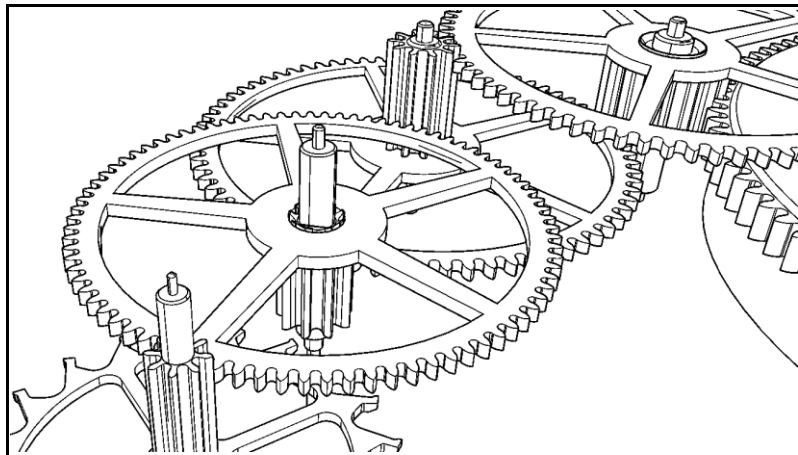


Gegenüberstellung des Reibungsverhaltens dreier Verzahnungstypen in einem Uhrwerk



V.24, 02.09.2020

© Irnich Informatik GmbH, 2020

Thomas Irnich
Irnich Informatik GmbH
Ipsachstrasse 10, CH-2560 Nidau
www.irnich.ch

Inhaltsverzeichnis

1 Einführung.....	3
2 Ansatz.....	4
2.1 Zahneingriff.....	5
2.2 Spezifisches Gleiten	6
3 Konstruktion der Evolventenverzahnungen	8
4 Untersuchung der Radsätze	9
4.1 Räderwerk	9
4.2 Technische Daten des Räderwerks.....	9
4.3 Datensammlung.....	10
4.3.1 Radpaar 107:16 Zähne	10
4.3.1.1 NIHS 20-02	10
4.3.1.2 NHS 56702/ 56703-C.....	12
4.3.1.3 Evolventenverzahnung	14
4.3.2 Radpaar 75:10 Zähne	16
4.3.2.1 NIHS 20-02	16
4.3.2.2 NHS 56702/ 56703-C.....	18
4.3.2.3 Evolventenverzahnung	20
4.3.3 Radpaar 72:9 Zähne	22
4.3.3.1 NIHS 20-02	22
4.3.3.2 NHS 56702/ 56703-C.....	24
4.3.3.3 Evolventenverzahnung	26
4.3.4 Radpaar 84:8 Zähne	28
4.3.4.1 NIHS 20-02	28
4.3.4.2 NHS 56702/ 56703-C.....	30
4.3.4.3 Evolventenverzahnung	32
5 Ergebnis.....	34
6 Zusammenfassung.....	35
7 Ausblick	35
8 Literaturverzeichnis.....	36

1 Einführung

Openmovement [OM, 2020] ist ein Verein, der neue Basis-Uhrwerke nach den Prinzipien von Open Source entwickelt. Ein Beispiel ist das Basiswerk OM 10 // 30 mm 25'200 AH für Herren-Armbanduhren. Dieses Basisuhrwerk soll als einfaches Dreizeiger-Werk benutzt werden oder ein individuelles Modul antreiben. Die Konstruktion des Werks ist mittlerweile fertiggestellt. Dessen Zahnräder sollen zunächst Zähne entsprechend der Norm NIHS 20-02 [NIHS, 2005, S. 177] erhalten. Diese Zahnform gehört zur Gruppe der Kreisbogenverzahnungen.

Später sollten andere Zahnformen in Erwägung gezogen werden. Hierfür kommt eine alternative Beräderung nach der älteren Norm NHS 56702/ NHS 56703 [NHS, 1928] in Frage (ebenfalls eine Kreisbogenverzahnung). Beobachtungen von Uhrmachern haben gezeigt, dass NHS-Verzahnungen gegenüber NIHS-Verzahnungen einen geringeren Verschleiss zeigen. Dies wird offensichtlich, wenn ein Werk nach längerer Laufzeit zur Revision geöffnet wird.

In der vorliegenden Arbeit wird diese Aussage mit den Mitteln der Verzahnungstheorie überprüft.

Weiter wird eine dritte Verzahnungsalternative untersucht, deren Räder evolventische Zahnformen aufweisen. Diese Zahnformen sind in unzähligen Leistungsgetrieben im Einsatz und haben sich dort seit langem bewährt. Sie sind prinzipiell auch für den Einsatz in Uhrwerken geeignet, werden dort jedoch relativ selten eingesetzt, unter anderem, weil ihre Konstruktion für diesen Bereich nicht standardisiert ist. Für einen evolventischen Radsatz soll nun untersucht werden, ob er bezüglich Reibung mit den beiden Radsätzen mit Kreisbogenverzahnung konkurrieren kann.

2 Ansatz

Zahnradpaarungen entwickeln im Betrieb verschiedene Schadenstypen [Klocke, 2017, S. 364], die je nach Belastung, Schmierung, Drehzahl und Geometrie mit der Zeit bis zur Zerstörung des Radpaars führen. Schadenstypen sind z. B. Reibverschleiss (Wear), Fressen (Scoring), Grübchenbildung (Pitting) und Zahnbruch (Breakage).

Abhängig von den Betriebsbedingungen treten bestimmte Schadensarten bevorzugt auf [Radzevich, 2012, S. 545]:

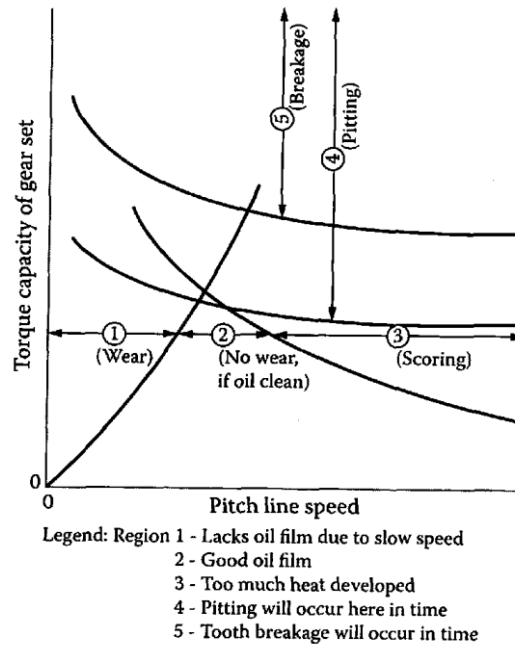


Bild 2-1: Schadensarten [Radzevich, 2012, S. 545]

Radpaare im Gehwerk einer Uhr laufen mit sehr geringer Drehzahl bei sparsamer Schmierung. Bei dieser Betriebsart ist Reibverschleiss (Wear (Bereich „1“ in Bild 2-1)) zu erwarten.

Reibverschleiss wird üblicherweise durch Auswertung des „Spezifischen Gleitens“ [Roth, 2001, S. 96] analysiert.

2.1 Zahneingriff

Zum Verständnis des spezifischen Gleitens ist eine vorgängige Betrachtung des Zahneingriffs hilfreich:

Die Zähne zweier drehender Zahnräder rollen nicht einfach aufeinander ab sondern gleiten dabei nicht unbeträchtlich. Die Gleitbewegung wird bei Eingriffsbeginn und –Ende maximal. Dazwischen liegt der sogenannte Wälzpunkt „C“, an dem keinerlei Gleiten auftritt. Er liegt genau dort, wo sich die beiden Wälzkreise (rot) tangential berühren (Bild 2-2b).

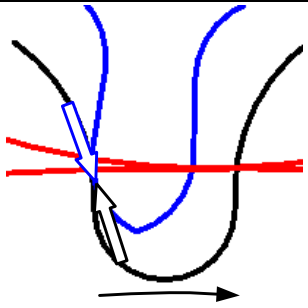
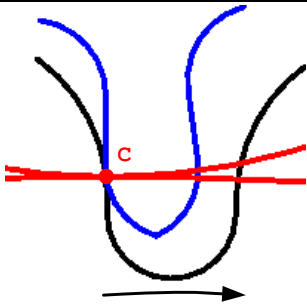
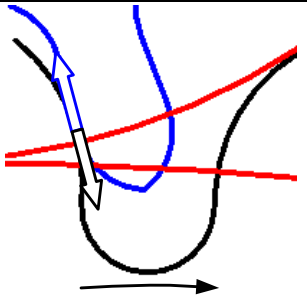
			<p>Der schwarze Zahn des treibenden Rades und der blaue Zahn des getriebenen Rades bewegen sich von links nach rechts.</p>
<p>a.) Beide Zähne bewegen sich in Flankenrichtung betrachtet aufeinander zu.</p>	<p>b.) Beide Zähne berühren sich im Wälzpunkt und bewegen sich in Flankenrichtung betrachtet nicht.</p>	<p>c.) Beide Zähne bewegen sich in Flankenrichtung betrachtet voneinander weg.</p>	

Bild 2-2: Wälzvorgang

Das Vorbeischieben des Zahns vom ersten Kontakt (Bild 2-2a) bis zum Wälzpunkt (Bild 2-2b) ist reibungstechnisch unvorteilhaft, weil hier ein progressives Reibsystem vorliegt [Roth, 2001, S. 110]. Ähnlich verhält es sich mit einem Stuhl, der an einen Tisch herangeschoben wird. Diese Art der Reibung wird als „schiebende Reibung“ bezeichnet.

Bild 2-2b zeigt den kurzen Moment, in dem sich beide Zähne im Wälzpunkt „C“ berühren und ohne jegliche Gleitbewegung aufeinander abrollen.

Danach (Bild 2-2c) gleiten die beiden Zähne aufeinander bis zum Ende des Kontakts in Form eines degressiven Reibsystems [Roth, 2001, S. 110]. Vergleichbar ist dies mit einem Stuhl, der von einem Tisch weggezogen wird. Hier macht sich die Reibung kaum störend bemerkbar. Diese Art der Reibung wird als „ziehende Reibung“ bezeichnet.

Aus der Betrachtung der Reibsysteme kann man folgende Erkenntnisse ziehen: Soll die aufrauende Wirkung z. B. durch den Eingriff vor dem Wälzpunkt (Bild 2-2a) insbesondere bei hohen Reibwerten und Mangelschmierung vermieden werden, dann sollte man den Eingriffsbeginn bei Aussen-Radpaarungen (auch bei Übersetzungen ins Schnelle) möglichst nahe an den Wälzpunkt „C“ legen [Roth, 2001, S. 110].

2.2 Spezifisches Gleiten

Um diese Vorgänge leicht verständlich und vergleichbar darzustellen, wird das sogenannte „spezifische Gleiten“ (Formelzeichen: ζ (Zeta)) in einem standardisierten Diagramm aufgetragen:

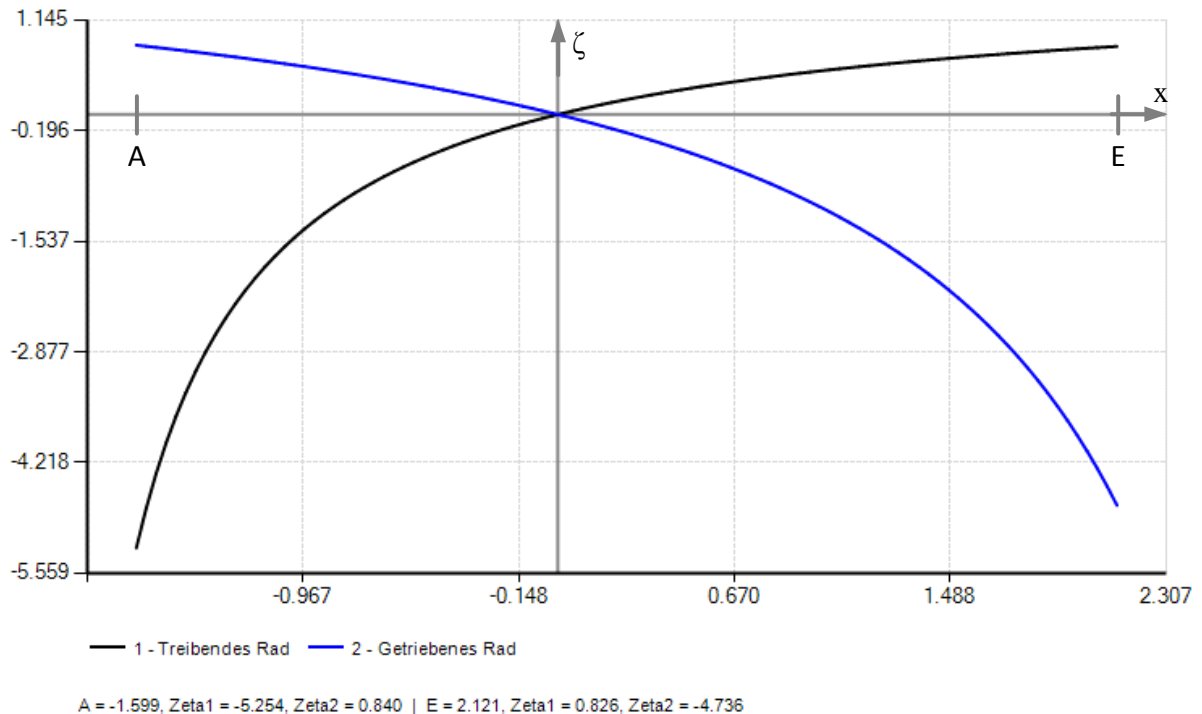


Bild 2.2-1: Spezifisches Gleiten (Beispiel aus [Roth, 2001, S. 98]).

A bezeichnet den Anfang des Eingriffs ganz links (siehe auch Bild 2-2a),

C (hier nicht ausgewiesen) liegt bei $X = 0$ (siehe auch Bild 2-2b),

E bezeichnet das Ende des Eingriffs ganz rechts (siehe auch Bild 2-2c),

Auf der **Achse „X“** wird der jeweilige Abstand des Kontaktpunktes vom Wälzpunkt in mm abgetragen,

Auf der **Achse „ ζ “** wird das zugehörige spezifische Gleiten ζ für beide Räder abgetragen (einheitenlos).

Das spezifische Gleiten (oder der Schlupf) ist der Quotient aus der Gleitgeschwindigkeit und der absoluten Tangentialgeschwindigkeit im betrachteten Berührungspunkt. Ist die Gleitgeschwindigkeit der Tangentialgeschwindigkeit entgegengerichtet, liegt ein negativer Schlupfzustand vor, im umgekehrten Fall ein positiver [Klocke, 2017, S. 371]. Die jeweilige Tangentialgeschwindigkeit ist die Geschwindigkeit im Berührungspunkt in Richtung des jeweiligen Zahnprofils. Die Gleitgeschwindigkeit ist die Differenz der beiden Tangentialgeschwindigkeiten.

$$\zeta_1 = \frac{v_{t1} - v_{t2}}{v_{t1}}$$

$$\zeta_2 = \frac{v_{t2} - v_{t1}}{v_{t2}}$$

Im Wälzpunkt ist $\zeta_{1/2} = 0$; die absoluten Maximalwerte werden in den Endpunkten der Eingriffsstrecke erreicht. Ein grosser negativer Schlupf (wie er im unteren Fussbereich auftritt) bedeutet, dass ein kleiner Flankenabschnitt mit einem grossen Abschnitt der Gegenflanke kämmt. Die Reibarbeit wirkt also am Fuss auf einem kleinen Flankenabschnitt, an der Gegenflanke, am Kopf auf einem grossen Abschnitt. $\zeta_{1/2}$ ist also ein gewisses Kriterium für die Verschleissbeanspruchung [Niemann, 2003, S.39].

Der Bereich der schiebenden Reibung A - C findet sich im Diagrammbereich (Bild 2.2-1) links neben der Achse „ ζ “; der Bereich der ziehenden Reibung C - E findet sich rechts neben der Achse „ ζ “.

In der Verzahnungsindustrie wird $|\zeta| < 3$ angestrebt. Dabei sollte dem Bereich A-C des Diagramms (also dem Bereich der schiebenden Reibung) besondere Beachtung geschenkt werden. Erhöhter Abrieb oder Blockage z. B. bei Uhrwerksrädern wird vorzugsweise hier auftreten.

Um die auftretende Reibung unter Verwendung des spezifischen Gleitens zu quantifizieren und damit verschiedene Radpaare zu vergleichen, reicht es allerdings nicht aus, nur den Parameter ζ_1 an der Stelle A zu betrachten, der für die maximal wirkende Reibkraft im Bereich der schiebenden Reibung steht. Vielmehr wird ebenfalls betrachtet, über welche Streckenlänge ζ_1 wirkt. Dazu eignet sich eine Aufsummierung der Grössen von ζ_1 über die Streckenlänge s (einheitenlos), dargestellt durch die grau markierte Fläche W_R . Diese Fläche entspricht der spezifischen Reibarbeit und dient als Grundlage für den Vergleich der drei Verzahnungstypen.

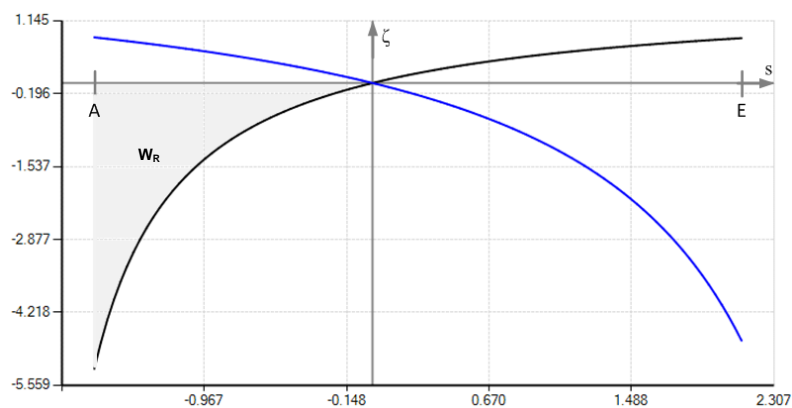


Bild 2.2-2: Spezifische Reibarbeit W_R (grau)

Zur Berechnung der Fläche dient folgende Beziehung:

$$W_R = - \int_{s_A}^0 \zeta_1(s) ds \quad \text{standardisiert mit} \quad s = \frac{x}{x_E - x_A}$$

Die Lösung wird jeweils numerisch gewonnen.

3 Konstruktion der Evolventenverzahnungen

Kreisbogenverzahnungen nach NIHS oder nach NHS werden immer als Paar konstruiert. Mit der Kenntnis der zu verwendenden Norm, der beiden Zähnezahlen und des Moduls liegen die Geometrien der beiden Zähne fest.

Evolventenräder dagegen werden einzeln konstruiert. Die Geometrie eines Radzahns ist in gewissen Grenzen variabel und ergibt sich beispielsweise auf Basis der Parameter Zähnezahl, Modul, Eingriffswinkel, Kopfkreisdurchmesser, Fusskreisdurchmesser und Profilverschiebungsfaktor [DIN-Taschenbuch 106, 1996, S. 68]. Es existieren Normen, z. B. DIN 867 [DIN-Taschenbuch 106, 1996, S. 1], die vorschreiben, mit welchen Grössen die Parameter zu besetzen sind.

Für Uhrenverzahnungen sind solche Normen jedoch nicht geeignet, da die geometrischen Verhältnisse dort relativ extrem sind (kleine Zähnezahl des Ritzels, grosse Übersetzung) und Evolventenräder dazu tendieren, am Zahnfuss relativ dick zu werden. Aus diesem Grund werden die notwendigen Räder unter Verwendung der vorgegebenen Zähnezahlen, Module und Achsabstände (siehe Kapitel 4.2, „Technische Daten des Räderwerks“) konstruiert, ohne eine Norm zu verwenden.

4 Untersuchung der Radsätze

Zur Bearbeitung der gegebenen Fragestellung werden pro Radpaarung drei Diagramme (jeweils für die drei Profiltypen NIHS, NHS und Evolvente) generiert. Der Vergleich der gefundenen Daten wird im Kapitel 5, „Ergebnis“ präsentiert.

4.1 Räderwerk

Das Räderwerk (Mit dem Profiltyp NIHS) ist als CAD-Geometrie im STEP-Format vorgegeben und gibt einen Eindruck von der Anordnung der Räder:

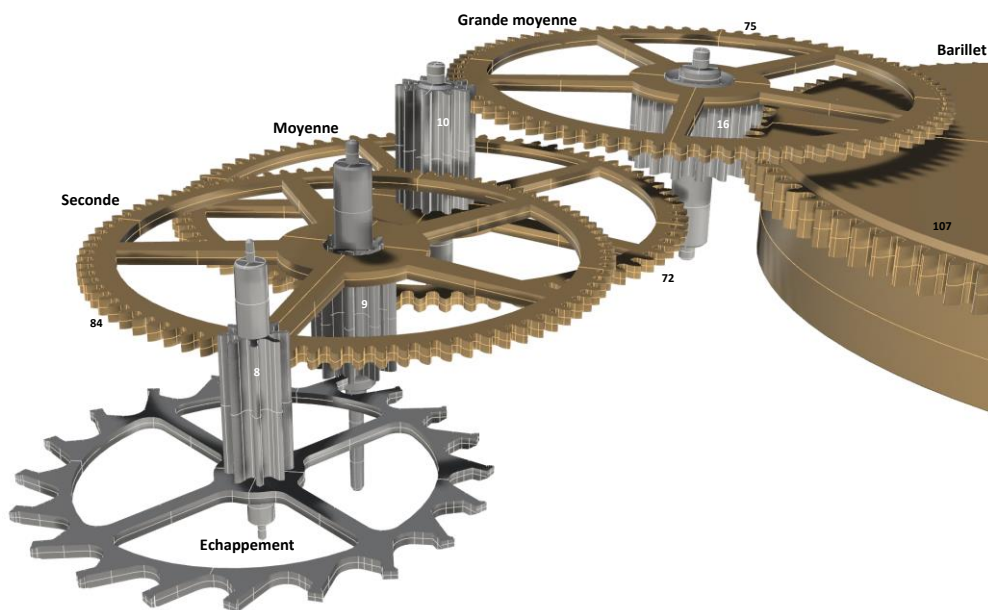


Bild 4.1-1: Räderwerk

4.2 Technische Daten des Räderwerks

Die nachfolgende Tabelle enthält alle notwendigen Parameter, um die Geometrie der Radpaare basierend auf den Normen NIHS 20-02 und NHS 56702/ 56703-C zu generieren. Evolventenverzahnungen werden ebenfalls unter Berücksichtigung dieser Parameter aufgebaut; fehlende Parameter, wie Eingriffswinkel oder Profilverschiebungsfaktor wurden durch Optimierung gewonnen.

		Nombrage	module	entraxe	diamètre primitif
Barillet	tambour	107	0,13	7,995	13,91
	pignon	16			2,08
Grande moyenne	roue	75	0,11	4,675	8,25
	pignon	10			1,1
Moyenne	roue	72	0,11	4,455	7,92
	pignon	9			0,99
Seconde	roue	84	0,08	3,68	6,72
	pignon	8			0,64
Échappement	roue	20	-		

4.3 Datensammlung

4.3.1 Radpaar 107:16 Zähne

4.3.1.1 NIHS 20-02

Die beiden Räder werden mit einem Programm zur Auslegung von Uhrenverzahnungen unter Eingabe von Norm (NIHS 20-02), Modul (0.13 mm) und den beiden Zähnezahlen (107, 16) parametrisiert. Die Zähne stehen danach im DXF-Format bereit.

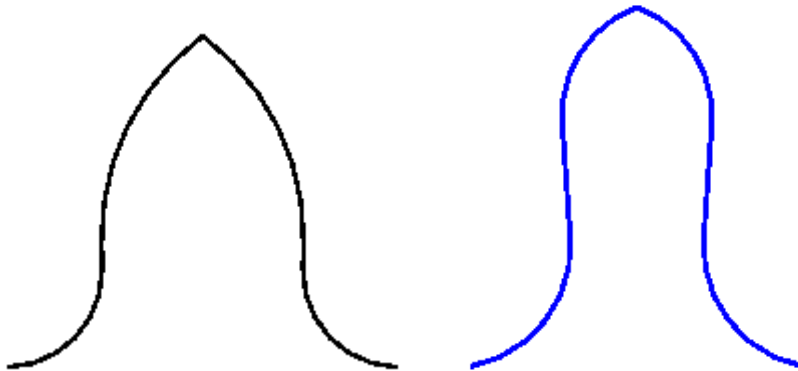


Bild 4.3.1.1-1:
Zahnform NIHS 20-02, 107 Zähne

Bild 4.3.1.1-2:
Zahnform NIHS 20-02, 16 Zähne

Das spezifische Gleiten wird von einem weiteren Programm berechnet. Dazu werden die beiden Zahngeometrien und der Achsabstand vorgegeben.

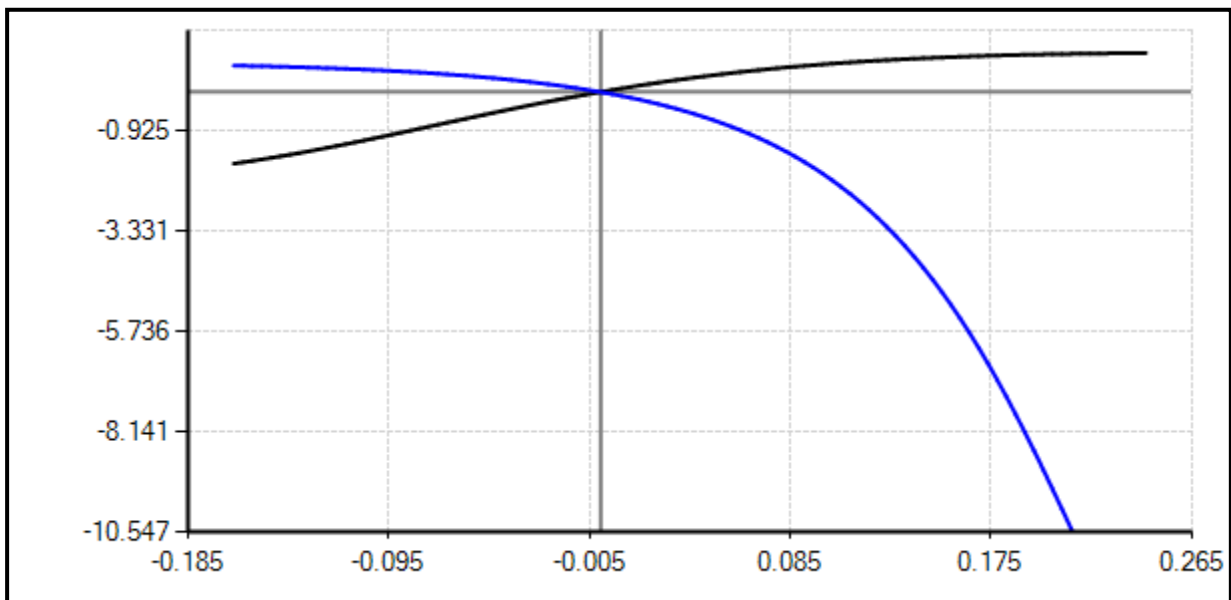


Bild 4.3.1.1-3: Spezifisches Gleiten NIHS 20-02, 107 und 16 Zähne

Zusätzlich ermittelt das Programm die spezifische Reibarbeit, anhand derer die verschiedenen Radtypen später verglichen werden sollen.

Damit ergeben sich folgende Zahlenwerte:

X	ζ_1	ζ_2	W_R
-0.165	-1.714	0.632	0.353
0.245	0.933	-13.974	k. A.

Tabelle 4.3.1.1-1: Spezifische Reibarbeit W_R nach Kapitel 2.2, „Spezifisches Gleiten“

„k. A.“ steht für „keine Angabe“, da die spezifische Reibarbeit nur für den schiebenden (also negativen Teil) des Diagramms berechnet werden soll.

4.3.1.2 NHS 56702/ 56703-C

Die beiden Räder werden mit einem Programm zur Auslegung von Uhrenverzahnungen unter Eingabe von Norm (NHS 56702/ 56703-C), Modul (0.13 mm) und den beiden Zähnezahlen (107, 16) parametrisiert. Die Zähne stehen danach im DXF-Format bereit.

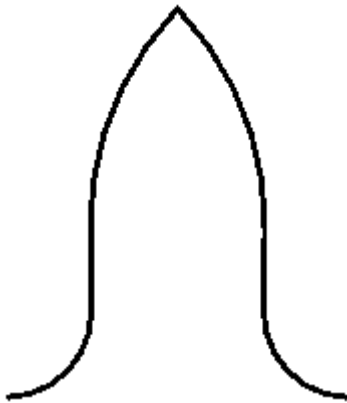


Bild 4.3.1.2-1:
Zahnform NHS 56702/ 56703-C, 107 Zähne

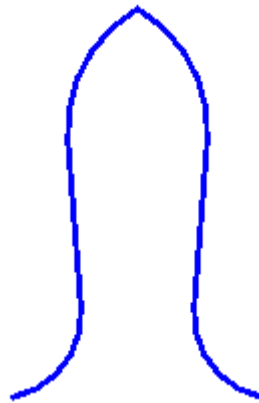


Bild 4.3.1.2-2:
Zahnform NHS 56702/ 56703-C, 16 Zähne

Das spezifische Gleiten wird von einem weiteren Programm berechnet. Dazu werden die beiden Zahngeometrien und der Achsabstand vorgegeben.

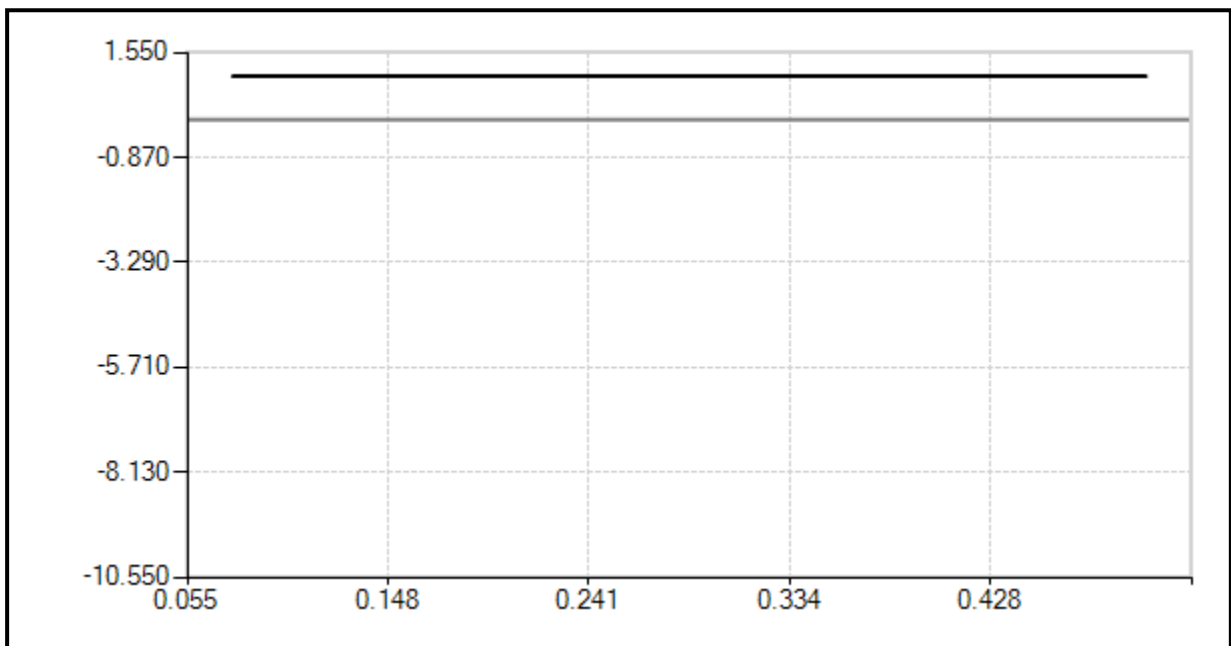


Bild 4.3.1.2-3: Spezifisches Gleiten NHS 56702/ 56703-C, 107 und 16 Zähne

Zusätzlich ermittelt das Programm die spezifische Reibarbeit, anhand derer die verschiedenen Radtypen später verglichen werden sollen.

Damit ergeben sich folgende Zahlenwerte:

Position	ζ_1	ζ_2	W_R
0.076	1.000	$-\infty$	0.000
0.500	1.000	$-\infty$	k. A.

Tabelle 4.3.1.2-1: Spezifische Reibarbeit W_R nach Kapitel 2.2, „Spezifisches Gleiten“

Hinweis:

Das eigentümliche Aussehen des Diagramms ergibt sich aufgrund der speziellen Zahngeometrie:

Zahnkontakt besteht hier nur im Bereich der ziehenden Reibung (die X-Achse liegt ausserhalb des linken Bildrahmens).

Der Quotient aus der Gleitgeschwindigkeit und der absoluten Tangentialgeschwindigkeit im betrachteten Berührungspunkt ergibt für die erste Flanke konstant 1 und für die zweite Flanke konstant unendlich während der Kopfbogen des ersten Rades auf der radial stehenden Fusslinie der zweiten Flanke gleitet.

4.3.1.3 Evolventenverzahnung

Die beiden Räder werden mit einem Programm zur Auslegung von Evolventenverzahnungen unter Eingabe von Modul (0.13 mm), Achsabstand (7.995 mm) und den beiden Zähnezahlen (107, 16) parametrisiert. Die Zähne stehen danach im DXF-Format bereit.

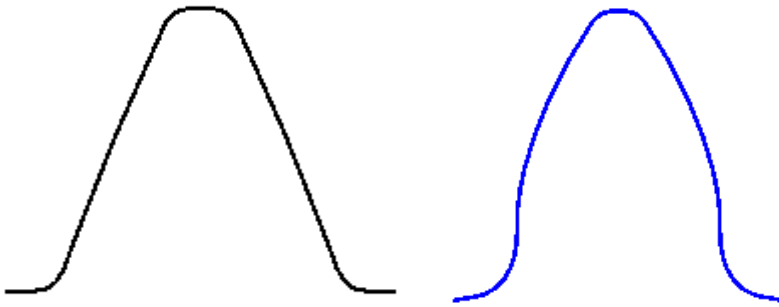


Bild 4.3.1.3-1: Evolventenzahn, 107 Zähne

Bild 4.3.1.3-2: Evolventenzahn, 16 Zähne

Das spezifische Gleiten wird von einem weiteren Programm berechnet. Dazu werden die beiden Zahngeometrien und der Achsabstand vorgegeben.

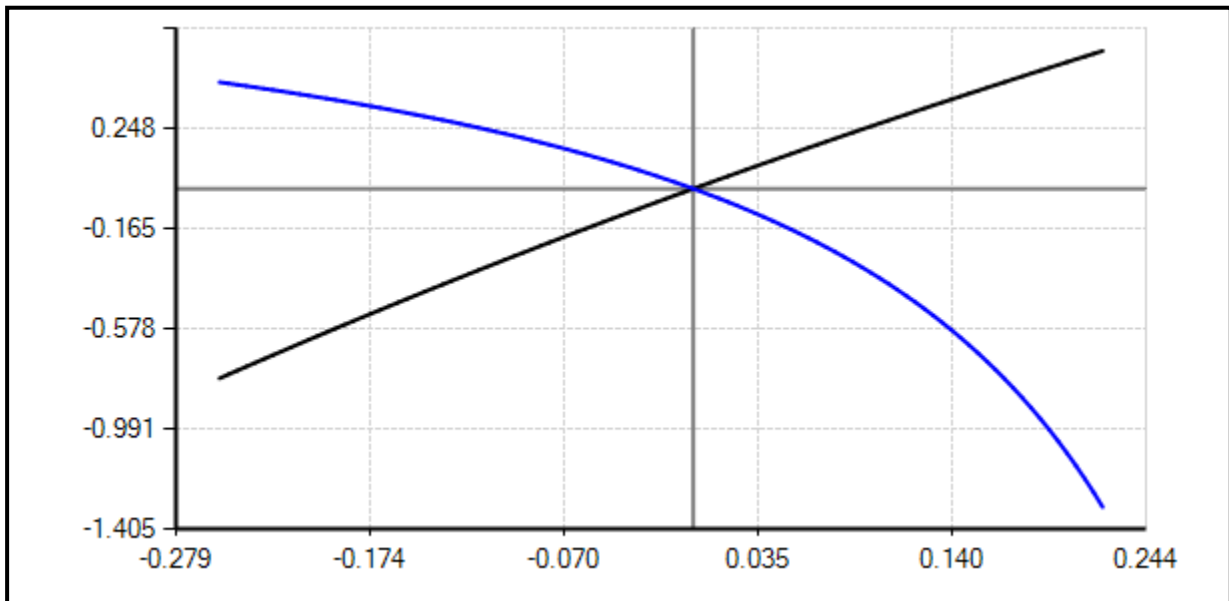


Bild 4.3.1.3-3: Spezifisches Gleiten Evolventenverzahnung, 107 und 16 Zähne

Zusätzlich ermittelt das Programm die spezifische Reibarbeit, anhand derer die verschiedenen Radtypen später verglichen werden sollen.

Damit ergeben sich folgende Zahlenwerte:

Position	ζ_1	ζ_2	W_R
-0.252	-0.771	0.435	0.175
0.284	0.716	-2.516	k. A.

Tabelle 4.3.1.3-1: Spezifische Reibarbeit W_R nach Kapitel 2.2, „Spezifisches Gleiten“

4.3.2 Radpaar 75:10 Zähne

4.3.2.1 NIHS 20-02

Die beiden Räder werden mit einem Programm zur Auslegung von Uhrenverzahnungen unter Eingabe von Norm (NIHS 20-02), Modul (0.11 mm) und den beiden Zähnezahlen (75, 10) parametrisiert. Die Zähne stehen danach im DXF-Format bereit.

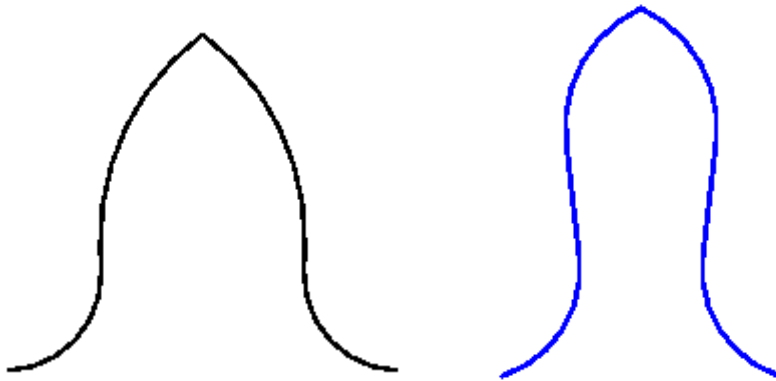


Bild 4.3.2.1-1:
Zahnform NIHS 20-02, 75 Zähne

Bild 4.3.2.1-2:
Zahnform NIHS 20-02, 10 Zähne

Das spezifische Gleiten wird von einem weiteren Programm berechnet. Dazu werden die beiden Zahngeometrien und der Achsabstand vorgegeben.

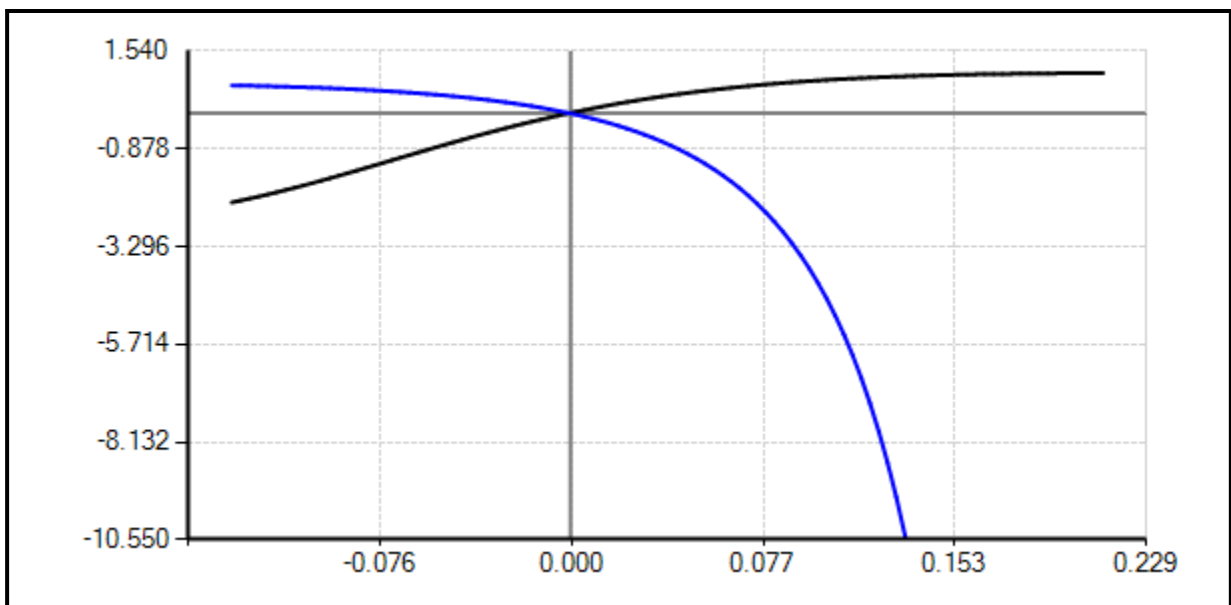


Bild 4.3.2.1-3: Spezifisches Gleiten NIHS 20-02, 75 und 10 Zähne

Zusätzlich ermittelt das Programm die spezifische Reibarbeit, anhand derer die verschiedenen Radtypen später verglichen werden sollen.

Damit ergeben sich folgende Zahlenwerte:

Position	ζ_1	ζ_2	W_R
-0.135	-2.205	0.688	0.427
0.212	0.991	-108.405	k. A.

Tabelle 4.3.2.1-1: Spezifische Reibarbeit W_R nach Kapitel 2.2, „Spezifisches Gleiten“

4.3.2.2 NHS 56702/ 56703-C

Die beiden Räder werden mit einem Programm zur Auslegung von Uhrenverzahnungen unter Eingabe von Norm (NHS 56702/ 56703-C), Modul (0.11 mm) und den beiden Zähnezahlen (75, 10) parametrisiert. Die Zähne stehen danach im DXF-Format bereit.

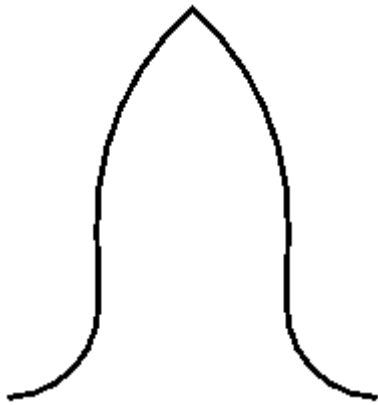


Bild 4.3.2.2-1:
Zahnform NHS 56702/ 56703-C, 75 Zähne

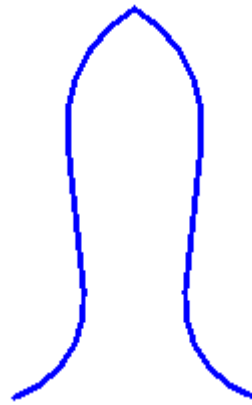


Bild 4.3.2.2-2:
Zahnform NHS 56702/ 56703-C, 10 Zähne

Das spezifische Gleiten wird von einem weiteren Programm berechnet. Dazu werden die beiden Zahngeometrien und der Achsabstand vorgegeben.

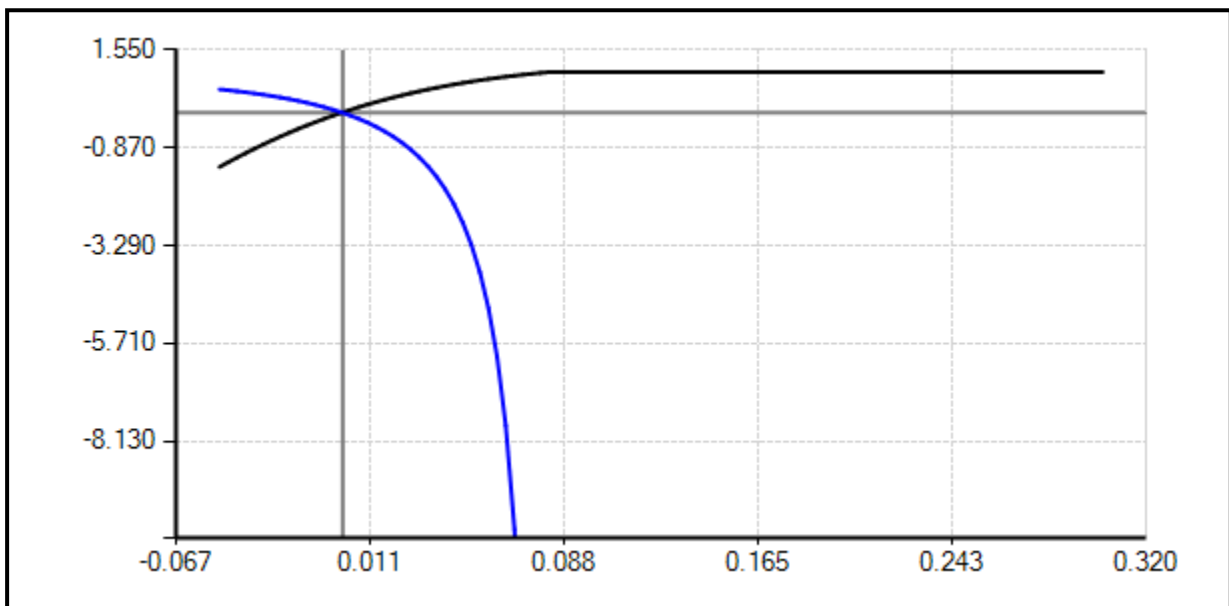


Bild 4.3.2.2-3: Spezifisches Gleiten NHS 56702/ 56703-C, 75 und 10 Zähne

Zusätzlich ermittelt das Programm die spezifische Reibarbeit, anhand derer die verschiedenen Radtypen später verglichen werden sollen.

Damit ergeben sich folgende Zahlenwerte:

Position	ζ_1	ζ_2	W_R
-0.049	-1.347	0.574	0.086
0.302	1.000	$-\infty$	k. A.

Tabelle 4.3.2.2-1: Spezifische Reibarbeit W_R nach Kapitel 2.2, „Spezifisches Gleiten“

4.3.2.3 Evolventenverzahnung

Die beiden Räder werden mit einem Programm zur Auslegung von Evolventenverzahnungen unter Eingabe von Modul (0.11 mm), Achsabstand (4.675 mm) und den beiden Zähnezahlen (75, 10) parametrisiert. Die Zähne stehen danach im DXF-Format bereit.



Bild 4.3.2.3-1: Evolventenzahn, 75 Zähne

Bild 4.3.2.3-2: Evolventenzahn, 10 Zähne

Das spezifische Gleiten wird von einem weiteren Programm berechnet. Dazu werden die beiden Zahngeometrien und der Achsabstand vorgegeben.

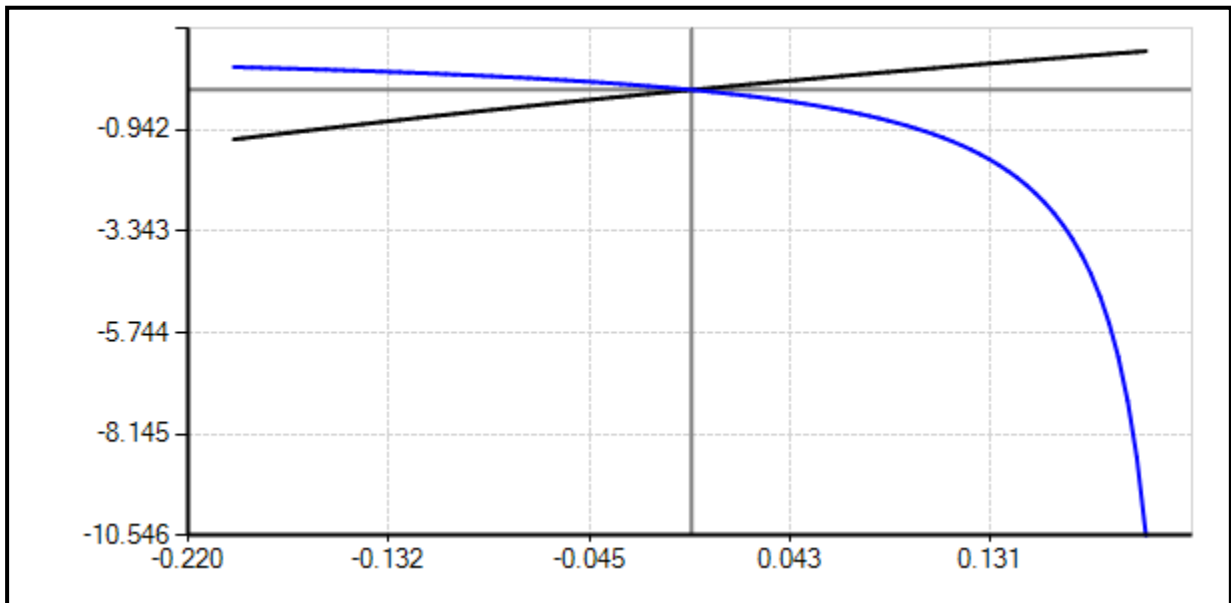


Bild 4.3.2.3-3: Spezifisches Gleiten Evolventenverzahnung, 75 und 10 Zähne

Zusätzlich ermittelt das Programm die spezifische Reibarbeit, anhand derer die verschiedenen Radtypen später verglichen werden sollen.

Damit ergeben sich folgende Zahlenwerte:

Position	ζ_1	ζ_2	W_R
-0.201	-1.177	0.541	0.283
0.199	0.913	-10.534	k. A.

Tabelle 4.3.2.3-1: Spezifische Reibarbeit W_R nach Kapitel 2.2, „Spezifisches Gleiten“

4.3.3 Radpaar 72:9 Zähne

4.3.3.1 NIHS 20-02

Die beiden Räder werden mit einem Programm zur Auslegung von Uhrenverzahnungen unter Eingabe von Norm (NIHS 20-02), Modul (0.11 mm) und den beiden Zähnezahlen (72, 9) parametrisiert. Die Zähne stehen danach im DXF-Format bereit.

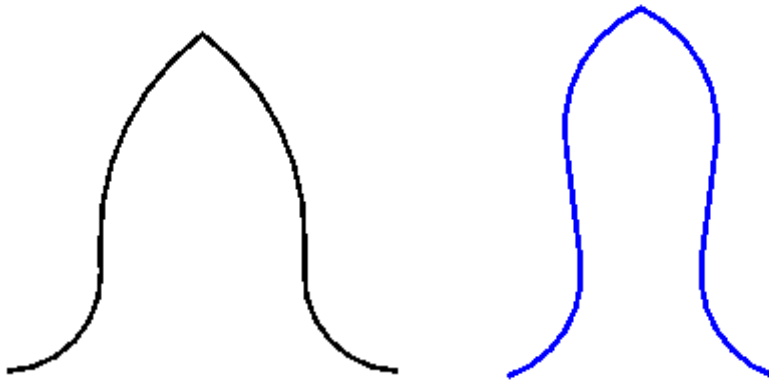


Bild 4.3.3.1-1:
Zahnform NIHS 20-02, 72 Zähne

Bild 4.3.3.1-2:
Zahnform NIHS 20-02, 9 Zähne

Das spezifische Gleiten wird von einem weiteren Programm berechnet. Dazu werden die beiden Zahngeometrien und der Achsabstand vorgegeben.

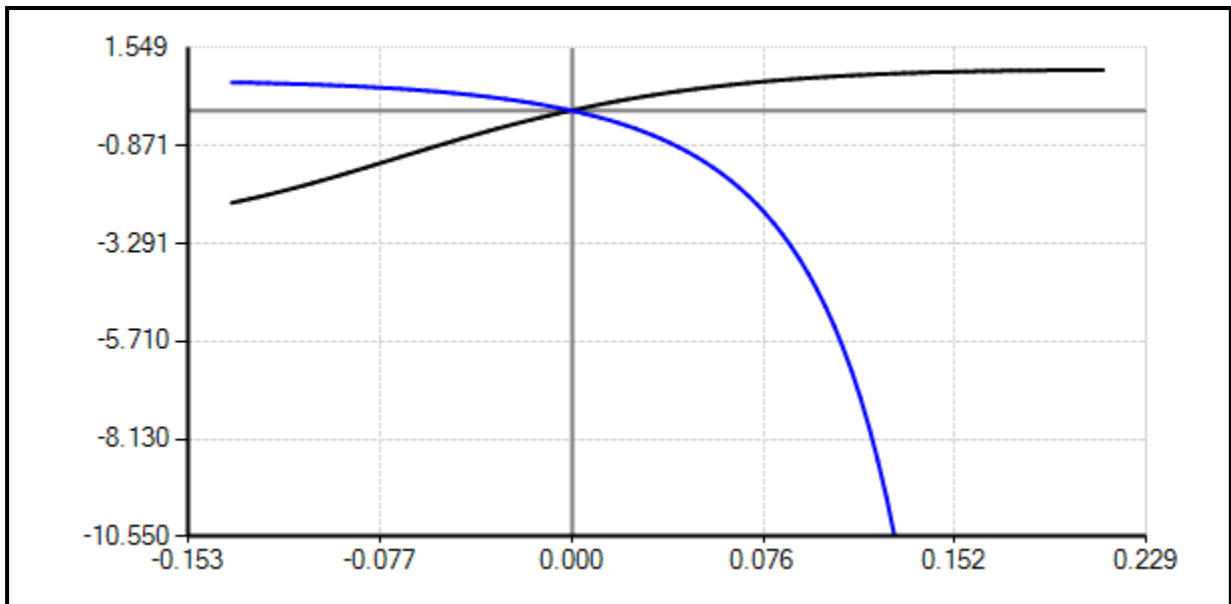


Bild 4.3.3.1-3: Spezifisches Gleiten NIHS 20-02, 72 und 9 Zähne

Zusätzlich ermittelt das Programm die spezifische Reibarbeit, anhand derer die verschiedenen Radtypen später verglichen werden sollen.

Damit ergeben sich folgende Zahlenwerte:

Position	ζ_1	ζ_2	W_R
-0.136	-2.284	0.695	0.446
0.211	0.999	-1025.413	k. A.

Tabelle 4.3.3.1-1: Spezifische Reibarbeit W_R nach Kapitel 2.2, „Spezifisches Gleiten“

4.3.3.2 NHS 56702/ 56703-C

Die beiden Räder werden mit einem Programm zur Auslegung von Uhrenverzahnungen unter Eingabe von Norm (NHS 56702/ 56703-C), Modul (0.11 mm) und den beiden Zähnezahlen (72, 9) parametrisiert. Die Zähne stehen danach im DXF-Format bereit.

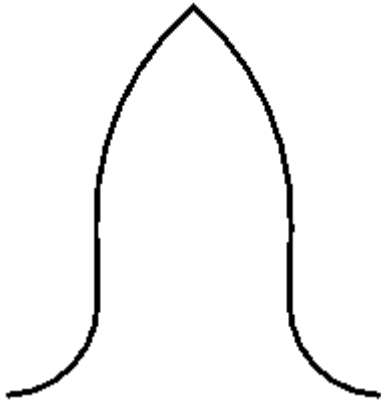


Bild 4.3.3.2-1:
Zahnform NHS 56702/ 56703-C, 72 Zähne

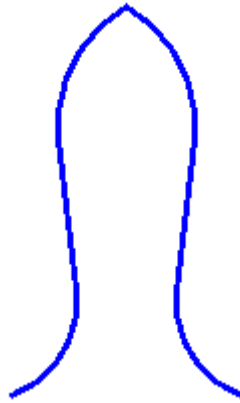


Bild 4.3.3.2-2:
Zahnform NHS 56702/ 56703-C, 9 Zähne

Das spezifische Gleiten wird von einem weiteren Programm berechnet. Dazu werden die beiden Zahngeometrien und der Achsabstand vorgegeben.

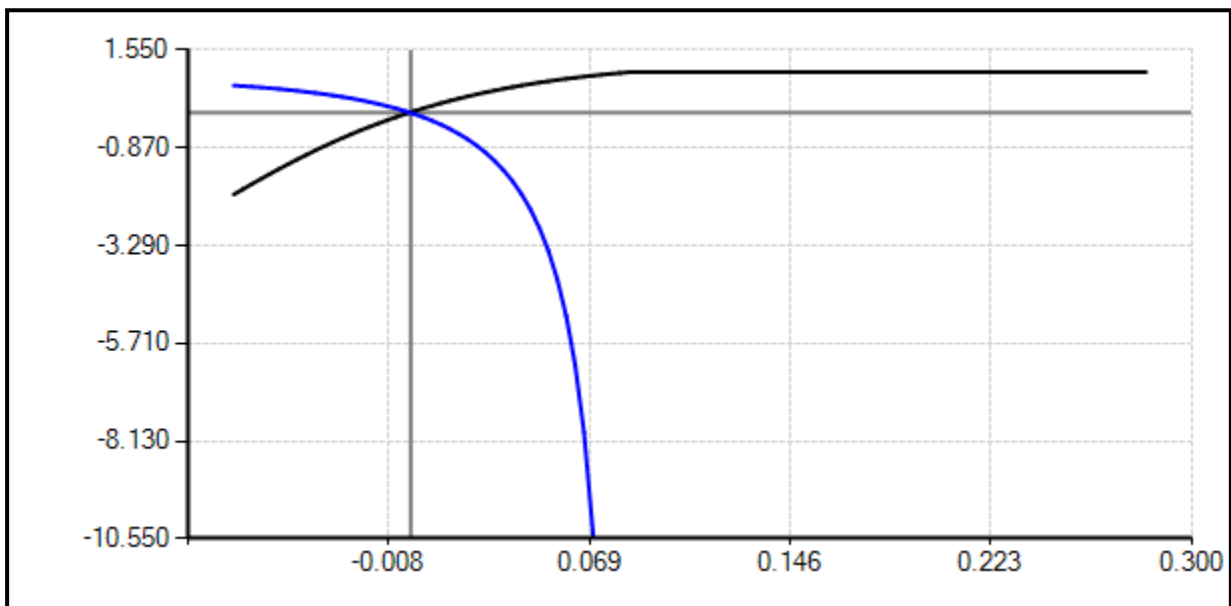


Bild 4.3.3.2-3: Spezifisches Gleiten NHS 56702/ 56703-C, 72 und 9 Zähne

Zusätzlich ermittelt das Programm die spezifische Reibarbeit, anhand derer die verschiedenen Radtypen später verglichen werden sollen.

Damit ergeben sich folgende Zahlenwerte:

Position	ζ_1	ζ_2	W_R
-0.068	-2.028	0.670	0.176
0.282	1.000	$-\infty$	k. A.

Tabelle 4.3.3.2-1: Spezifische Reibarbeit W_R nach Kapitel 2.2, „Spezifisches Gleiten“

4.3.3.3 Evolventenverzahnung

Die beiden Räder werden mit einem Programm zur Auslegung von Evolventenverzahnungen unter Eingabe von Modul (0.11 mm), Achsabstand (4.455 mm) und den beiden Zähnezahlen (72, 9) parametrisiert. Die Zähne stehen danach im DXF-Format bereit.

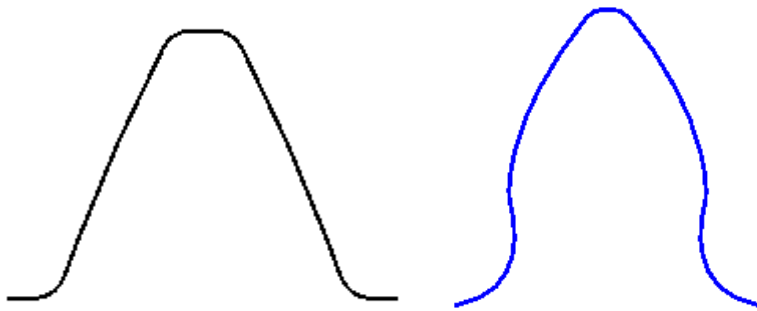


Bild 4.3.3.3-1: Evolventenzahn, 72 Zähne

Bild 4.3.3.3-2: Evolventenzahn, 9 Zähne

Das spezifische Gleiten wird von einem weiteren Programm berechnet. Dazu werden die beiden Zahngeometrien und der Achsabstand vorgegeben.

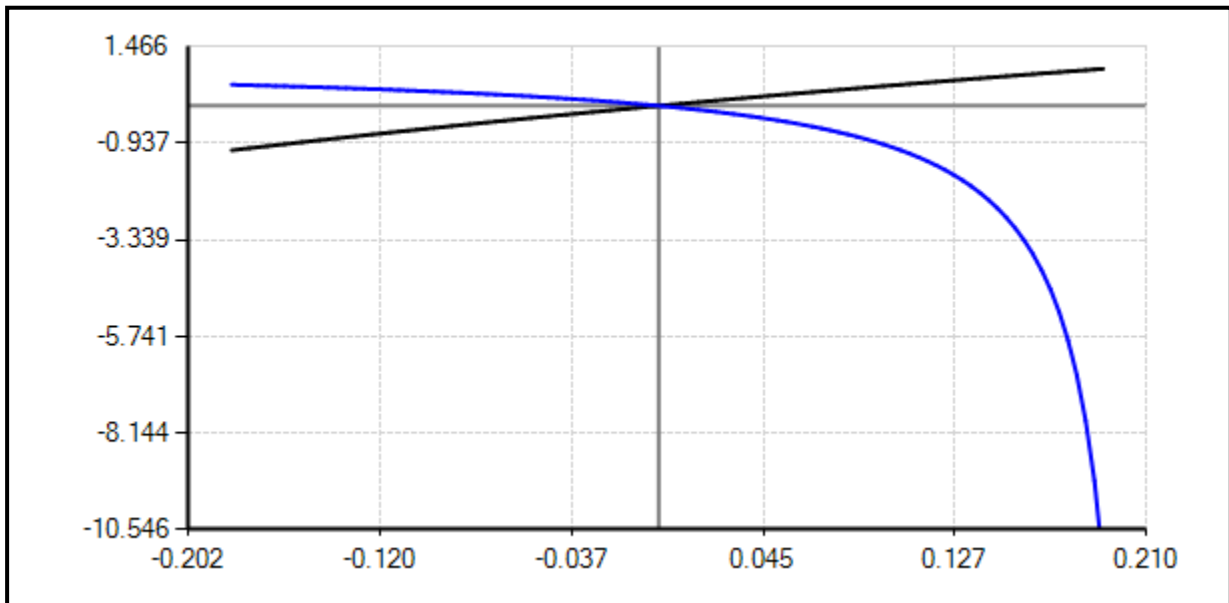


Bild 4.3.3.3-3: Spezifisches Gleiten Evolventenverzahnung, 72 und 9 Zähne

Zusätzlich ermittelt das Programm die spezifische Reibarbeit, anhand derer die verschiedenen Radtypen später verglichen werden sollen.

Damit ergeben sich folgende Zahlenwerte:

Position	ζ_1	ζ_2	W_R
-0.183	-1.105	0.525	0.260
0.191	0.920	-11.437	k. A.

Tabelle 4.3.3.3-1: Spezifische Reibarbeit W_R nach Kapitel 2.2, „Spezifisches Gleiten“

4.3.4 Radpaar 84:8 Zähne

4.3.4.1 NIHS 20-02

Die beiden Räder werden mit einem Programm zur Auslegung von Uhrenverzahnungen unter Eingabe von Norm (NIHS 20-02), Modul (0.08 mm) und den beiden Zähnezahlen (84, 8) parametrisiert. Die Zähne stehen danach im DXF-Format bereit.

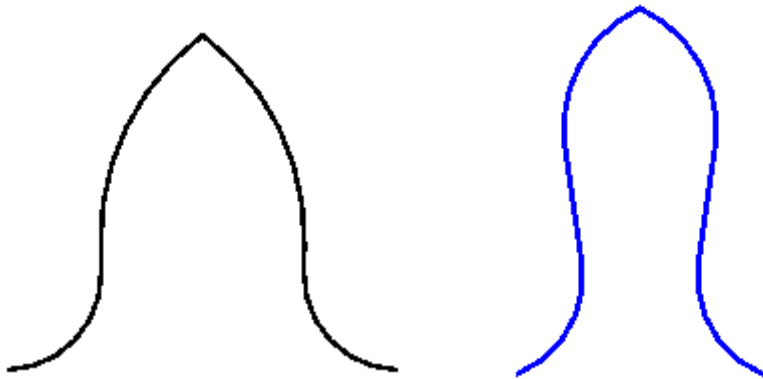


Bild 4.3.4.1-1:
Zahnform NIHS 20-02, 84 Zähne

Bild 4.3.4.1-2:
Zahnform NIHS 20-02, 8 Zähne

Das spezifische Gleiten wird von einem weiteren Programm berechnet. Dazu werden die beiden Zahngeometrien und der Achsabstand vorgegeben.

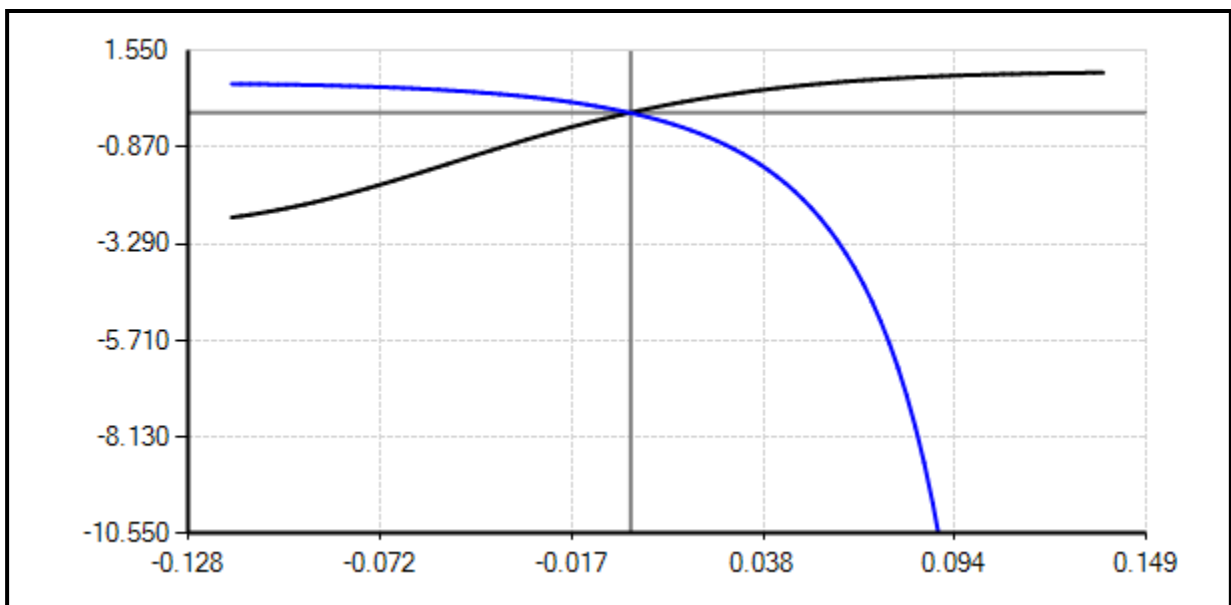


Bild 4.3.4.1-3: Spezifisches Gleiten NIHS 20-02, 84 und 8 Zähne

Zusätzlich ermittelt das Programm die spezifische Reibarbeit, anhand derer die verschiedenen Radtypen später verglichen werden sollen.

Damit ergeben sich folgende Zahlenwerte:

Position	ζ_1	ζ_2	W_R
-0.115	-2.623	0.724	0.632
0.136	1.000	$-\infty$	k. A.

Tabelle 4.3.4.1-1: Spezifische Reibarbeit W_R nach Kapitel 2.2, „Spezifisches Gleiten“

4.3.4.2 NHS 56702/ 56703-C

Die beiden Räder werden mit einem Programm zur Auslegung von Uhrenverzahnungen unter Eingabe von Norm (NHS 56702/ 56703-C), Modul (0.08 mm) und den beiden Zähnezahlen (84, 8) parametrisiert. Die Zähne stehen danach im DXF-Format bereit.

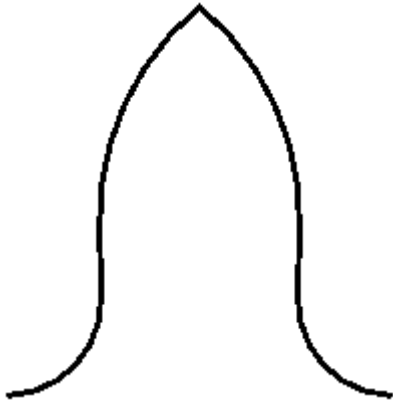


Bild 4.3.4.2-1:
Zahnform NHS 56702/ 56703-C, 84 Zähne

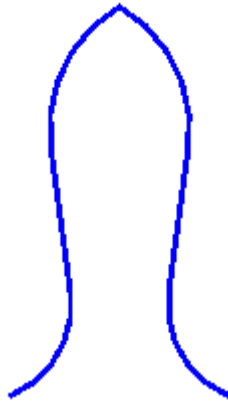


Bild 4.3.4.2-2:
Zahnform NHS 56702/ 56703-C, 8 Zähne

Das spezifische Gleiten wird von einem weiteren Programm berechnet. Dazu werden die beiden Zahngeometrien und der Achsabstand vorgegeben.

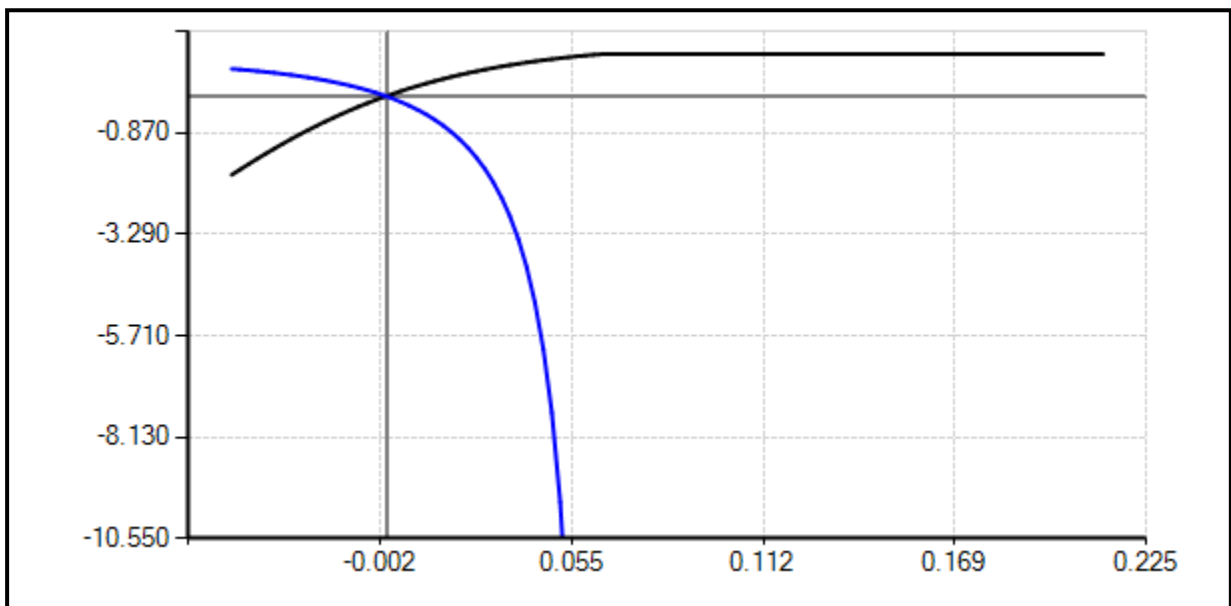


Bild 4.3.4.2-3: Spezifisches Gleiten NHS 56702/ 56703-C, 84 und 8 Zähne

Zusätzlich ermittelt das Programm die spezifische Reibarbeit, anhand derer die verschiedenen Radtypen später verglichen werden sollen.

Damit ergeben sich folgende Zahlenwerte:

Position	ζ_1	ζ_2	W_R
-0.046	-1.874	0.652	0.150
0.212	1.000	$-\infty$	k. A.

Tabelle 4.3.4.2-1: Spezifische Reibarbeit W_R nach Kapitel 2.2, „Spezifisches Gleiten“

4.3.4.3 Evolventenverzahnung

Die beiden Räder werden mit einem Programm zur Auslegung von Evolventenverzahnungen unter Eingabe von Modul (0.08 mm), Achsabstand (3.680 mm) und den beiden Zähnezahlen (84, 8) parametrisiert. Die Zähne stehen danach im DXF-Format bereit.



Bild 4.3.4.3-1: Evolventenzahn, 84 Zähne

Bild 4.3.4.3-2: Evolventenzahn, 8 Zähne

Das spezifische Gleiten wird von einem weiteren Programm berechnet. Dazu werden die beiden Zahngeometrien und der Achsabstand vorgegeben.

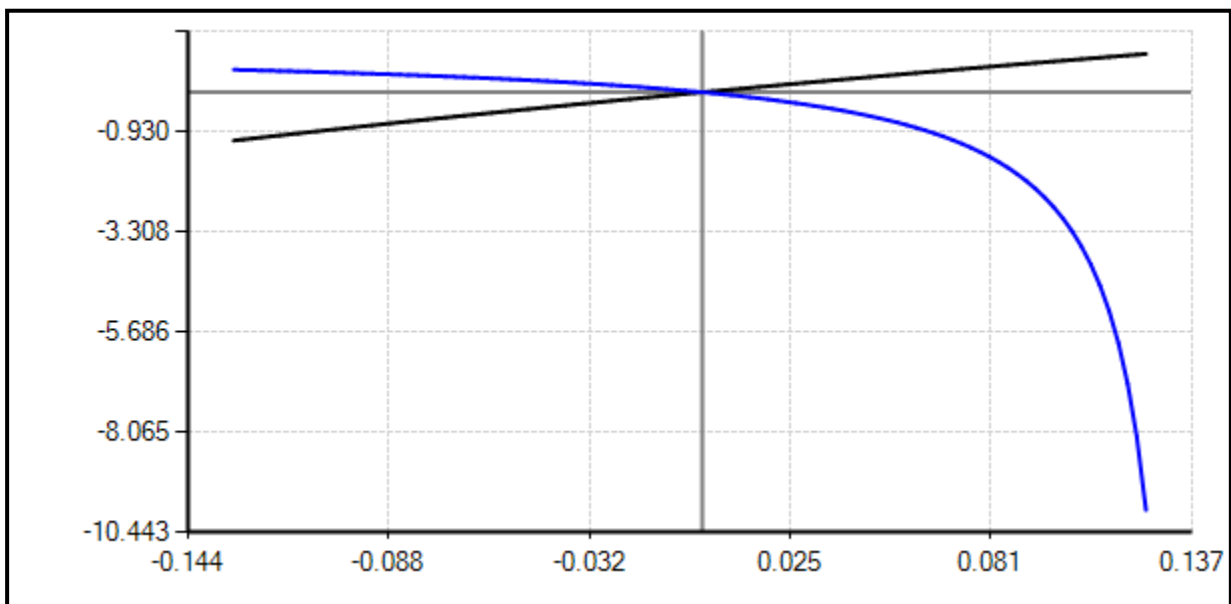


Bild 4.3.4.3-3: Spezifisches Gleiten Evolventenverzahnung, 84 und 8 Zähne

Zusätzlich ermittelt das Programm die spezifische Reibarbeit, anhand derer die verschiedenen Radtypen später verglichen werden sollen.

Damit ergeben sich folgende Zahlenwerte:

Position	ζ_1	ζ_2	W_R
-0.132	-1.145	0.534	0.285
0.125	0.908	-9.902	k. A.

Tabelle 4.3.4.3-1: Spezifische Reibarbeit W_R nach Kapitel 2.2, „Spezifisches Gleiten“

5 Ergebnis

Um die Verschleissfreudigkeit verschiedener Verzahnungstypen zu vergleichen, eignet sich die Betrachtung der Diagramme des spezifischen Gleitens. Dabei muss besonderes Augenmerk auf den linken unteren Teil der Diagramme gelegt werden, der die schiebenden Gleitanteile für das treibende Rad zeigt. Dabei ist es nicht genug, nur die reine Grösse des Gleitens als Indikator für die zu erwartende Reibung zu betrachten. Vielmehr muss auch berücksichtigt werden, über welche Strecke die Reibung auftritt, was als spezifische Reibarbeit interpretiert werden kann.

Die spezifische Reibarbeit wurde für vier Radpaare eines Uhrwerks ermittelt. Die Radpaare wurden mit zwei klassischen Uhrenverzahnungen nach den Normen NIHS 20-02 und NHS 56702/ 56703-C konstruiert. In den Vergleich wurden zusätzlich Radpaare mit Evolventenverzahnung einbezogen.

Die Auswertung dieser 12 Radpaare zeigte zunächst, dass der Betrag des spezifischen Gleitens für das treibende Rad im schiebenden Bereich für alle Radpaare gut im zulässigen Bereich von 0 bis 3 liegt.

Die Betrachtung der spezifischen Reibarbeit zeigt eine klare Rangfolge der Verzahnungstypen:

Zähnezahl	Verzahnungstyp	Spezifische Reibarbeit
107 Zähne, 16 Zähne	NHS 56702/ 56703-C	0.000
	Evolventenverzahnung	0.175
	NIHS 20-02	0.353
75 Zähne, 10 Zähne	NHS 56702/ 56703-C	0.086
	Evolventenverzahnung	0.283
	NIHS 20-02	0.427
72 Zähne, 9 Zähne	NHS 56702/ 56703-C	0.176
	Evolventenverzahnung	0.260
	NIHS 20-02	0.446
84 Zähne, 8 Zähne	NHS 56702/ 56703-C	0.150
	Evolventenverzahnung	0.285
	NIHS 20-02	0.632

Dies bedeutet: Für Radpaare mit einer Verzahnung nach NHS 56702/ 56703-C ist die geringste Beeinträchtigung durch Verschleiss zu erwarten, gefolgt von den Evolventen-Radpaaren. Für die Radpaare nach NIHS 20-02 ist der grösste Verschleiss zu erwarten.

6 Zusammenfassung

Ziel dieser Arbeit war es, mit theoretischen Mitteln zu untersuchen, ob die Erfahrung von Uhrmachern bestätigt werden kann, dass NHS-Verzahnungen weniger verschleissfreudig als NIHS-Verzahnungen sind. Zusätzlich wurden Evolventenverzahnungen in den Vergleich einbezogen.

Die Untersuchungen wurden anhand des Radsatzes eines vorgegebenen neu konstruierten Uhrwerks durchgeführt.

Zum Nachweis wurde die Methode des spezifischen Gleitens verwendet, die in der Verzahnungstechnik bekannt ist. Die Methode wurde um den Begriff der spezifischen Reibarbeit erweitert, die zum Vergleich der Verzahnungstypen herangezogen wurde.

Für alle Radpaare des Uhrwerks ergab sich eine konsistente Reihenfolge:

NHS 56702/ 56703-C	Schwächster Verschleiss zu erwarten.
Evolventenverzahnung	Mittelgrosser Verschleiss zu erwarten.
NIHS 20-02	Stärkster Verschleiss zu erwarten.

7 Ausblick

Die heute vorliegenden Praxiserfahrungen mit Rädern der beiden Normen NIHS 20-02 und NHS 56702/ 56703-C sollten in Zukunft um Erfahrungen mit Evolventenrädern ergänzt werden. Dazu empfiehlt sich die Herstellung dreier Radsätze mit den vorgestellten Verzahnungstypen.

Mit diesen Radsätzen sollten Prüfstandversuche durchgeführt werden. Dabei sollten die neuen und die verschlissenen Räder mit einer geeigneten Messvorrichtung (z. B. Koordinatenmessmaschine) gemessen und die gefundenen Differenzen verglichen werden.

Weiterhin empfiehlt sich die Herstellung dreier Uhrwerke oder Uhrwerkserien mit den vorgenannten Radsätzen. Damit können Langzeittests durchgeführt und anschliessend optisch beurteilt werden (z. B. mit Mikroskop).

8 Literaturverzeichnis

[OM, 2020]

<https://www.openmovement.org>

[DIN-Taschenbuch 106, 1996]

DIN-Taschenbuch 106, Verzahnungsterminologie, 1996, 4. Auflage, Beuth-Verlag Berlin, Wien, Zürich

[Klocke, 2017]

Klocke, Fritz, Brecher, Christian, Zahnrad- und Getriebetechnik, Auslegung - Herstellung - Untersuchung - Simulation, 2017, Carl Hanser Verlag, München

[Niemann, 2003]

Niemann, G., Winter, H., Maschinenelemente, Band 2: Getriebe allgemein, Zahnrad-Getriebe - Grundlagen, Stirnradgetriebe, 2003, 2. Auflage, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York

[NHS, 1928]

Normes de l'industrie horlogère suisse, Engrenages, NHS 56702, NHS 56703, 1928, Commission de normalisation NHS

[NIHS, 2005]

NIHS, Extrait des Normes de l'Industrie Horlogère Suisse, NIHS 20-02, 2005, 7. Auflage, Fédération de l'Industrie Horlogère Suisse FH, Service NIHS

[Openmovement.org]

Watchmaking 2.0, <https://www.openmovement.org/>

[Radzevich, 2012]

Radzevich, Dr., Stephen P, Dudley's Handbook of Practical Gear Design and Manufacture, 2012, 2. Auflage, CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton FL

[Roth, 2001]

Roth, Karlheinz, Stirnrad-Evolventenverzahnungen, 2001, 2. Auflage, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York