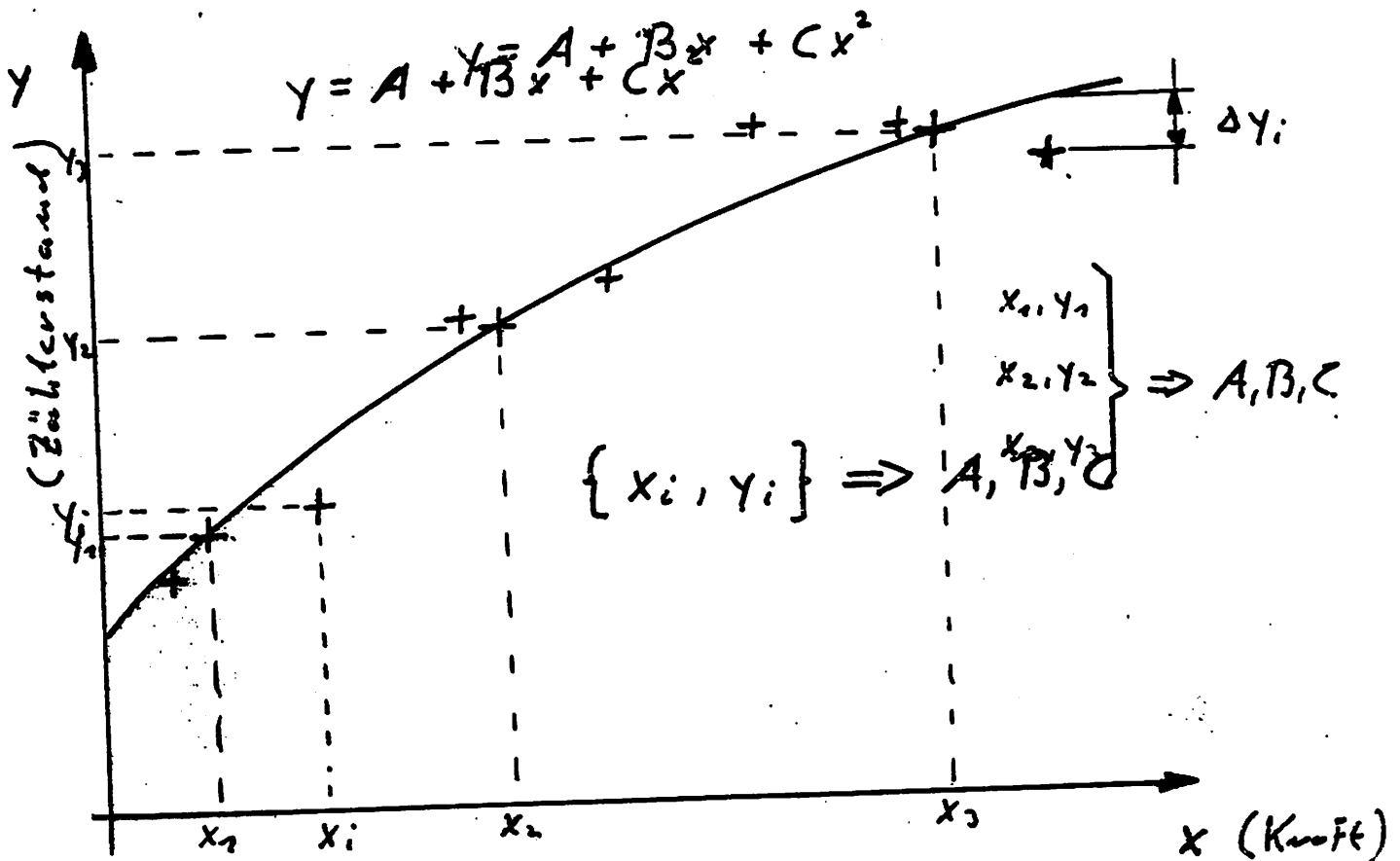
## 3. Empirischer Funktionsansatz

$$y(x) = A + Bx + C/x + Dx^{1/2}$$



# Approximation durch ganzrationale Polynome

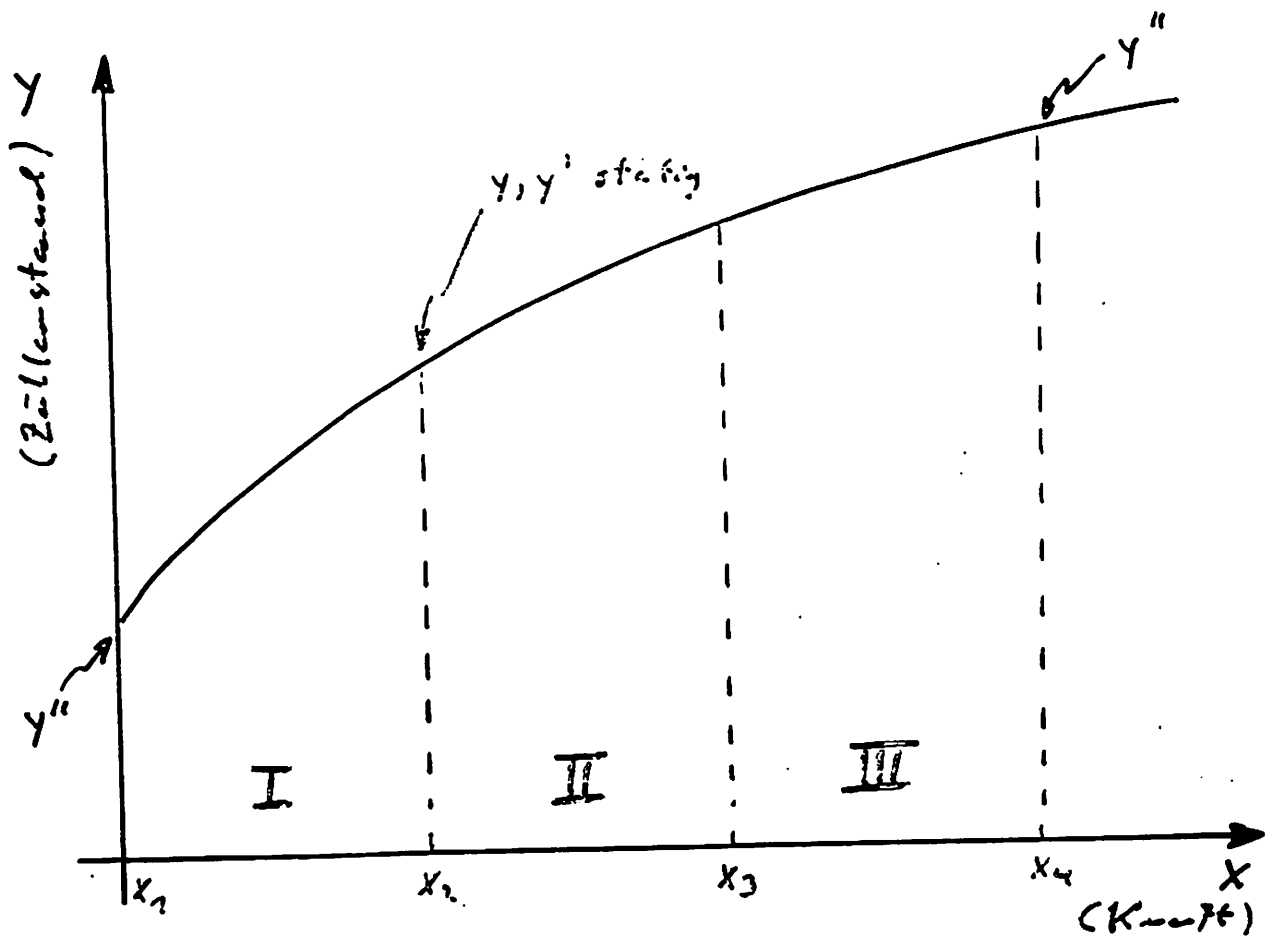
⊕



Bei Koeffizientenbestimmung aus überbestimmten Gleichungssystemen:

- $(\sum \Delta y_i^2)^{1/2} \stackrel{!}{=} \text{Minimum (Least squares)}$
- $\Delta y_{\max} \stackrel{!}{=} \text{Minimum (Tchebyscheff)}$

# Abschnittsweise Approximation



$$y_k(x) = A_k + B_k(x - x_k) + C_k(x - x_k)^2 + D_k(x - x_k)^3$$

$$\text{I} : A_1, B_1, C_1, D_1$$

$$\text{II} : A_2, B_2, C_2, D_2$$

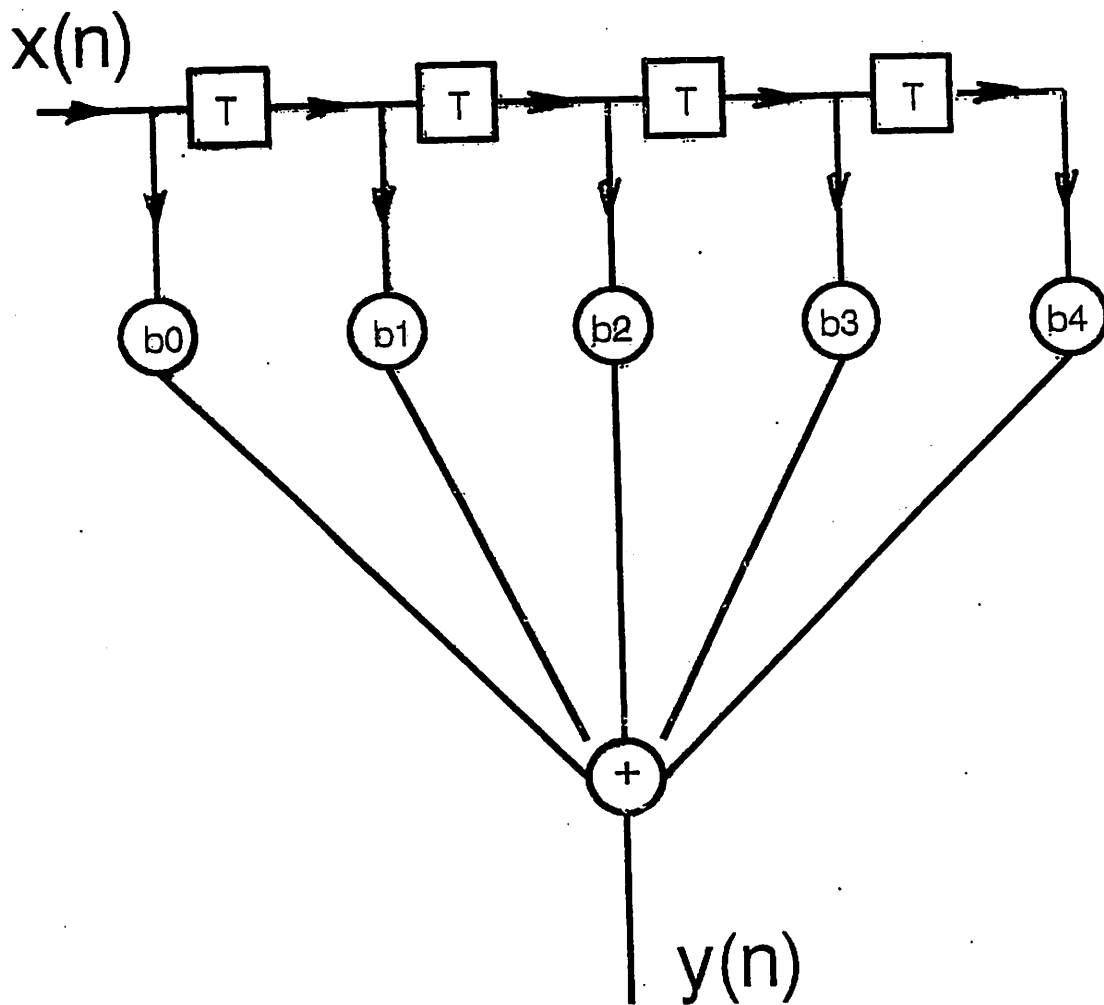
$$\text{III} : A_3, B_3, C_3, D_3$$

Randbedingungen

$$\left. \begin{array}{l} - y''(x_1) \\ - y''(x_4) \end{array} \right\} \text{ iterativ bestimmen}$$

# Verfahren zur Filterung

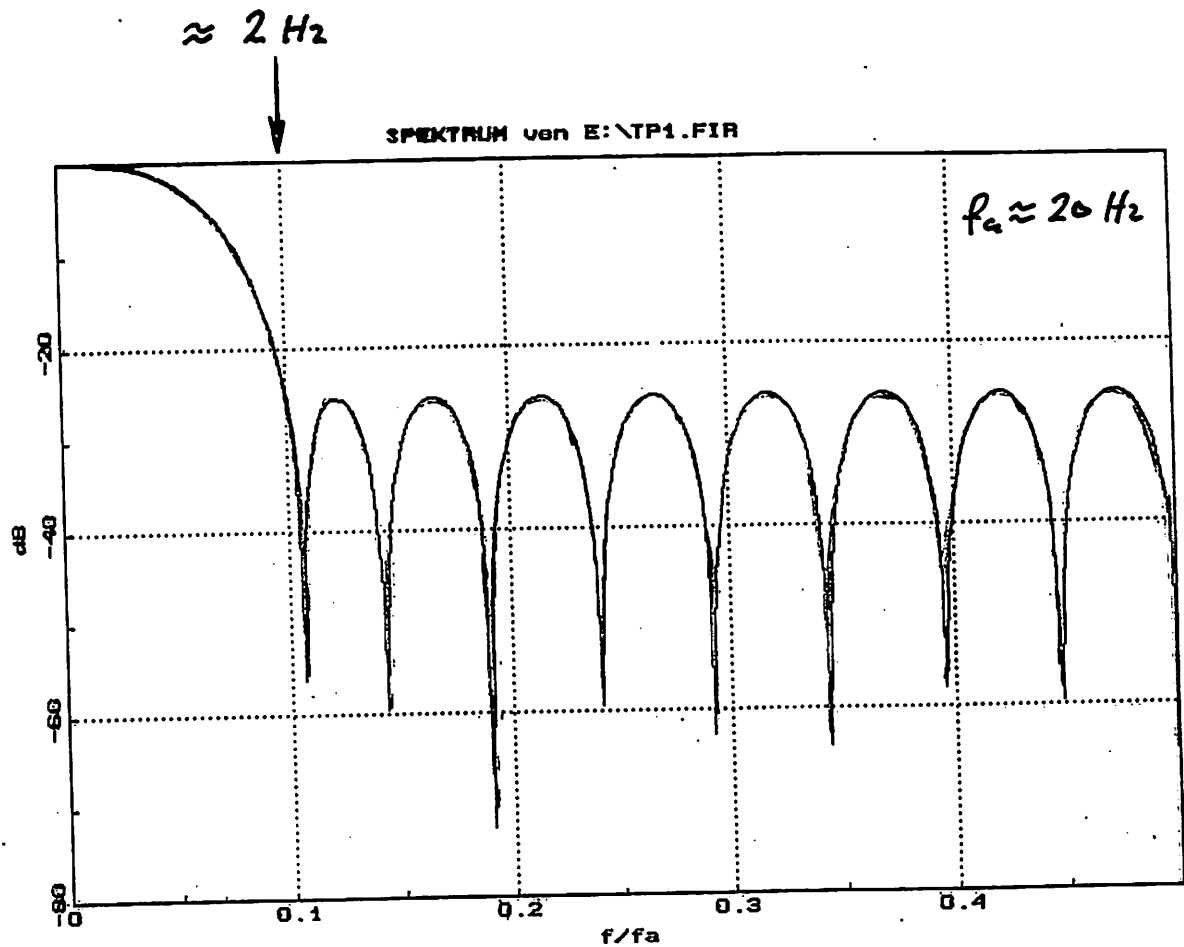
Nichtrekursives FIR-Filter



$$y(n) = \sum_{k=0}^4 b_k \cdot x(n-k)$$

$b_k$  aus gewünschter Filterkennlinie

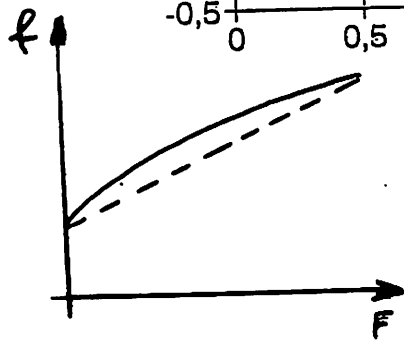
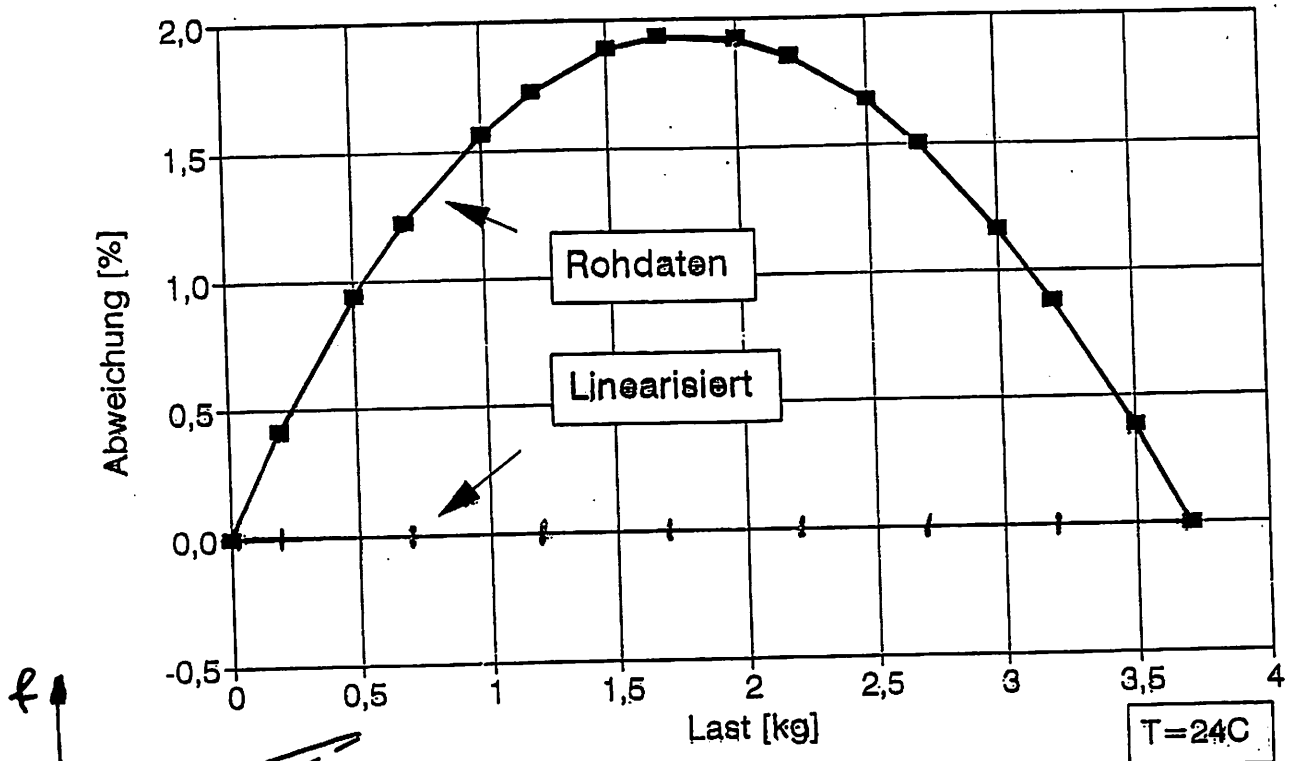
# Filterkennlinie im Funktionsmuster



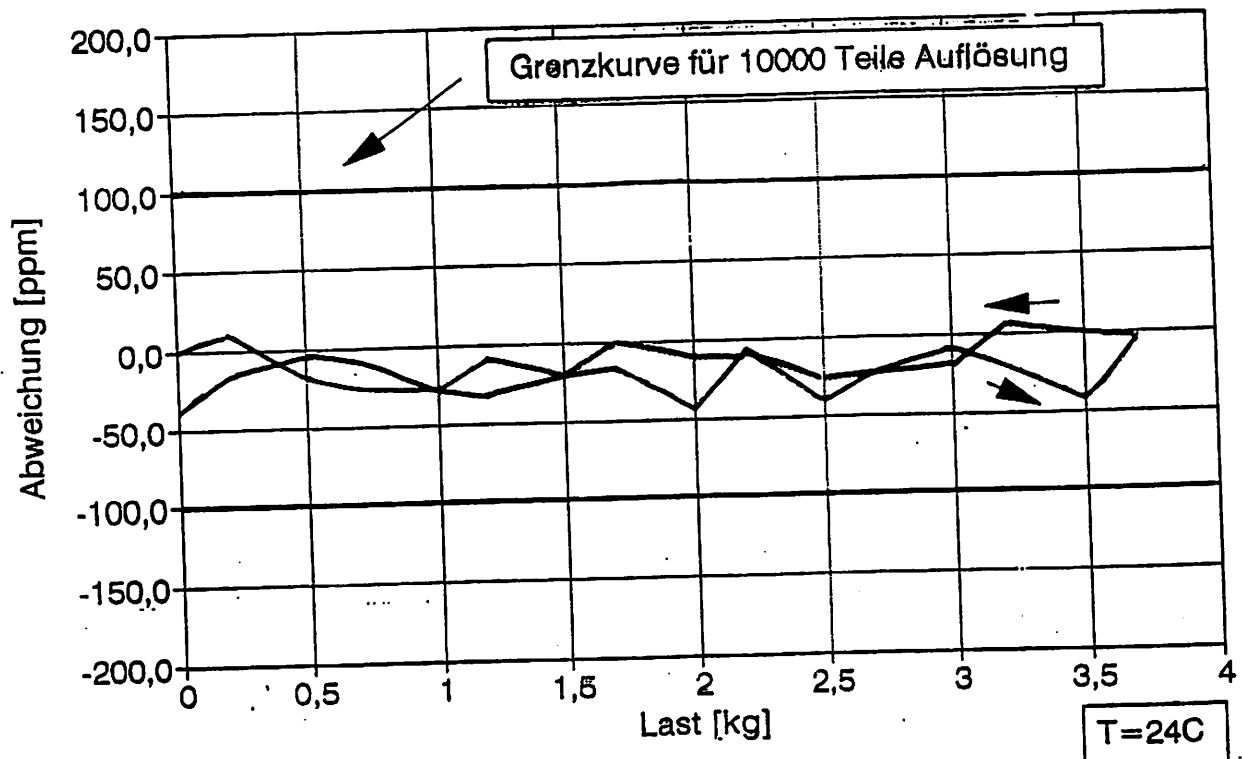
$k$	$b_k$	$k$	$b_k$
1	-0.03110	11	0.13266
2	-0.00829	12	0.12279
3	-0.00138	13	0.10471
4	0.01211	14	0.08114
5	0.03170	15	0.05566
6	0.05566	16	0.03170
7	0.08114	17	0.01211
8	0.10471	18	-0.00138
9	0.12279	19	-0.00829
10	0.13266	20	-0.03110

$$y_n = \sum b_k \cdot x_{n-k}$$

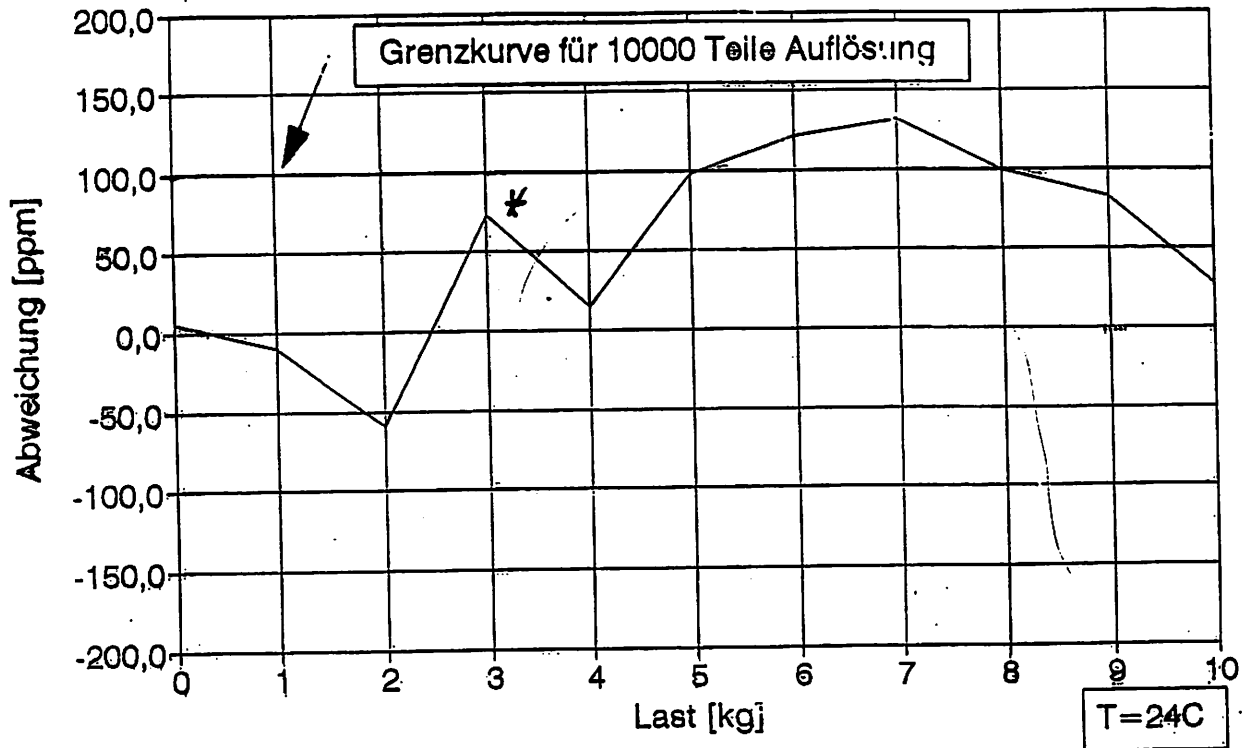
# Lastkurve für Aufnehmer RES 2 Mit und ohne Linearisierung



## Lastkurve für Aufnehmer RES 2 Linearisiert mit kubischen Splines

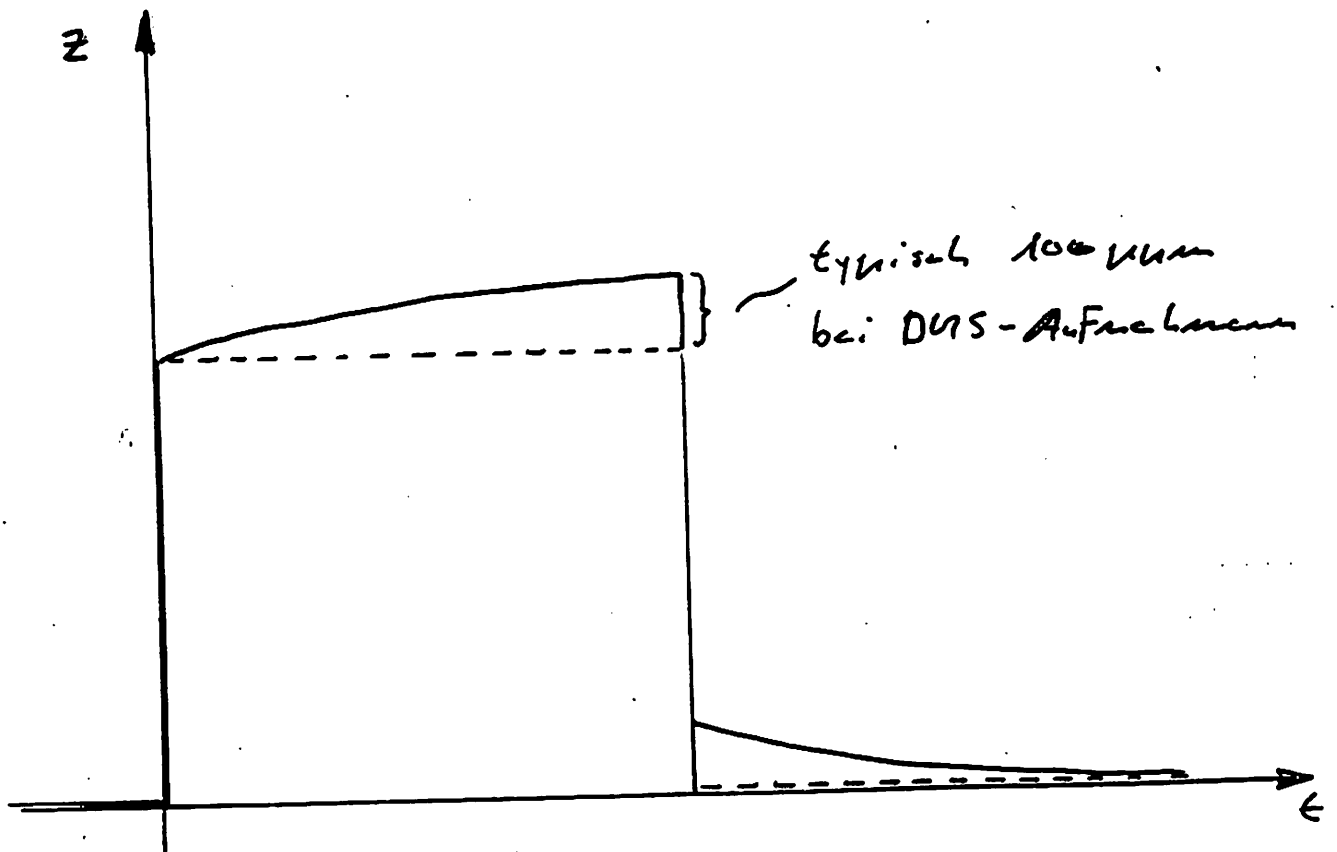
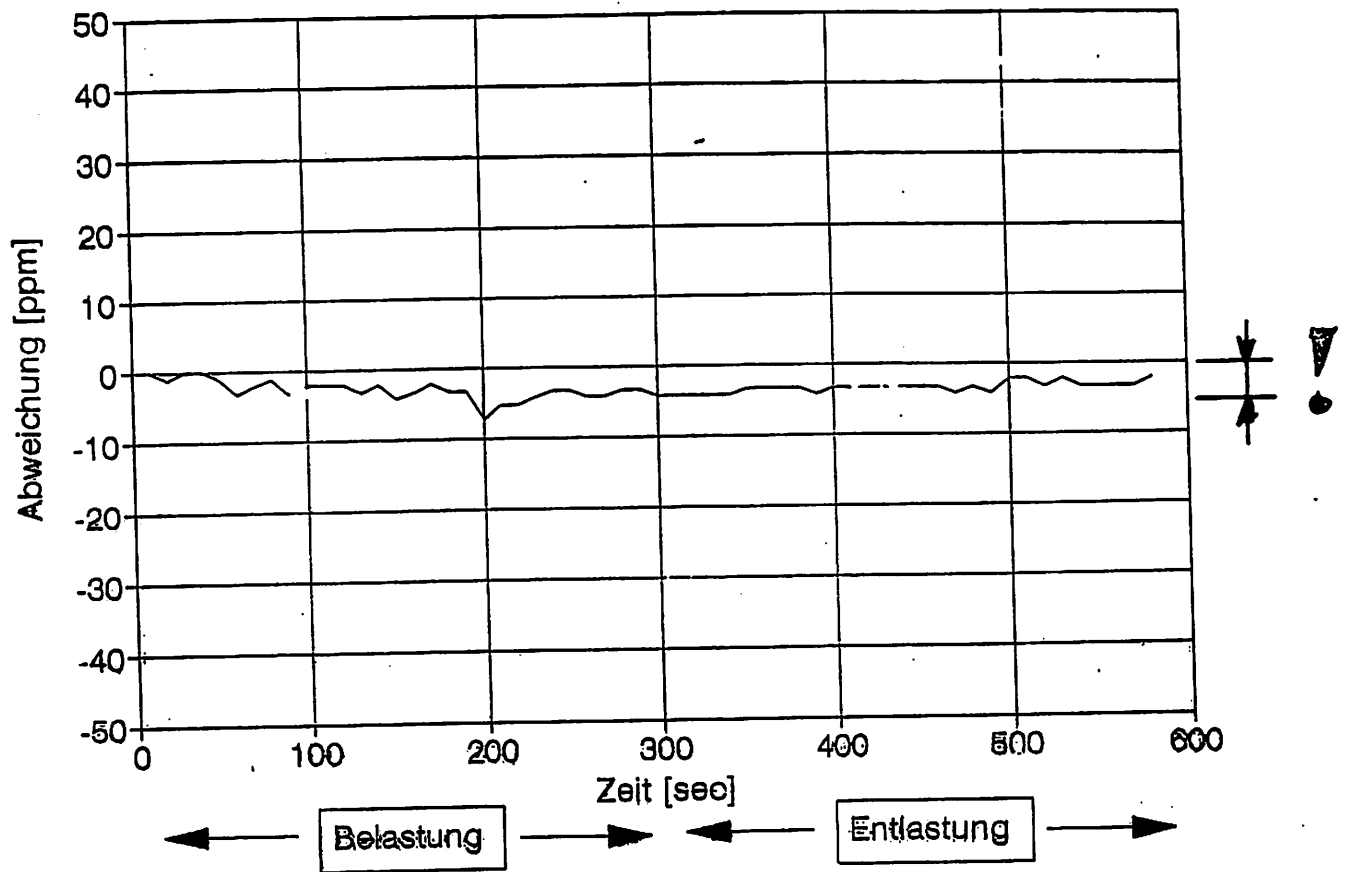


# Lastkurve für Aufnehmer RES 2 Linearisiert mit Polynom 2. Grades



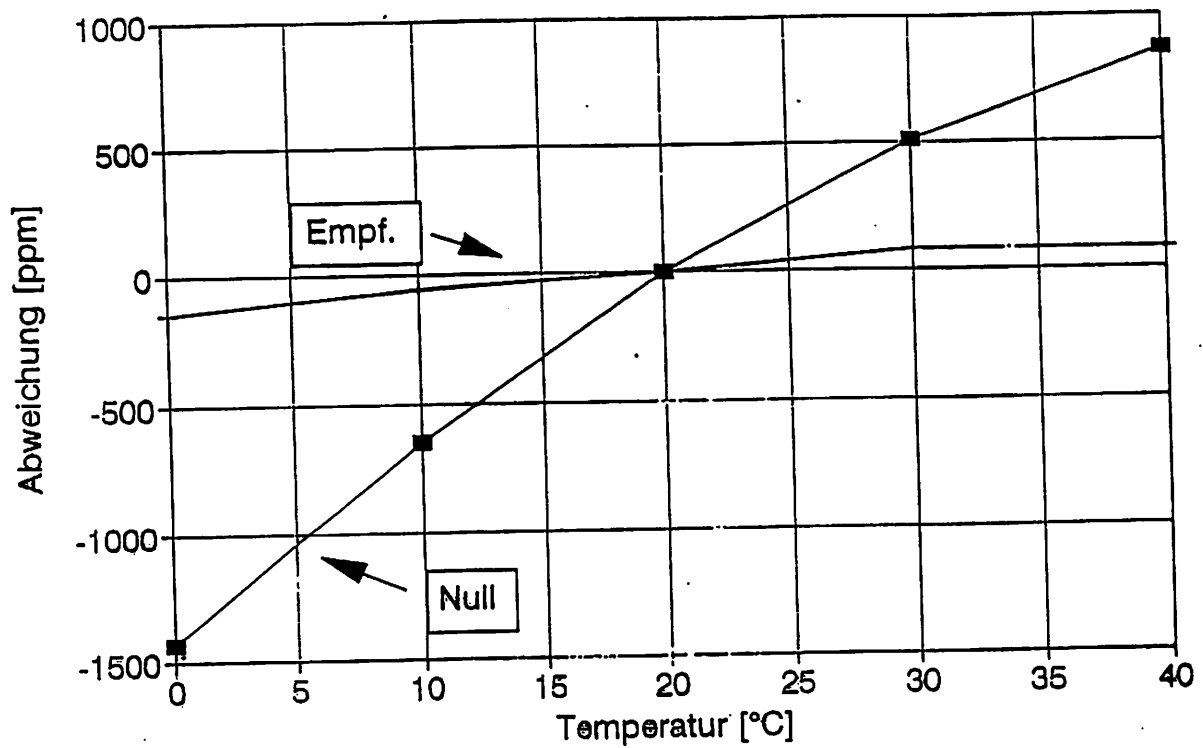
\*  $\Rightarrow$  Vorteile der abschnittsweisen Approximation

# Elastische Nachwirkung



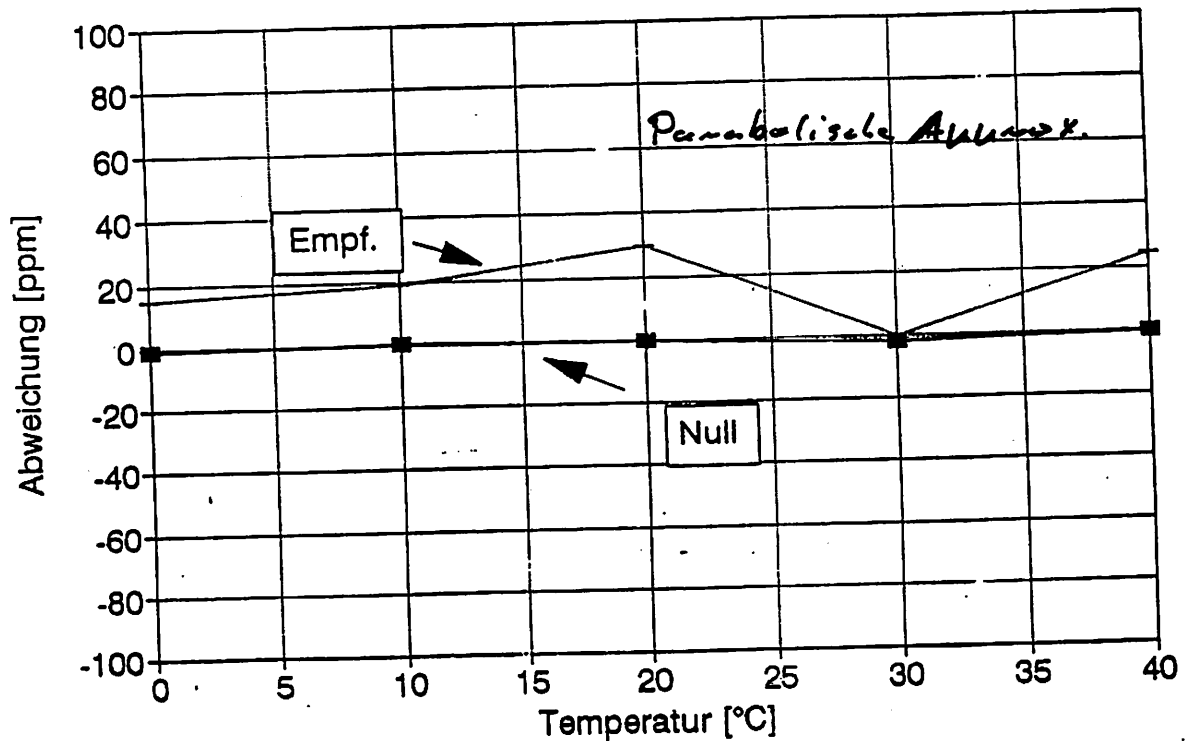
Temperaturgang  
von Nullpunkt und Empfindlichkeit

*Rohwerte*



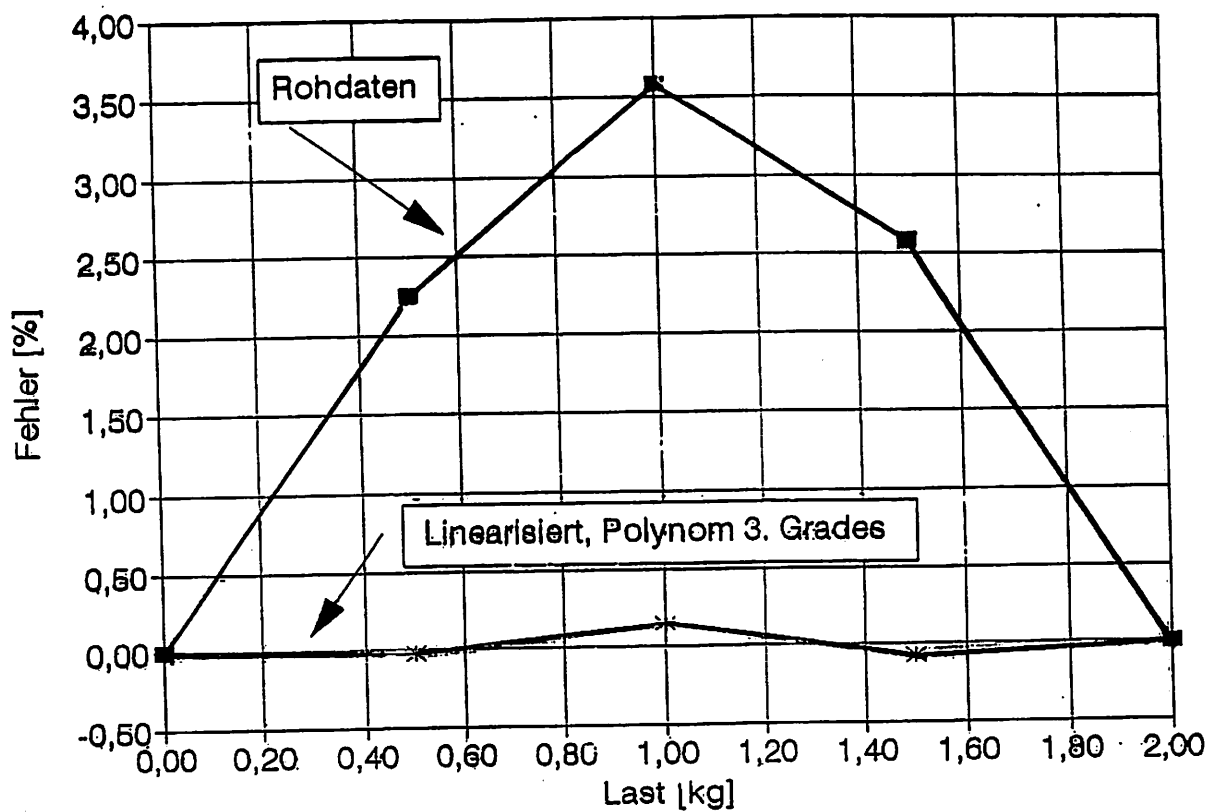
Temperaturgang  
von Nullpunkt und Empfindlichkeit

*Korr. Werte*

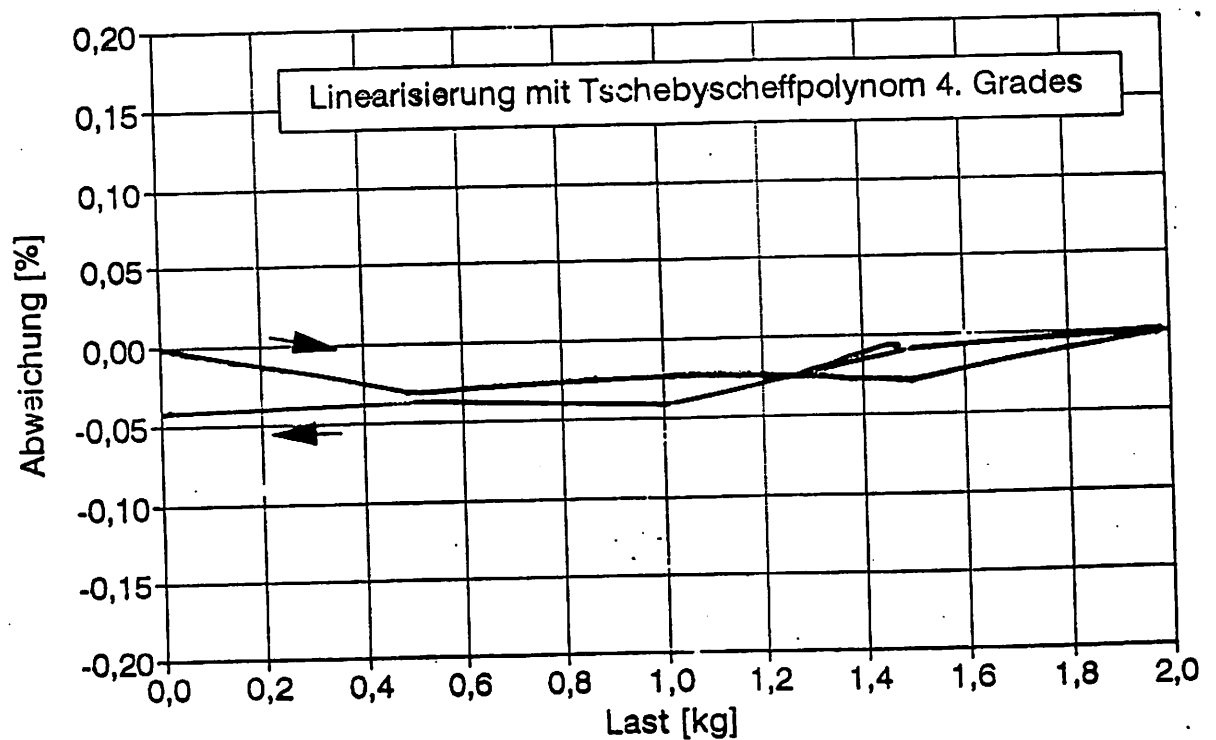




## Aufnehmer mit Si-Resonator

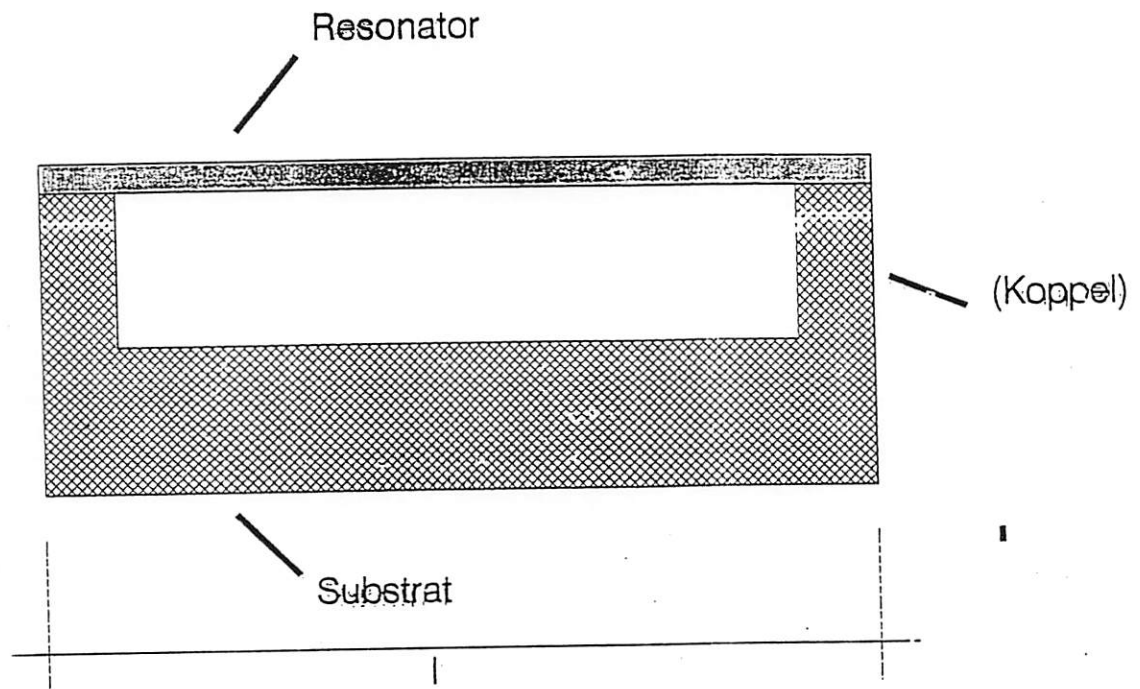


## Lastaufnehmer mit Si-Resonator Linearisiert

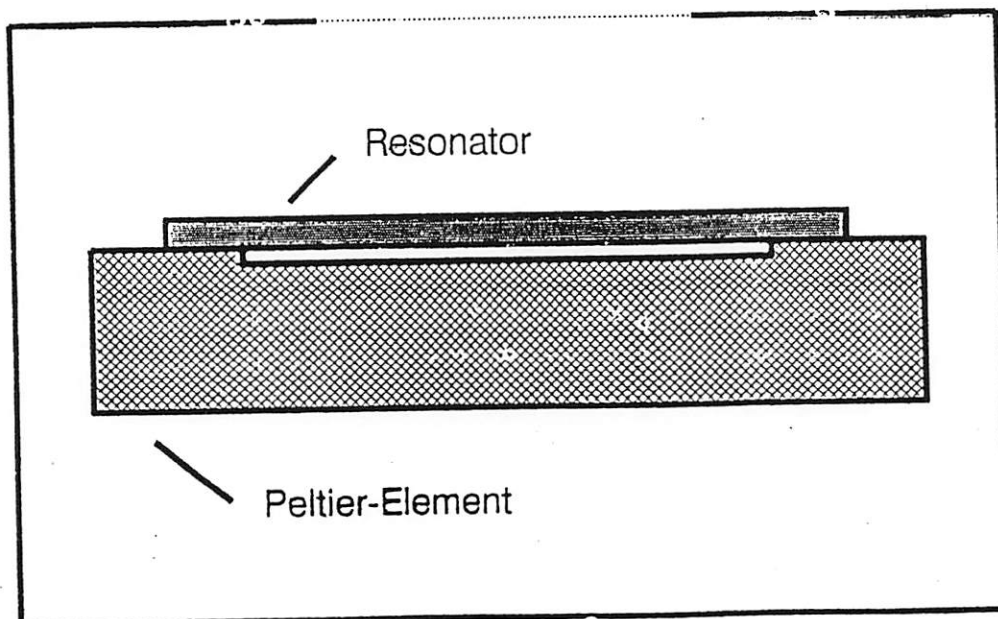


# Weitere Anwendungen

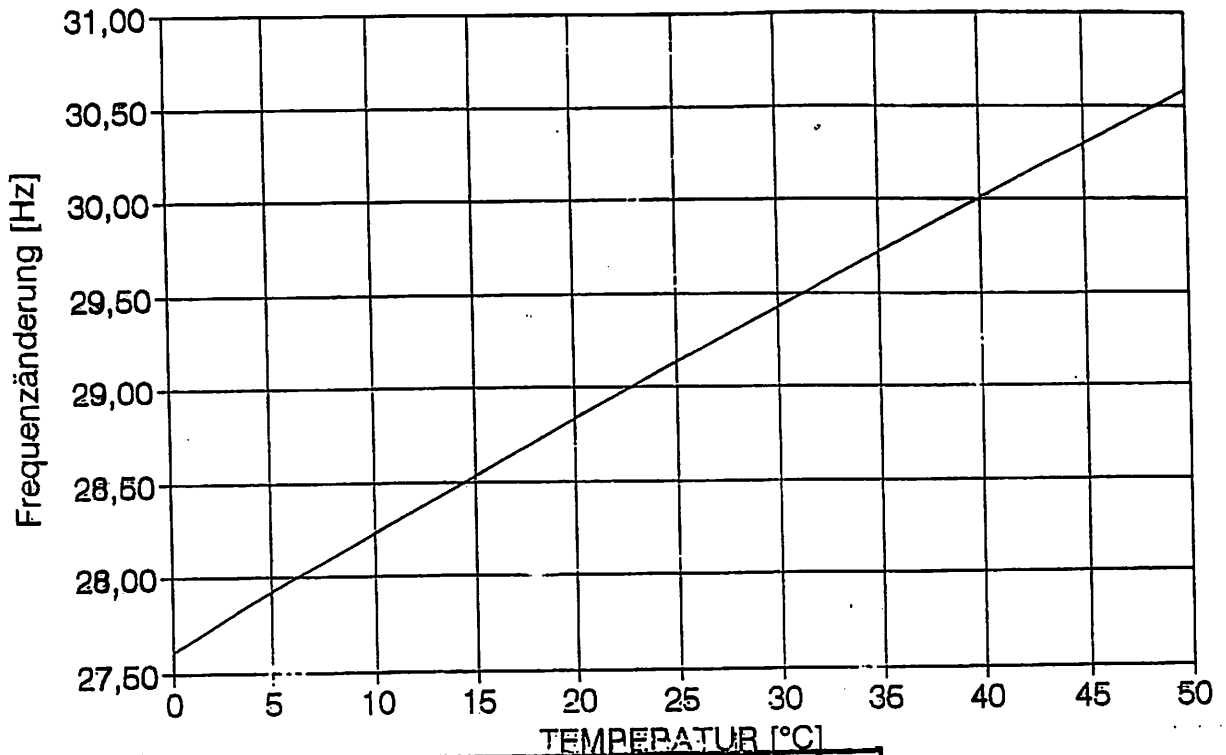
## 1. Alpha-Temperaturaufnehmer



## 2. Taupunktfühler (Hygrometer)



# Alpha Thermometer Frequenzänderung über Temperatur



$$\frac{df}{dT} = \frac{L_1 \cdot d_1 - L_2 \cdot d_2 - L_3 \cdot d_3}{\frac{L_1}{Q_1 \cdot E_1} + \frac{L_2}{Q_2 \cdot E_2} + \frac{L_3}{Q_3 \cdot E_3}}$$

**Substrat :** Alpha = 22 ppm/ C  
 E = 70000 N/qmm  
 l = 10 mm

Q = 20 qmm

**Koppel :** Alpha = 22 ppm/ C  
 k = 10000 N/mm

**Resonator** Alpha = 13 ppm/ C  
 E = 87000 N/qmm  
 l = 8 mm

d = 0.3 mm

b = 0.3 mm