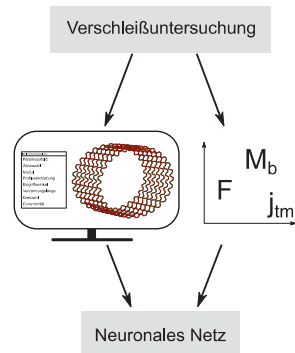


## Verschleißschätzer: Ideale Bewegungssimulation einer evolventischen Zahnwellen Verbindung

Kaczmarek, D.; Lohrengel, A.; Schäfer, G.

Am Institut für Maschinenwesen entsteht ein stand-alone fähiger Rechenkern zur Berechnung des idealen kinematischen Kontaktes zwischen Welle und Nabe. Dieser Rechenkern soll im Zusammenhang mit Versuchsergebnissen dazu dienen, die Parametervielfalt des Verschleißproblems bei evolventischen Welle Nabe Verbindungen zu reduzieren. In diesem Artikel werden die ersten Ergebnisse sowie die Idee des Rechenkerns aufgezeigt.



The Institute for Mechanical Engineering works for a stand-alone calculation kernel, which calculates the ideal kinematic contact between shaft and hub connections. The calculation kernel and experimental result should help to reduce the variety of parameters of the abrasive problem. This article shows the first results and ideas behind.

### Einleitung

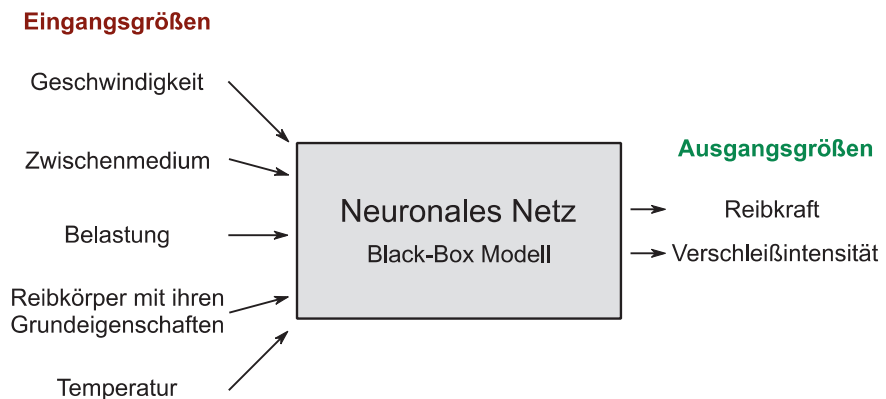
Für Aufgaben der Übertragung von Drehmomenten sowie Kräften mit gleichzeitiger axialer Verschiebbarkeit sind Welle-Nabe-Verbindungen mit evolventischen Profilen ein hervorragender Verbindungstyp. Für die Zahnwellenverbindung existieren -trotz des bereits fortgeschrittenen historischen Alters, nach wie vor Fragestellungen hinsichtlich der Festigkeit sowie des Verschleißes. Insbesondere für den Bereich der Verschleißbetrachtung wird am IMW eine neue Vorgehensweise zur Abschätzung des Verschleißes evaluiert. Hierbei sollen mit Hilfe von neuronalen Netzen und einem Verbund aus *empirischen* sowie *synthetischen Daten* ein Informationspool aufgebaut werden, welcher genauere Aussagen hinsichtlich der Verschleißcharakteristik von Zahnwellenverbindungen ermöglichen soll.

### Ausgangssituation

Die Beschreibung des Festkörperverschleißes lässt sich nach [1] in drei Bestandteile einteilen, den *Eingangsfaktoren*, *Inneren Faktoren* und den *Ausgangsfaktoren*. Die *inneren Faktoren* werden durch verschiedene messtechnisch schwer zu erfassenden Größen definiert, wie beispielsweise „Veränderung der mechanischen Eigenschaften“ oder auch „Veränderung der Rauheit“. Mit Hilfe von neuronalen Netzen ist es möglich, für hochgradig nichtlineare Zusammenhänge Black-Box

Modelle zu erstellen. Grundsätzlich sollte die Problematik des Verschleißes mit Ansätzen der neuronalen Netze lösbar sein. Dabei wurde die Idee gefasst, die *Eingangsfaktoren* sowie die *Ausgangsfaktoren* des Wechselwirkmodells von /1/ als Informationspool für die Beschreibung der Verschleißcharakteristik aufzustellen und diese für das neuronale Netz aufzunehmen.

Die *Eingangsfaktoren* und *Ausgangsfaktoren* sind nachfolgenden in Abbildung 1 festgehalten.



**Abbildung 1:** Grundlegende Modellvorstellung (Faktoren nach /1/)

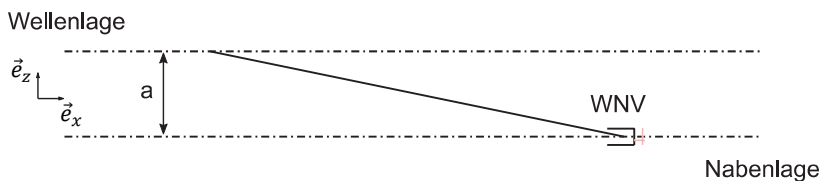
Für diesen Artikel ist die Netzarchitektur sowie der Netztyp für das neuronale Netz nicht von belangen. In diesem Rahmen wird sich auf die *synthetische Datenbeschaffung* für das neuronale Netz konzentriert.

Neben den grundsätzlichen experimentellen Daten, welche bei Untersuchungen von Maschinenelementen entstehen, sollen speziell für die evolventischen Welle-Nabe-Verbindungen eine *Datenreduktion* mit Hilfe eines idealen Berechnungsmoduls geschaffen werden. Dazu soll die Datenvielfalt für das neuronale Netz reduziert und so der benötigte Prüfaufwand reduziert werden. Dabei wird mit Hilfe eines idealen Berechnungsmodells die *Einflussfaktoren* der *Geschwindigkeit*, *Weg* sowie im übertragbaren Sinne die *Belastungen* synthetisch erzeugbar gemacht werden.

## Betriebssituation von Welle-Nabe-Verbindungen

Eine ideale Achs- sowie Winkelausrichtung von Welle und Nabe findet in der Praxis nicht statt. Diese Fehlausrichtung führt zu parasitären Zusatzbelastungen in der Verzahnung. Es wird kurz auf diese Zusatzbelastung der Welle-Nabe-Verbindung eingegangen.

Bei einer fehlerhaften Achsausrichtung folgt eine dynamische Auslenkung der Welle-Nabe-Verbindung in eine Richtung. Diese Auslenkung hat zur Folge, dass die Verzahnung der Welle eine „*Kippbewegung*“ in der Nabe durchführt, welche wiederum zu einer erhöhten Flächenpressung im örtlichen Kontakt des Verzahnungsanfanges sowie des Verzahnungsendes führt (im Bereich WNV).



**Abbildung 2:** Achsausrichtungsfehler

Die Abbildung 2 verdeutlicht die Zusammenhänge der „*Kippbewegung*“ im übertriebenen Charakter. Die obere Symmetrielinie definiert die Wellenlage, während die untere die Nabenlage definiert. Dazwischen ist die Welle-Nabe Verbindung (durch WNV gekennzeichnet), hier befindet sich der Kontaktbereich. Durch die Auslenkung  $a$  ist ein Winkelversatz über die Wellenlänge definiert. Dabei kann die Auslenkung nicht nur statisch sein, sie kann in dem Zusammenhang auch dynamisch im Kreis oszillieren.

Die Bewegung hat die Eigenheit, dass der örtliche Kontakt am Verzahnungsanfang / -ende der Welle, sofern es die technischen Umstände zulassen, einen leichte Axial- sowie eine Radialbewegung durchführen. Zusätzlich werden die Pressungen aufgrund der Geometrieüberlagerung erhöht. Dadurch entstehen je nach Steifigkeit der Welle sowie Nabe zusätzliche Beanspruchungen im Kontakt.

Neben der Fehlausrichtung über die Achslage können Winkelfehlstellungen der Welle und Nabe zu erhöhten Beanspruchungen führen.



**Abbildung 3: Winkelneigung**

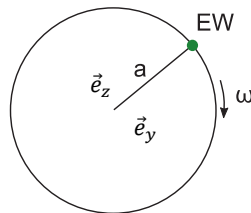
In der Abbildung 3 ist die Winkelneigung beispielhaft mit dem Fehlerwinkel  $\varphi$  dargestellt. Die jeweiligen Symmetrielinien bilden die Winkelausrichtung der Wellen- sowie Nabenlage ab. Durch diese Fehlausrichtung wird je nach Anwendung eine statische oder dynamische, der Abbildung entsprechende, Auslenkung erzeugt.

Diese Fehlausrichtung führt wie bei der Achsverlagerung zu den gleichen Aufschlagsbeanspruchungen am Verzahnungsanfang und -ende. An dieser Stelle findet die Bewegung von der Nabe aus statt.

Beide dieser zusätzlichen Beanspruchungen können sich überlagern und müssen so kombinatorisch betrachtet werden. Dennoch sind die Wirkprinzipien die gleichen und erfordern ausschließlich das Modellieren einer dieser Bewegungen.

### Modell zur Datenreduktion

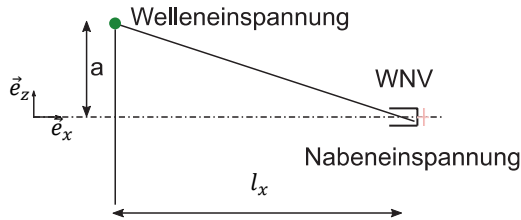
Die Grundidee beschäftigt sich mit dem Aufbau eines kinematischen Idealmodells und umfasst mögliche Betriebsmodi unter verschiedenen Randbedingungen der Welle-Nabe-Verbindung. Dazu wurde für den rechnerischen Entwurf folgende Idealvorstellung als Randbedingung in die Berechnungsumgebung eingepflegt.



**Abbildung 4: Digitaler Prüfstand – Axialansicht**

In der Abbildung 4 ist eine Auslenkung  $a$ , eine Winkelgeschwindigkeit  $\omega$  sowie die Einspannung der Welle EW zu erkennen. Die Einspannung der Welle (EW) rotiert mit der Geschwindigkeit  $\omega$  um die ideale Ausrichtung von Nabe zu Welle. Diese Modellierung entspricht der dynamischen Bewegung aus der Abbildung 2 und kann

wie in der Bewegungsanalyse festgestellt worden ist, auch für die Winkelfehlstellung verwendet werden.

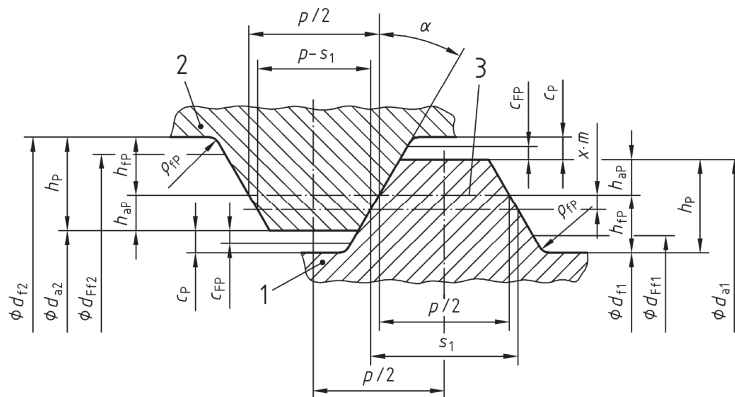


**Abbildung 5:** Digitaler Prüfstand – Seitenansicht

Die Seitenansicht aus Abbildung 5 zeigt die gesamte modellierte Bewegung. Einzustellen sind alle abgebildeten Größen der Modellierung, sodass eine spezifizierte Bewegung ermöglicht wird. Es können neben statischen Werten auch dynamische Zeitverläufe als Bewegung festgelegt werden (z. B.  $a(t)$  o. ä.) Neben diesen Bestandteilen ist es ebenso möglich verschiedene Punktbewegungen auf die Einspannungen zu setzen, sodass überlagerte Bewegungen abbildbar sind.

### Welle-Nabe-Geometrie

Als Verbindungsgeometrie für die WNV wurde eine Verzahnung nach DIN 5480 gewählt, diese ist nachfolgend in Abbildung 6 mit allen Details der Verbindung dargestellt. In diesem Zusammenhang wird nicht auf die Erzeugung der Punktewolke eingegangen, sondern nur die verwendete Geometrie aufgezeigt.



**Abbildung 6:** Bezugsprofil nach DIN 5480 / 2/

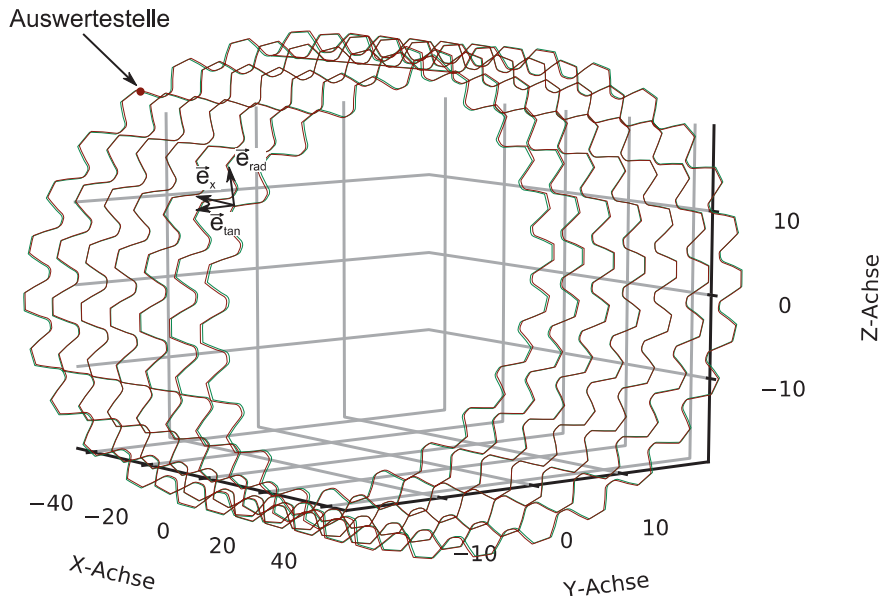
Die abgebildete Geometrie wurde modular erzeugbar in dem erstellten Rechenkern implementiert, dadurch ist es nun möglich, nicht nur verschiedene Prüfbedingungen zu überprüfen, sondern auch die verschiedenen Verzahnungen und deren Einflüsse mit abzubilden. Es wurde die flankenzentrierte Idealgeometrie der DIN 5480 als Grundlage gewählt.

## Ergebnisse des Rechenkerns

Für die nachfolgenden Berechnungen wurde eine Verzahnung nach DIN 5480 – A 60 x 2 x 28 ohne Toleranzen ausgeführt. Die Verzahnung wurde dem Rechenkern mit folgenden Randdaten übergeben:

- Auslenkung  $a = 2 \text{ mm}$
- Einspannungslänge  $l_x = 300 \text{ mm}$
- Prüffrequenz  $f = 7 \text{ Hz}$

In der nachfolgenden Abbildung 7 ist die genannte Verzahnung in 7 Schichten modelliert. Diese Schichten ermöglichen es, *Geschwindigkeitsprofile*, *Strecken* oder auch *Überlappungen* der Verzahnungen über die Verzahnungslänge, an definierten Stellen, zu ermitteln. Diese *Überlappungen* stellen Faktoren zur Beanspruchungsüberhöhung dar. Die Achsen des kartesischen Koordinatensystems aus der Abbildung geben die Geometrie in Millimetern an und bilden daneben die eingeführten Koordinatensysteme aus den vorherigen Abbildungen ab. Die **grüne Punktwolke / Linien** entspricht der Welle, während die **rote Punktwolke / Linien** die Nabe abbildet.



**Abbildung 7:** Verzahnung – DIN 5480 – A 60 x 2 x 28

Mit Hilfe der schichtweisen Analysemöglichkeit können nun beispielsweise die *Verschiebungen* der Verzahnung in den Verzahnungsschichten ermittelt werden. In diesem Beispiel wurde die Auswertung am Verzahnungsanfang (rote Markierung - Abbildung 7) gesetzt.

Für die Berechnung wurde an der Flanke der Geometrie ein weiteres Koordinatensystem eingeführt. Dieses befindet sich normal ausgerichtet auf der Zahnflanke der Nabe (stehendes Koordinatensystem – roter Verlauf) an der Auswertestelle. In dem dargestellten Beispiel ist das eingeführte Koordinatensystem demonstrativ an einer anderen Stelle eingezeichnet. Die Bewegung findet mit der grünen Wellengeometrie statt.

Die relative Bewegung wird zwischen der Nabe und der Welle entsprechend des Koordinatensystems aufgezeichnet und abbildbar gemacht. Diese Berechnungen sind ausschließlich ideale Bewegungen und bilden in diesem Zusammenhang die Kinematik ab. Übergeben wird nach der Berechnung ein Parametersatz aus drei Größen:

- Maximale Überlappung
- Maximale Geschwindigkeit
- Maximale Strecke

Diese Größen definieren einen Punkt in der Verzahnung und können so für das neuronale Netz als Eingangsdaten dienen.

Durch diesen Ansatz kann nun eine Parameterreduktion erreicht werden. Dazu werden alle wichtigen geometrisch definierenden Größen der Verzahnung in dem Berechnungstool verrechnet und auch die Einflüsse der Einbaubedingungen mitberücksichtigt.

**Tabelle 1: Parameterreduktion**

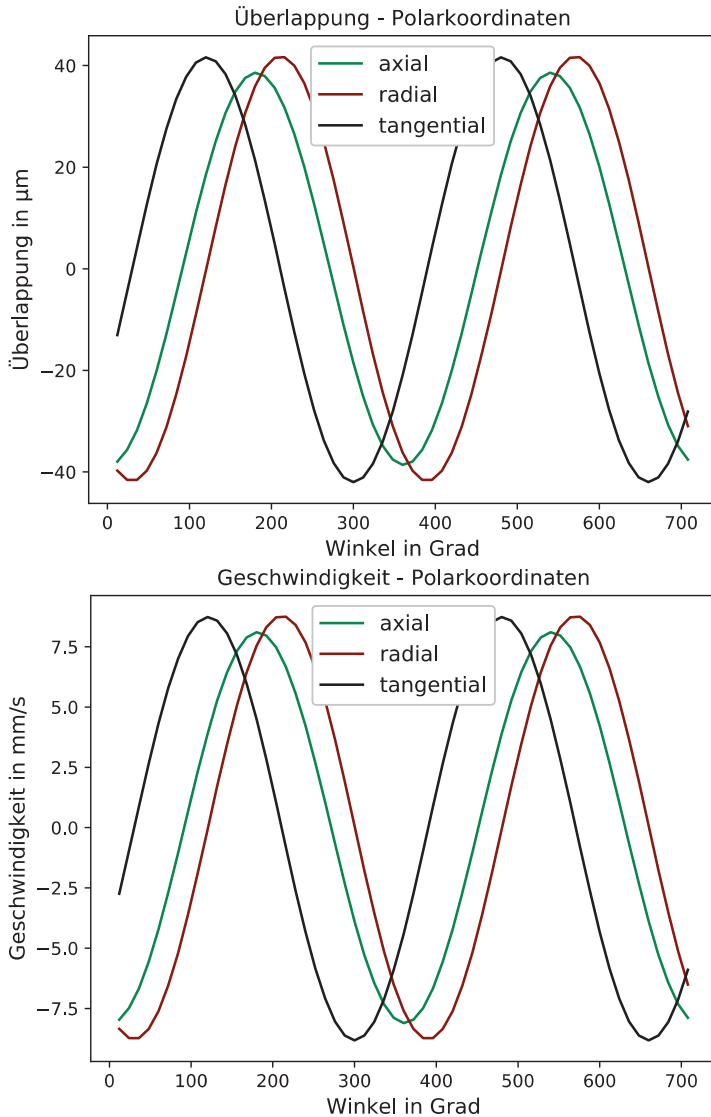
<b>Normalverrechnung</b>	<b>Verrechnungsmodell</b>
Modul	Überlappung (radial)
Zähnezahl	Geschwindigkeit (tangential)
Verzahnungslänge	Strecke (tangential)
Eingriffswinkel	
Exzentrizität	
Drehzahl	

Es konnte so eine Parameterreduktion um 50 % geschaffen werden, dies ermöglicht ein einfacheres Anlernen des neuronalen Netzes in den weiteren Schritten. Die inhaltlichen Aussagen der Eingabegrößen für das neuronale Netz sollen dabei mit Hilfe der Überlappung eine quantitative Größe der Pressungsüberhöhung darstellen. Diese Aussage gilt hier für den Fall einer elastischen Verformung, da hier mit linearen Verhaltensweisen zu rechnen ist. Die Geschwindigkeit ist in Kombination mit der Punkteüberlagerung ein Belastungsfaktor für den Kontakt und soll in diesem Zusammenhang als die *Reibkraft* des in Abbildung 1 vorgestellten Modells vergleichbar sein. Die Verschleißintensität ist informativ mit Hilfe der *Reibkraft* und der zurückgelegten *Strecke* aus dem Berechnungsmodell nachmodellierbar. So soll mit dem Berechnungsmodell eine Grundlage zu einem vereinfachten Aufbau eines Berechnungsmodells zum Verschleißfortschritt in der Verbindung gefunden werden. Die Berechnungen berufen sich auf folgende Grundformel:

$$W_r = \int_{s_0}^{s_1} F_N \cdot \mu \cdot ds \quad (1)$$

Mit den Grundgrößen der Normalkraft  $F_N$ , Reibkoeffizient  $\mu$  und der zurückgelegten inkrementellen Strecke  $ds$ .





**Abbildung 8:** Verschiebungen und Punktgeschwindigkeit der idealen Geometrie

Durch den programmtechnischen Aufbau können Sonderkonfigurationen der Verzahnung erstellt werden, sodass die Bewegungseinflüsse der modifizierten

Verzahnung mitberücksichtigt werden können. Eine Zusammenstellung verschiedener geometrischer einflussnehmender Grundgrößen ist nachfolgend in Abbildung 9 dargestellt. Der Aufbau der Geometrie erfolgt immer im nicht modifizierten Rahmen der DIN 5480, allerdings sind normübergreifende Modifikationen möglich, wie sie in der Abbildung 9 gezeigt sind.



**Abbildung 9:** Verschiedene Geometrien – Modellierungsgrundlage der DIN 5480

Dadurch wird ein weiterer Vorteil der analytischen Vorgehensweise klar. Während für jede Geometrie gesondert Versuche für das neuronale Netz ermittelt werden müssten, können mit diesem Ansatz die diversen Modifikationen in die bereits erwähnten Parameter übertragen werden.

## Einordnung

Die erstellten Ergebnisse sollen in diesem Zusammenhang zur Parameterreduktion beitragen und ein besseres Modellabbild bei geringerer Versuchsanzahl ermöglichen. Dazu ist es wichtig, die relevanten Parameter des Verschleißkontaktes eingrenzen zu können. In Abbildung 1 wurden diese relevante Parameter des Festkörperverschleißes eingeführt. Mit dem erläuterten Ansatz ist es möglich, die Bestandteile der *Reibkraft* und der *Verschleißintensität* mit Hilfe des idealen Modellabbildes bezüglich diverser Modifikationen verhältnismäßig abschätzen zu können. Dies beruht auf die Präprozess Bestandteile beim Anlernen von neuronalen Netzen. Während des Präprozess werden die Eingabegrößen normiert, dies führt dazu das verhältnismäßige Zusammenhänge als Informationsgrundlage übergeben werden. Die inneren funktionellen Zusammenhänge der quantitativen Auswirkungen gilt es dann mit dem neuronalen Netz sowie den empirischen Daten aus dem Versuch zu ermitteln.

Bisherige Rechenansätze zur Verschleißberechnung aus /3/ nutzten in der Vergangenheit keine Relativgeschwindigkeiten bei der Beschreibung des Verschleißes. Neben den Ansätzen aus /3/ liegen auch Berechnungsansätze aus den Arbeiten von /4/ vor. Diese behandeln auf Basis molekular-mechanische Theorien lineare Rechenansätze zur Beschreibung des Verschleißfortschrittes (Verschleißtieflängenberechnung) auf Grundlage der *Exzentrizität* und des einhergehenden *Verschleißweges*. In der Arbeit /5/ wird allerdings abschließend gesagt, dass auch mit Hinblick der Exzentrizität nicht alle Untersuchungen abgeschlossen sind und somit noch nicht der Einfluss der Exzentrizität auf den möglichen Verschleißweg gegeben ist. Da hier verschiedene Belastungssituationen zu andere Bewegungsfreiheiten führen. Unberücksichtigt bleiben bei der Behandlung ebenso die „*Kippbewegung*“ im Kontakt.

Mit dem Rechenansatz über neuronale Netze sollen die bisher vernachlässigten Berechnungen mit in der Modellierung berücksichtigt werden. Weiter können durch die Einbindung einer Toleranztafel in das Berechnungsmodul die mittleren *Überlagerungs Minderungs- / Vergrößerungseffekte* berücksichtigt oder resultierende Exzentrizität /5/ abgeleitet werden.

Aus diesen Gründen wurde es am IMW als sinnvoll erachtet, ein Berechnungsmodul zu programmieren, welches Kinematik und Toleranzen bündelt, umso eine breitere Wissensbasis über den Kontaktbereich einer zuvor definierten Verbindung zu schaffen. Diese Informationen sollen dann für ein neuronales Netz die linearen und nichtlinearen Verhaltensweisen einer Verbindung abbildbar machen können.

Dieses Vorgehen wird sobald praktisch am Institut umgesetzt.

## Literatur

- /1/ Kragelski, V.; Dobycin, M.; Kombalov, V.: Grundlagen der Berechnung von Reibung und Verschleiß. In: VEB Verlag Technik Berlin, 1977, ISBN: 3446136193
- /2/ DIN 5480-1 – Passverzahnungen mit Evolventenflanken und Bezugsdurchmesser, Deutsche Norm, März 2006
- /3/ Lörsch, G.: Tragfähigkeit von Evolventenzahn-Verbindungen, Maschinenbautechnik 29 (1980), S.257-259
- /4/ Zapf, R.: Betriebs- und Verschleißverhalten flankenzentrierter Zahnwellenverbindungen mit Schiebesitz, Dissertation, TU Clausthal, August 1986
- /5/ Schäfer, G.: Der Einfluß von Oberflächenbehandlungen auf das Verschleißverhalten flankenzentrierter Zahnwellenverbindungen mit Schiebesitz, Dissertation, TU Clausthal, November 1995