

Drehzahlprüfung von Cycloid-Getrieben

Birkholz, H.

Cycloidgetriebe bieten analog zum Planetengetriebe die Möglichkeit, durch Einspeisen einer Steuerdrehzahl unterschiedliche Drehzahlen an den Getriebeausgängen zuzulassen. Im Institut für Maschinenwesen wurden zwei Cycloid-Getriebe verschiedener Hersteller auf ihr Drehzahl- und Temperaturverhalten hin überprüft.

As well as a planetary gear cycloid gearboxes offer the opportunity to control the speed of the outgoing shafts by inducing a control speed. At the institut for mechanical engineering a lot of tests were done for two different gears in respect of temperatur and speed.

Die Versorgung des Getriebes mit Schmiermittel wurde durch eine Lanze realisiert, welche durch die Hohlwelle des Spindelbocks direkt in die zentrale Hohlwelle des Getriebes führte. Das Schmiermittel wurde anschließend in einem Spritzschutzgehäuse aufgefangen. Die Schmierstoffversorgung erfolgte in einem geschlossenen Kreislauf.

Der Prüfstands Aufbau ist in **Bild 2** dargestellt. Das Spritzschutzgehäuse ist geöffnet. In der Mitte befindet sich das eingebaute Cycloid-Getriebe. Im Vordergrund ist die Schmierstoffpumpe zu erkennen. In **Bild 3** ist die Anordnung der Temperaturmessstellen eingezeichnet.

1 Durchführung der Versuche

1.1 Prüfstands Aufbau

Bild 1 zeigt die schematische Darstellung des Prüfaufbaus. Das Spritzschutzgehäuse ist nicht in der Darstellung enthalten.

Das zu testende Cycloidgetriebe ist am Spindelbock angeflanscht. Als Antrieb n_2 diente ein Riementrieb mit einem 5,5 kW-Elektromotor, der über einen Frequenzumrichter angesteuert wurde. Die Stelldrehzahl $n_{1,absolut}$ wurde über einen zweiten Spindelaufbau und eine biege weiche Welle in das Getriebe eingebracht. Auch hier erfolgte die Drehzahleinstellung mittels eines Frequenzumrichters.

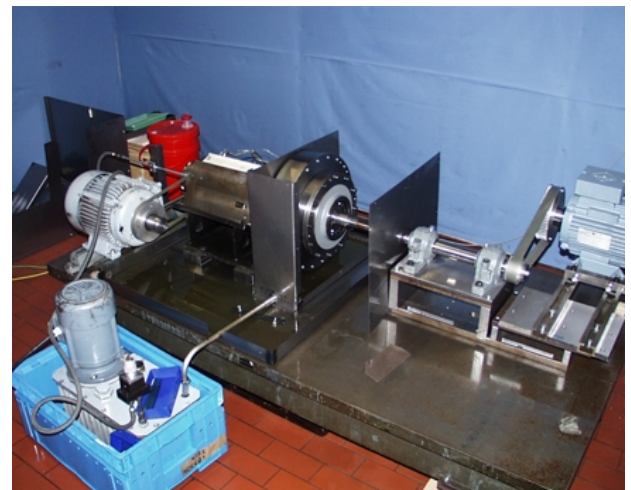


Bild 2: realisierter Prüfstands Aufbau mit geöffnetem Spritzschutzgehäuse

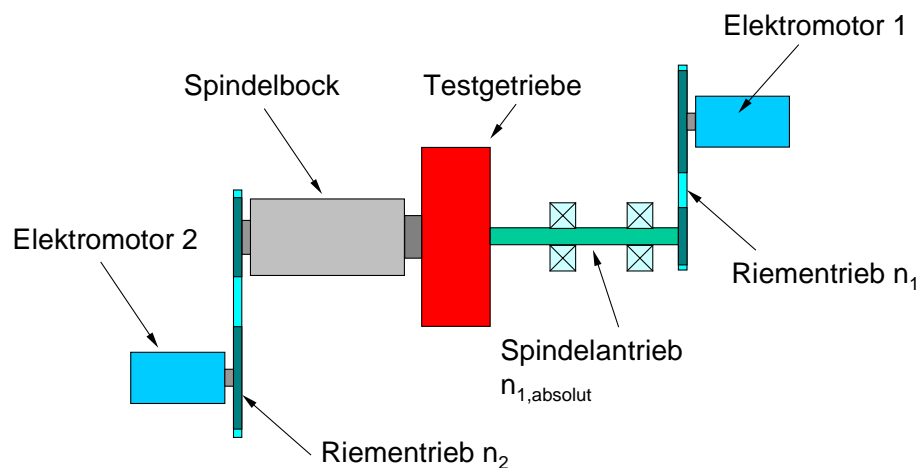


Bild 1: Schematische Darstellung des Prüfaufbaus

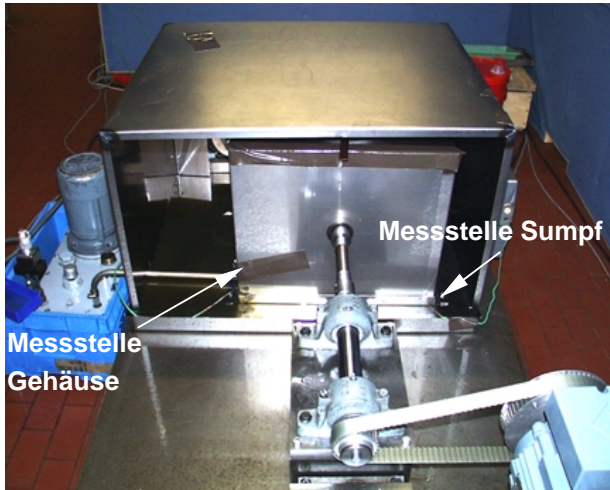


Bild 3: Anordnung der Temperaturmessstellen

Der Messfühler für die Sumpftemperatur wurde durch die Wandung in das Spritzschutzgehäuse geführt und direkt unter dem Getriebe angeordnet, so dass das aus dem Getriebe fließende Öl direkt auf den Messfühler auftraf. Der Messfühler für die Gehäusetemperatur wurde außen auf dem Spritzschutzgehäuse befestigt, da sich herausstellte, dass das umherspritzende Öl den gesamten Innenraum sehr gleichmäßig benetzte, also die Gehäusetemperatur der realen Öltemperatur ausreichend schnell folgte.

Schon bei geringen Drehzahlen kam es zum Austreten von Ölnebel aus der Behausung. Da sich der Ölnebel sehr fein im gesamten Prüfraum verteilte, war es notwendig, eine Zwangsentlüftung des Prüfraumes zu realisieren.

1.2 Drehzahlfestigkeit

Zunächst wurden Versuche zur Prüfung der Drehzahlfestigkeit gefahren werden. $n_{1,relativ}$ bezeichnet dabei die Relativdrehzahl innerhalb des Getriebes, $n_{1,absolut}$ die an der Zentralwelle einzustellende Drehzahl. Als Prüfmuster ergab sich die folgende Vorgehensweise:

1. Schritt: $n_{1,absolut} = n_2$
2. Schritt: $n_{1,relativ} = \text{Wert}$, $n_2 = \text{const.}$
3. Schritt: $n_{1,relativ} = -\text{Wert}$, $n_2 = \text{const.}$
4. Schritt: $n_{1,absolut} = n_2$

Die Haltezeit betrug je Drehzahlstellung 30 sec. Die einzustellenden Prüfdrehzahlen sind in **Tabelle 1** aufgeführt.

Prüfdrehzahlen		
n_2 [U/min]	$n_{1,relativ}$ [U/min]	$n_{1,absolut}$ [U/min]
500	± 2000	+2500 -1500
1000	± 2000	+3000 -1000
2000	± 2000	+4000 0
3000	± 2000	+5000 +1000
3700	± 2000	+5700 +1700

Tabelle 1: Prüfdrehzahlen der Cycloidgetriebe

1.3 Beharrungstemperaturversuche

Für die in **Tabelle 2** aufgeführten Werte wurden Dauerlaufversuche bis zur Einstellung einer Beharrungstemperatur durchgeführt.

n_2 [U/min]	$n_{1,relativ}$ [U/min]	$n_{1,absolut}$ [U/min]
500	± 1000	+1500 -500
2000	± 1000	+3000 +1000
3700	± 1000	+4700 +2700

Tabelle 2: Drehzahlwerte zu Temperaturversuchen

Dabei wurde zunächst die positive Drehzahl für $n_{1,relativ}$ angefahren, nach Erreichen der Beharrungstemperatur die negative Drehzahl. Die Messung der Temperatur war im Ölsumpf des Gehäuses, an der Gehäuseoberfläche sowie unmittelbar nach Erreichen der Beharrungstemperatur im Stillstand direkt auf der Getriebeoberfläche vorgesehen.

Die Weiterführung der Untersuchungen sollte ergebnisabhängig vorgenommen werden:

bei Temperatureinfluss durch n_2 :

- gleiche Reihe für n_2 , $n_1 = \pm 2000$ U/min

ohne Temperatureinfluss durch n_2 :

- $n_2 = 2000$ U/min = const., $n_{1,relativ} = \pm 2000, \pm 3000, \pm 4000$ U/min.

1.4 Versuchsdurchführung

Nach Aufbau des jeweils zu testenden Getriebes wurden die geforderten Drehzahlen eingestellt und das Getriebe auf eine erste Drehzahlfestigkeit geprüft. Anschließend erfolgten die Versuche zur Beharrungstemperatur nach Tabelle , also mit

variabler Drehzahl n_2 und konstanter Differenzdrehzahl $n_{1,relativ}$. Nach jedem Versuch wurde die Oberflächentemperatur des Getriebes gemessen. Zwischen jeder Temperaturstufe konnte das Getriebe komplett auf Raumtemperatur abkühlen. Da sich bei beiden Getrieben kein Einfluss der Drehzahl n_2 nachweisen ließ, wurden anschließend Versuche bei konstanter Drehzahl $n_2 = 2000$ U/min und veränderlicher Drehzahl $n_{1,relativ}$ gefahren.

2 Auswertung

Es ist zu bemerken, dass bei allen Versuchen nach einer relativ gleichmäßigen Erwärmung bis zur Beharrungstemperatur nach Umkehr der Drehrichtung ein weiteres Ansteigen der Temperatur bis zu einer erneuten Beharrung auftrat. Die nachfolgende **Tabelle 3** zeigt Endtemperaturen und Beharrungszeiten für das kleinere Getriebe für die Versuche mit konstanter Relativdrehzahl $n_{1,relativ} = \pm 1000$ U/min.

Der leichte Anstieg der Temperaturen bei den verschiedenen Drehzahlen n_2 resultiert aus der Erwärmung der Lager im Spindelbock. Die Temperatur dieser Lager wurde ebenfalls überwacht und stieg naturgemäß mit steigender Drehzahl. Auffällig ist die deutliche Verminderung der Zeit bis zum Erreichen der Beharrungstemperatur.

Drehzahl n_2 [U/min]	500	2000	3700
Beharrungstemperatur Gehäuseoberfläche [°C]	-	34	38
Endtemperatur Getriebeoberfläche [°C]	39,1	42,0	44,1
Zeit bis zur Beharrungstemperatur [min]	198	100	90

Tabelle 3: Endtemperaturen und Beharrungszeiten kleines Getriebe

Da sich kein signifikanter Einfluss der Drehzahl n_2 auf die Erwärmung des Getriebes einstellte, wurde im Folgenden bei konstanter Drehzahl $n_2 = 2000$ U/min die Spindeldrehzahl $n_{1,absolut}$ variiert (**Tabelle 4**).

Relativdrehzahl $n_{1,relativ}$ [U/min]	Spindeldrehzahl $n_{1,absolut}$ [U/min]
± 2000	0
	4000
± 3000	-1000
	+5000
± 4000	-2000
	+6000

Tabelle 4: Drehzahlwerte für $n_{1,relativ}$ und $n_{1,absolut}$

Eine positive Drehzahl $n_{1,absolut}$ bedeutet dabei gleiche Drehrichtung wie n_2 , eine negative Drehzahl bedeutet entgegengesetzte Drehrichtung zu n_2 .

Bild 4 zeigt den Verlauf der Temperatur für die letzte gefahrene Drehzahlstufe bis zum Abbruch.

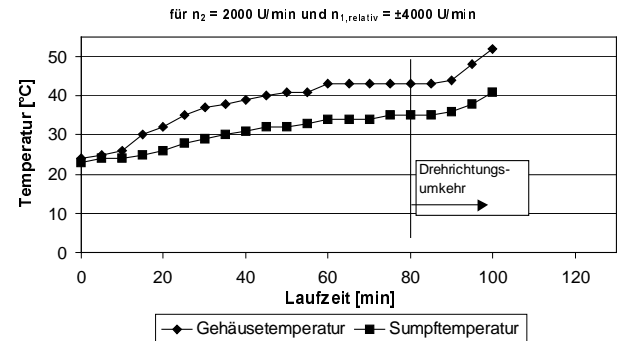


Bild 4: Temperaturverlauf für $n_2 = 2000$ U/min, $n_{1,relativ} = \pm 4000$ U/min

Die erste Beharrungstemperatur stellte sich mit 43°C für $n_2 = 2000$ U/min, $n_{1,absolut} = -2000$ U/min nach 60 min ein. Die an der Oberfläche gemessene Getriebetemperatur betrug 59,1°C. Nach 80 Minuten erfolgte die Drehrichtungs-umkehr von $n_{1,absolut} = -2000$ U/min auf $n_{1,absolut} = +6000$ U/min. Nach ca. 5 Minuten kam es zu einem deutlichen Anstieg der Gehäusetemperatur und in der Folge zu einem Abfall der Drehzahl bis zum Abschalten des Antriebes. Die Getriebetemperatur betrug zum Zeitpunkt des Abschaltens 88,1°C. Nach einer Abkühlung auf Raumtemperatur wurde der zweite Versuchsteil mit $n_{1,absolut} = +6000$ U/min wiederholt. Es zeigte sich das gleiche Ergebnis mit Drehzahlverringern und Abschalten des Antriebs nach ca. 15 min Laufzeit. Aus diesem Verhalten kann gefolgert werden, dass die Lagerung der Zentralwelle einer Drehzahl von 6000 U/min auf Dauer nicht standhält.

Die nachfolgende **Tabelle 5** zeigt Endtemperaturen und Beharrungszeiten für das große Getriebe für die Versuche mit konstanter Relativdrehzahl $n_{1,relativ} = \pm 1000$ U/min.

Drehzahl n_2 [U/min]	500	2000	3700
Beharrungstemperatur Gehäuseoberfläche [°C]	25	29	33
Endtemperatur Getriebeoberfläche [°C]	30,5	34,8	41,2
Zeit bis zur Beharrungstemperatur [min]	130	105	95

Tabelle 5: Endtemperaturen und Beharrungszeiten
großes Getriebe

Auffallend war, dass wie auch bei den folgenden Versuchen innerhalb des Spritzschutzgehäuses eine wesentlich stärkere Ölbewegung zu beobachten war, obwohl die Schmiermittelmenge mit 250 ml/min konstant blieb. Dies ist auf den deutlich größeren Getriebeaußendurchmesser zurückzuführen.

Der leichte Anstieg der Temperaturen bei den verschiedenen Drehzahlen n_2 resultiert auch hier aus der Erwärmung der Lager im Spindelbock. Auffällig ist ebenfalls die deutliche Verminderung der Zeit bis zum Erreichen der Beharrungstemperatur.

Da sich analog zum kleinen Getriebe kein signifikanter Einfluss der Drehzahl $n_{2,absolut}$ einstellte, erfolgte die weitere Versuchsdurchführung bei konstanter Drehzahl $n_2 = 2000$ U/min nach Tabelle 4. Für die letzte getestete Kombination $n_2 = 2000$ U/min, $n_{1,absolut} = -1000$ U/min stellte sich die Beharrungstemperatur von 39°C nach 70 min ein. Die Änderung auf $n_{1,absolut} = +5000$ U/min brachte zunächst einen weiteren Anstieg der Temperatur, bis es zum Abschalten des Antriebs kam (**Bild 5**). Nach Beendigung des Versuches wurde auf der Getriebeoberfläche eine Temperatur von 81,5°C gemessen. Auch hier wurde aus Absicherungsgründen der Versuch wiederholt. Die Ergebnisse entsprachen dem ersten Versuch.

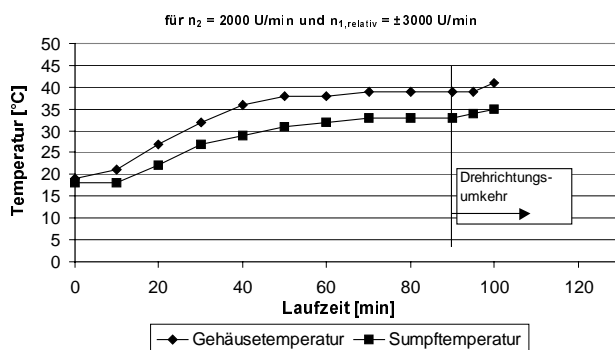


Bild 5: Temperaturverlauf für $n_2 = 2000$ U/min,
 $n_{1,relativ} = \pm 3000$ U/min, großes Getriebe

3 Messung von Drehzahl und Stromaufnahme

Um einen Eindruck von Drehzahlverhalten und Stromaufnahme während des Festgehens des großen Getriebes zu erhalten, wurden beide Größen zu identischen Zeitpunkten gemessen und im Diagramm (**Bild 6**) dargestellt.

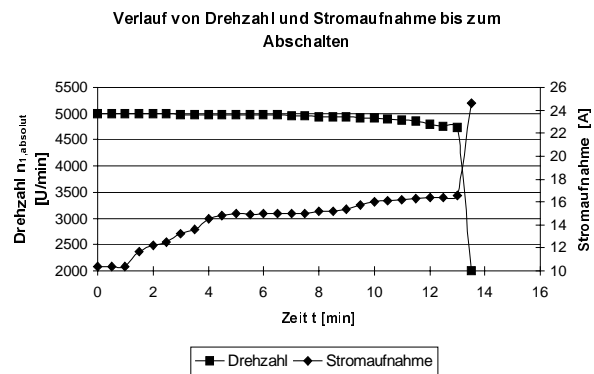


Bild 6: Drehzahl und Stromaufnahme bis zum Abschalten für $n_2 = 2000$ U/min, $n_{1,absolut} = +5000$ U/min, großes Getriebe

Während der ersten Minute stellte sich ein Gleichgewicht zwischen Nenndrehzahl und Stromaufnahme ein. Nach Ablauf der ersten Minute kam es zu einem deutlichen Anstieg der Stromaufnahme bis zur vierten Minute bei gleichzeitig nur geringfügig sinkender Drehzahl. Anschließend hielten sich Drehzahlabfall und steigende Stromaufnahme die Waage, bis es nach ca. 13 Minuten zu einem schlagartigen Anstieg der Stromaufnahme bis zum Abschalten kam. Der letzte Punkt im Diagramm stellt den Endzustand zum Zeitpunkt des Abschaltens dar. Nach dem Abschalten wurde die Zentralwelle durch die Blockierung sofort auf die Drehzahl n_2 beschleunigt, die Differenzdrehzahl $n_{1,relativ}$ wurde also zu Null.

4 Zusammenfassung

Während der gesamten Versuche kam es bis auf die Ablösung des Typenschilds und das Auswandern der Dichtung an einem der Getriebe nicht zu Zerstörungen an den Getrieben. Beide Getriebe zeigten ein ähnliches Temperaturverhalten, Unterschiede dürften auf die mit einer Differenz von 40 kg unterschiedlichen Massen zurückzuführen sein. Beide Getriebe konnten die geforderten Drehzahlstufen nicht dauerhaft ertragen, das kleinere Getriebe blockierte bei $n_2 = 2000$ U/min, $n_{1,relativ} = +4000$ U/min, das große bereits eine Drehzahlstufe früher bei $n_2 = 2000$ U/min, $n_{1,relativ} = +3000$ U/min. Beide Getriebe konnten also nicht die nach Tabelle 4 geforderten Drehzahlstufen einhalten, zusätzlich ist zu berücksichtigen, dass eine Momentenbeanspruchung nicht stattfand.