

## Modul TA.PR+SY

# Zugmittelgetriebe

## 2. Teil: Zahnriemengetriebe



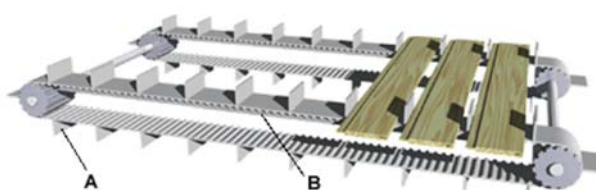
Antriebstechnik



Transporttechnik



Lineartechnik



Bilder: MULCO, Gates

FH Zentralschweiz

## Inhalt

- Geschichte, Entwicklung und Trends
- Aufbau, Geometrie und Werkstoffe
- Getriebearten und Konstruktion
- Berechnung von Zahnriemengetrieben
- Vorspannung, Genauigkeit, Wirkungsgrad und Geräuschverhalten

### Weiterführende Literatur:

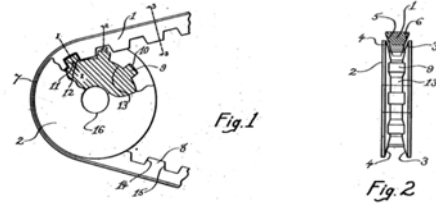
- [1] *Roloff / Matek*; Maschinenelemente: Normung, Berechnung, Gestaltung; 22. Auflage, Verlag Vieweg, Wiesbaden 2015
- [2] *Nagel T.*; Zahnriemengetriebe: Eigenschaften, Normung, Berechnung, Gestaltung, Hanser Verlag, München 2008
- [3] *Perneder P.*; Handbuch Zahnriementeknik, Grundlagen, Berechnung, Anwendung, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg 2009

## Geschichte des Zahnriemens

- Der erste Zahnriemen wurde 1944 entwickelt und von der damaligen Firma Uniroyal (heute Gates) zum Patent angemeldet. (Polychloroprene)
  - 1964 Polyurethan Riemen
  - 1970 Halbrundzahnprofil (High Torque Drive HTD)
  - 2000 Aramid Zugstränge
  - 2007 Carbon Zugstränge



Erste Zahnriemenanwendung in einer Nähmaschine [2]

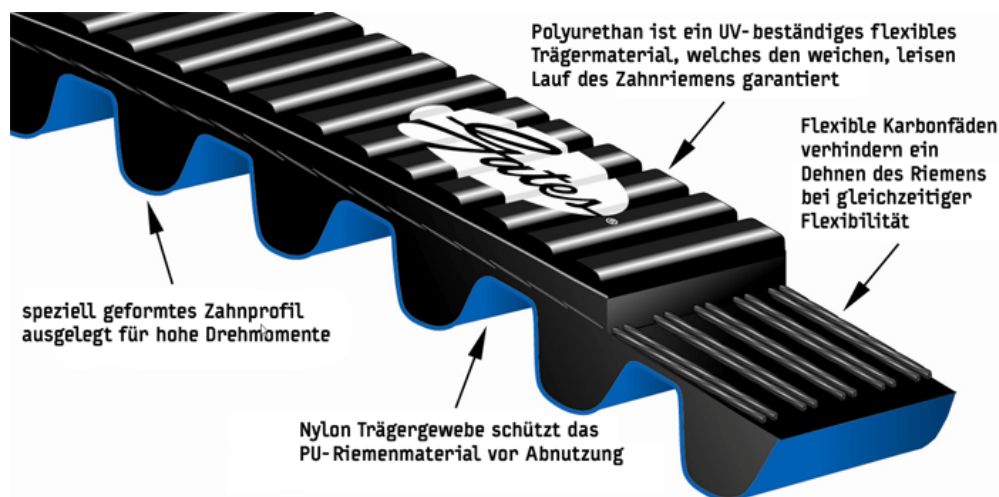


Auszug aus US Patent 2'397'312

## Entwicklung und Trends

### • Beispiel aus der aktuellen Zahnriemen-Entwicklung

- Einbettung von Carbon-Fasern in ein Trägermaterial  
Patentanmeldung THE GATES CORPORATION, EP 0 841 500



Priorität: 2. November 2011

Bild: Gates

## Entwicklung und Trends



Gates Poly Chain GT Carbon Zahnriemen als Fahrradtrieb verbaut in CH Fahrrad Marke Simpel

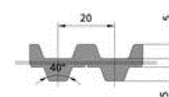
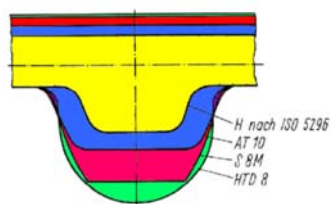
© HSLU PR+SY\_H16: Zahnriemengetriebe

Bilder: Gates und Simpel

5

## Zahnformen und Werkstoffe

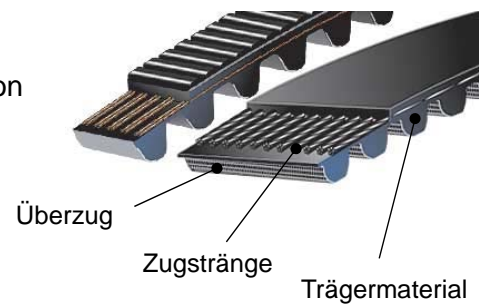
### • Zahnformen



doppeltverzahnt

### • Werkstoffe




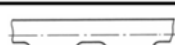

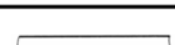



- Zugstränge: Glasfasern, Stahl, Aramid, Carbon
- Trägermaterial: Polychloropren, Polyurethan
- Überzug: Polyamidgewebe



© HSLU PR+SY\_H16: Zahnriemengetriebe

15

## Zahnprofil

Profilbezeichnung	Teilungs- kurzzeichen	Teilung in mm	Riemenprofil (nicht maßstäblich)
Trapezprofil nach DIN 7721	T2,5	2.500	
	T5	5.000	
	T10	10.000	
	T20	20.000	
Trapezprofil ähnlich DIN 7721	T2	2.000	
	M	2.032	
Trapezprofil nach DIN / ISO 5296 sowie DIN / ISO 5294	MXL	2.032	
	XXL	3.175	
	XL	5.080	
	L	9.525	
	H	12.700	
	XH	22.225	
Hochleistungsprofil Trapezform	XXH	31.750	
	AT3	3.000	
	AT5	5.000	
	AT10	10.000	
	AT20	20.000	
Hochleistungsprofil Kreisform (8M und 14M genormt ISO 13050 als H-System)	HTD 3M	3.000	
	HTD 5M	5.000	
	HTD 8M	8.000	
	HTD 14M	14.000	
	HTD 20M	20.000	
Hochleistungsprofil Parabolform (8M und 14M genormt ISO 13050 als S-System)	S 2M	2.000	
	S 3M	3.000	
	S 4,5M	4.500	
	S 5M	5.000	
	S 8M	8.000	
	S 14M	14.000	
Hochleistungsprofil Parabolform	GT 3M	3.000	
	GT 5M	5.000	
	GT 8M	8.000	
	GT 14M	14.000	
Hochleistungsprofil Trapezform mit Einkerbung	ATP10	10.000	
	ATP15	15.000	
Hochleistungsprofil Parabolform mit Einkerbung (RPP8M und RPP14M genormt nach ISO 13050 als R-System)	RPP 3	3.000	
	RPP 5	5.000	
	RPP 8	8.000	
	RPP 14	14.000	
	OMEGA 2M	2.000	
	OMEGA 3M	3.000	
	OMEGA 5M	5.000	
	OMEGA 8M	8.000	
	OMEGA 14M	14.000	

© HSLU PR+SY\_H16: Zahnriemengetriebe

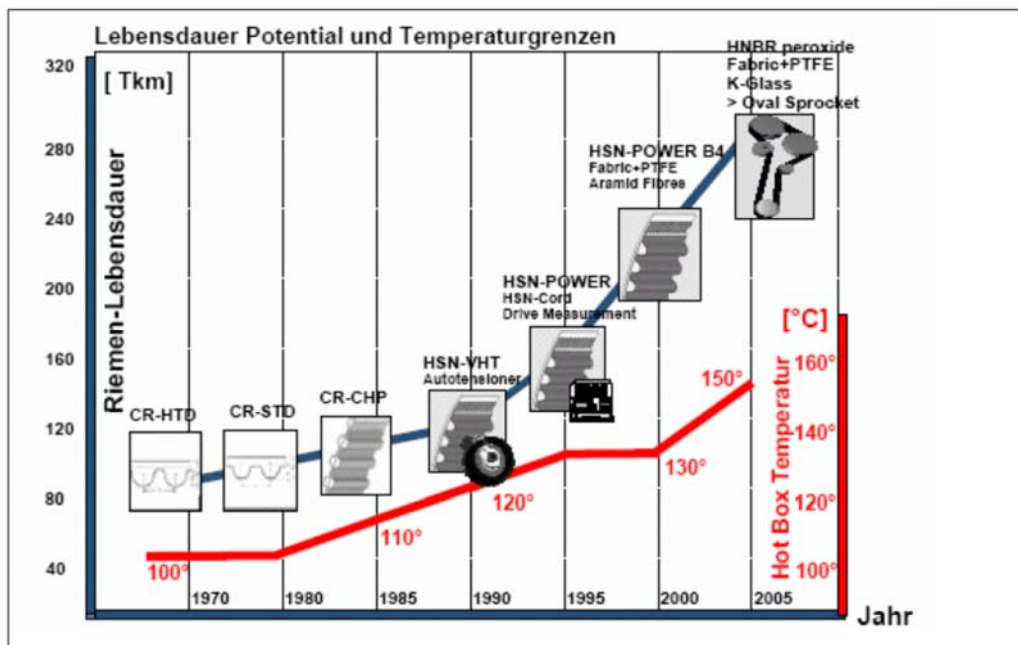
Quelle: ifte, Dresden

Übersicht über genormte und weitere ausgewählte Profile für Zahnriemen.

Es gibt eine Vielzahl verschiedener Profilgeometrien und Teilungen. Nur ein kleiner Teil davon ist genormt.

16

## Temperaturgrenzen und Lebensdauer von Zahnriemen



Einfluss der Riemenkomponenten auf die Riemenlebensdauer, [2]

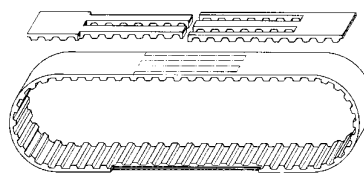
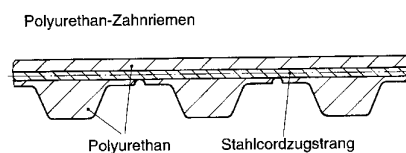
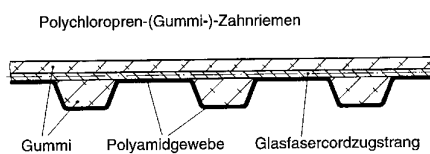
## Bauraumvergleich verschiedener Zahnriemen

Antrieb	Gummi HTD®	Gummi GT3	Poly Chain® GT2	Poly Chain® GT Carbon™
Teilung (mm)	14	14	14	14
Riemenscheiben (Zähnezahl)	P32/P64	P32/P64	P32/P64	P32/P64
Durchmesser (mm)	142/285	142/285	142/285	142/285
Riemenbreite (mm)	170	85	37	20



Bauraumvergleich Gates

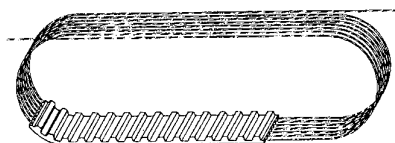
## Herstellung der Zahnriemen



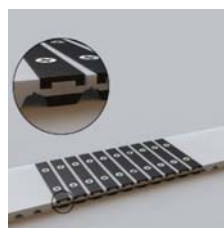
Verschweisste Meterware



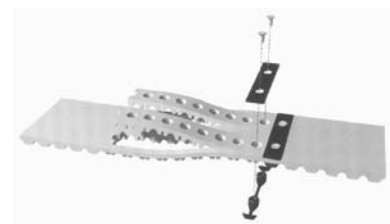
Giessform mit aufgespultem Zugstrang auf dem Formkern



Endlos-Zahnriemen



Zahnriemensschloss von BRECO





## Herstellung der Zahnriemen

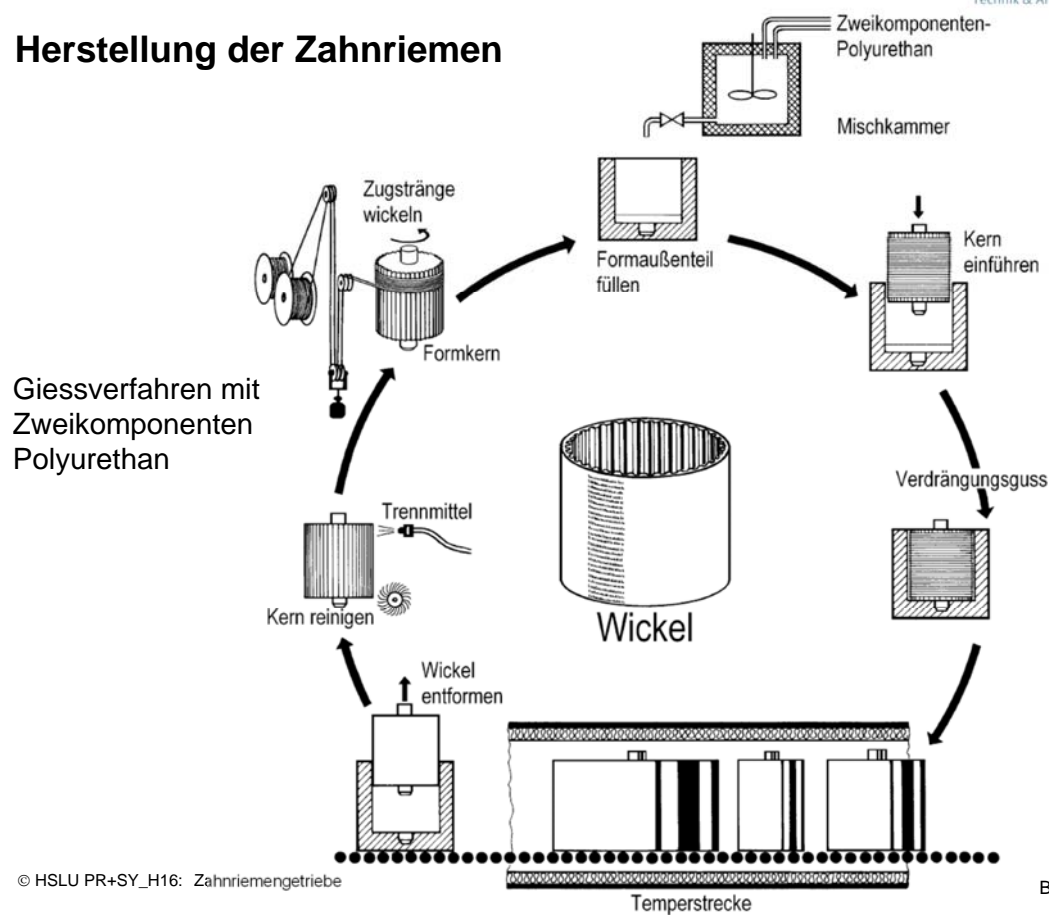
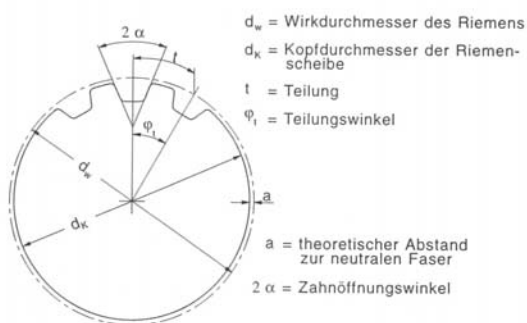


Bild [3]

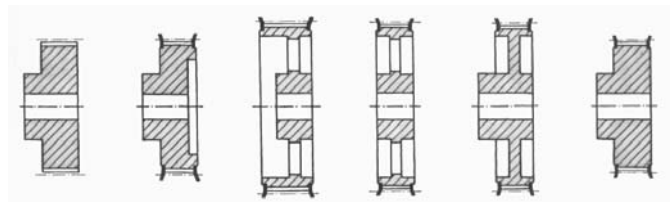
21

## Zahnscheiben

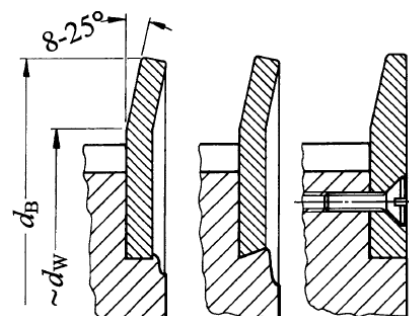


Parameter am Zahnriemenrad

### Ausführungsbeispiele von Zahnscheiben



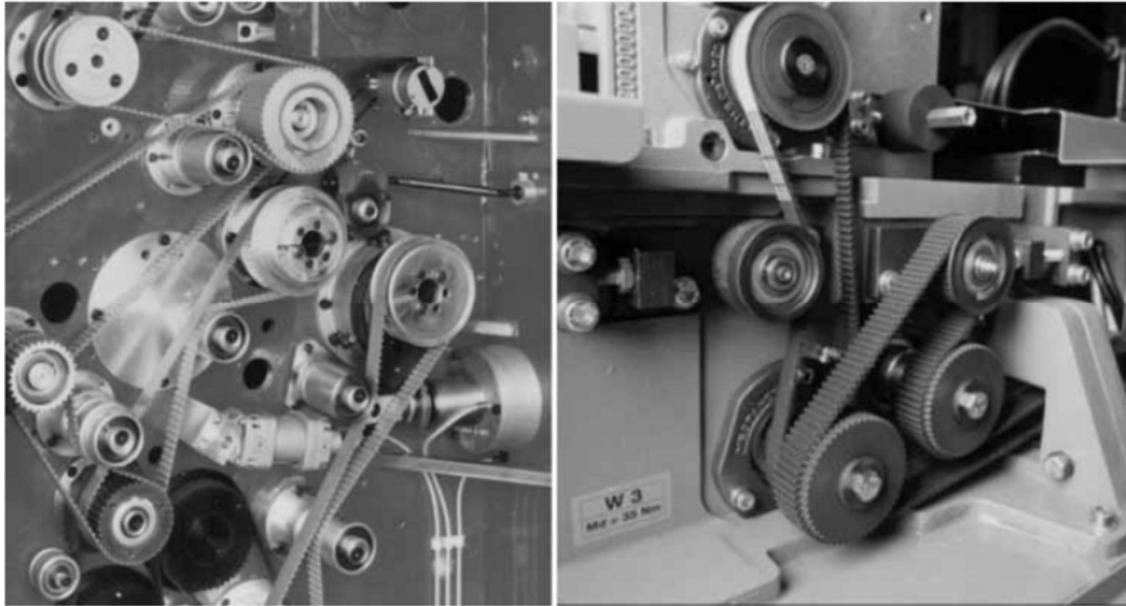
Übliche Werkstoffe für Zahnscheiben sind Stähle, Aluminium höherer Festigkeit, Gusseisen, Sintermetalle und Kunststoffe.



Ausführung von Bordscheiben und Befestigungsarten gebördelt, mit Hinterschnitt gebördelt, geschraubt.

## Beispiele von Zahnriemengetrieben

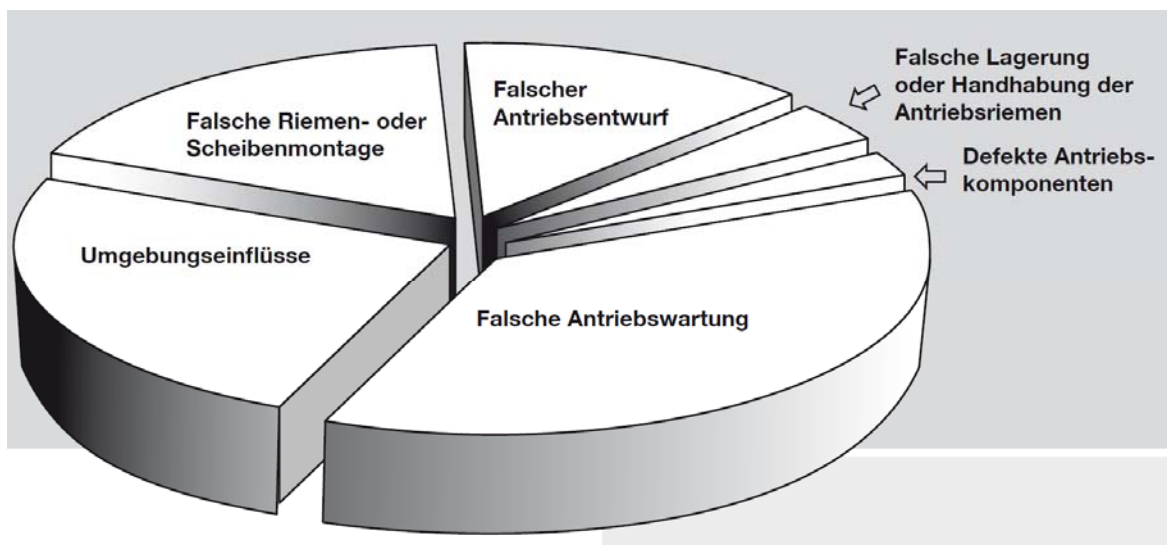
Typische Einsatzgebiete: Antriebstechnik, Lineartechnik, Transporttechnik



Zahnriemengetriebe in Textil- und Werkzeugmaschine

Bilder: [2]

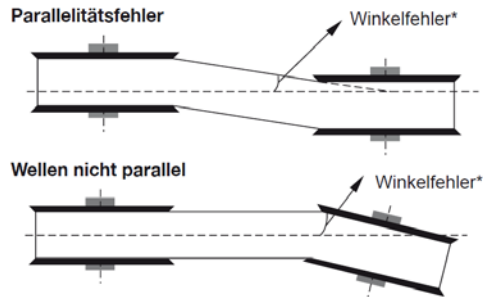
## Ursachen von Problemen bei Zahnriemenantrieben



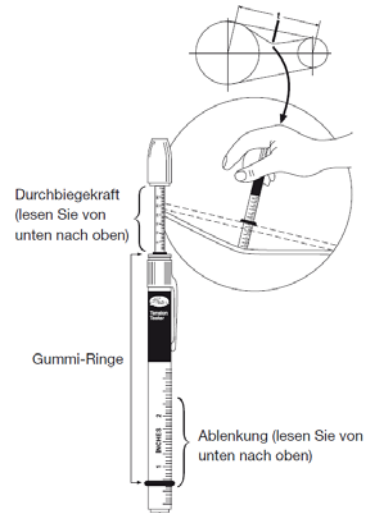
Quelle: Gates

## Ursachen von Antriebsproblemen

### Fluchtungsfehler

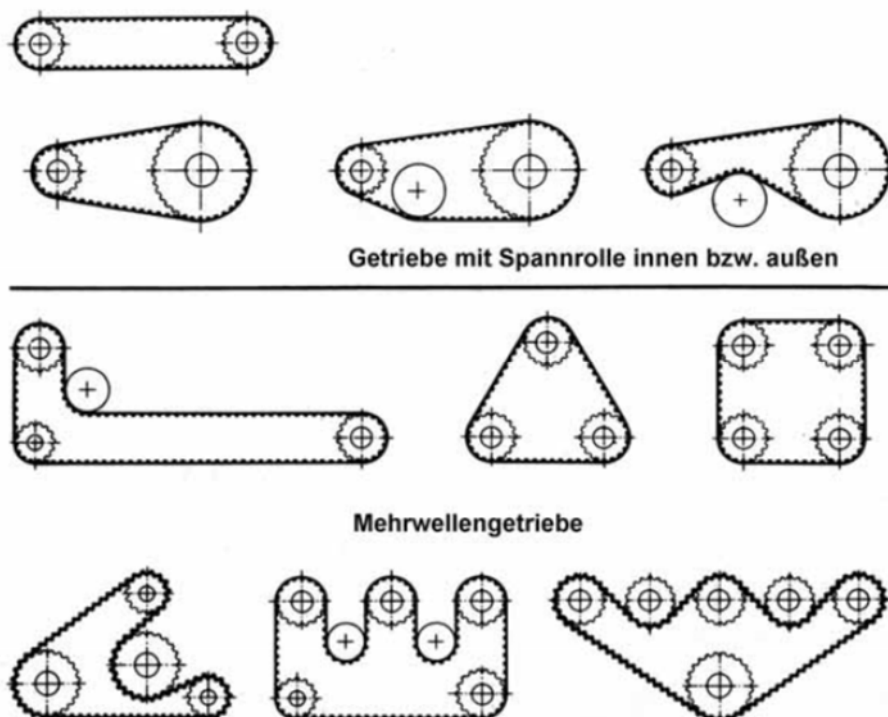


### Falsche Vorspannung



Quelle: Gates

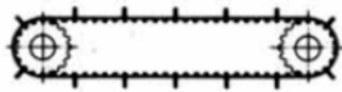
## Getriebearten und Konstruktionsweisen



Quelle: Mulco



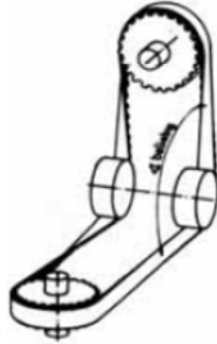
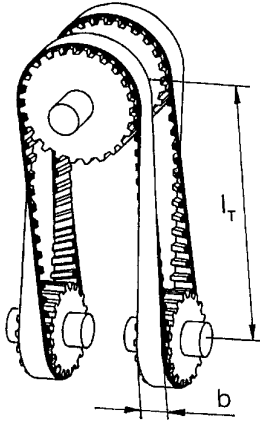
## Getriebearten und Konstruktionsweisen



Zahnriemen mit Nocken



Linearschlitten



$$\frac{\text{Trumlänge}}{\text{Riemenbreite}} \geq 20$$

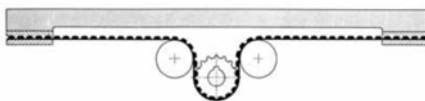
Quelle: Mulco

## Getriebearten und Konstruktionsweisen

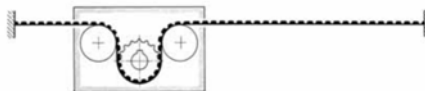
### Bauarten von Linearantrieben



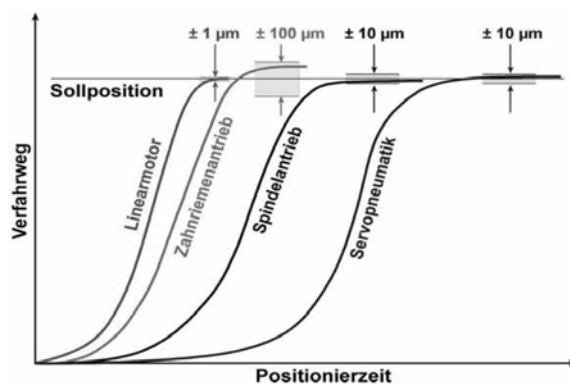
Linearschlitten



Lineartisch

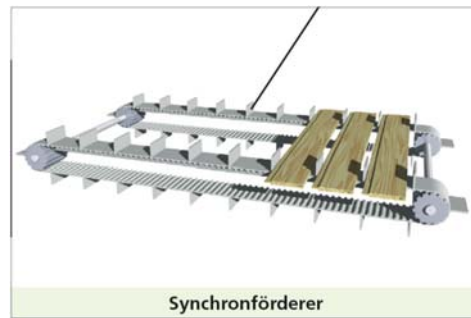
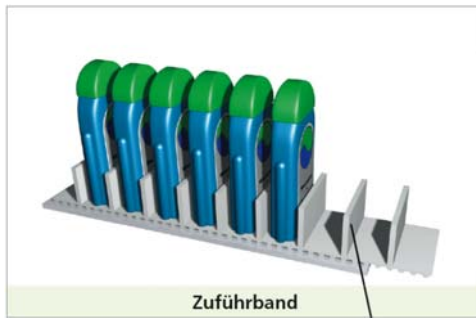


Linear-Laufkatze



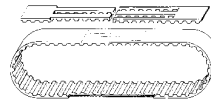
Positionier- und Wiederholgenauigkeiten  
von Linearantrieben im Vergleich

## Zahnriemen in der Transporttechnik



In der Transporttechnik werden überwiegend Polyurethan-Zahnriemen eingesetzt:

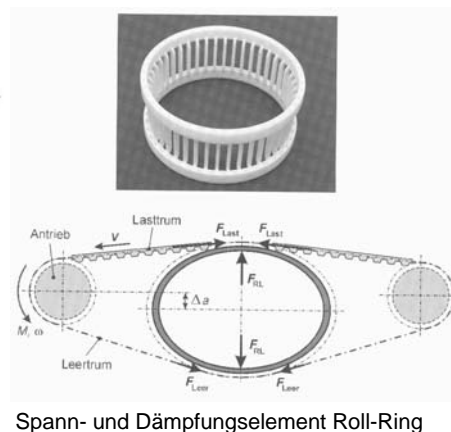
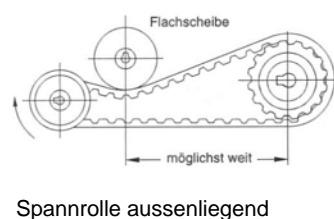
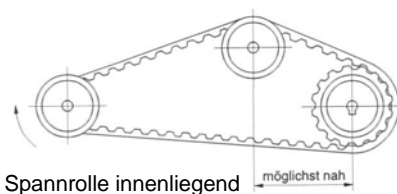
- leicht in Meterware herstellbar
- einfache Verbindung zu Endlosriemen
- beliebige Nockenformen können aufgeschweisst werden



Bilder: Mulco

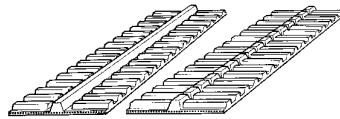
## Spann- und Führungseinrichtungen

- Durchmesser der Spannrolle  $\geq$  kleinste Zahnscheibe.
- Breite der Spannrolle  $\geq$  der eingesetzten Zahnscheiben.
- Spannrolle im Lostrum anordnen.
- Beim Einsatz als Innenspannrollen können bei Zähnezahlen  $> 40$ , zylindrische Rollen eingesetzt werden.
- Beim Einsatz aussen mit Gegenbiegung, immer zylindrische Rollen einsetzen.

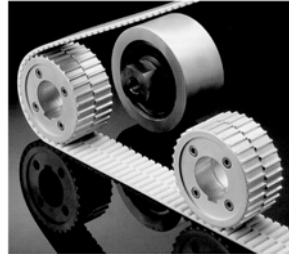


## Selbstführende Zahnriemen

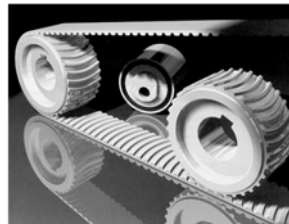
- Spurzahnriemen  
TK, ATK



- Versetzte Verzahnung  
SFAT



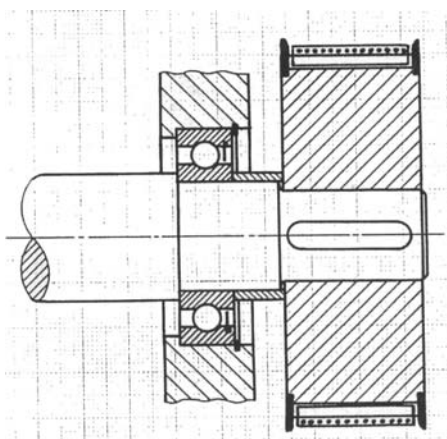
- Bogenverzahnung  
BAT



Bilder: Mulco

## Grössenverhältnisse zur Grobauslegung von Zahnriemenantrieben

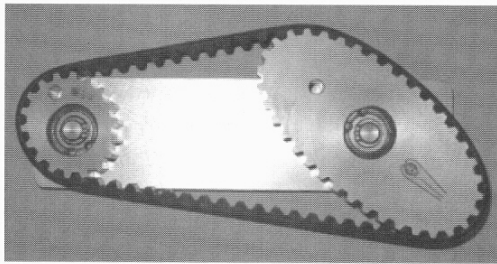
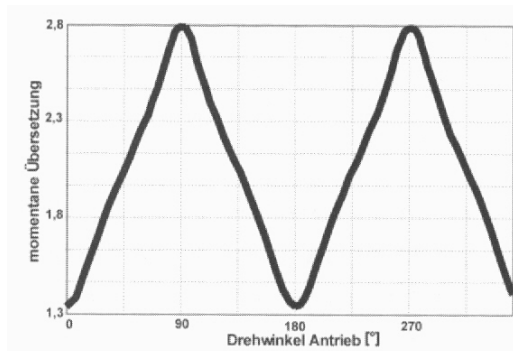
	Wellenzapfen $d$	Zahnteilung $t$	Riemenbreite $b$	Zahnscheiben- durchmesser $d_0$
<b>Verhältnis</b>	<b>1</b>	<b><math>0.5 \times d</math></b>	<b><math>1 \dots 2 \times d</math></b>	<b><math>2.5 \dots 5 \times d</math></b>
<b>Beispiel</b>	<b>20</b>	<b>T 10</b>	<b>25 mm</b>	<b>80 mm</b>



Beispiel einer ausgewogenen  
Zahnscheibenkonstruktion

Bei den zunehmend leistungsfähigeren Riemenbauarten werden die Werte für  $t$ ,  $b$  und  $d_0$  in Bezug zum Wellendurchmesser tendenziell kleiner, d.h. der erforderliche Bauraum für den Riementrieb wird kleiner.

## Ovalradtechnik



Quelle: [2]

### Funktionsprinzip der Ovalradtechnologie

Durch exzentrische Riemenräder oder durch ovale Formen können ungleichmässig übersetzende Getriebe gebaut werden.

Die durch den Ovalradantrieb erzeugten Riemenkräfte können gezielt zur Verminderung von Kraftspitzen in Antrieben eingesetzt werden.

Mit der erstmals im Jahr 2004 von Audi eingesetzten Technologie können die Kräfte im Nockenwellenantrieb bis zu 35% reduziert werden. Quelle: ifte

## Berechnung von Zahnriemengetrieben

- Allgemeingültige Berechnung für Zahnriemenantriebe:
  - Parameteraufbereitung
  - Auswahl des Zahnriemens
  - Grobauslegung
  - Nachrechnung

Bei der Berechnung von Zahnriemen ist grundsätzlich nach den für die entsprechende Bauart geltenden Herstellerangaben vorzugehen.

In der VDI-Richtlinie 2758 werden die Berechnungsverfahren für Riemengetriebe dargelegt.

Die Auswahlempfehlungen für verschiedene Riementypen basieren auf dieser Richtlinie.

# Auslegung von Zahnriemengetrieben

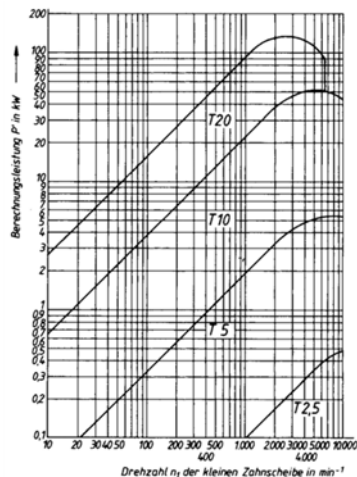
## Vorgehensschritte

1. Parameteraufbereitung und bestimmen der Berechnungsleistung  $P_B$   
(Betriebsbedingungen, Übersetzungen, Drehzahlen, Geometrische Randbedingungen, Spannsystem etc.)
2. Auswahl der Zahnriementeilung
3. Auswahl Zahnscheibenkombination, Zahnriemenlänge, Achsabstand
4. Bestimmung der Zahnriemenbreite (Zahntragfähigkeit)
5. Kontrolle der Seilzugfestigkeit (Polyurethanriemen)
6. Kontrolle der Biegewilligkeit (Stahlzugstränge)
7. Berechnung der Riemenvorspannung
8. Bei Linearantrieben Berechnung auf Steifigkeit

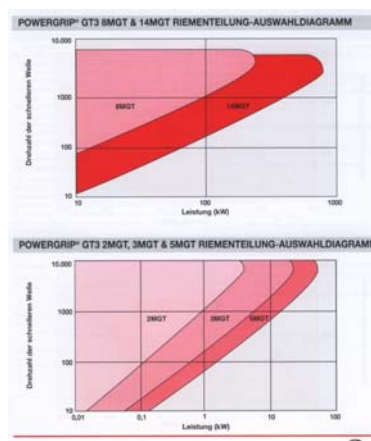
# Auslegung von Zahnriemengetrieben

- Berechnungsleistung  $P_B = P_N * K_A$
- Auswahl des Riemenprofils und der Riementeilung  
(gemäss Auswahldiagramme der Riemenhersteller)

## Polyurethanriemen: TB 16-18



## Polychloropreneriemen: Beispiel Gates





## Auslegung von Zahnriemengetrieben

- Auswahl Zahnscheibenkombination, Zahnriemenlänge, Achsabstand

- Zähnezahlen Zahnscheiben

$$i = \frac{n_1}{n_2} = \frac{z_2}{z_1} = \frac{d_2}{d_1}$$

- Zähnezahl Zahnriemen

$$X = \frac{2 * e}{t} + \frac{z_1 + z_2}{2} + \left( \frac{z_2 - z_1}{2 * \pi} \right)^2 * \frac{t}{e}$$

- Achsabstand

$$e \approx \frac{1}{4} \left( L - \frac{t}{2} (z_1 + z_2) \right) + \frac{1}{4} \sqrt{\left( L - \frac{t}{2} (z_1 + z_2) \right)^2 - 2 \left( \frac{t}{\pi} (z_2 - z_1) \right)^2}$$

- Grobauslegung

- Unter Verwendung der Kennwerte des Riementriebes und der riemenspezifischen Angaben wird die übertragbare Leistung ermittelt.

## Auslegung von Zahnriemengetrieben

- Grobauslegung: Riemenbreite, übertragbare Leistung

- **Polychloropreneriemen**

$$P_{Riemen} = P_{spez} * b_f * z_f * l_f \geq P_B$$

 $P_{Riemen}$ 

Riemenleistung

 $P_{spez}$ 

spezifische Riemenleistung

 $b_f$ 

Breitenfaktor

 $z_f$ 

Zähnezahlfaktor,  $z_f = 1$  bei  $z \geq 6$ 
 $l_f$ 

Längenfaktor

- **Polyurethanriemen**

$$b \geq \frac{P_B}{z_k * z_e * P_{spez}}$$

 $P_B$ 

Berechnungsleistung

 $T_B$ 

Berechnungsdrehmoment

 $P_{spez}$ 

spezifische Riemenleistung W/mm, gemäss Hersteller

 $T_{spez}$ 

spezifische Drehmoment Nm/mm

 $z_k$ 

Zähnezahl der kleinen Scheibe

 $z_e$ 

eingreifende Zähnezahl  $\leq 12$ 

$$b \geq \frac{T_B}{z_k * z_e * T_{spez}}$$

Ist die übertragbare Leistung zu klein, oder die erforderliche Breite zu gross, so ist ein leistungsstärkeres Profil zu wählen.

## Kontrolle der Seilzugfestigkeit

- Seilzugfestigkeit in Abhängigkeit der Riementeilung und der Riemenbreite  
Beispiel Synchroflex T2.5 (MULCO)

zulässige Zugkraft des Riemens  $F_{zul}$  [N]

Riemenbreite $b$ [mm]	4	6	10	16	25	32
SYNCHROFLEX T2,5	39	65	117	195	312	403
SYNCHROFLEX T2,5-DL	39	65	117	195	312	403
SYNCHROFLEX T2,5-FA	39	65	117	195	312	403

DL: doppelt verzahnt

FA: verstärkter Riemenrücken

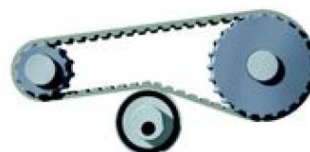
Weitere Werte siehe TB 16-9c

## Kontrolle der Biegewilligkeit

- Beachtung der Mindestzähnezahl und des Mindestdurchmessers  
Beispiel Synchroflex T2.5 (MULCO)



( X ) ohne Gegenbiegung



( X X ) mit Gegenbiegung

Riementyp	Zähnezahl $z_{min}$ ( X )	Spannrolle $d_{min}$ [mm] ( X )	Zähnezahl $z_{min}$ ( X X )	Spannrolle $d_{min}$ [mm] ( X X )
SYNCHROFLEX T2,5	10	15	18	15
SYNCHROFLEX T2,5-DL	10	15	18	15
SYNCHROFLEX T2,5-FA	10	15	18	15

## Berechnung von Zahnriemengetrieben

- Nachrechnung
  - Die Nachrechnung kann mit der in [2] dargestellten Methode oder mit einer Berechnungssoftware erfolgen. Die Berechnungsprogramme werden von den Riemenherstellern kostenfrei angeboten.
  - Gängige Riemenhersteller sind: Gates, Mulco, Continental
- Linear- und Transporttechnik
  - In der Linear- und Transporttechnik erfolgt die Dimensionierung über die Leistungsfähigkeit des Riemens unter Beachtung der zulässigen Werte für die Zugstrangbelastung und der Verzahnung.

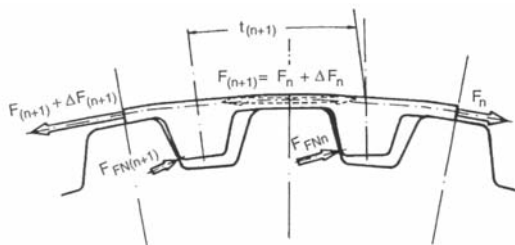
$$b_{\text{erf}} = \frac{F_t}{F_{\text{tspez}} * z_e}$$

$b_{\text{erf}}$   
 $F_t$   
 $F_{\text{tspez}}$   
 $z_e$

erforderliche Riemenbreite  
Umfangskraft  
spezifische Umfangskraft je Zahn und mm-Riemenbreite  
eingreifende Zähnezahl  $\leq 12$

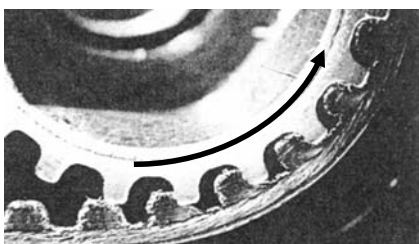
## Vorspannung von Zahnriementrieben

- Eingriffsverhalten von Zahnriemen
  - Durch die Variation der Riemenelastizität über dem Umschlingungsbogen ergibt sich eine Änderung der Teilung gegenüber der Zahnteilung.
  - Teilungsausgleich durch Zahnverformung und Riemenelastizität



- Entspricht die Riementeilung ohne Kraftübertragung der Teilung der Riemenscheibe, so hat ein Riemen im Betrieb im Einlauf der getriebenen Scheibe eine zu geringe Teilung und im Auslauf eine zu grosse Teilung.

- Hochlaufen eines Riemens bei Stossbelastung (Einlauf Leertrum)



### Polygoneffekt

- Ähnlich wie bei Kettengetrieben tritt auch bei Zahnriemengetrieben ein Polygoneffekt auf.
- Der Effekt wird durch das Stützen der Riemen im Zahnfüllgrund stark reduziert.

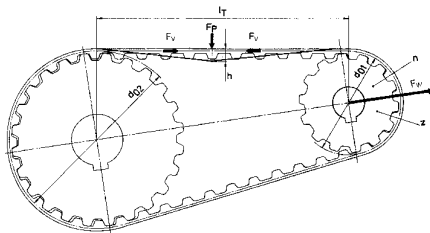
## Vorspannung von Zahnriementrieben

- Eine optimale Funktion des Riemengetriebes wird durch das richtige Vorspannen des Riemens gewährleistet.
- Die Vorspannkraft kann mittels Messung der Eigenfrequenz des vorgespannten Riemens ermittelt werden.

$$F_V = 4 * m * l_T^2 * f_e^2$$

$m$ : Masse  
 $l_T$ : freie Trumlänge  
 $f_e$ : Eigenfrequenz

- Durch das Messen der Eindrücktiefe mit einer definierten Prüfkraft kann die Vorspannkraft ebenfalls ermittelt werden.



$$h \approx \frac{1}{50} * l_T$$

$$F_{P\max} = \frac{F_T}{20}$$

Stossbelastung

$$F_{P\min} = \frac{F_T}{40}$$

Ruhig laufende Antriebe



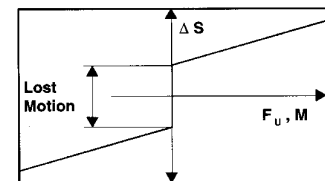
Messgerät zur Bestimmung der Trumeigenfrequenz

- Vorspannkräfte:  $F_V = 0.5 \dots 1 * F_T$  (Antriebstechnik)  
 $F_V \geq F_T$  (Lineartechnik)

## Steifigkeit von Zahnriementrieben

- Genauigkeit der Bewegungsübertragung

- Geometrisch bedingte Ursachen, wie z. B. Fertigungs- und Montageabweichungen oder Lost Motion-Effekt



- Belastungsabhängige Ursachen, wie Zugstrangdehnung und Zahndeformation

- Dehnung  $\Delta l$  eines Riemenstücks  $L_T$

$$\Delta l = \frac{F}{c} = \frac{F * L_T}{c_{spez}}$$

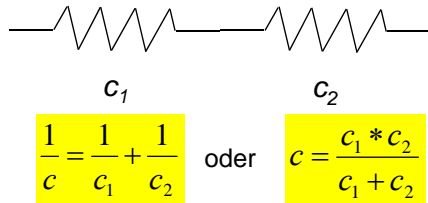
$\Delta l$ : Trumdehnung  
 $F$ : Trumkraft  
 $L_T$ : Trumlänge  
 $c$ : Riemensteifigkeit N/mm  
 $c_{spez}$ : spezifische Riemensteifigkeit je m Riemenlänge in N

$$c = \frac{c_{spez}}{L_T}$$

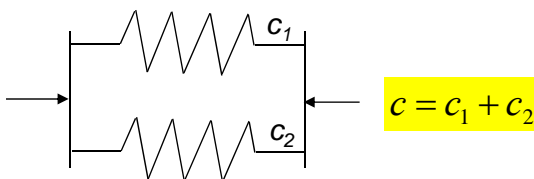
## Steifigkeit von Zahnriementrieben

- Trumsteifigkeit  $c$  in Abhängigkeit der Lastposition

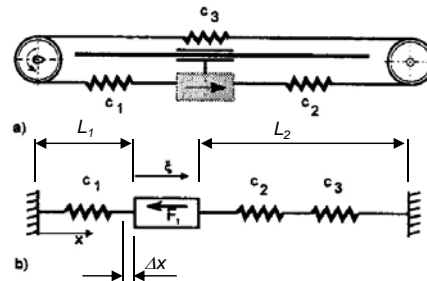
- Serieschaltung von Federn



- Parallelschaltung von Federn (verspannte Federn)



### Beispiel Linearschlitten



### Gesamtsteifigkeit Linearantrieb

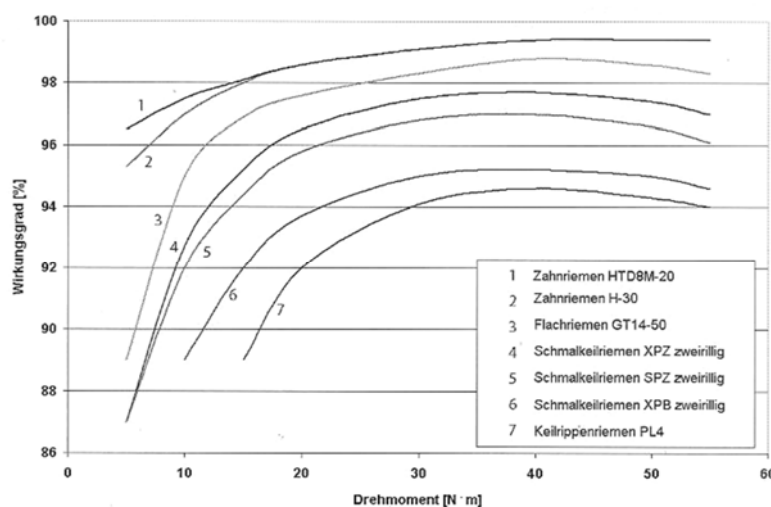
$$c = c_1 + \frac{c_2 * c_3}{c_2 + c_3} \quad \text{oder} \quad c = c_{spez} * \frac{L_1 + L_2}{L_1 * L_2}$$

### Positionsfehler

$$\Delta x = \frac{F}{c}$$

## Wirkungsgrad von Zahnriementrieben

- Richtig eingesetzte Riementriebe erreichen hohe Wirkungsgrade

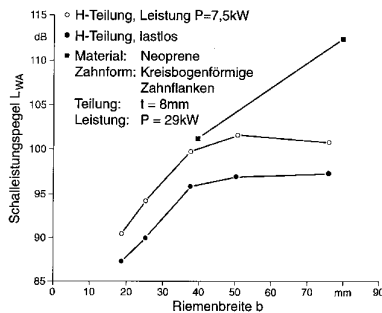


Experimentell ermittelte Wirkungsgrade verschiedener Riementriebe, [2]

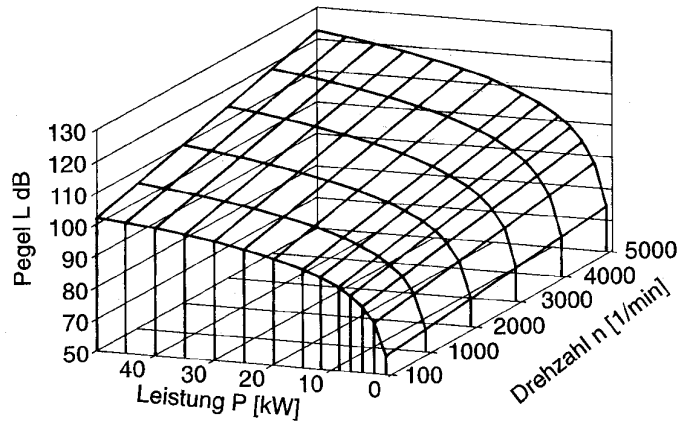


## Geräuschverhalten von Zahnriementrieben

- Hauptursachen für die Laufgeräusche in Zahnriementrieben sind:
  - Aufschlagen der Riemen auf die Zahnscheiben
  - Luftverdrängung aus den Zahnlücken
- Wichtige Einflussgrößen sind:
  - Riemengeschwindigkeit
  - Riemenbreite
  - Zahnscheibenzähnezahlen



Schallpegel in Funktion der Breite



Geräuschverhalten von Zahnriementrieben, Quelle: Funk

## Verschleissverhalten und Lebensdauer

- Maximale Belastbarkeit
  - Durch die **Dehnungen im Zahnriemen** weichen die Teilungen des Riemens und der Scheibe so stark voneinander ab, dass ein Ausgleich durch Verformung der elastischen Riemenzähne nicht mehr möglich ist.
  - Die Zugfestigkeit wird durch die eingesetzten **Materialien** bestimmt. Hierbei wird die Biegeweichselfestigkeit beim Einsatz von **kleinen Scheibendurchmessern negativ** beeinflusst.
- Verschleiss
  - Zusammenspiel von Zahnriemen und Zahnscheibe (Stahl / Alu eloxiert)
  - Oberflächenrauheit der Scheiben  $R_a \leq 12,5 \mu\text{m}$  (N 10)
  - Ist das Gewebe, welches den Zahn überzieht verschlissen, setzt eine schnelle Zerstörung des Riemens ein.

## Schwingungen in Zahnriementrieben

- Das dynamische Verhalten der Riementriebe wird sowohl durch das Drehschwingungs- als auch das Biegeschwingungsverhalten (Transversalschwingungen) der freien Trumlänge bestimmt.
- Einflüsse auf das dynamische Verhalten
  - Riementyp (Steifigkeit)
  - Wellenabstand
  - Scheibendurchmesser
  - Übersetzung
  - Drehzahl
  - Drehmoment
  - Vorspannung
  - Temperatur
  - Erregerfrequenz

Ersatzsystem für das Drehschwingungsverhalten:

$$f_e = \frac{1}{2 * \pi} \sqrt{c \left( \frac{r_1^2}{J_1} + \frac{r_2^2}{J_2} \right)}$$

$f_e$ : erste Eigenfrequenz [s<sup>-1</sup>]

$c$ : Gesamttrumsteifigkeit [N/m]

