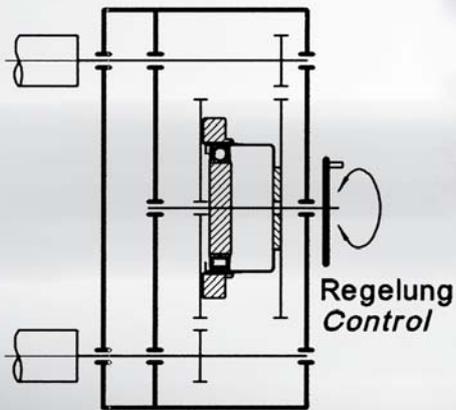




Harmonic
Drive AG



Differenzialanwendungen *Differential Applications*



Präzision in Bewegung
Precision in Motion





Differenzialanwendungen

Vorteile im Vergleich zu herkömmlichen Differenzialgetrieben

- Die konzentrische Getriebeanordnung ermöglicht einen kompakten und leicht überschaubaren Differenzialantrieb im Vergleich zu herkömmlichen Antrieben mit einer Vielzahl von Bauteilen.
- Hohe Genauigkeit und Spielfreiheit, kombiniert mit der hohen Untersetzung, ermöglichen eine exakte Phasen- oder Geschwindigkeitsregelung ohne die Notwendigkeit, einen präzisen Regelantrieb einsetzen zu müssen.
- Die Phasen- oder Geschwindigkeitsregelung kann während des Betriebes in beide Drehrichtungen über 360° durchgeführt werden.
- Aufgrund des kompakten Aufbaus lässt sich dieser Antrieb auf einfache Weise auch in bestehende Anlagen integrieren.

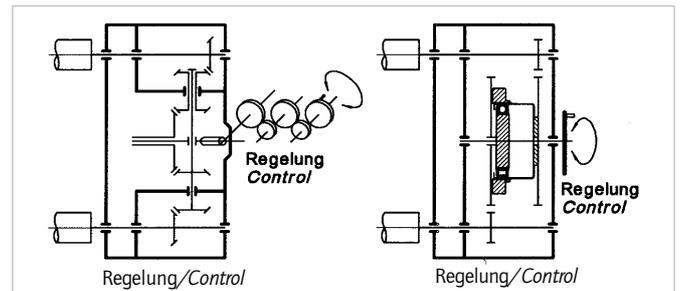
Differential Applications

Advantages over conventional differential gears

- Concentric configuration of elements makes the overall differential drive small and simple, compared with the multiple parts of conventional drives.
- High accuracy and extremely low backlash, combined with the high reduction ratio, enables the output phasing or speed to be precisely controlled without the need for a precision trim input.
- Bi-directional control phase or speed adjustment can be accomplished through 360° in either direction while the machine is running.
- Compact in-line configuration

Beispiel: Phasenregelung zweier Druckwalzen einer Druckmaschine
 Example: Phase adjustment of two rollers of a printing machine

Abb. /Fig. 2.2



Herkömmliches Differenzialgetriebe
 Typical differential gear train

Harmonic Drive Differenzialgetriebe
 Harmonic Drive differential gear

Die Differenzialgleichung The Differential Gear Equation

$$n_{FS} \cdot z_{FS} - n_{CS} \cdot z_{CS} = n_{WG} (z_{FS} - z_{CS})$$

[Gleichung/Equation 2.1]

$$\text{Drehzahlverhältnis} = \frac{n_{Antrieb}/n_{Input}}{n_{Abtrieb}/n_{Output}}$$

Speed Ratio

Tabelle/Table 2.3

$n_{Antrieb}/n_{Input}$	$n_{Abtrieb}/n_{Output}$	fixiert $n=0$ fixed $n=0$	$\frac{n_{Antrieb}/n_{Input}}{n_{Abtrieb}/n_{Output}}$
FS	CS	WG	$\frac{n_{FS}}{n_{CS}} = \frac{z_{CS}}{z_{FS}}$
CS	FS		$\frac{n_{CS}}{n_{FS}} = \frac{z_{FS}}{z_{CS}}$
FS	WG	CS	$\frac{n_{FS}}{n_{WG}} = \frac{z_{FS} - z_{CS}}{z_{FS}}$
WG	FS		$\frac{n_{WG}}{n_{FS}} = \frac{z_{FS}}{z_{FS} - z_{CS}}$
CS	WG	FS	$\frac{n_{CS}}{n_{WG}} = \frac{z_{CS} - z_{FS}}{z_{CS}}$
WG	CS		$\frac{n_{WG}}{n_{CS}} = \frac{z_{CS}}{z_{CS} - z_{FS}}$

z_{CS} = Zähnezahl des Circular Spline
 = Doppelte Untersetzung + 2
 z. B. $z_{CS} = 162$ bei Untersetzung $i = 80$

z_{FS} = Zähnezahl des Flexspline
 = Doppelte Untersetzung,
 z. B. $z_{FS} = 160$ bei Untersetzung $i = 80$

z_{CS} = number of teeth of the Circular Spline
 = twice the nominal ratio + 2
 (e. g. $z_{CS} = 162$ for ratio 80)

z_{FS} = number of teeth of the Flexspline
 = twice the nominal ratio
 (e. g. $z_{FS} = 160$ for ratio 80)

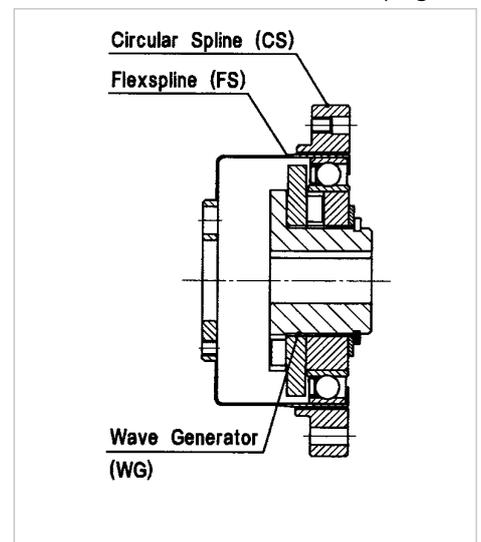
$\frac{n_{Antrieb}/n_{Input}}{n_{Abtrieb}/n_{Output}} > 0 \Rightarrow$ Antrieb und Abtrieb in gleicher Drehrichtung
 Input and Output in same direction

$\frac{n_{Antrieb}/n_{Input}}{n_{Abtrieb}/n_{Output}} < 0 \Rightarrow$ Antrieb und Abtrieb gegensinnig
 Input and Output in different directions

Beispiel: HFUC Einbausatz als Differenzialgetriebe mit stillstehendem Regelantrieb

Example: HFUC component set as a differential gear with the control input stationary.

Abb. /Fig. 2.4





Untersetzung 1:1 wird erreicht:

- wenn die Drehzahl von Circular Spline und Flexspline durch eine permanente Regeldrehzahl am Wave Generator kompensiert wird oder
- wenn zwei identische Harmonic Drive Getriebe so eingesetzt werden, dass deren innere Untersetzung gegenseitig aufgehoben wird oder
- wenn die innere Untersetzung durch eine Stirnradstufe am An- oder am Abtrieb des Harmonic Drive Getriebes ausgeglichen wird.

Ratio 1:1 is achievable:

- if the different speeds of Circular Spline and Flexspline are equalized by a permanent control speed at the Wave Generator or
- if two identical Harmonic Drive component sets are mounted "back-to-back" so that the internal ratio of both gears equalize themselves or
- if the internal ratio is equalized by a spur gear combination at the input and output of the Harmonic Drive.

Beispiel für ein Getriebe mit i=80
Example for a gear with R=80

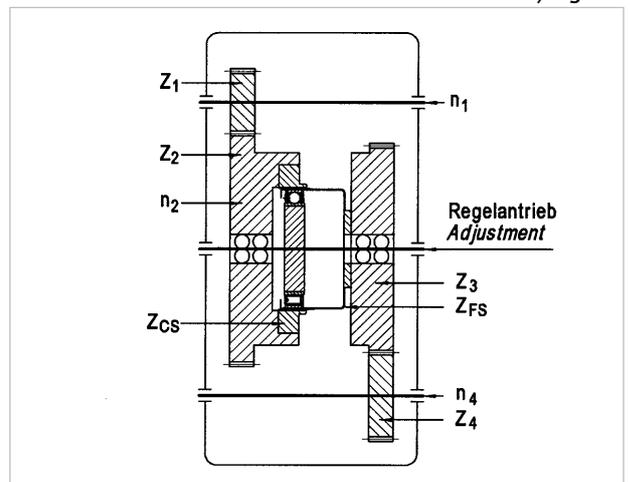
$$i = \frac{n_1}{n_4} = \frac{\text{Antriebsdrehzahl/input speed}}{\text{Abtriebsdrehzahl/output speed}} = 1$$

$$i = \frac{n_1}{n_4} = \frac{z_2 \cdot z_{FS} \cdot z_4}{z_1 \cdot z_{CS} \cdot z_3} = \frac{27 \cdot 160 \cdot 39}{26 \cdot 162 \cdot 40} = 1$$

Zähnezahlen der Stirnradstufe
 Number of teeth of the spur gears

[Gleichung/Equation 3.1]

Abb. /Fig. 3.2



Innere Getriebeuntersetzung und Vorzugszähnezahlen für Stirnräder
Compound gear ratios and favourable low number gear pairs

Tabelle/Table 3.3

Innere Untersetzung des Harmonic Drive Getriebes Internal ratio of the Harmonic Drive component set	30 ¹⁾ 31	50 ¹⁾ 51	80 ¹⁾ 81	100 ¹⁾ 101	120 ¹⁾ 121	160 ¹⁾ 161
Beschreibung durch Primzahlen Expression of internal ratio in prime numbers	2·3·5 31	2·5 ² 3·17	2 ⁴ ·5 3 ⁴	2 ² ·5 ² 101	2 ³ ·13 11 ²	2 ³ ·3·5 7·23
Zähnezahlen der Stirnradstufen ²⁾ Number of teeth of the spur gears ²⁾	15/16 · 32/31	16/24 · 25/17	16/15 · 25/27	40/42 · 105/101	25/22 · 48/55	16/14 · 20/23
	24/28 · 35/31	20/18 · 15/17	16/18 · 20/18	50/48 · 96/101	16/22 · 30/22	20/21 · 24/23
	30/29 · 29/31	20/24 · 20/17	16/18 · 40/36	50/51 · 102/101	18/22 · 40/33	22/23 · 80/77
	45/48 · 64/62	30/27 · 30/34	20/18 · 24/27	80/76 · 95/101	20/22 · 24/22	24/23 · 40/42
	54/45 · 50/62	32/24 · 25/34	20/21 · 28/27		30/33 · 36/33	25/23 · 32/35
			24/27 · 30/37		30/33 · 60/55	
			24/27 · 40/36		32/33 · 45/34	
			26/27 · 40/39		33/33 · 44/34	
			40/27 · 52/39			
			39/27 · 54/39			

¹⁾ Die angegebene innere Untersetzung wird mittels folgender Gleichung ermittelt. Abtriebsselement ist der Flexspline und der Antrieb erfolgt über den Circular Spline.

$$\frac{1}{2} \cdot \text{Zähnezahl von FS} = \frac{\text{Untersetzung}}{\frac{1}{2} \cdot \text{Zähnezahl von CS} \cdot \text{Untersetzung} + 1}$$

²⁾ Die innere Untersetzung kann auch mit nur einer Stirnradstufe ausgeglichen werden.

¹⁾ The shown internal ratio is achieved by the following formula. The output element is the Flexspline and the input is the Circular Spline.

$$\frac{1}{2} \cdot \text{Number of teeth of FS} = \frac{\text{Ratio}}{\frac{1}{2} \cdot \text{Number of teeth of CS} \cdot \text{Ratio} + 1}$$

²⁾ The internal ratio can also be compensated by only one spur gear reduction stage.



Regelbereich

1. Geschwindigkeitsberechnung mit Regelung über den Wave Generator. Das Antriebselement ist der Circular Spline (CS), der Abtrieb erfolgt über den Flexspline (FS).

Abtrieb/Output

$$n_{FS} = n_{CS} \cdot \frac{i+1}{i} \pm \frac{n_{WG}}{i}$$

$$n_{FS} = n_{CS} \cdot \frac{Ratio+1}{Ratio} \pm \frac{n_{WG}}{Ratio}$$

[Gleichung/Equation 4.1]

- + WG und CS drehen gegenseinig
- + WG and CS turn in different directions
- i = Tabellierte Untersetzung des Harmonic Drive Getriebes
- Ratio = Tabulated ratio of the Harmonic Drive Gear
- n = Drehzahl in min⁻¹
- n = Speed in rpm

2. Beispiele (A, B, C, D) für die Berechnung des Regelbereiches eines HFUC-20 mit einer Untersetzung von i = 80 und einer Eingangsdrehzahl von n_{CS} = 800 min⁻¹ am Circular Spline:

Beispiel A

Die drei Bauteile des Getriebes rotieren in gleicher Richtung.

$$n_{WG} = n_{CS} = n_{FS} = 800 \text{ min}^{-1}/\text{rpm}$$

[Gleichung/Equation 4.3]

Beispiel B

Durch die Regelung am WG rotiert der Abtrieb FS schneller als der Antrieb CS. Die hierfür benötigte Regelungsdrehzahl (WG) wird gemäß Gleichung 4.4 berechnet:

$$n_{WG} = n_{FS} \cdot \text{Untersetzung}/\text{Ratio} - n_{CS} \cdot (\text{Untersetzung}/\text{Ratio} + 1)$$

$$n_{WG} = 824 \cdot 80 - 800 \cdot (80 + 1)$$

$$n_{WG} = 1120 \text{ min}^{-1}/\text{rpm}$$

[Gleichung/Equation 4.4]

Der Wave Generator muss mit einer Drehzahl von n_{WG} = 1120 min⁻¹ in entgegengesetzter Richtung zum Antrieb (CS) angetrieben werden.

Beispiel C

Durch Regelung am Wave Generator rotiert der Abtrieb FS entgegengesetzt zum Antrieb CS. Die hierfür benötigte Regelungsdrehzahl (WG) wird gemäß Gleichung 4.5 berechnet: Der Wave Generator muss mit einer Drehzahl von n_{WG} = 2080 min⁻¹ in gleicher Richtung wie der Antrieb (CS) angetrieben werden.

$$n_{WG} = n_{FS} \cdot \text{Untersetzung}/\text{Ratio} - n_{CS} \cdot (\text{Untersetzung}/\text{Ratio} + 1)$$

$$n_{WG} = 784 \cdot 80 - 800 \cdot (80 + 1)$$

$$n_{WG} = -2080 \text{ min}^{-1}/\text{rpm}$$

[Gleichung/Equation 4.5]

Beispiel D

Wird die Regelung (WG) fixiert, n_{WG} = 0, bedeutet dies für die Drehzahl: n_{CS} = 800 min⁻¹; n_{FS} = 810 min⁻¹

Control Range

1. Calculation of the speed with adjustment at the Wave Generator. The input element is the Circular Spline (CS), the output is via the Flexspline (FS).

Antrieb/Input

$$n_{CS} = n_{FS} \cdot \frac{i}{i+1} \pm \frac{n_{WG}}{i+1}$$

$$n_{CS} = n_{FS} \cdot \frac{Ratio}{Ratio+1} \pm \frac{n_{WG}}{Ratio+1}$$

[Gleichung/Equation 4.2]

- + WG und FS drehen gegenseinig
- + WG and FS turn in different directions
- i = Tabellierte Untersetzung des Harmonic Drive Getriebes
- Ratio = Tabulated ratio of the Harmonic Drive Gear
- n = Drehzahl in min⁻¹
- n = Speed in rpm

- Examples (A, B, C, D) for control range of a HFUC-20 gear with ratio = 80 and an input speed of n_{CS} = 800 rpm at the Circular Spline.

Example A

All three parts of the gear rotate at the same speed.

Example B

A control input of the Wave Generator causes the output FS to progress forward in relation to the input CS. The required speed of the control input (WG) is calculated as shown in Eq.4.4. This means that the Wave Generator must be driven with n_{WG} = 1120 rpm in the opposite direction to the input (CS).

Example C

A control input of the Wave Generator causes the output FS to regress backward in relation to the input CS.

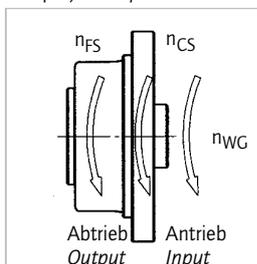
The required speed of the control input (WG) is calculated as shown in Eq. 4.5.

This means that the Wave Generator must be driven with n_{WG} = 2080 rpm in the same direction as the input (CS).

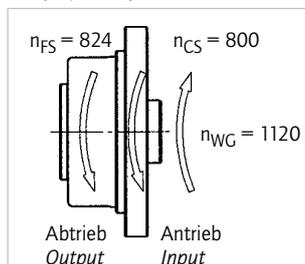
Example D

If the control element (WG) is fixed, n_{WG} = 0, this results in the speeds: n_{CS} = 800 rpm; n_{FS} = 810 rpm

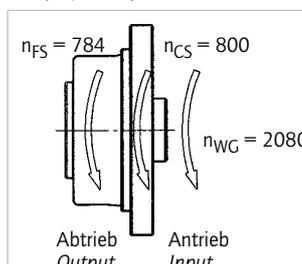
Beispiel/Example A



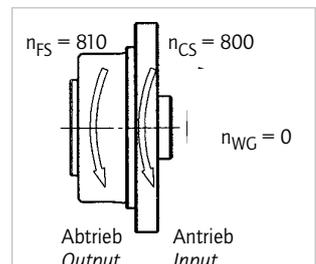
Beispiel/Example B



Beispiel/Example C



Beispiel/Example D

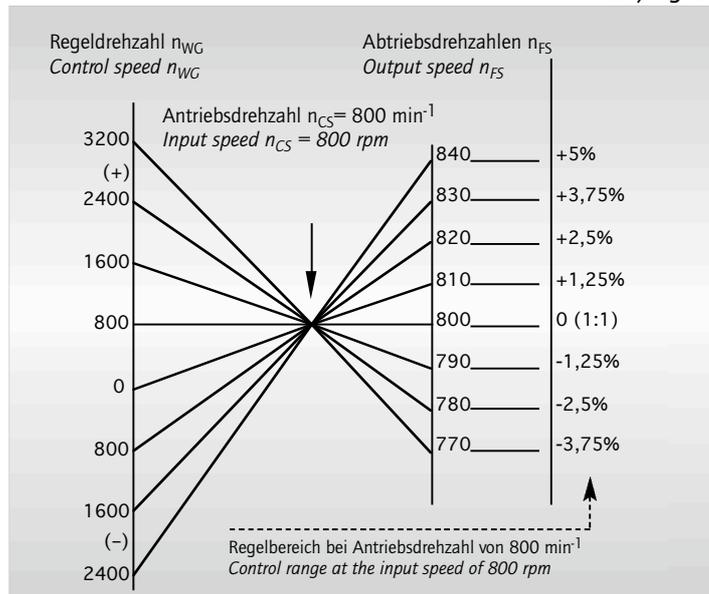




3. Regelbereich eines HFUC Getriebeeinbausatzes mit einer Untersetzung von $i = 80$

3. Control range of an HFUC component set with a ratio equal to $R=80$

Abb./Fig. 5.1



4. Maximaler Regelbereich

4. Maximum control range

Der Regelbereich wird begrenzt durch die maximal zulässige Drehzahl des Getriebeeinbausatzes. In dem Beispiel sind die Antriebs- und Abtriebsdrehzahl gegensinnig und müssen daher addiert werden. Die max. Drehzahl beträgt:

The control range is limited by the max. permissible speed of the component set. The input and output speeds travel in different directions, and must therefore be added. In the above example this means that the maximum speed is:

$$n_{WG} + n_{FS} = 2400 \text{ min}^{-1} + 840 \text{ min}^{-1} = 3240 \text{ min}^{-1}$$

[Gleichung/Equation 5.2]

$$n_{WG} + n_{FS} = 2400 \text{ rpm} + 840 \text{ rpm} = 3240 \text{ rpm}$$

[Gleichung/Equation 5.3]

Hinweise

Wichtig ist die Betrachtung der Relativedrehzahlen der einzelnen Getriebeelemente.

Rotiert der Regelantrieb entgegengesetzt zum An- oder Abtrieb des Getriebes, werden beide Drehzahlen addiert.

Diese Drehzahl muss für die Auslegung des Harmonic Drive Getriebes herangezogen werden.

Notes

It is important to consider the relative speeds of the different gear components. If the control input works in the opposite direction to the input or output, their speeds have to be added together to calculate the maximum speed within the gear.

This speed must be used to select the size of the Harmonic Drive.

Beispiel für ein Getriebe mit $i=100$

Example for a gear with $R=100$

$$\begin{aligned} n_{FS} &= 500 \text{ min}^{-1}/\text{rpm} \\ n_{CS} &= 470 \text{ min}^{-1}/\text{rpm} \\ n_{WG} &= 2530 \text{ min}^{-1}/\text{rpm} \\ n_{\text{max}} &= n_{FS} + n_{WG} = 3030 \text{ min}^{-1}/\text{rpm} \end{aligned}$$

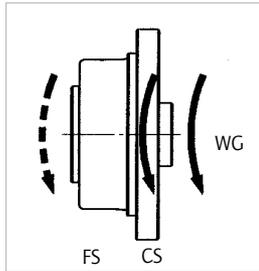
Flexspline und Wave Generator rotieren gegensinnig.
Flexspline and Wave Generator rotate in opposite directions.



**Berechnungen der Abtriebsdrehzahl
bei unterschiedlichen Hauptantriebselementen**

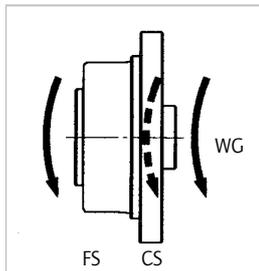
CS Hauptantrieb mit n_{CS} in min^{-1}
 FS Abtrieb mit n_{FS} in min^{-1}
 WG Regelantrieb mit n_{WG} in min^{-1}

Abb./Fig. 6.1



FS Hauptantrieb mit n_{FS} in min^{-1}
 CS Abtrieb mit n_{CS} in min^{-1}
 WG Regelantrieb mit n_{WG} in min^{-1}

Abb./Fig. 6.4



**Calculation of Output Speed
for different Primary Input Elements**

CS Primary input with n_{CS} in rpm
 FS Output with n_{FS} in rpm
 WG Control input with n_{WG} in rpm

Abtriebsdrehzahl	Output speed
$n_{FS} = n_{CS} \cdot \frac{i+1}{i} \pm \Delta n_{FS}$	$n_{FS} = n_{CS} \cdot \frac{\text{Ratio} + 1}{\text{Ratio}} \pm \Delta n_{FS}$
[Gleichung/Equation 6.2]	
Feinstregelung	Fine adjustment
$\Delta n_{FS} = \pm \frac{n_{WG}}{i}$	$\Delta n_{FS} = \pm \frac{n_{WG}}{\text{Ratio}}$
[Gleichung/Equation 6.3]	

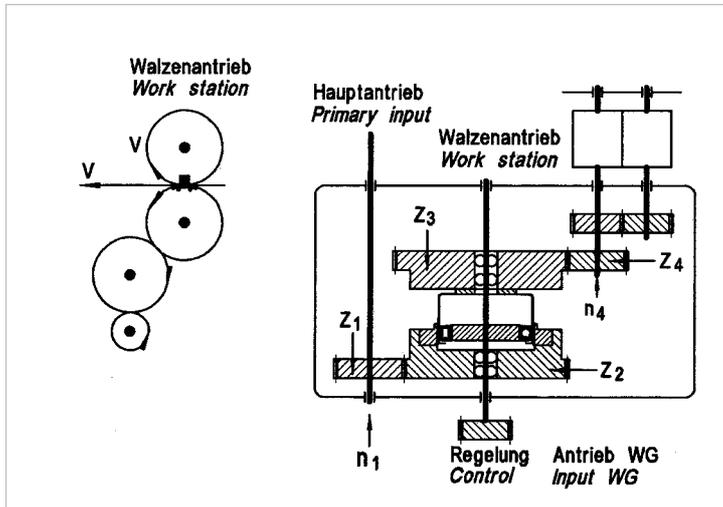
FS Primary input with n_{FS} in rpm
 CS Output with n_{CS} in rpm
 WG Control input with n_{WG} in rpm

Abtriebsdrehzahl	Output speed
$n_{CS} = n_{FS} \cdot \frac{i}{i+1} \pm \Delta n_{CS}$	$n_{CS} = n_{FS} \cdot \frac{\text{Ratio}}{\text{Ratio} + 1} \pm \Delta n_{CS}$
[Gleichung/Equation 6.5]	
Feinstregelung	Fine adjustment
$\Delta n_{CS} = \pm \frac{n_{WG}}{i+1}$	$\Delta n_{CS} = \pm \frac{n_{WG}}{\text{Ratio} + 1}$
[Gleichung/Equation 6.6]	

Berechnungsbeispiel

Phasenregelung von Walzen in einer Druckmaschine

Abb./Fig. 6.7



Calculation Example

Phase adjustment of print rollers in a printing machine

- $Z_1, Z_2, Z_3, Z_4 =$ Zähnezahl der Stirnräder
number of teeth of the spur gears
- $Z_{CS} =$ Zähnezahl des Circular Spline
number of teeth of the Circular Spline
- $Z_{FS} =$ Zähnezahl des Flexspline
number of teeth of the Flexspline

Gegeben/Given

- Geschwindigkeit des Papiers
Speed of paper 60 m/min
- Umfang der Walzen
Circumference of the roller 0.5 m
- Abtriebsdrehmoment
Output Torque $T_4 = 70 \text{ Nm}$
- Drehzahl des Hauptantriebes
Speed of the primary input $n_1 = 500 \text{ min}^{-1}/\text{rpm}$
- Drehzahl der Walzen
Speed of the rollers $n_4 = 120 \text{ min}^{-1}/\text{rpm}$



Das Nenndrehmoment T_N für ein HFUC-25-2A-GR Getriebe mit einer Untersetzung von $i = 80$ bei einer Drehzahl von 2000 min^{-1} beträgt 63 Nm .

Rated torque T_N of the HFUC-25-2A-GR gear with a ratio of $R=80$ at a speed of $n = 2000 \text{ rpm}$ is 63 Nm .

Gesucht/Unknown:

Zähnezahlen, Getriebedrehzahlen, Drehmomentbelastungen
Number of teeth, Gear speeds, Torques at gears

Erster Schritt/First step:

Auswahl eines HFUC-25-2A-GR Getriebes mit einer Untersetzung von $i=80$
Selection of HFUC-25-2A-GR with ratio $R=80$

Innere Untersetzung $\frac{Z_{FS}}{Z_{CS}} = \frac{160}{162} = \frac{80}{81}$
Internal ratio

Zähnezahl

Number of teeth

Gesamtuntersetzung i_G
Overall ratio i_G

$$i_G = \frac{n_1}{n_4} = \frac{Z_2}{Z_1} \cdot \frac{Z_{FS}}{Z_{CS}} \cdot \frac{Z_4}{Z_3}$$

$$\rightarrow \frac{Z_1}{Z_2} \cdot \frac{Z_3}{Z_4} = \frac{Z_{FS}}{Z_{CS}} \cdot \frac{n_4}{n_1}$$

$$= \frac{80}{81} \cdot \frac{120}{500}$$

→ Darstellung in Primzahlen
Expression in prime numbers

$$\frac{Z_{FS}}{Z_{CS}} \cdot \frac{n_4}{n_1} = \frac{2^4 \cdot 5}{3^4} \cdot \frac{2^3 \cdot 3 \cdot 5}{2^2 \cdot 5^3}$$

$$= \frac{2^5}{3^3 \cdot 5}$$

$$= \frac{2^3}{3 \cdot 5} \cdot \frac{2^2}{3^2}$$

$$= \frac{8}{15} \cdot \frac{4}{9}$$

$$= \frac{16}{30} \cdot \frac{16}{36}$$

Zähnezahl/Number of teeth:

$Z_1 = 16 \quad Z_2 = 30$

$Z_3 = 16 \quad Z_4 = 36$

Drehzahlen
Speeds

$$n_1 = 500 \text{ min}^{-1}/\text{rpm}$$

$$n_2 = n_1 \cdot \frac{Z_1}{Z_2}$$

$$= 500 \cdot \frac{16}{30}$$

$$= 267 \text{ min}^{-1}/\text{rpm}$$

$$n_3 = n_1 \cdot \frac{Z_1}{Z_2} \cdot \frac{Z_{CS}}{Z_{FS}}$$

$$= 500 \cdot \frac{16}{30} \cdot \frac{81}{80}$$

$$= 270 \text{ min}^{-1}/\text{rpm}$$

$$n_4 = n_1 \cdot \frac{Z_1}{Z_2} \cdot \frac{Z_{CS}}{Z_{FS}} \cdot \frac{Z_3}{Z_4}$$

$$= 500 \cdot \frac{16}{30} \cdot \frac{81}{80} \cdot \frac{16}{36}$$

$$= 120 \text{ min}^{-1}/\text{rpm}$$

Drehmomente
Torques

$$T_1 = \frac{T_4}{i_G} = \frac{T_4}{\frac{Z_2}{Z_1} \cdot \frac{Z_{FS}}{Z_{CS}} \cdot \frac{Z_4}{Z_3}}$$

$$T_1 = 16.8 \text{ Nm}$$

$$T_2 = T_4 \cdot \frac{Z_3}{Z_4} \cdot \frac{Z_{CS}}{Z_{FS}}$$

$$T_2 = 31.5 \text{ Nm}$$

$$T_3 = T_4 \cdot \frac{Z_3}{Z_4}$$

$$T_3 = 31 \text{ Nm}$$

T_1 = Antriebsdrehmoment
Input torque

T_4 = Abtriebsdrehmoment
Output torque

Der Einfluss des Wirkungsgrades ist bei dieser Betrachtung vernachlässigt worden.

The efficiency influence has been neglected for this calculation.

Verstellwinkel
Adjustment angle

$$\square = 360^\circ \cdot \frac{Z_3}{Z_4} \cdot \frac{1}{i}$$

$$= 360^\circ \cdot \frac{16}{36} \cdot \frac{1}{80}$$

$$= 2^\circ$$

Verstellwinkel der Druckwalzen bei einer Umdrehung am Regelantrieb.

The adjusting angle at the printing rollers with one rotation of the control input.

Dies bewirkt eine Verstellung am Umfang von:

This causes an adjustment at the circumference of:

$$0.5 \text{ m} \cdot \frac{2^\circ}{360^\circ} = 0.0028 \text{ m}$$

$$= 2.8 \text{ mm}$$

und ein Verstelldrehmoment T am Wave Generator von:

and an adjustment torque T at the Wave Generator of:

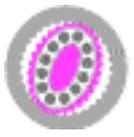
$$T = T_4 \cdot \frac{Z_3}{Z_4} \cdot \frac{1}{i}$$

$$= 70 \text{ Nm} \cdot \frac{16}{36} \cdot \frac{1}{80}$$

$$= 0.39 \text{ Nm}$$

Der Einfluss des Wirkungsgrades ist bei dieser Betrachtung vernachlässigt worden.

The efficiency influence has been neglected for this calculation.



Harmonic
Drive AG

01/2007 90 01 60

Harmonic Drive AG
Hoenbergstraße 14
65555 Limburg/Lahn
Germany

☎ + 49 (0) 6431/5008-0

📠 + 49 (0) 6431/5008-119

www.harmonicdrive.de

info@harmonicdrive.de