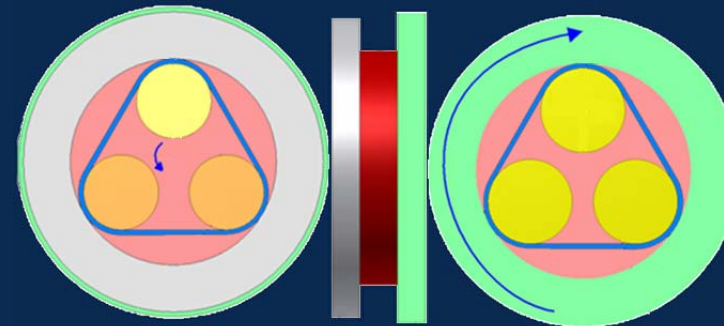


Bauformen, Dimensionierung und Gestaltung hochübersetzender Getriebe mit miniaturisierten Zahnriemen



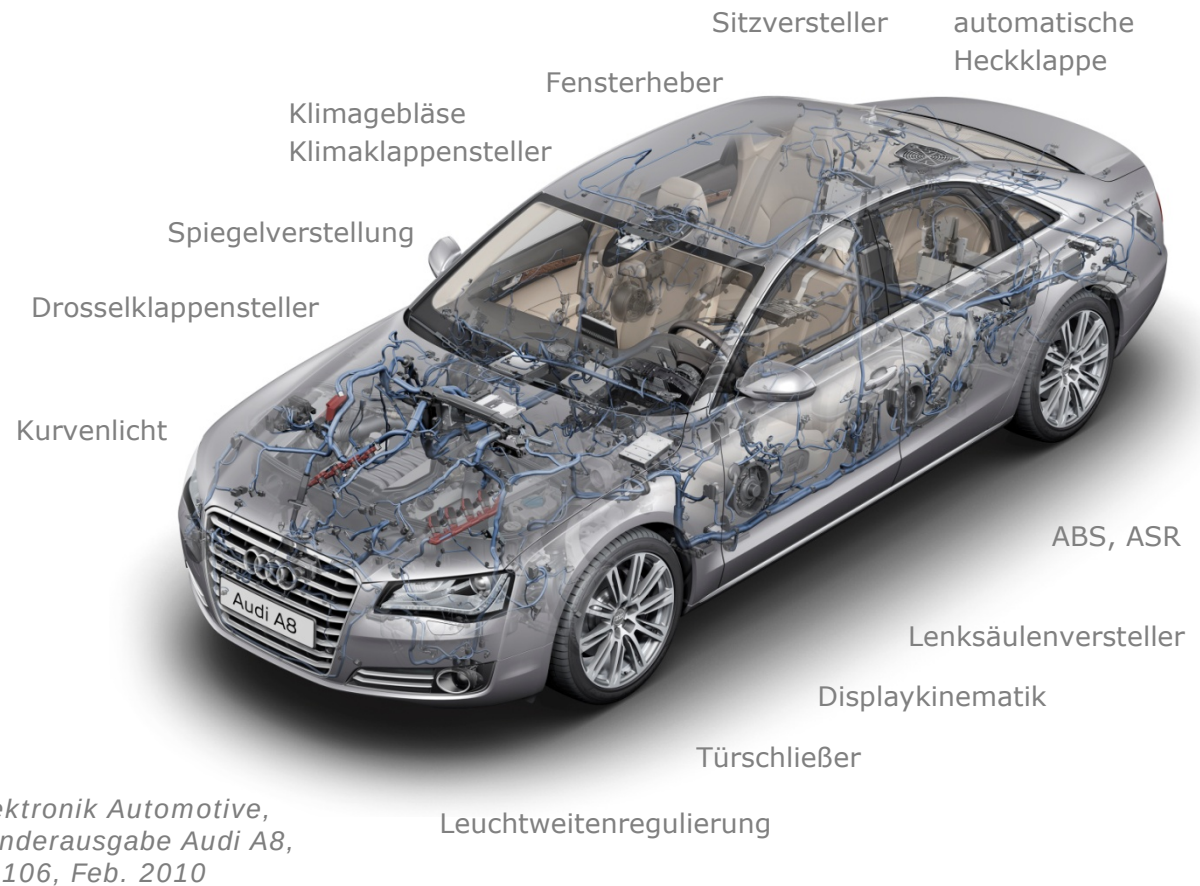
Dr. –Ing. Stefan Richter

Institut für Feinwerktechnik und Elektronik-Design

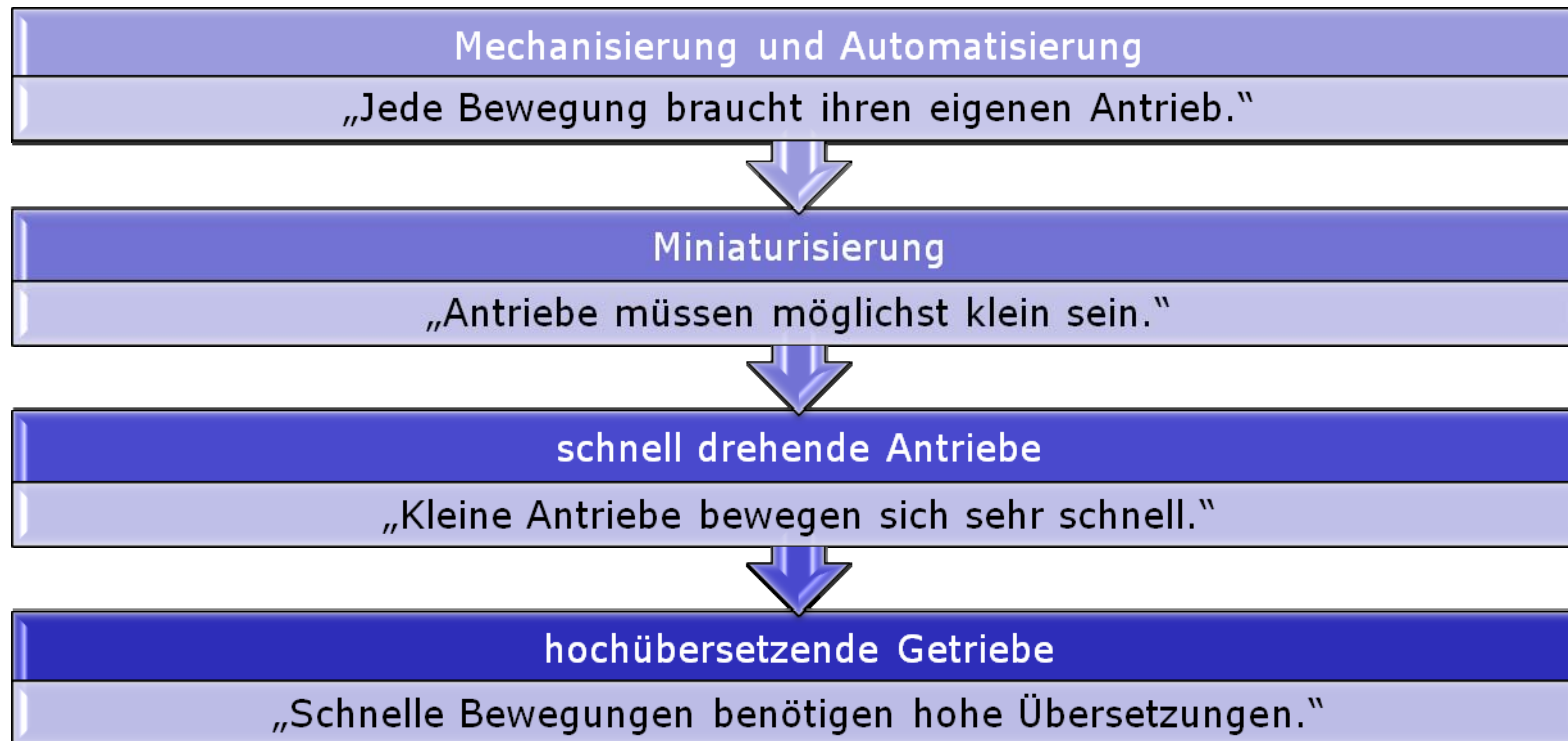
Motivation

Antriebssysteme erhöhen:

- Sicherheit
- Fahrkomfort
- Umweltverträglichkeit
- Lebensdauer
- Bedienfreundlichkeit



Motivation



Inhalt

- 1 Stand der Technik
 - 1.1 Miniaturisierte Zahnriemen
 - 1.2 Hochübersetzende Getriebe
- 2 Aufgabenstellung
- 3 Miniaturisierte Zahnriemen
 - 3.1 Aufbau
 - 3.2 Messtechnik
 - 3.3 Ergebnisse
- 4 Cyclobelt-Getriebe
 - 4.1 Aufbau
 - 4.2 Funktion
 - 4.3 Auslegung
 - 4.4 Hohl scheiben
 - 4.5 Muster
- 5 Zusammenfassung und Ausblick

Stand der Technik → Miniaturisierte Zahnriemen

Zahnriemengetriebe:

- schlupffreie Drehzahl- und Drehmomentübertragung
- hohe zulässige Geschwindigkeiten und Belastungswerte
- hoher Wirkungsgrad
- schmierstofffrei, wartungsfrei
- nahezu frei wählbare Achsabstände
- schwingungsdämpfend
- massearm
- spielfrei
- geräuscharm

Aber

- selten: Teilungen
- typisch: Übersetzung



Monaco V4,
Quelle TAG Heuer



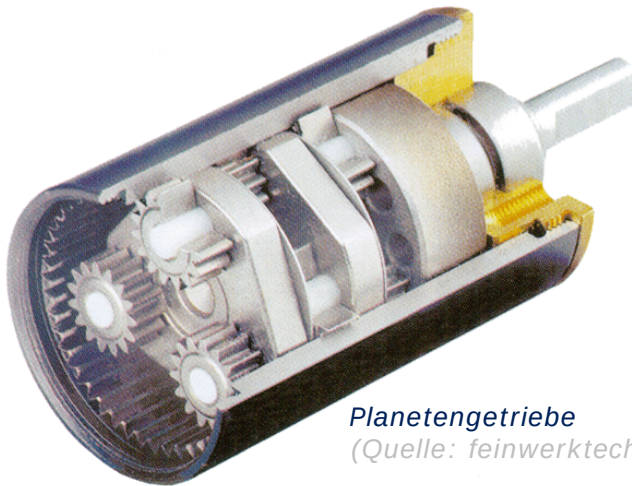
Projektstudie IFTE;
Kleinantrieb mit
Schrittmotor, vor (links)
und nach (rechts) der
Optimierung

Stand der Technik → Hochübersetzende Getriebe

Hochübersetzende Getriebe → $i > 100$

Beispiele

- Schneckengetriebe
- mehrstufige Planetengetriebe
- Wellgetriebe (Harmonic Drive)
- CYCLO sowie CORONET Getriebe



Planetengetriebe
(Quelle: feinwerktechnik-web.de)



Harmonic drive
(Quelle: Harmonic Drive AG)



CYCLO Drive

Stand der Technik → Hochübersetzende Getriebe

Getriebe, welche nach dem Differenzenprinzip arbeiten, ermöglichen hohe Stufenübersetzungen.

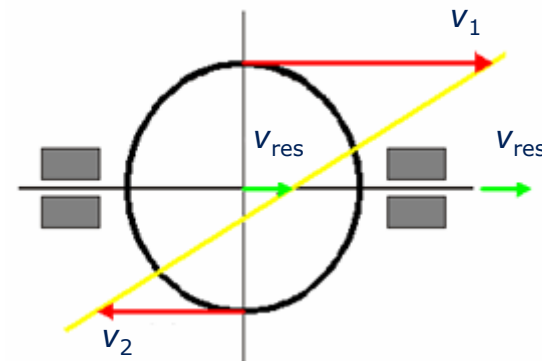
$$i_v = \frac{v_{an}}{v_{res}},$$

$$v_1 = a \cdot v_{an}, \quad v_2 = b \cdot v_{an},$$

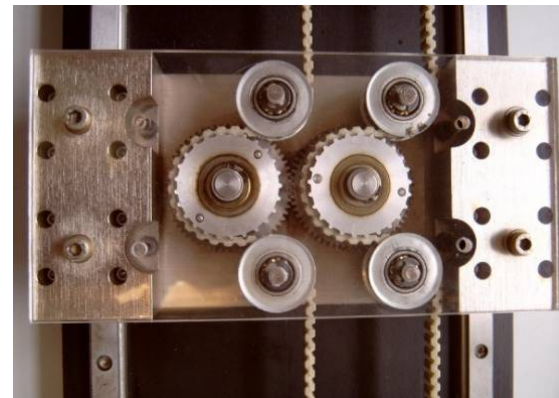
$$i_v = \frac{v_{an}}{v_1 - v_2} = \frac{v_{an}}{(a \cdot v_{an} - b \cdot v_{an})},$$

$$i_v = \frac{1}{a - b}.$$

Idee: Überlagerungsgetriebe mit Zahnriemen



Prinzip eines Überlagerungsgetriebes



Hochübersetzende Zahnriemengetriebe (linear)

2 Aufgabenstellung

1 Stand der Technik

1.1 Miniaturisierte Zahnriemen

1.2 Hochübersetzende Getriebe

2 Aufgabenstellung

3 Miniaturisierte Zahnriemen

3.1 Aufbau

3.2 Messtechnik

3.3 Ergebnisse

4 Cyclobelt Getriebe

4.1 Aufbau

4.2 Funktion

4.3 Auslegung

4.4 Hohlscheiben

4.5 Muster

5 Zusammenfassung und Ausblick

Aufgabenstellung

Ziele:

- Entwurf und Analyse von Bauformen von Cyclobelt-Getrieben sowie deren systematische Ordnung
- Untersuchung wesentlicher Betriebsparameter von Cyclobelt-Getrieben
- Miniaturisierung von Cyclobelt-Getrieben
- Zahnriemen in Hohlscheiben
- Funktionsmuster
- Dimensionierungsanleitung und konstruktive Hinweise

Fokus:

- hohe Übersetzungen
- kleiner Bauraum
- guter Wirkungsgrad
- geringe Geräuscentwicklung
- moderate Drehmomente

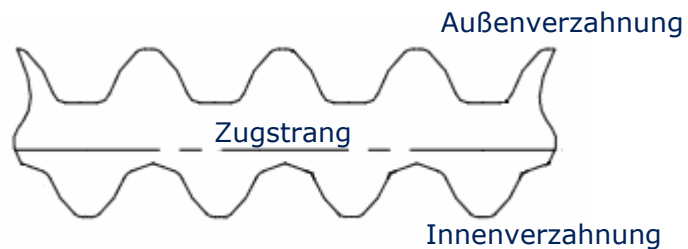
Miniaturisierte Zahnriemen

1. Stand der Technik
 - 1.1 Miniaturisierte Zahnriemen
 - 1.2 Hochübersetzende Getriebe
2. Aufgabenstellung
- 3. Miniaturisierte Zahnriemen**
 - 3.1 Aufbau**
 - 3.2 Messtechnik**
 - 3.3 Ergebnisse**
4. Cyclobelt-Getriebe
 - 4.1 Aufbau
 - 4.2 Funktion
 - 4.3 Auslegung
 - 4.4 Hohlscheiben
 - 4.5 Muster
5. Zusammenfassung und Ausblick

Miniaturisierte Zahnriemen → Aufbau

Neuartige Riemen

- Profil: FHT 1
- Werkstoff: Polyurethan
- Zugstrang: Aramid
- Variante 1: einseitig verzahnt mit 72 Zähnen
- Variante 2: zweiseitig verzahnt innen 72 Zähne außen 71 Zähne



Fenner FHT 1 Profil



Ein- und zweiseitig verzahnter Riemen (Eigenentwicklung),
exemplarisch ausgewählte Zahnscheiben

Miniaturisierte Zahnriemen → Messtechnik

Neuer Versuchsstand

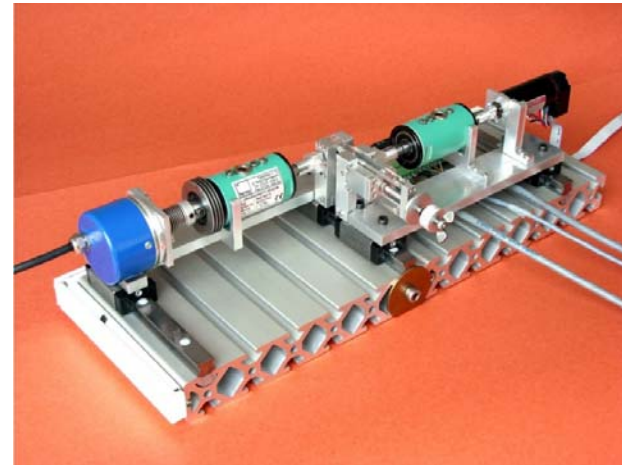
- Drehwinkel- und Drehmomentmessung für An- und Abtrieb
- Kraftsensor

Experimentelle Untersuchungen

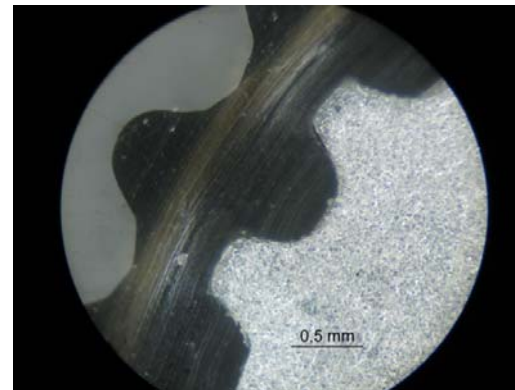
- Übertragungsgenauigkeit
- Drehzahlen und Drehmomente
- Wirkungsgrad
- einstellbare Vorspannkraft

Geometrische Analyse

- Passfähigkeit
- spielfrei



Versuchsstand Miniaturriemen



Mikroskopaufnahme

Miniaturisierte Zahnriemen → Ergebnisse

Profil - FHT-1
Riemenbreite - 3 mm

Messergebnisse:

- Reißfestigkeit 50 N/mm
- Übersprungmoment 800 mN·m
- Torsionssteifigkeit bis zu 1 N·m/rad
(bei $z_p = 20$)
- Wirkungsgrad bis zu 98 %

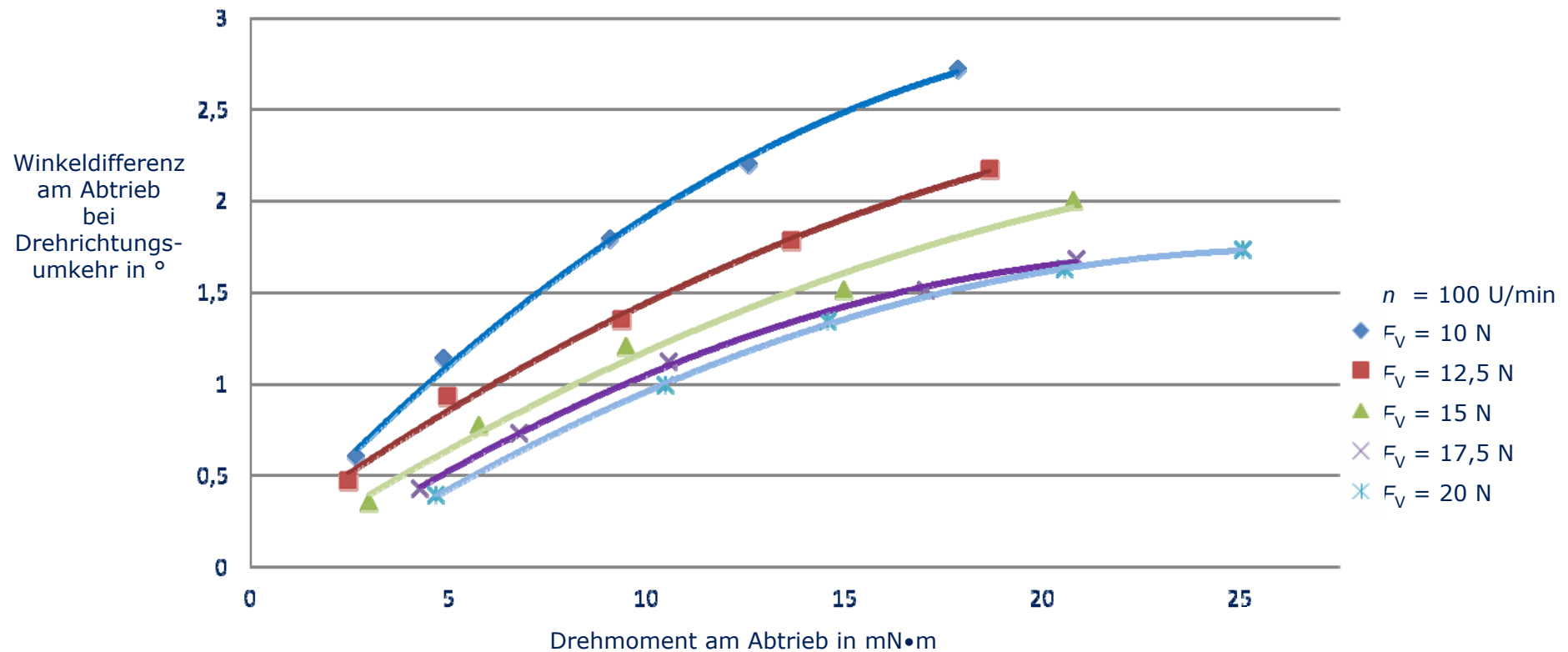


Prüfung der Reißfestigkeit

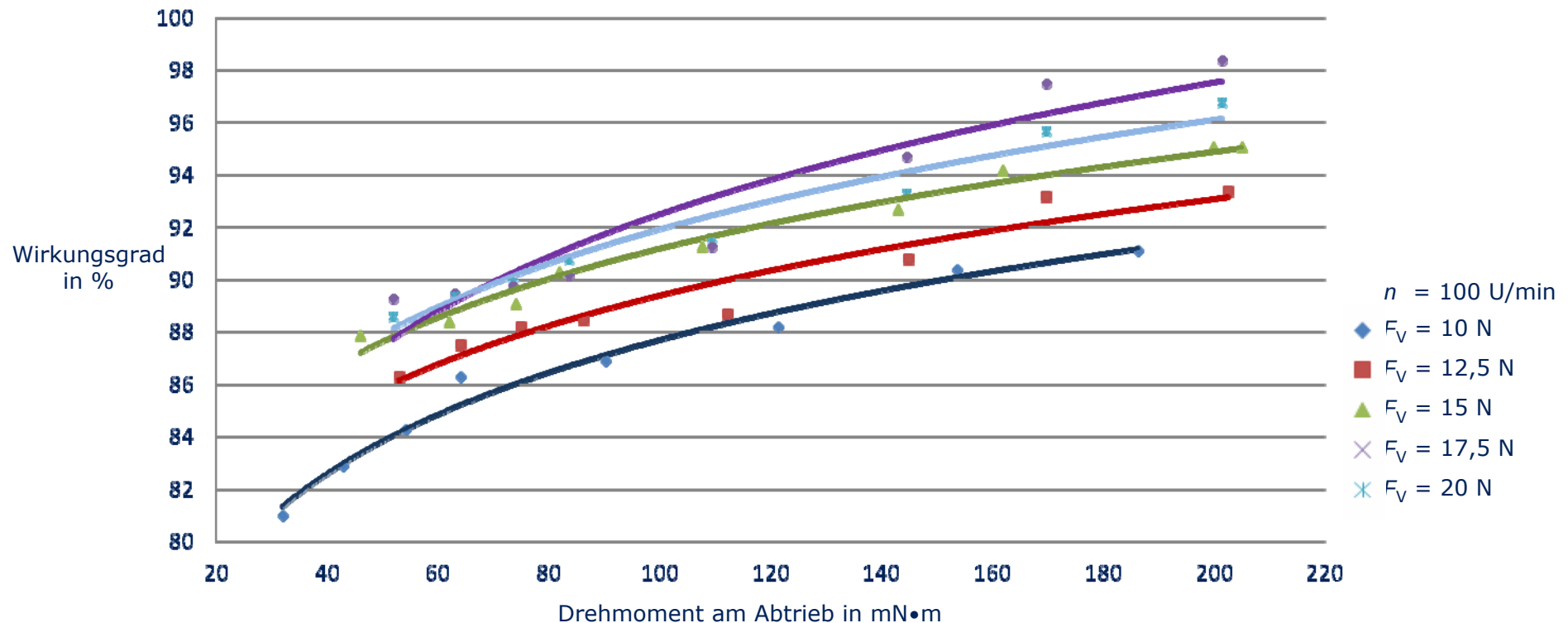
Festlegungen für die Dimensionierung:

- maximale Drehmomente 200 mN·m (bei Drehzahlen von 5000 U/min; entspricht 25 % des Übersprungmomentes)
- Biegewechselfestigkeit (minimale Zähnezahl = 20)

Miniaturisierte Zahnriemen → Ergebnisse



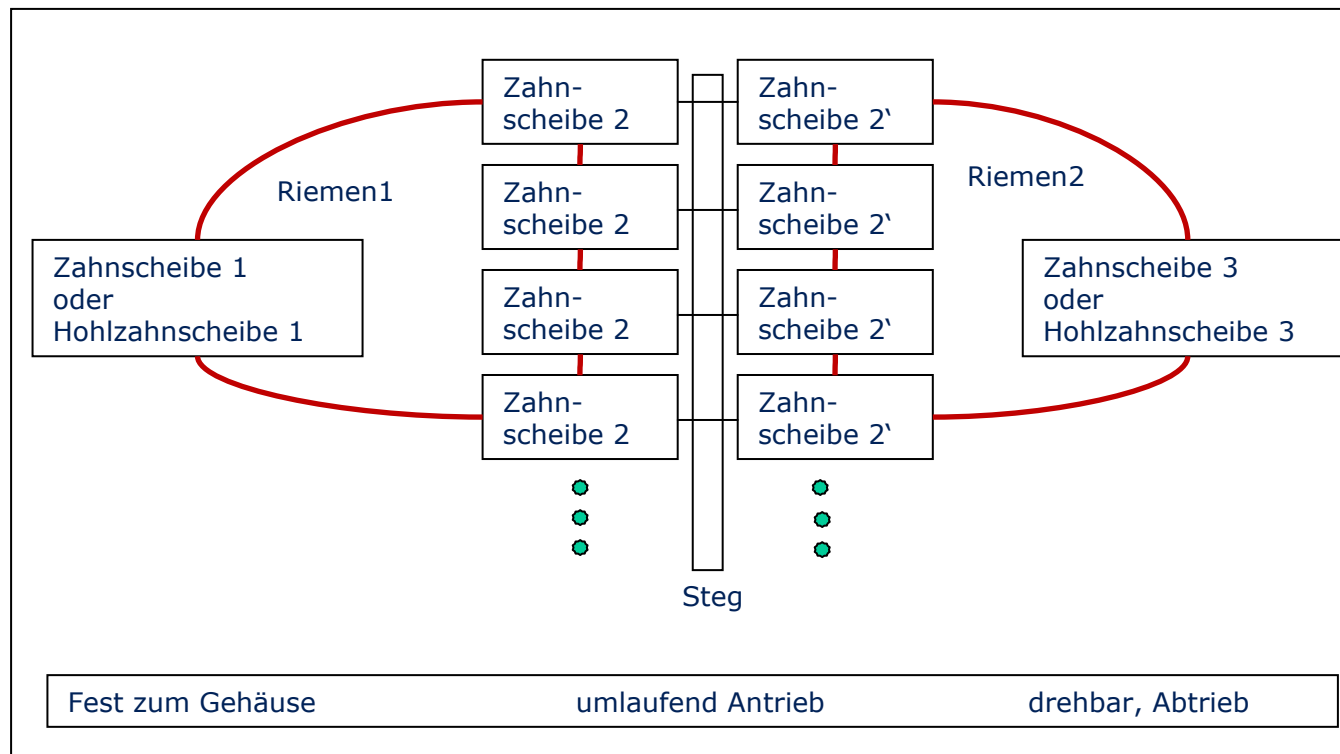
Miniaturisierte Zahnriemen → Ergebnisse



Cyclobelt-Getriebe

1. Stand der Technik
 - 1.1 Miniaturisierte Zahnriemen
 - 1.2 Hochübersetzende Getriebe
2. Aufgabenstellung
3. Miniaturisierte Zahnriemen
 - 3.1 Aufbau
 - 3.2 Messtechnik
 - 3.3 Ergebnisse
4. Cyclobelt-Getriebe
 - 4.1 Aufbau
 - 4.2 Funktion
 - 4.3 Auslegung
 - 4.4 Hohl scheiben
 - 4.5 Muster
5. Zusammenfassung und Ausblick

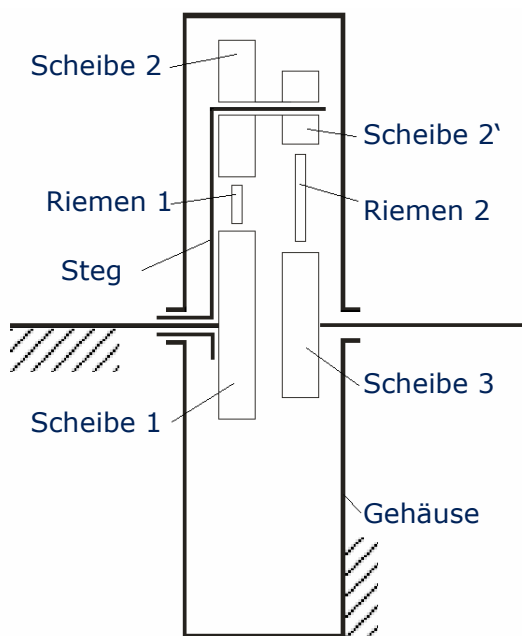
Cyclobelt-Getriebe → Aufbau



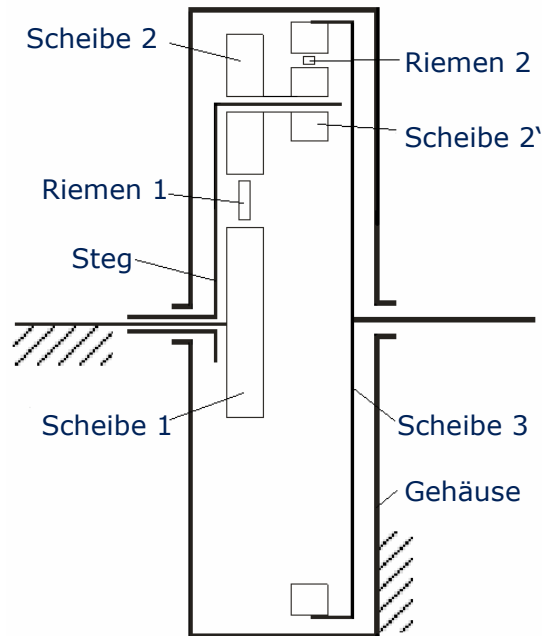
Schematischer Aufbau von Cyclobelt-Getrieben

Cyclobelt-Getriebe → Aufbau

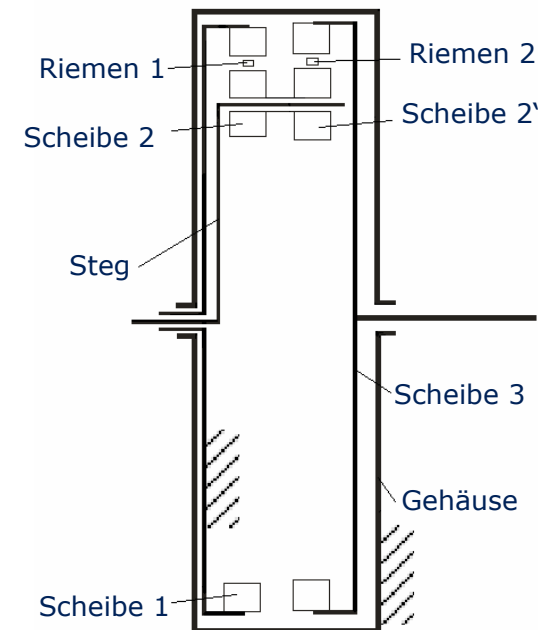
Cyclobelt-Getriebe sind Differenzengetriebe mit umlaufenden Zahnriemen.



Cyclobelt-Getriebe Typ A I I

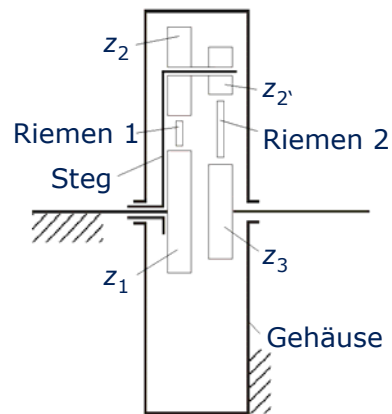


Cyclobelt-Getriebe Typ B I I



Cyclobelt-Getriebe Typ C I I

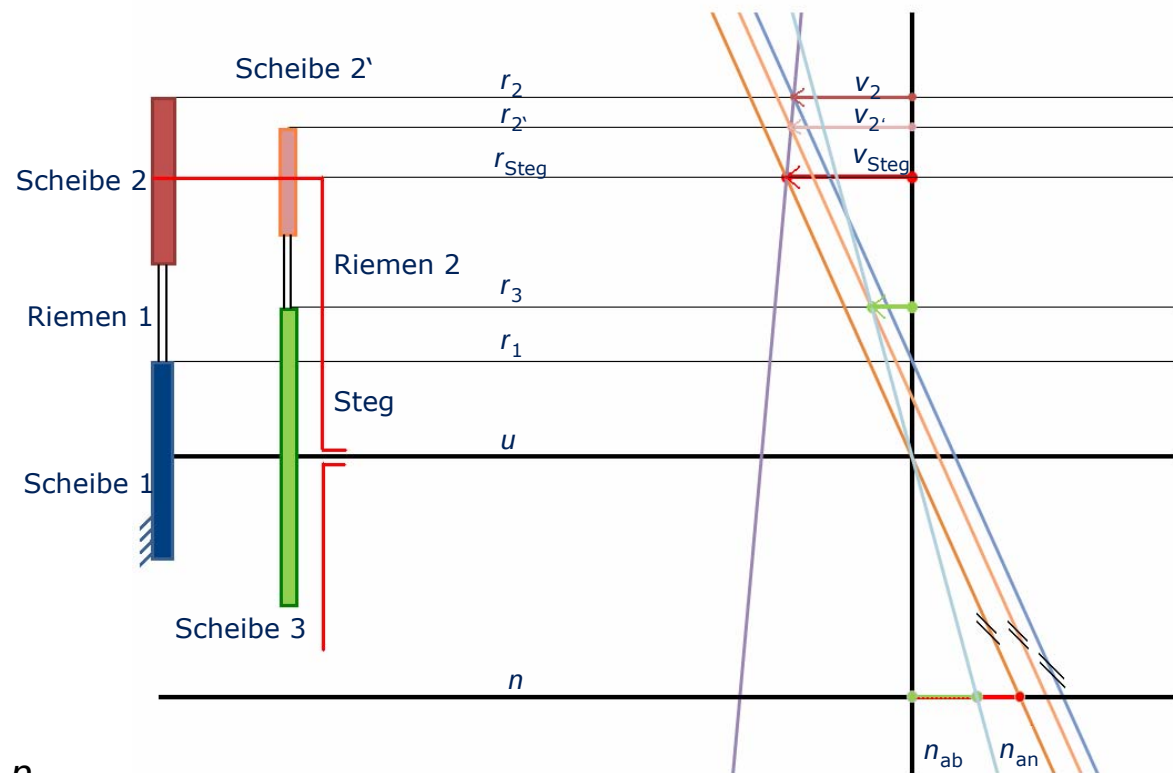
Cyclobelt-Getriebe → Funktion



Übersetzung:

$$i = \frac{n_{an}}{n_{ab}} = \frac{1}{1 - i_0},$$

$$i_0 = \frac{z_1 \cdot p_{\text{Riemen1_Scheibe1}} \cdot z_2' \cdot p_{\text{Riemen2_Scheibe2'}}}{z_2 \cdot p_{\text{Riemen1_Scheibe2}} \cdot z_3 \cdot p_{\text{Riemen2_Scheibe3}}}$$



Kutzbachplan für ein Cyclobelt-Getriebe vom Typ A II (Schema links)

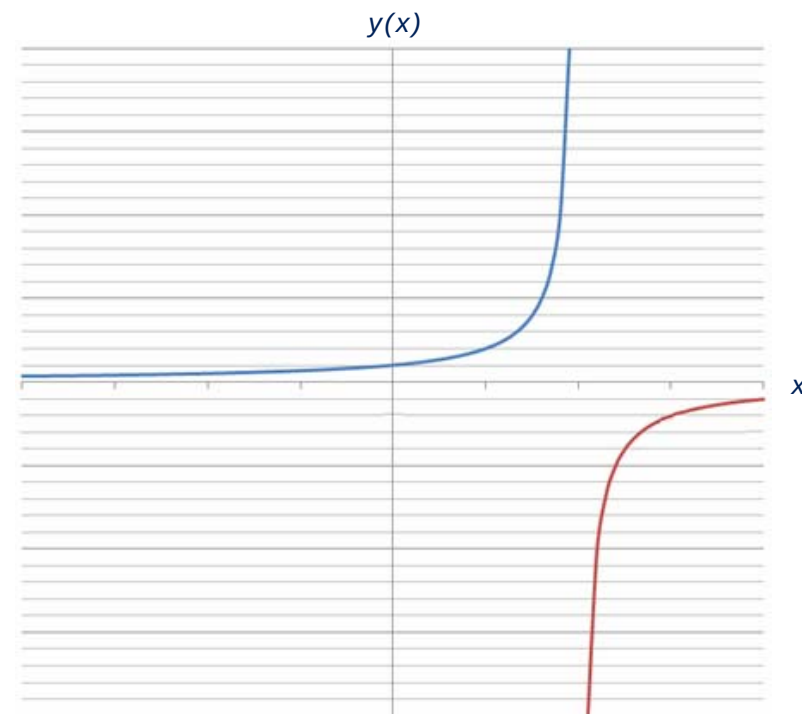
Cyclobelt-Getriebe → Funktion

Die Übersetzung von Umlaufrädergetrieben ermittelt sich mit:

$$i = \frac{n_{\text{an}}}{n_{\text{ab}}} = \frac{1}{1 - i_0}.$$

Damit folgt die Übersetzung einer Funktion der Form

$$y(x) = \frac{1}{1 - x}.$$



$y(x)$ rot für $x > 1$; blau für $x < 1$

Cyclobelt-Getriebe → Funktion

Für Planetengetriebe (rückkehrende Plusgetriebe) mit blockierter Scheibe 1 und Antrieb über den Steg ermittelt sich die Standübersetzung mit:

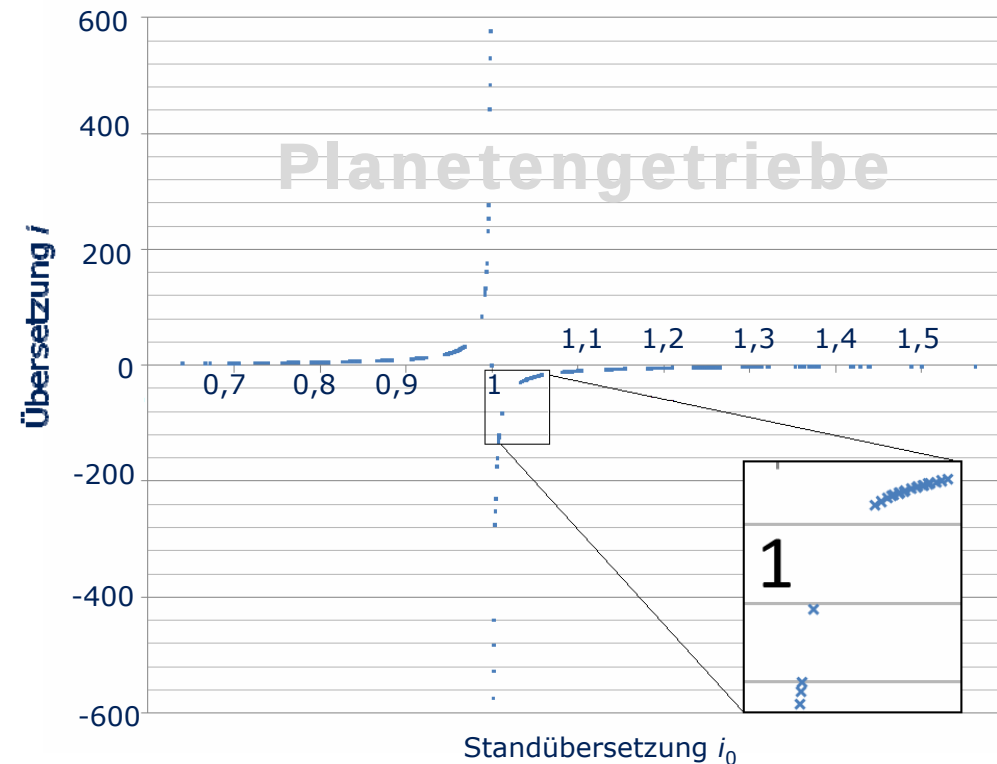
$$i_0 = \frac{z_1 \cdot z_2'}{z_2 \cdot z_3},$$

und damit die Übersetzung:

$$i = \frac{n_{\text{an}}}{n_{\text{ab}}} = \frac{1}{1 - \frac{z_1 \cdot z_2'}{z_2 \cdot z_3}}.$$

Beispieldarstellung im Diagramm:

- $z \in \mathbb{N}$
- $20 \text{ Zähne} < z < 25 \text{ Zähne}$



Cyclobelt-Getriebe → Funktion

Übersetzung von Cyclobelt-Getrieben:

$$i = \frac{n_{\text{an}}}{n_{\text{ab}}} = \frac{1}{1 - i_0},$$

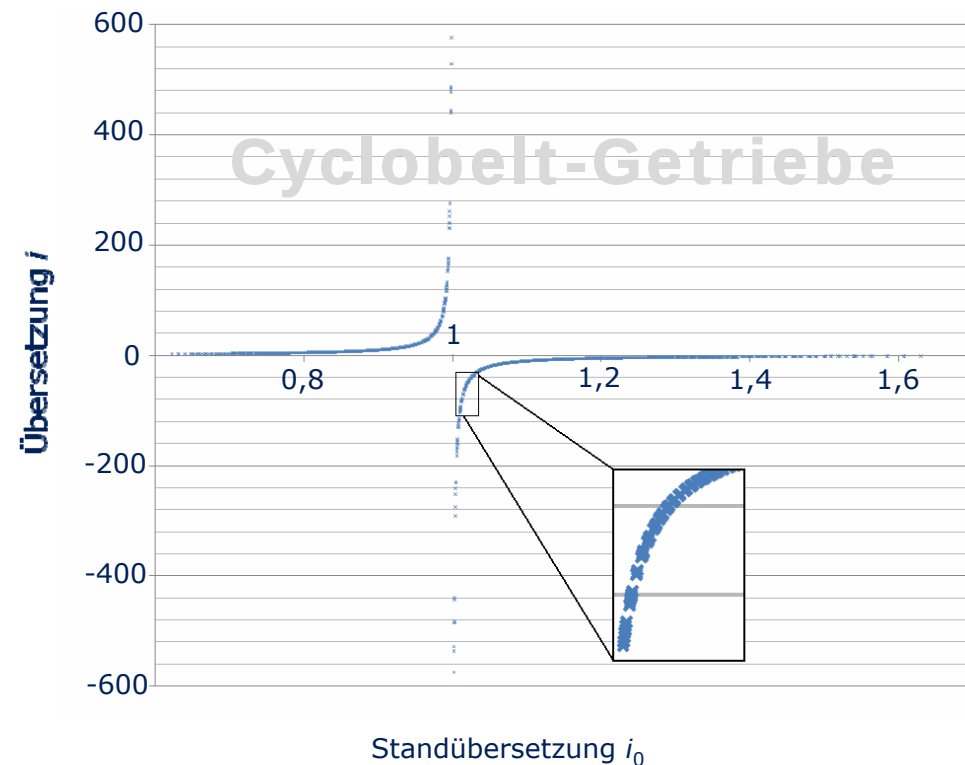
mit:

$$i_0 = \frac{z_1 \cdot p_{R1_S1} \cdot z_2' \cdot p_{R2_S2'}}{z_2 \cdot p_{R1_S2} \cdot z_3 \cdot p_{R2_S3}}.$$

Beispieldarstellung im Diagramm:

- $z \in \mathbb{N}$
- 20 Zähne < z < 25 Zähne
- ein Riemen mit

z_{innen}	= 71 Zähne
$z_{\text{außen}}$	= 72 Zähne



Cyclobelt-Getriebe → Auslegung

Ausgangspunkt → bekannte Dimensionierungsregeln der Hersteller

- Zahntragfähigkeit,
- Zugstrangbelastbarkeit,
- Biegewilligkeit.

Besonderheit Cyclobelt-Getriebe:
notwendige Riemenbreite:

$$b = \frac{2 \cdot M_{ab}}{F_{U_spez} \cdot d_3 \cdot k_z},$$

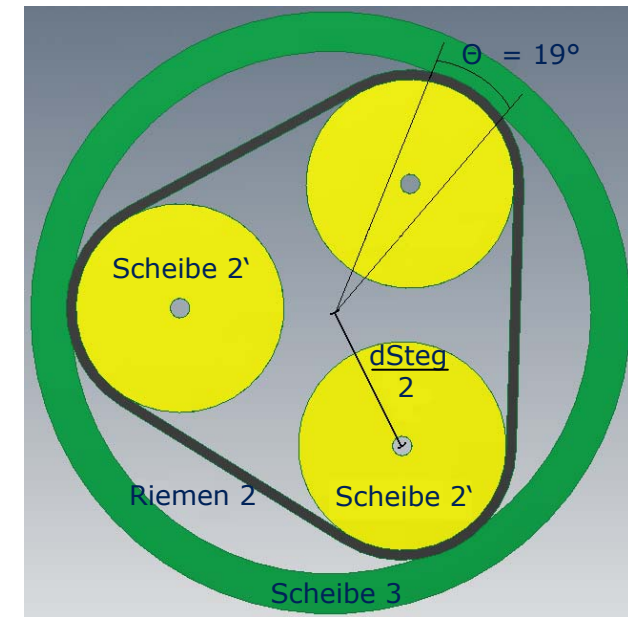
mit:

$$k_z = \frac{b_c \cdot \Theta \cdot d_3 \cdot \pi}{360^\circ \cdot p} = b_c \cdot \frac{\Theta \cdot z_3}{360^\circ}.$$

b_c (belt contacts)

→ Anzahl der Zahnscheibenpaare 2 und 2'

k_z (Eingriffsbelastungsfaktor) → Kenngröße für Cyclobelt-Getriebe

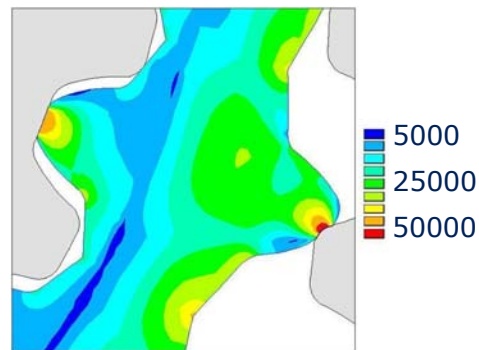
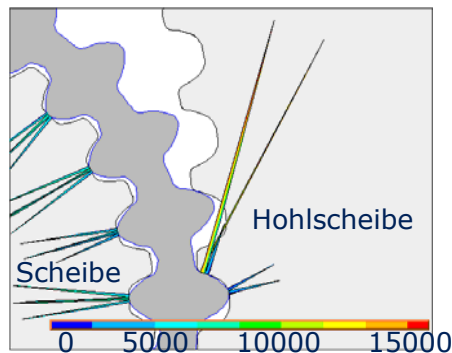


Umschlingungswinkel

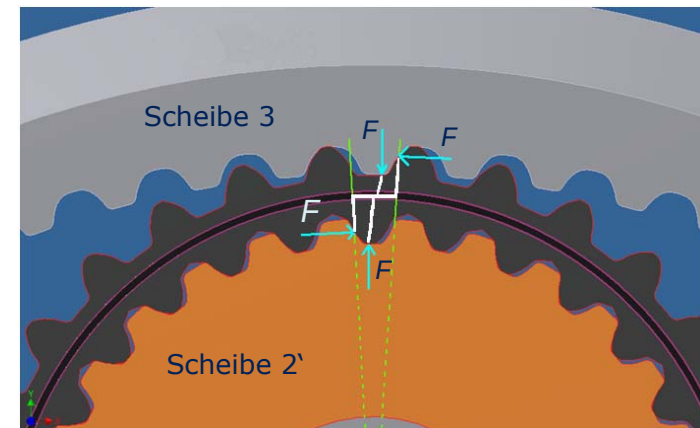
Cyclobelt-Getriebe → Hohlscheiben

Der Begriff Hohlscheibe bezeichnet innenverzahnte Scheiben

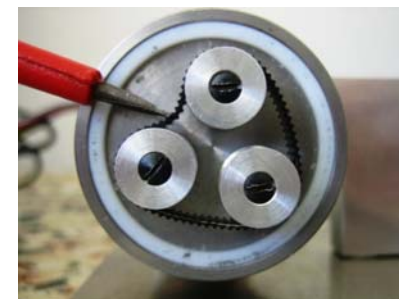
- Riemen wird in die Hohlscheibe gedrückt
- Mehrfacheingriff möglich
- keine Vorspannung notwendig
- Anpresskraft F_{ap}



Örtlich auftretende Druckspannungen (links) in mN/mm^2 ;
„von Mises“ Vergleichsspannungen (rechts) in mN/mm^2 ;
dargestellt ist ein ungünstiger Einzahnungsvorgang
in eine Hohlscheibe



Zahneingriff Hohlscheibe

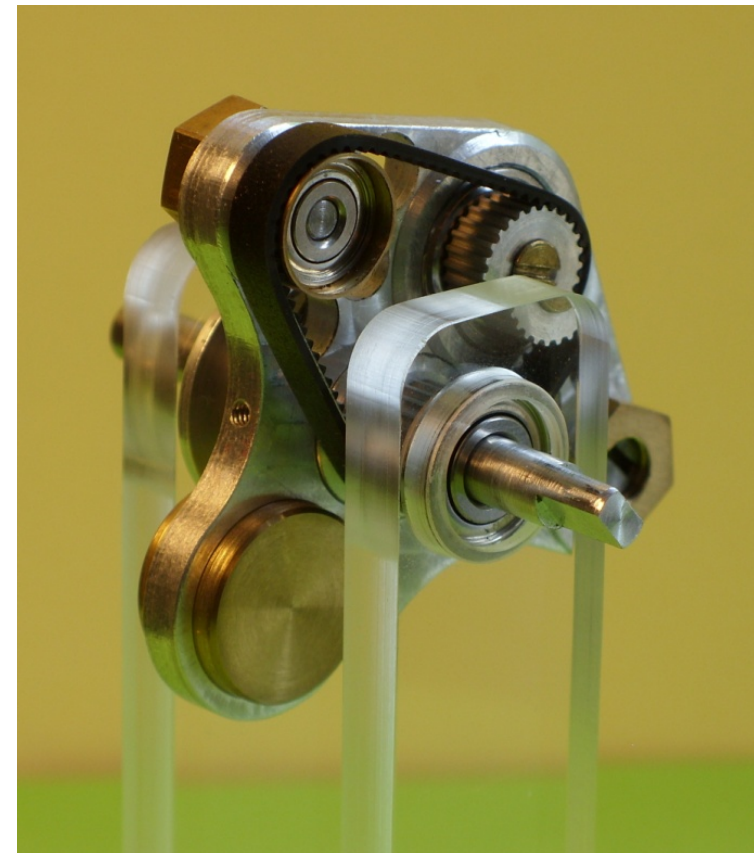
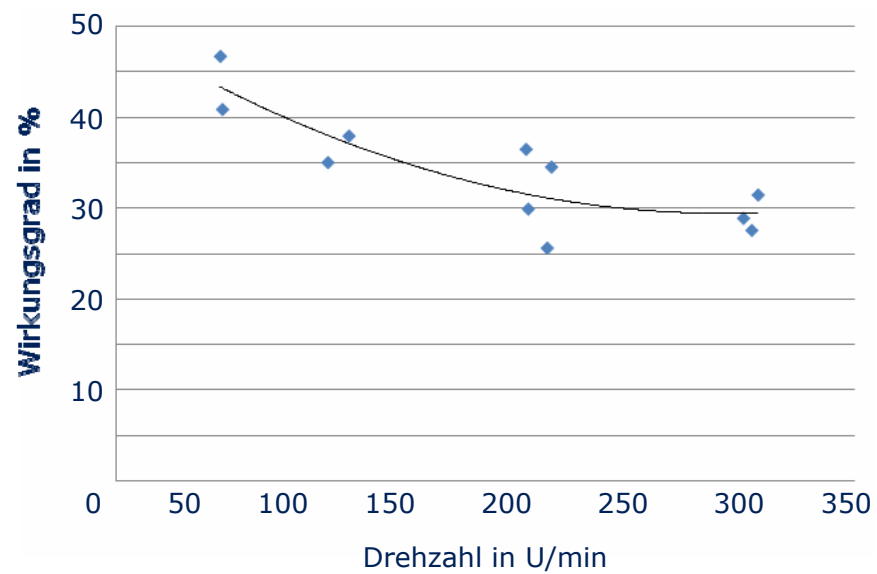


Keine Vorspannung des Riemens notwendig

Cyclobelt-Getriebe → Muster

Funktionsmuster 1:

- Cyclobelt-Getriebe vom Typ A I I
- $i = 300$



Ansicht Cyclobelt-Getriebe vom Typ A II

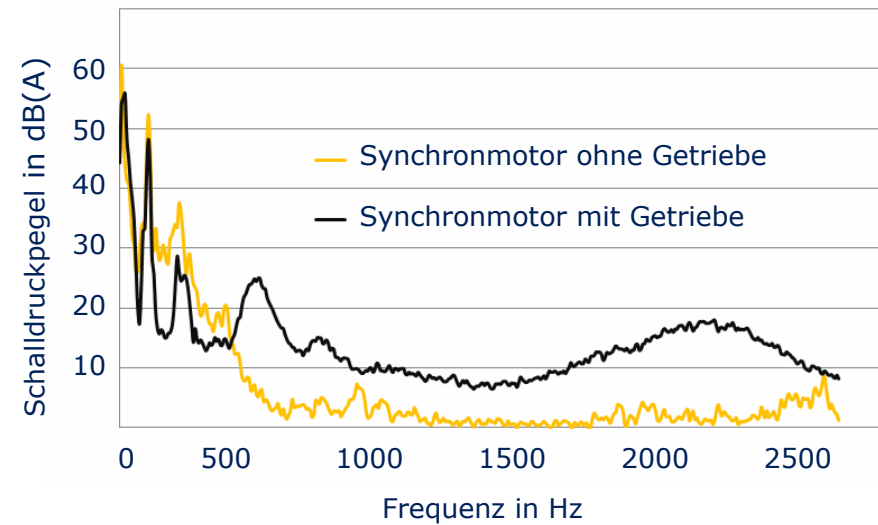
Cyclobelt-Getriebe → Muster

Funktionsmuster 2:

- Cyclobelt-Getriebe vom Typ A X X
- $i = 120$



*Cyclobelt-Getriebe vom Typ A XX
ohne Gehäuse*



Ges. Schalldruckpegel gemessen:

- Motor ohne Getriebe 38 dBA
- Motor mit Getriebe 40 dBA

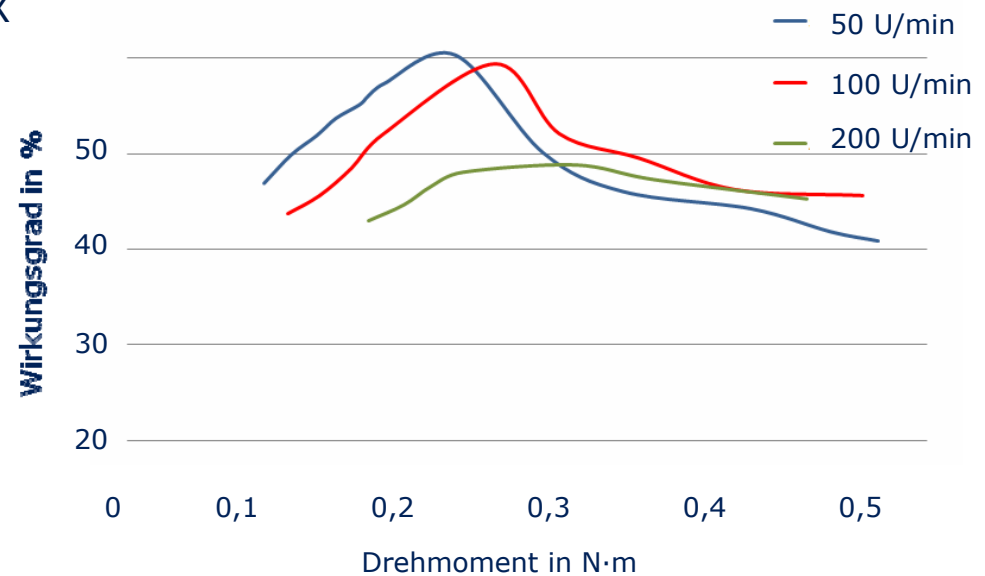
Cyclobelt-Getriebe → Muster

Funktionsmuster 3:

- Cyclobelt-Getriebe vom Typ C X X
- $i = 50$



Ansicht des demontierten Getriebes



Zusammenfassung und Ausblick

1. Stand der Technik
 - 1.1 Miniaturisierte Zahnriemen
 - 1.2 Hochübersetzende Getriebe
2. Aufgabenstellung
3. Miniaturisierte Zahnriemen
 - 3.1 Aufbau
 - 3.2 Messtechnik
 - 3.3 Ergebnisse
4. Cyclobelt-Getriebe
 - 4.1 Aufbau
 - 4.2 Funktion
 - 4.3 Auslegung
 - 4.4 Hohl scheiben
 - 4.5 Muster
- 5. Zusammenfassung und Ausblick**

Zusammenfassung und Ausblick

Miniaturisierte Zahnriemen

- sind herstellbar
- positive Eigenschaften nutzbar
- Problem für Anwendung: geringes Sortiment
- kundenspezifische Riemen:
 - Zugstrang: Durchmesser, Anzahl der Filamente und Steigung
 - Riemengeometrie
 - Doppel- oder Schrägverzahnung

Erschließung neuer Anwendungsgebiete in der Medizin-, Hausgeräte- und Kfz-Technik

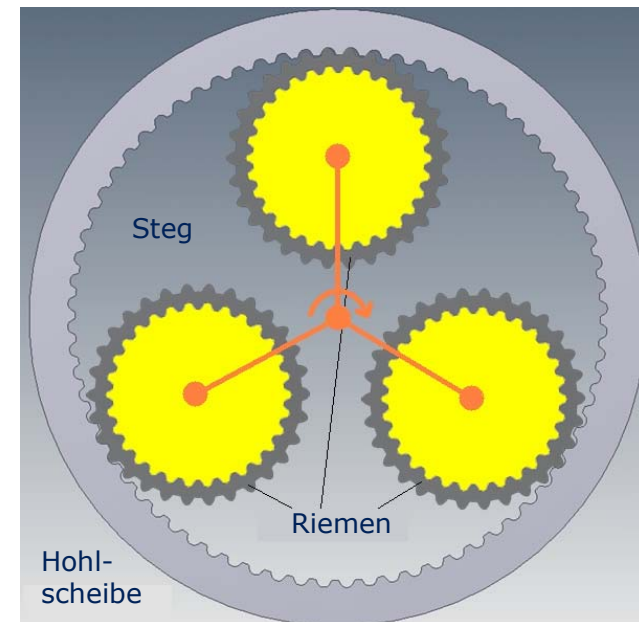
Zusammenfassung und Ausblick

Cyclobelt-Getriebe

- neue Getriebeart
- Wirkungsweise nachgewiesen
- Einsatz von Hohl-scheiben sinnvoll
- hohe Übersetzungen bei kompakter Bauweise erzielbar
- spezifische Vorteile der Zahnriemengetriebe nutzbar

Zukünftige Aufgaben

- Wirkungsgrad
- Übertragungsgenauigkeit
- neue Strukturen



Ausblick → Zahnscheiben (gelb), umspannt durch Zahnriemen

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit