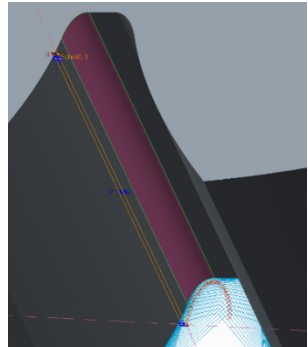


Erweiterung des Flankengenerators um die Funktionalität „Wälzgefärbte Zahnform“

Arslan, G.:

Am Institut für Maschinenwesen existiert seit letztem Jahr ein selbstgeschriebenes Programm, welches evolventische Zahngeometrien für Stirnräder und Zahnwellenverbindungen nach dem Formfräs-verfahren erzeugt. In der neuesten Version können auch Zahngeometrien nach dem Wälzverfahren abgebildet werden.



At the Institute of Mechanical Engineering since last year, there is a self-written program. The program generates involute tooth geometry for spur gears and gear shaft connections. In the latest version also hobbled tooth geometries can be created.

1 Einleitung

In der Institutsmitteilung 2013 wurde über einen Flankengenerator berichtet. Mithilfe des Flankengenerators können geradzahnte, evolventische Geometrien nach dem Formfräsverfahren erstellt werden. Die Modellierbarkeit von innenverzahnten Geometrien ermöglicht die Baugruppenerstellung von Steckverzahnungen. Der Flankengenerator erzeugt nach den Vorgaben des Benutzers den Flankenverlauf als Punktwolke im Stirnschnitt. Diese Punkte werden in eine Textdatei geschrieben. Das kostenlose CAD-Programm FreeCAD wird automatisch aufgerufen und die Punktwolke der Zahngeometrie im Skizzenmodus eingelesen. Im Anschluss wird die Geometrie extrudiert und bei Bedarf als Lauf- oder Steckverzahnung abgespeichert. Zur wirtschaftlichen Fertigung von außenverzahnten Bauteilen kommen wälzgefärbte Fertigungsverfahren in Frage. Im Rahmen einer Diplomarbeit /7/ am IMW wurde ein parametrisches Simulationsmodell im CAD-Programm Creo Parametric realisiert. In dem Simulationsmodell lassen sich geradzahnte Zylinderräder mittels der Hüllschnittmethode /5/ u.a. aus dem Bezugsprofil nach DIN 867 erzeugen. Aufgrund der Hüllschnitte kommt es im Bereich der Fußausrundungen zu bogenförmigen Geometrieabweichungen, welche für die nachfolgenden FE-Untersuchungen geglättet werden müssen. Im Folgenden wird dieser Weg beschrieben und die

Einbindung des geglätteten Zahnmodells in den Flankengenerator erklärt.

2 Fertigungstechnische Grundlagen von Zahnrädern nach dem Wälzprinzip

Generell wird innerhalb der spanenden Herstellverfahren von Zylinderrädern zwischen Formscheid- und Wälzverfahren differenziert. Ersteres findet Anwendung bei der Herstellung größerer Zahnräder sowie bei der Massenfertigung kleinerer Zahnräder und ist dadurch charakterisiert, dass das Werkzeug die Kontur der zu fertigenden Zahnücke besitzt /1/.

Im Gegensatz dazu, entstehen bei den wälzenden Verfahren die Zahnräder im Erzeugungsgetriebe durch Abwälzen an einem Werkzeug. Abbildung 1 gibt eine Übersicht über ausgewählte spanende Verfahren nach dem Wälzprinzip. Aufgrund der Übersichtlichkeit ist das Werkrad nur für das Wälzhobeln eingezeichnet und muss entsprechend bei den anderen Prozessen hinzu gedacht werden. Das allgemeine Zahnstangenprofil ist dabei als einhüllende Kontur zwischen die Werkzeugschneiden und die entstehenden Zahnflanken des Werkstücks gezeichnet.

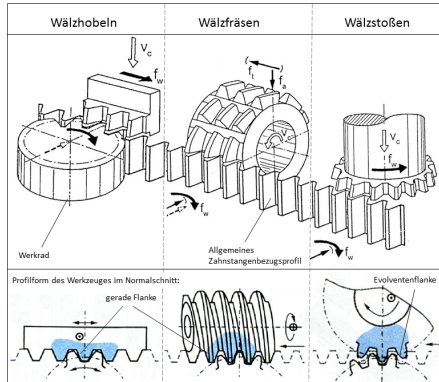


Abbildung 1: Ausgewählte spanende Verfahren nach dem Wälzprinzip /2,3,4/

Betrachtet man die jeweiligen Prozesse im Normalschnitt, so lassen sich vor dem Hintergrund der geometrischen Grundlagen von Stirnradverzahnungen grundsätzlich zwei Varianten identifizieren:

1. Die Evolvente wird durch Abwälzen an einem Kreisbogen erzeugt, was der Paarung zweier Stirnräder entspricht. Das zugehörige

Werkzeug imitiert also ein Zahnrad, wobei die evolventischen Flanken den Werkzeugschneiden entsprechen. Dies ist beim Wälzstoßen einer Verzahnung mit einem Schneidrad der Fall.

2. Die Evolvente entsteht durch Abwälzen an einer Geraden. Dies entspricht der Paarung Stirnrad-Zahnstange. Das Werkzeug besitzt damit gerade Flanken, die in einem bestimmten Eingriffswinkel zur Bezugslinie bzw. zur Wälzgeraden geneigt sind. Dieses Prinzip ist beim Wälzfräsen und Wälzhobeln verwirklicht.

Das Wälzfräsen und das Wälzstoßen besitzen die Gemeinsamkeit, dass die Wälzbewegung ohne Unterbrechung erfolgt, da hierbei das Werkzeug durch die kreisförmige Grundgeometrie eine im Prinzip unendliche Wirklänge besitzt. Beide Verfahren sind also kontinuierlich. Im Gegensatz dazu kommt der Zahnkamm beim Wälzhobeln nach einem Wälzvorgang außer Eingriff und muss entsprechend zurückbewegt werden, wobei das Werkstück für den nächsten Arbeitsgang um einen oder mehrere Zähne weitergeschaltet wird /2/. Aufgrund dieser Unterbrechungen durch Teilungsvorgänge wird das Verfahren als (diskontinuierliches) Teil-Wälzverfahren bezeichnet /3/.

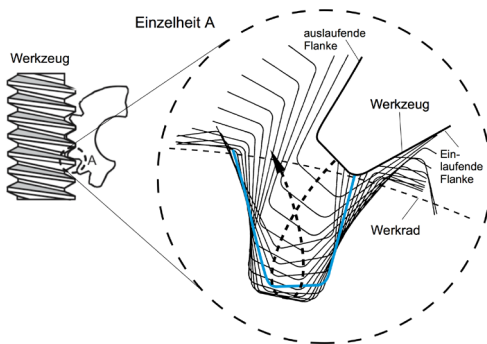


Abbildung 2: Arbeitsbereich eines Fräserzahns /5/

Allgemein erfolgt die Erzeugung des evolventischen Bereichs der Werkradflanke entsprechend dem Verzahnungsgesetz auf der Eingriffslinie, wobei die Zähne des Werkzeuges Bereiche der geforderten Zahnücke beim Eintauchen in das Werkrad vorschneiden.

Wird der Arbeitsbereich der Werkzeugzähne nach Abbildung 2 betrachtet, so ist erkennbar, dass die zuerst in das Werkstück eindringende Zahnflanke (einlaufende Flanke) das Werkradprofil vom Kopf beginnend bis zum Fuß ausbildet. Gleichzeitig schneidet der Kopf des Werkzeuges den der Flanke gegenüberliegenden Fußbereich

/4/. Nach Durchlaufen der neutralen Wälzstellung im Fußgrund wird die andere Flanke des Werkstücks in umgekehrter Reihenfolge (von Fuß- bis Kopf) durch die auslaufende Flanke des Werkzeugs profiliert, wobei vom Werkzeugkopf wieder die der Flanke gegenüberliegende Fußgeometrie erzeugt wird.

Die am meisten eingesetzten spanenden Verfahren in der Zahnradherstellung sind das Wälzfräsen und das Wälzstoßen. Im Nachfolgenden wird die Kinematik beider Prozesse näher betrachtet.

3 CAD-Modell

Das vorliegende CAD-Modell erzeugt die Zahnücke nach dem Prinzip der Hüllschnittkonstruktion, wie sie auch von /5/ zeichnerisch vorgeschlagen wird. Es wurde mit der CAD-Anwendung Creo Parametric 2.0 erstellt. Dafür wird zunächst vom Benutzer ein zahnstangenförmiges Werkzeugprofil definiert und die Kenngrößen der Verzahnung eingestellt. Dies wird über entsprechende Parameter realisiert, analog zu denen des Bezugsprofils nach DIN 867 /6/. Der Nutzer kann grundsätzlich zwischen zwei Modellvarianten wählen: Eine Version enthält ein parametrisiertes Werkzeugprofil mit kreisförmiger Kopfausrundung, die andere Version eines mit elliptischer Kopfform.

Das Werkrad wird entsprechend der eingestellten Verzahnungsparameter am Werkzeugbezugsprofil positioniert, so dass die Wälzgerade des Werkzeuges die Tangente an den Wälzkreis des Werkrades ist. Ausgehend von dieser neutralen Mittelstellung in der zu erzeugenden Zahnücke wird dann das Werkzeug um bestimmte Winkel (in /7/ mit Δ bezeichnet) links und rechts von der neutralen Position verkippt, vgl. Abbildung 3.

Dies erfolgt, indem zunächst das Werkzeugprofil am Umfang des Wälzkreises jeweils um die zu Δ gehörende Bogenlänge $\Delta d/2$ tangential bewegt wird. Danach erfolgt eine Translation in entgegengesetzte Richtung um die „abgewälzte Strecke“ $\Delta d/2$. Dabei ist der Rotationswinkel Δ zwischen zwei Hüllschnitten jeweils konstant. Er entspricht dem Wälzwinkel $\Delta\varphi_w$ nach /8/. Im Unterschied zum realen Fertigungsprozess, bei welchem der Wälzwinkel u.a. von der Geometrie des Werkzeugs abhängt, kann der Wert Δ vom Nutzer frei vorgegeben werden.

Die Anzahl der Hüllschnitte pro Zahnflanke ergibt sich dann im CAD-Modell aus folgendem Formelzusammenhang

$$n = \frac{360^\circ}{z \cdot \Delta} ,$$

wobei n die Anzahl der Hüllschnitte pro Zahnücke ist, z die Zähnezahl und Δ der Rotationswinkel in Grad. Abbildung 4 zeigt im Fußbereich der Verzahnung die auftretenden treppenstufenförmigen Absätze im CAD-Modell für gewählte Rotationswinkel Δ von 2° bzw. 1° .

Die Hüllschnittmethode stellt ein einfaches Mittel dar, eine Verzahnung ausgehend von ihrem Bezugsprofil zu beschreiben, vgl. /5/. Die Darstellung der zugehörigen Kinematik in komplexen mathematischen Formeln wird damit umgangen. Da die Zahngeometrie durch Abwälzen des Bezugsprofils erzeugt wird, ergibt sich weiterhin ein direkter Bezug zu den abwälzenden Fertigungsverfahren. Gemäß den Ausführungen unter 3 bildet ein zahnstangenförmiges Werkzeug die Verfahrenen Wälzfräsen und Wälzhobeln ab. Somit kann auch das vorliegende CAD-Modell Verzahnungen beschreiben, die durch eines der beiden Verfahren hergestellt wurden. Eine Simulation des Fertigungsprozesses ist damit jedoch nicht gegeben.

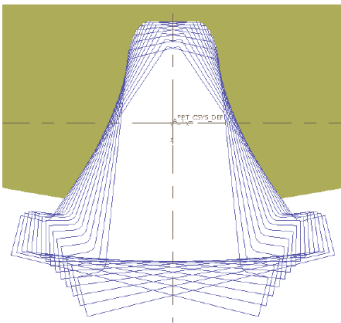


Abbildung 3: An Zahnfußkurve unbeteiligter Materialschnitt

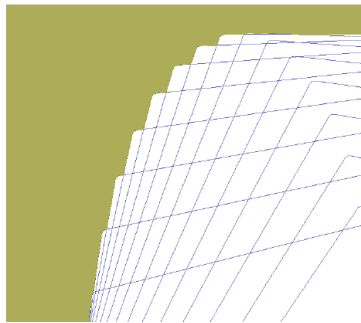


Abbildung 4: Absätze an der Zahnfußkurve

Aus kinematischer Sicht werden deutliche Vereinfachungen im Vergleich zum realen Fertigungsverfahren vorgenommen. Der Prozess wird lediglich zweidimensional in einer Ebene im Stirnschnitt dargestellt. Somit werden Aspekte wie die Durchdringungskurve eines Werkzeugzahnes am Werkrad oder die Geometrie des Fräasers nicht dargestellt. Da das CAD-Modell dazu dient, FE-Untersuchungen an der Geometrie verschiedener Zahnflanken durchzuführen und fertigungstechnische Betrachtungen keine weitere Rolle spielen, ist jedoch der gewählte Abstraktionsgrad des Modelles für die Zielsetzung völlig ausreichend.

Daneben bietet das Modell aus geometrischer Sicht viele Freiheiten in Hinblick auf zukünftige Geometriebetrachtungen. Die Erzeugung der Verzahnungsgeometrie durch Abwälzen kann mit Hilfe des CAD-Modells anschaulich nachvollzogen werden und es kann ein tieferes Verständnis des Vorgangs entwickelt werden. Die hierbei vorhandene Offenheit der Arbeitsumgebung ist bei Zahnrad-Programmen im Allgemeinen nicht gegeben. Die beschriebenen treppenstufenförmigen Absätze im Fußbereich der erzeugten Verzahnung treten auch im realen Prozess aufgrund des ebenfalls endlichen Hüllkurvennetzes auf und werden in der Fertigbearbeitung entfernt. Demgemäß ist auch die Fußausrundung der CAD-Verzahnung zu glätten, bevor eine FE-Untersuchung vorgenommen werden kann. Die entwickelten Methoden werden im Nachfolgenden beschrieben.

4 Glättungsmethode der Zahnfußkurve

Die Zahnfußkurve entsteht aus der Kopfrundung des eingesetzten Werkzeuges. Damit muss die Glättung der Zahnfußkurve für den Fall einer kreisrunden und einer elliptischen Kopfrundung des Werkzeugprofils vorgenommen werden. Zunächst wurden die finalen entwickelten Verfahren für beide Fälle beschrieben /9/. Um die Güte der vorgenommenen Glättung beurteilen zu können, wurde anschließend exemplarisch die Zahnflanken der geglätteten Verzahnung mit den zugehörigen Flanken, die mittels einer Referenzsoftware erstellt wurden, verglichen. Als Referenz wurde dabei die Software KISSsoft verwendet. In Abbildung 5 ist exemplarisch ein Bezugswerkzeug mit kreisförmiger Kopfrundung dargestellt.

Unabhängig von der Kopfform des Werkzeuges erfolgt der entwickelte Glättungsmechanismus im CAD-Programm automatisiert nach folgenden fünf Arbeitsschritten:

1. Definition von Glättungspunkten
2. Erzeugung einer Glättungskurve durch die Glättungspunkte
3. Extrudieren eines Schnittvolumens entlang der Glättungskurve
4. Durch Abzug des Schnittvolumens vom erzeugten Zahnradkörper wird der treppenstufige Bereich im Zahnfuß entfernt und somit geglättet.
5. Die geglättete Flanke wird an der Symmetrielinie der erzeugten Zahnücke gespiegelt. Dadurch ist die gegenüberliegende Flanke ebenfalls geglättet.

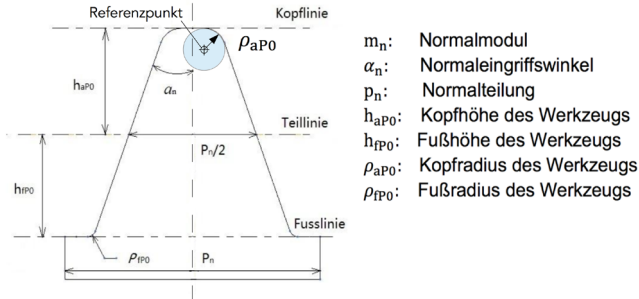


Abbildung 5: Parameter des Bezugswerkzeuges mit kreisförmiger Kopfrundung im Simulationsmodell /9/

Diese Vorgehensweise hat sich für eine Glättung mit den Mitteln und Randbedingungen der CAD-Umgebung als zweckmäßig erwiesen.

Anforderung an die Glättung

Um eine robuste Glättung der Zahnfußkurve zu erreichen, sind folgende Anforderungen an das CAD-Modell gestellt.

a) Glättungspunkte:

Die Glättungspunkte sind die Grundlage für alle weiteren Prozessschritte. Sie müssen so gewählt werden, dass die geglättete Geometrie dem Idealfall, d.h. einem Hüllkurvennetz mit einer unendlichen Anzahl an Hüllschnitten, entspricht. So kann eine hohe Übereinstimmung mit dem Referenzprogramm Kisssoft erreicht werden. Dementsprechend muss die Glättungskurve die Einhüllende aller bogenförmigen Schnittflächen im Fußbereich sein.

b) Geometrische Bezüge:

Allgemein wird die Lage von Punkten im CAD-Programm mittels geometrischer Bezüge definiert. Die Glättungskurve muss bei Variation der Parameter des Modells stets regeneriert werden können. Damit keine Konflikte bei der Modellregenerierung auftreten, müssen also geometrische Referenzen für die Kurvenpunkte gewählt werden, die auch bei Veränderung sämtlicher Parameter erhalten bleiben.

c) Festlegung der Anzahl der Hüllschnitte:

Das bisherige Modell ist so gestaltet, dass bei gleichbleibendem Rotationswinkel Δ mit steigender Zähnezahzahl die Anzahl der Hüllschnitte pro Zahnücke abnimmt. Eine veränderliche Hüllschnittzahl ist für die Automatisierung der Glättung jedoch problematisch, da sie mit einer Veränderung sämtlicher

geometrischer Bezüge des Modells einhergeht. Da die Hülschnittanzahl ohnehin entkoppelt vom Werkzeug ist, wird eine feste Anzahl von Hülschnitten für alle Modellvarianten festgesetzt. Hierbei werden 16 Hülschnitte in jede Richtung, d.h. pro Flanke einer Zahnücke, gewählt. Dies ermöglicht kurze Berechnungszeiten bei gleichzeitig hinreichend hoher Auflösung.

5 Variation der Flankenform

Ein Vorteil des CAD-Modells besteht darin, dass auf anschauliche und direkte Art verschiedene Flankengeometrien untersucht werden können, die sich durch Abwälzen eines zahnstangenförmigen Werkzeuges generieren lassen. Dabei bleibt stets der Bezug zur erzeugenden Flankenform des Werkzeuges erhalten. Dies kann vor allem im Bereich von Steck- bzw. Passverzahnungen als Welle-Nabe-Verbindungen Potenziale beherbergen, da hier Evolventen im Bereich der Nutzflanke im Gegensatz zu Laufverzahnungen nicht alternativlos eingesetzt werden. Modifizierte Formen der Nutzflanke können direkt auf das erzeugende Werkzeugprofil für wirtschaftliche Wälzverfahren zurückgeführt werden.

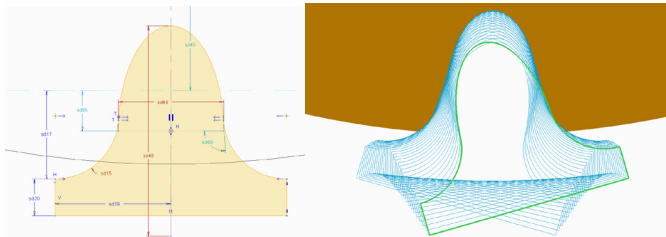


Abbildung 7: Werkzeug mit parabelförmigen Flanken und dazugehörige Hülschnitte

Somit werden fertigungstechnische Aspekte bei der Flankenoptimierung direkt in die Betrachtung mit einbezogen. Abbildung 7 zeigt ein Werkzeugprofil mit parabelförmiger Flanke und die zugehörige durch Abwälzen erzeugte Flankenform.

6 Einbindung des CAD-Modells in den Flankengenerator

In der Oberfläche des Flankengenerators kann jetzt neben dem Formfräsen auch das Wälzfräsen bei außenverzahnten Geometrien ausgewählt werden. Nachdem das Wälzfräsen ausgewählt worden ist, muss der Anwender noch die Werkzeugparameter eingeben.

Danach teilt der Flankengenerator den Flankenverlauf in mehrere Bereiche auf /10/. Der Verlauf des Flanken- und Kopfbereichs von evolventischen Zahngeometrien ist unabhängig vom gewählten Fertigungsverfahren (Form- und Wälzfräsen) /9,10/. Um den wälzgefrästen Zahnfuß modellieren zu können, muss der Flankengenerator die Punkte des wälzgefrästen Zahnfußbereiches einlesen. Diese Punkte werden von einer Excel-Datei zur Verfügung gestellt. Das oben erwähnte CAD-Modell wird mit einer Excel-Analyse in Creo Parametric verknüpft. Hierfür wurden 16 Referenzpunkte definiert, welche in gleichmäßigen Abständen über die Zahnfußkurve verteilt sind. Die Punkte sind dynamisch auf der Fußkurve definiert, d.h. ihre Position wird durch die relative Bogenposition vorgegeben. Die Koordinaten der Referenzpunkte bezogen auf den Zahnradmittelpunkt werden automatisch mit jeder Modellregeneration in Creo Parametric zusammen mit den eingestellten Verzahnungs- und Werkzeugparametern in die Excel-Datei geschrieben. Der Flankengenerator erzeugt eine zusätzliche Textdatei, in die die Punkte des wälzgefrästen Zahnfußes aus dem CAD-Modell und die Punkte des Flanken- und Kopfbereichs aus der analytischen Betrachtung hineingeschrieben werden. Steht die graphische Darstellung der Verzahnung im Vordergrund, so werden die eingelesenen Punkte im Skizziermodus von FreeCAD extrudiert.

7 Zusammenfassung

In diesem Artikel wurden die fertigungstechnischen Aspekte geradzahnter, evolventischer Stirnräder betrachtet, die nach dem Wälzprinzip entstehen. Als Voraussetzung für die FE-Untersuchungen wurde jeweils ein automatischer Glättungsmechanismus für Werkzeuge mit kreisförmiger und elliptischer Kopfausrundung mit den Mitteln der CAD-Software realisiert und in das Modell implementiert /9/. Durch die Verknüpfung des CAD-Modells mit der Excel-Analyse in Creo Parametric wurden die Punkte des Zahnfußbereichs exportiert. Durch Zusammenführen der Punkte aus der Datei für den formgefrästen Flanken- und Kopfbereich und aus der Excel-Datei für den wälzgefrästen entsteht eine neue Textdatei, welche in ein FEM- Programm eingelesen werden kann.

Der Fokus der gesamten Betrachtung berücksichtigt lediglich geradzahnte Stirnräder. Eine zukünftige Erweiterung auf Schrägverzahnungen wäre wünschenswert. Weiterhin wäre es im Zuge eines einfachen und möglichst unkomplizierten Prozesses der Geometrieerzeugung vorteilhaft, die Hüllschnittkonstruktion bzw. die Erzeugung der Fußkurve direkt in Excel oder in den Flankengenerator zu implementieren. Weiterhin können dann die Verzahnungen mit

allgemein zugänglicher bzw. nicht-kommerzieller Software realisiert werden. Wiederum nachteilig wäre jedoch die limitierte Flexibilität des Modells aufgrund einer mathematisch-analytischen Beschreibung der Geometrierzeugung.

8 Literatur

- /1/ Felten, K.: Verzahntechnik. Das aktuelle Grundwissen über Herstellung und Prüfung von Zahnrädern, 3.Auflage, Expert-Verlag, 2012
- /2/ Linke, H.: Stirnradverzahnung. Berechnung – Werkstoffe – Fertigung, 2. Auflage, Hanser 2009
- /3/ Schlecht, B.: Maschinenelemente. Getriebe-Verzahnungen-Lagerungen, Pearson Studium 2010
- /4/ Thämer, R.: Untersuchung der Hauptschnittkraft beim Wälzstossen von Geradstirnrädern, Dissertation RWTH Aachen, 1963
- /5/ Roth, K.: Zahnradtechnik. Stirnrad- Evolventenverzahnungen. Geometrische Grundlagen, Profilverschiebungen, Toleranzen, Festigkeit, 2. Auflage, Springer 2000
- /6/ DIN-Norm 867, Bezugsprofil für Evolventenverzahnungen an Stirnrädern, Februar 1987
- /7/ Zhang, Y.: Fertigungssimulation von Stirnrädern mit elliptischer Zahnfußverfahren im Abwälzverfahren, Diplomarbeit TU Clausthal, 2011
- /8/ Jong, H.de: Der Einfluss der Wälzgenauigkeit von Verzahnmaschinen auf die Fertigungsgenauigkeit und das Laufverhalten von Stirnradgetrieben, Dissertation RWTH Aachen, 1961
- /9/ Hansen, J.: Entwicklung eines Glättungsalgorithmus der Zahnfußkurve geradverzahnter evolventischer Stirnräder im Wälzverfahren, Bachelorarbeit TU Clausthal, 2014
- /10/ Arslan, G.: IMW-Flankengenerator, Institutsmittellung 2013