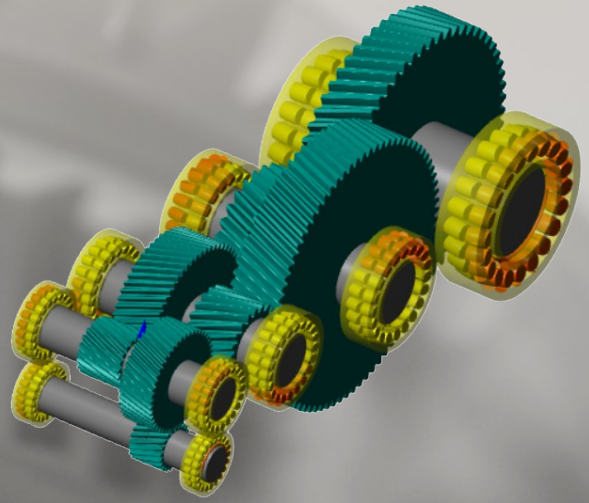
GWJ TECHNOLOGY

Berechnung von Verzahnungen: Potenzial & Möglichkeiten

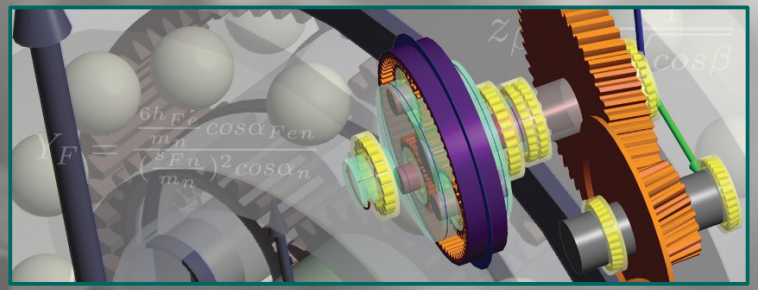
INDEX Technologie Campus



Trends in der Getriebeentwicklung: Potenzial hochreiner Stähle

GWJ TECHNOLOGY

1. *Kurzvorstellung GWJ*
2. *Verzahnungsberechnung: Wozu?*
3. *Typische Anwendung von Berechnungssoftware in der Zahnradfertigung*
4. *Verzahnungsauslegung - Makrogeometrie/Mikrogeometrie*
5. *Verzahnungsarten, die GWJ für die Fertigung unterstützt*

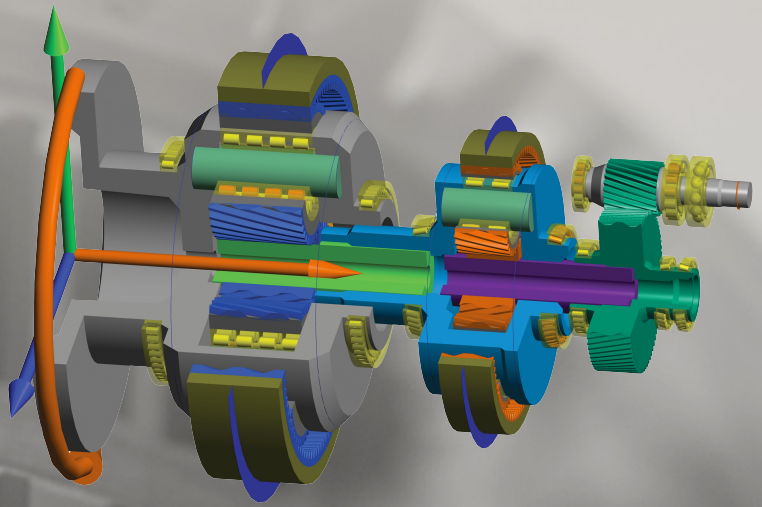


1. Wer ist GWJ?

GWJ TECHNOLOGY

Kurzvorstellung

- Januar 2002 gegründet und aus früherem Ingenieurbüro hervorgegangen
- Heute: marktführend im Bereich webbasierter Berechnungssoftware für Maschinenelemente, gehört zu TOP 5 der Softwareanbieter weltweit für Verzahnungen, Maschinenelemente allgemein und Systemberechnung
- Kundenspezifische Lösungen
- Engineering & Consulting



Referent: Dipl.-Ing. Gunther Weser,
Geschäftsführer der GWJ Technology GmbH,
38114 Braunschweig, www.gwj.de

1. Wer ist GWJ?

GWJ TECHNOLOGY

GWJ - Produkte

eAssistant
the engineering assistant

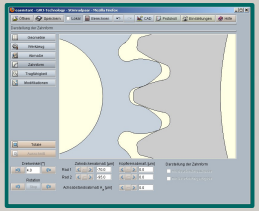
Webbasierte Berechnungssoftware für Maschinenelemente, wie Wellen, Lager & Zahnräder = Online-Lösung des TBK mit CAD-PlugIns & Erweiterung „SystemManager“

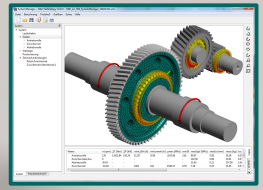
tbk 2014

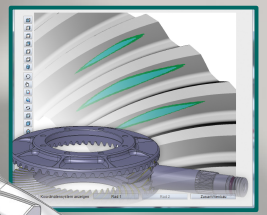
Berechnungssoftware für den Getriebebau, Wellen, Lager & Zahnräder, ... erweiterbar um CAD-PlugIns & Systemberechnung „SystemManager“

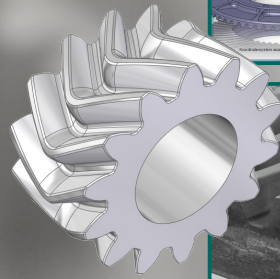
GearEngineer

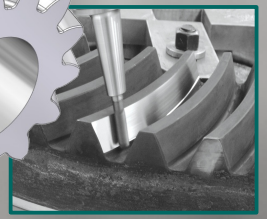
Spezialverzahnungssoftware als Ausgangsbasis zum 5-Achsfräsen von Zahnrädern, liefert u. a. reale 3D-Zahnformgeometrien von Stirn- & Kegelrädern





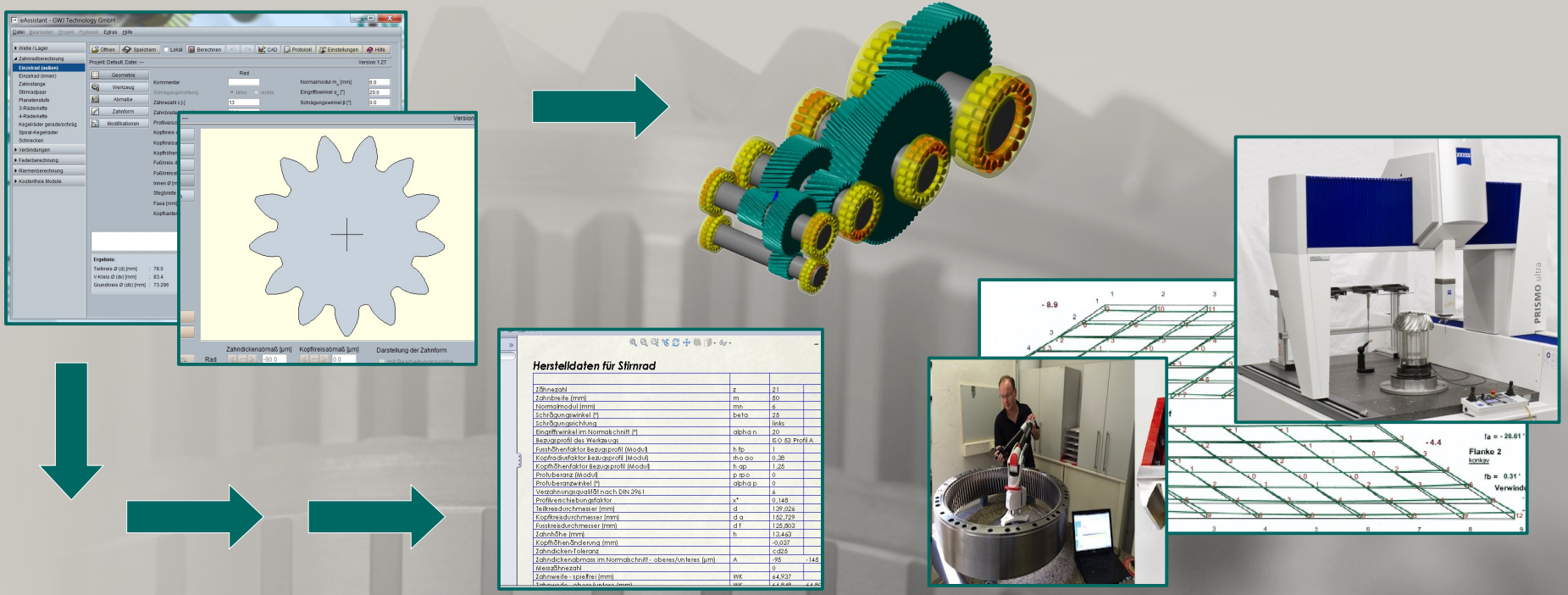






1. Wer ist GWJ?

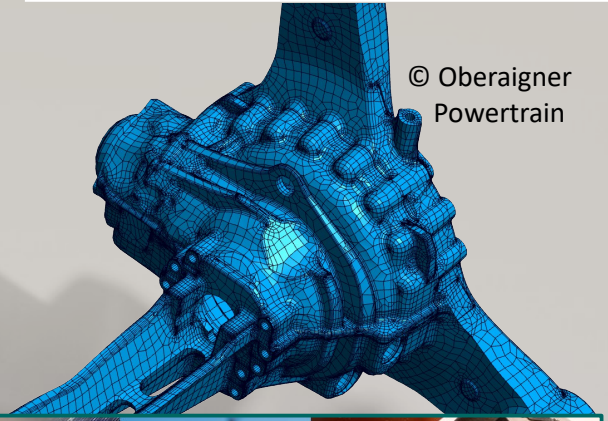
Skalierbare Softwarelösungen entlang des Produktentstehungsprozesses



2. Verzahnungsberechnung: Wozu?

GWJ TECHNOLOGY

Notwendigkeit der Berechnung (allg.)



© Oberaigner Powertrain

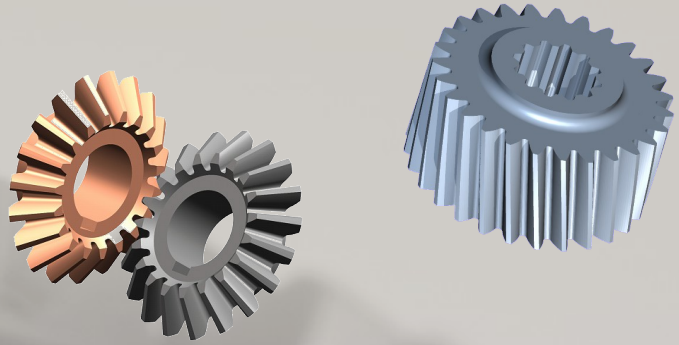
- Sicherstellung der Funktionsfähigkeit von Bauteilen, wie Wellen, Lager, Zahnräder, Welle-Nabe-Verbindungen, etc.
- Auslegen, Nachrechnen oder Optimieren zur Vermeidung von Unter- und Überdimensionierung
- Berechnungsnachweis gemäß dem Stand der Technik
- Zeiteinsparung & Verringerung von Fehlern
- Dokumentation im Rahmen von Qualitäts-sicherungssystemen
- Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit

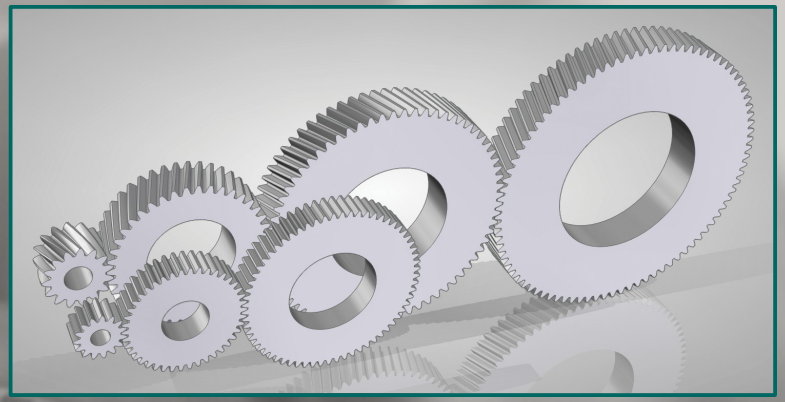
2. Verzahnungsberechnung: Wozu?

GWJ TECHNOLOGY

Verzahnungsberechnung

- Auslegung / Optimierung für Belastung / Geräusch
- Schnelle, aussagekräftige Dokumentation für Nachweis & Qualitätssicherung
- Berechnung nach anerkannten Berchnungsmethoden, wie DIN, ISO, ANSI/AGMA, VDI
- Liefert Ausgangsdaten für Fertigung
- Überprüfung von Zeichnungsdaten vor Fertigungsbeginn
- Prüfdaten für Qualitätssicherung sowie Daten für Messprogrammerstellung (GDE)
- Unterstützt Re-Engineering / Reparatur

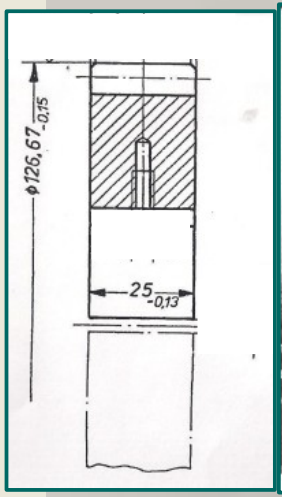


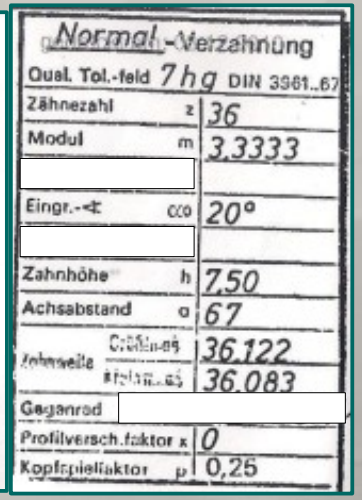


3. Typische Anwendung von Berechnungssoftware in der Zahnradfertigung

GWJ TECHNOLOGY

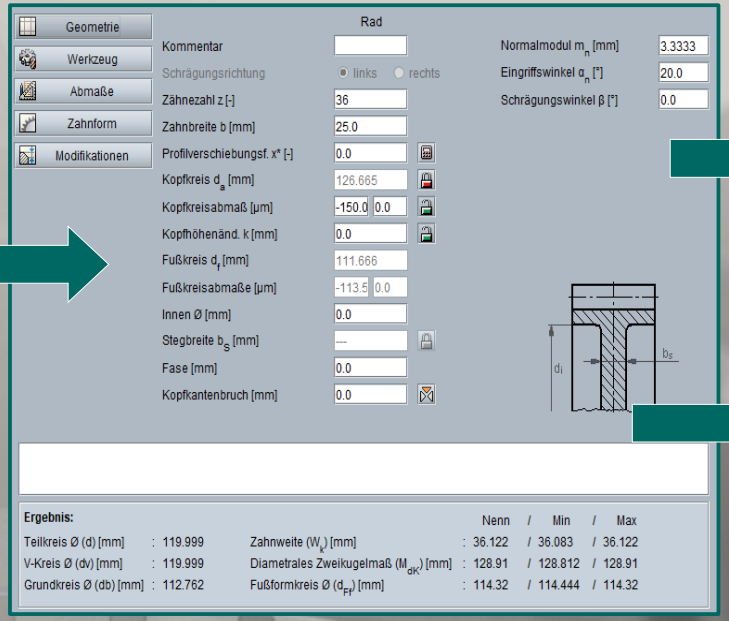
Von der Zeichnung zum Zahnrad

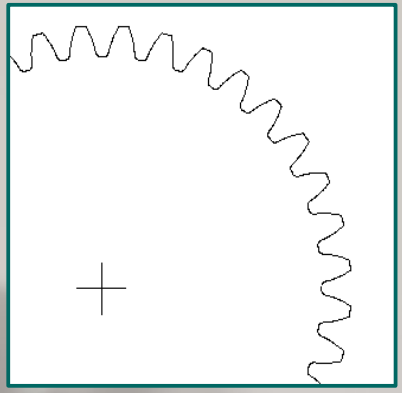


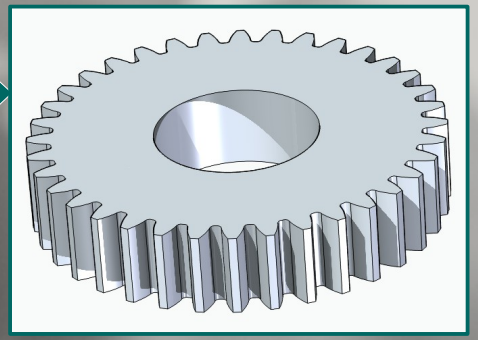


Normal-Verzahnung

Qual. Tol.-feld	7hg DIN 3961..67	
Zähnezahl	z	36
Modul	m	3,3333
Eingr.-∢	α0	20°
Zahnhöhe	h	7,50
Achsabstand	a	67
Zahnweite	Größtmaß	36,122
	Kleinstmaß	36,083
Gegenrad		
Profilversch.faktor x		0
Kopfspielfaktor	p	0,25



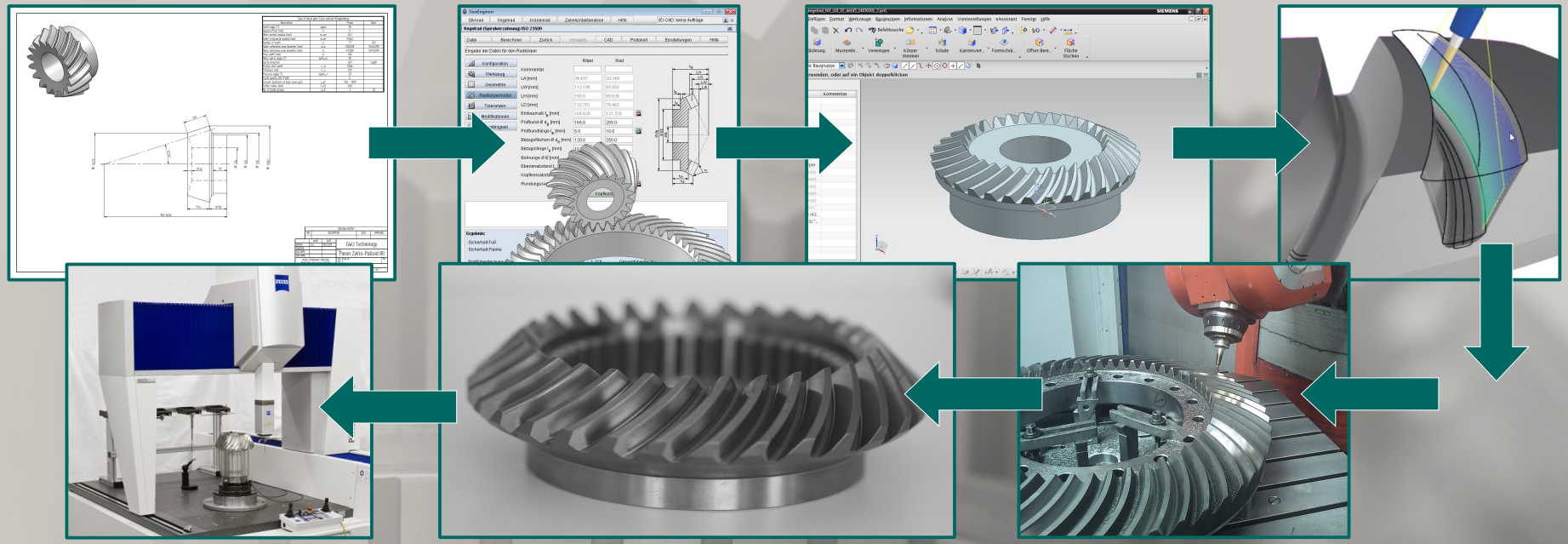




3. Typische Anwendung von Berechnungssoftware in der Zahnradfertigung

GWJ TECHNOLOGY

Von der Zeichnung zum Zahnrad

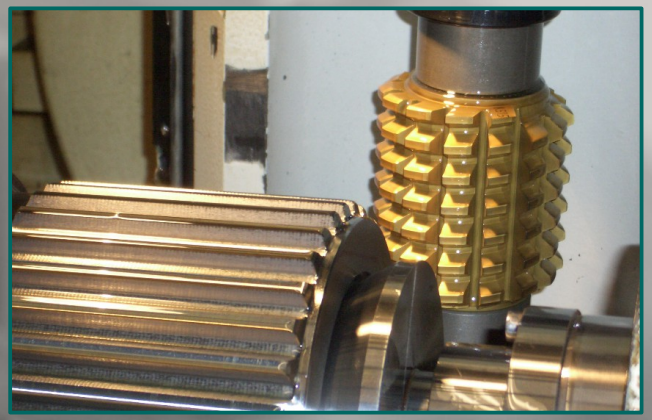


3. Typische Anwendung von Berechnungssoftware in der Zahnradfertigung

GWJ TECHNOLOGY

Traditionelle Herstellung mit Wälzfräser / Schneidrad

- Verzahnungen werden größtenteils mittels spanender Fertigungsverfahren hergestellt.
- Häufig kommt dabei das Abwälzfräsen oder Abwälzstoßen für Stirnräder sowie das Wälzfräsen (mit Messerköpfen im Einzelteil- oder kontinuierlichen Teilverfahren) für Kegelräder zum Einsatz.
- Diesen Fertigungsverfahren gemeinsam ist in der Regel die Verwendung von sogenannten Verzahnungsmaschinen als Einzweckmaschinen.
- Seit langem werden zylindrische Stirnräder auch im Form- bzw. Profilverfahren hergestellt.
- Hierbei erfolgt das Verzahnen z.B. mit Scheibenfräsern auf einer Universalfräsmaschine oder mittels Fingerfräser. Insbesondere Stirnräder mit mn > 20 werden häufig mit Fingerfräsern hergestellt, aber auch Pfeilverzahnungen sind damit möglich.

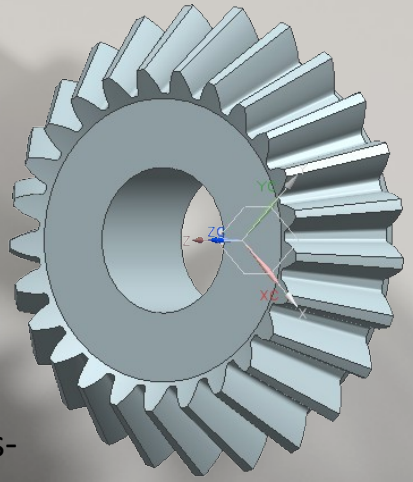


3. Typische Anwendung von Berechnungssoftware in der Zahnradfertigung

GWJ TECHNOLOGY

5-Achsfräsen von Verzahnungen

- Zahnräder, wie Stirn- oder Kegelräder, werden auf Universal-Mehrachsbearbeitungszentren mit unprofilierten Standardwerkzeugen (Schaft- oder Kugelfräser) gefertigt.
- Besonders für Großverzahnungen, Prototypen, Einzelstücke, Kleinserien oder Reparaturfälle geeignet
- Mehr Freiheitsgrade für eine optimale und flexible Fertigung von Verzahnungen (frei wählbarer Modul, von 20° abweichender Eingriffswinkel, individuelles Bezugsprofil, beliebiger Flugkreisradius)
- Trockenbearbeitung, Weich- und Hartbearbeitung möglich
- ***Voraussetzung:*** exakte 3D-Zahnform und geeignetes Universal-Mehrachsbearbeitungs-zentrum



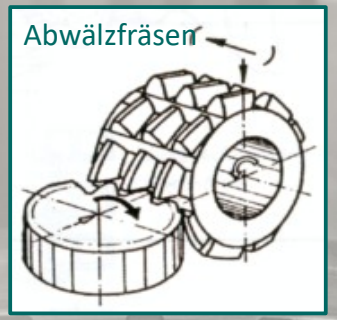
3. Typische Anwendung von Berechnungssoftware in der Zahnradfertigung

GWJ TECHNOLOGY

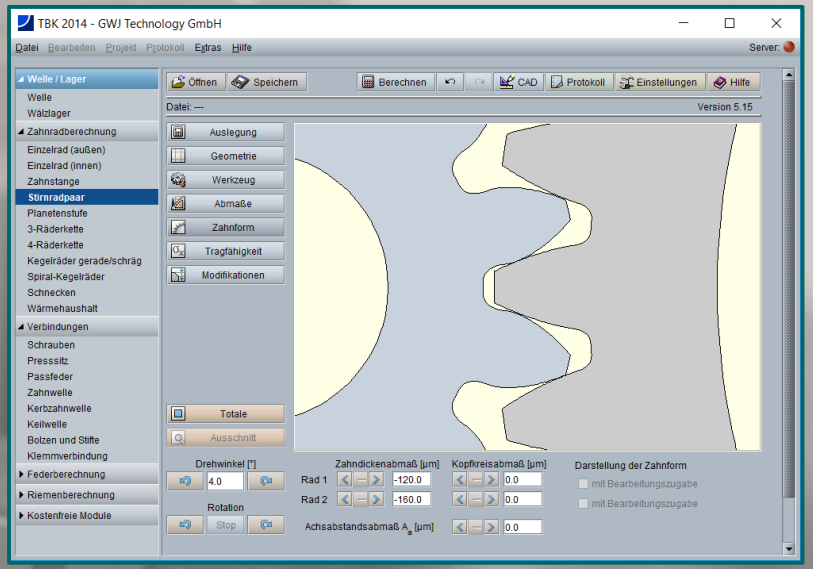
Moderne mathematische Herstellsimulation liefert reale Zahnform

- Für evolventische Verzahnungen gibt es mehrere Softwarelösungen am Markt, die auf Basis einer mathematischen Herstellsimulation die Berechnung der exakten Zahnform bieten.
- Die Zahnform wird meist auf Basis des Abwälzfräsens und Abwälzstoßens berechnet.

=> Wichtig, um Eingriffsstörungen zu vermeiden und um Festigkeit gemäß Auslegung zu gewährleisten



© Heinz Linke „Stirnradverzahnungen“



3. Typische Anwendung von Berechnungssoftware in der Zahnradfertigung

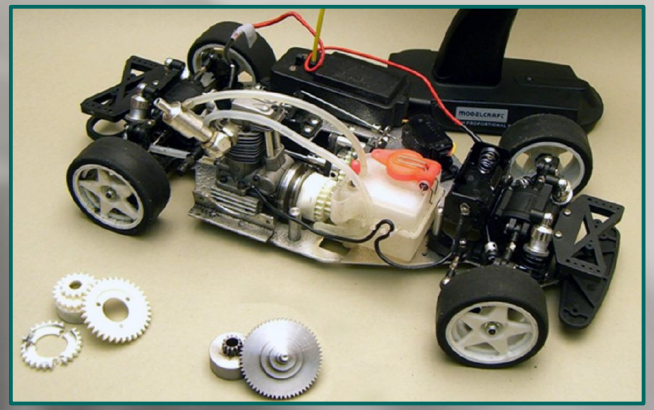
GWJ TECHNOLOGY

Moderne mathematische Herstellsimulation liefert reale Zahnform

- Die Zahnform kann meist als 2D-DXF ausgegeben werden und dient somit als Ausgangsbasis für die Fertigung beispielsweise mittels ***Laserschneiden*** oder ***Drahterodieren***.
- Aus der berechneten & realen Zahnform lassen sich auch exakte 3D-CAD-Modelle generieren. Diese können als Ausgangsbasis für

  Kunststoff-Spritzgießen oder
  additive Verfahren = 3D-Druck

  genutzt werden.



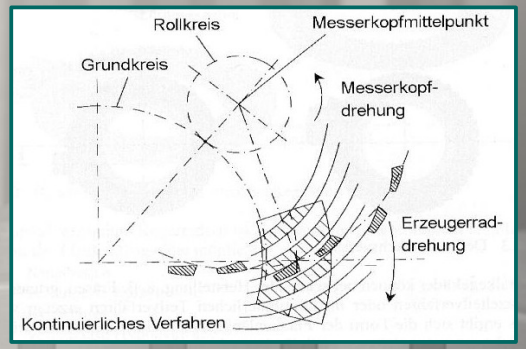
© TU Braunschweig, Institut für Konstruktionstechnik, Vorlesung „Rechnerunterstütztes Auslegen und Optimieren“

3. Typische Anwendung von Berechnungssoftware in der Zahnradfertigung

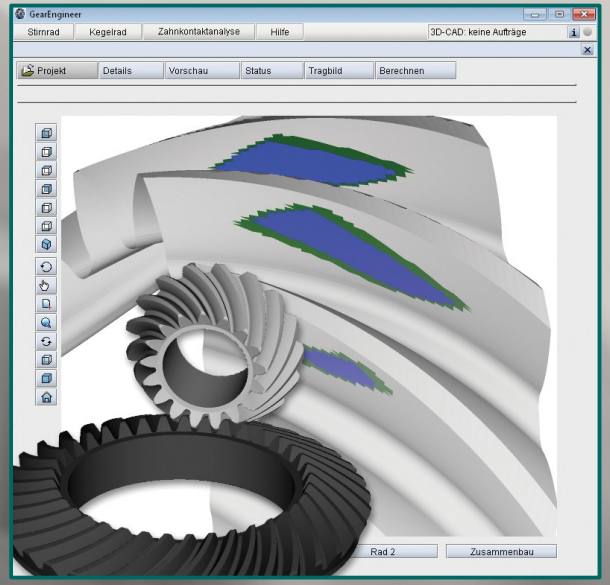
GWJ TECHNOLOGY

Moderne mathematische Herstellsimulation liefert reale Zahnform

- Für Kegelräder ist die Berechnung aufgrund der komplexeren Zahnform deutlich schwieriger und aufwendiger.
- Deshalb nur sehr wenige Softwarelösungen hierfür am Markt, wie z.B. von den Herstellern von Kegelradverzahnungsmaschinen Klingelnberg oder Gleason oder aber auch die maschinenunabhängige Lösung GearEngineer.



© Jan Klingelnberg „Kegelräder“

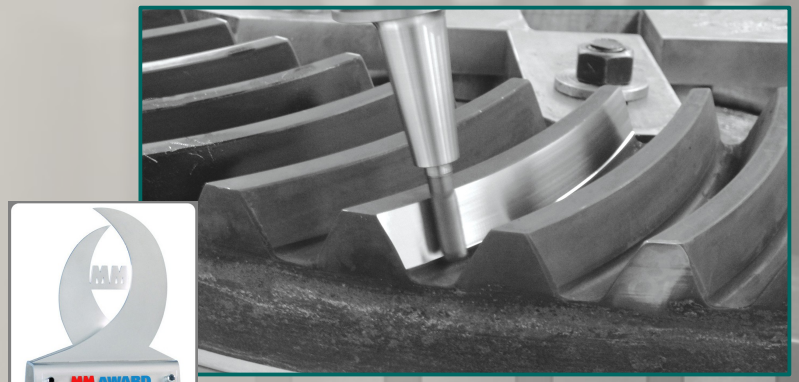


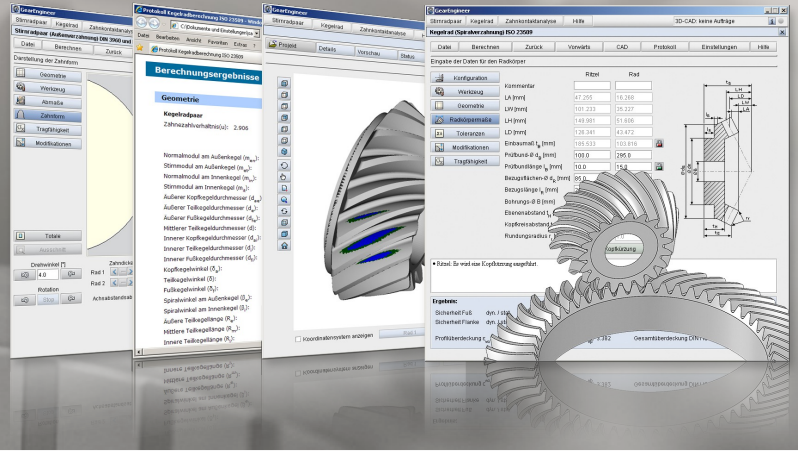
3. Typische Anwendung von Berechnungssoftware in der Zahnradfertigung

GWJ TECHNOLOGY

Moderne mathematische Herstellsimulation liefert reale Zahnform

- Mittels der Berechnung der realen Zahnform (Oktoide) von Kegelrädern lassen diese sich ebenfalls additiv bzw. im 3D-Druck herstellen.
- Aber auch das Schmieden (z.B. von Differentialkegelrädern) oder 5-Achsfräsen auf Universal-Bearbeitungszentren nutzt die exakte 3D-Zahnform von Kegelrädern als Ausgangsbasis.





3. Typische Anwendung von Berechnungssoftware in der Zahnradfertigung

GWJ TECHNOLOGY

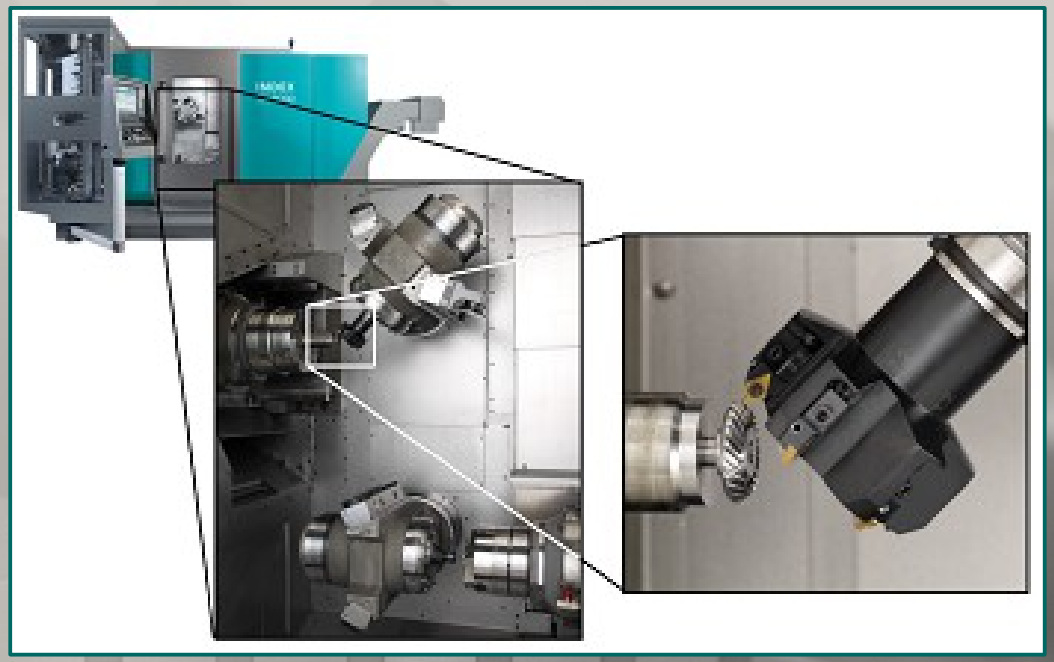
Alternativer Lösungsansatz für Kegelräder

- Neben dem Freiformfräsen mit Standardwerkzeugen auf Universal-Mehrachs-BAZs gibt es auch Ansätze mit Spezialwerkzeugen zu arbeiten, so z. B.:
  - Firma INDEX bietet für einen vergleichbaren Ansatz ein Komplettpaket bestehend aus Maschine, Werkzeug und Software; mittels Messerkopf und entsprechender Zyklusprogrammierung können im kontinuierlichen Wälzfräsverfahren Spiralkegelräder mit einer Epizykloide als Flankenleitlinie und konstanter Zahnhöhe im Modulbereich von 0,6 bis 4 gefertigt werden. Mittels passender Softwarelösung aus dem Hause GWJ kann der Anwender selbst seine Kegelräder auslegen und die notwendigen Maschineneinstellparameter berechnen.
  - Diese INDEX-Maschinen bieten eine hohe Flexibilität und eignen sich sowohl für eine flexible kleine Stückzahl, z. B. < 10 in Komplettbearbeitung, als auch für hohe Stückzahlen mit hoher Produktivität für Massenproduktion zum reinen Verzahnen. Es sind sowohl Weich- als auch Hartbearbeitungen möglich.

3. Typische Anwendung von Berechnungssoftware in der Zahnradfertigung

GWJ TECHNOLOGY

Alternativer Lösungsansatz für Kegelräder



Quelle:
R200/R300
INDEX-Werke GmbH & Co. KG,
Hahn & Tessky

4. Verzahnungsauslegung - Makrogeometrie/Mikrogeometrie

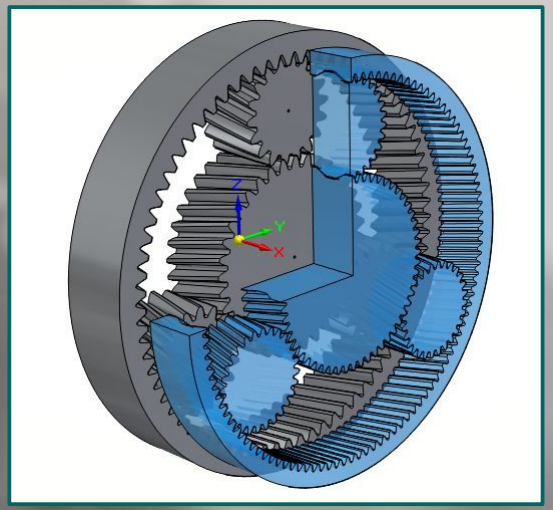
GWJ TECHNOLOGY

Anforderungen

An eine Verzahnung werden mehrere Anforderungen gestellt, die sich in der Regel widersprechen oder mit entsprechenden Prioritäten gewichtet sind. Somit muss meist ein Kompromiss erzielt werden!

Beispiele möglicher Hauptanforderungen:

- minimaler Bauraum
- kleinstes Gewicht
- hohe Übersetzungsgenauigkeit
- hoher Wirkungsgrad
- verschleißarm
- geräuscharm

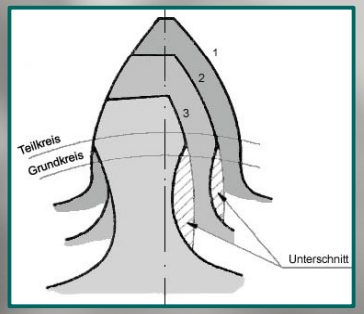


4. Verzahnungsauslegung - Makrogeometrie/Mikrogeometrie

GWJ TECHNOLOGY

Zähnezahl / Modul / Profilverschiebung

- Der Modul ist das charakteristische Maß für Zahnräder. Es können üblicherweise nur Zahnräder des gleichen Moduls zu einem Radpaar kombiniert werden.
- Der Modul sollte bei der Auslegung nur so groß gewählt werden, wie er für eine ausreichende Zahnfußsicherheit notwendig ist. Für Flanken- und Fresssicherheit sind dann entsprechende Zähnezahlen erforderlich.
- Zahnräder können mit einer Profilverschiebung ausgelegt und gefertigt werden. Durch die Profilverschiebung wird die Zahnform und somit die Zahnfuß- und Flankensicherheit beeinflusst.
- Der Profilverschiebungsfaktor liegt meist zwischen −1 und +1. Je kleiner die Zähnezahl desto größer der Einfluß der Profilverschiebung.



4. Verzahnungsauslegung - Makrogeometrie/Mikrogeometrie

GWJ TECHNOLOGY

Überdeckungen

Profilüberdeckung: Die Profilüberdeckung ε_α drückt die durchschnittlich im Eingriff befindliche Anzahl der Zahnflankenpaare aus.

Sprungüberdeckung: Damit sich die Vorteile einer Schrägverzahnung gegenüber der Geradverzahnung voll auswirken können, muss das Zahnrad bei einem entsprechenden Schrägungswinkel so breit sein, dass sich die gegenseitige Lage der Zahnflankenprofile an beiden Radstirnbreiten ausreichend unterscheidet. Das bestimmende Maß hierfür ist die Sprung-überdeckung ε_β, die das Verhältnis der Zahnbreite b zur Axialteilung p_x angibt.

Gesamtüberdeckung: Die Summe der Profilüberdeckung ε_α und Sprungüberdeckung ε_β wird Gesamt-überdeckung ε_γ genannt: $\varepsilon_\gamma = \varepsilon_\alpha + \varepsilon_\beta$

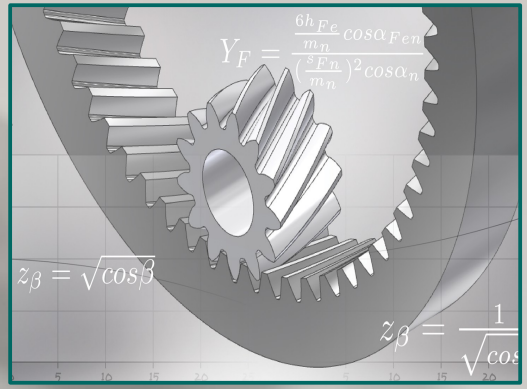
→ Eine ruckfreie Bewegungsübertragung ist bei $\varepsilon_\gamma \geq 1$ bzw. $\geq 1{,}1$ möglich.

4. Verzahnungsauslegung - Makrogeometrie/Mikrogeometrie

GWJ TECHNOLOGY

Geräuschoptimierung: Schrägungswinkel

- Übergang von der Gerad- zur Schrägverzahnung, da bei Schrägverzahnung wesentlich geringere Zahnsteifigkeitsschwankungen und eine gleichmäßigere Lastübernahme als bei Geradverzahnung vorliegen. Weiterhin erfolgt eine Verminderung des Eingriffsstoßes.
- Erhöhung des Schrägungswinkels bis max. 30° sinnvoll Durch die Form der Zahnsteifigkeitsschwankung bedingt, werden u.a. höherfrequente Anteile der Erregerkraft gesenkt.
- Bereits bei kleinem Schrägungswinkel, auch bei $\varepsilon_\beta < 1$, ist eine deutliche Senkung der Erregung zu verzeichnen.



Hinweis: *Durch große Verzahnungsabweichungen, niedrige Verzahnungsqualität, u.a. infolge der Flanken-abweichung, oder durch Wellenschiefstellung werden schnell die Vorteile einer Schrägverzahnung aufgehoben.*

4. Verzahnungsauslegung - Makrogeometrie/Mikrogeometrie

GWJ TECHNOLOGY

Geräuschoptimierung: Überdeckung

- Durch entsprechend Wahl von Schrägungswinkel sowie in erster Linie der Verzahnungsbreite Erzielung ganzzahliger Sprungüberdeckungen
- Wesentliche Beeinflussung der Profilüberdeckung u.a. durch Sonderverzahnungen
- Neben einer ganzzahligen Sprungüberdeckung ist eine ganzzahlige Gesamtüberdeckung von signifikanter Bedeutung.
- Soll ausschließlich der Steifigkeitswechsel minimiert werden ⇒ ganzzahlig Gesamtüberdeckung (möglichst auch ganzzahlige Profil- und Sprungüberdeckung)
- Gegenüber einer Sprungüberdeckung von 1 sind bei Sprungüberdeckungen von 2; 3; 4 keine wesentlichen Verbesserungen erreichbar.
- Relativ niedrige Anregungspegel auch bei Schrägverzahnungen mit Sprungüberdeckung > 0 und < 1 und hoher Profilüberdeckung > 1,7 (für hohe Zahnbelastungen)

GWJ TECHNOLOGY

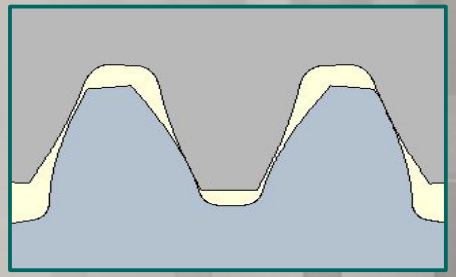
Geräuschoptimierung: Überdeckung

- Für hohe Laufruhe häufig Einsatz sogenannte Hochverzahnungen. Durch eine Profilüberdeckung = 2 geringere Schwankung der Zahnsteifigkeit und damit eine kleinere Schwingungserregung.

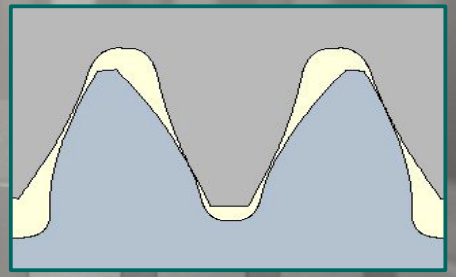
  Bei Hochverzahnungen sind Werkzeug-Zahnfußhöhen anstatt $h_{fp} = 1{,}0 \bullet m$ bis etwas $h_{fp} = 1{,}3 \bullet m$ üblich. Die Werkzeug-Kopfhöhen variieren üblicherweise zwischen $h_{ap} = (1{,}4 \text{ bis } 2{,}0) \bullet m$.

- ***Besonders ungünstig sind Überdeckungen, die zwischen ganzzahligen Werten liegen, z.B. Profilüberdeckung = 1,5 und Sprungüberdeckung = 0,5***

a)



b)



Normalverzahnung und Hochverzahnung:
($z_1 = 30$, $z_2 = 64$, $x_1 = 0{,}35$, ß = 0°,
Kopfrundungsradiusfaktor = 0,2)

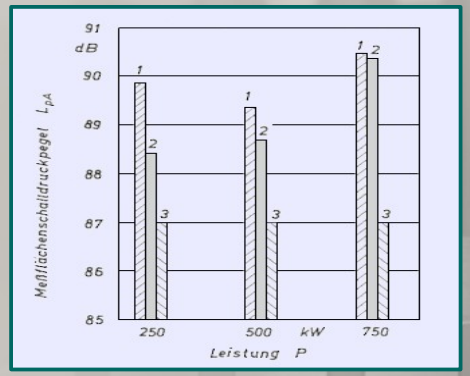
a) Verzahnung nach DIN 867
b) Hochverzahnung $h^*_{fp} = 1{,}3$ und $h^*_{ap} = 1{,}55$

4. Verzahnungsauslegung - Makrogeometrie/Mikrogeometrie

GWJ TECHNOLOGY

Sonderverzahnung ➡ Hochverzahnung

- Erzeugung der Verzahnungsgeometrie in der Art und Weise, dass die Profilüberdeckung ≥ 2,0 ist. Oft auch unter der Verwendung eines von 20° verschiedenen Eingriffswinkels
- Der Eingriffstoß wird durch gleichmäßigere Lastaufteilung reduziert. Die Zahnkraftsprünge beim Eingriffswechsel werden wesentlich verringert.



Version	1	2	3
m_n	5	4	4
α	20°		
β	11°		
ε_α	1,368	1,685	2,021
ε_β	1,093	1,367	1,367
ε_γ	2,461	3,052	3,388

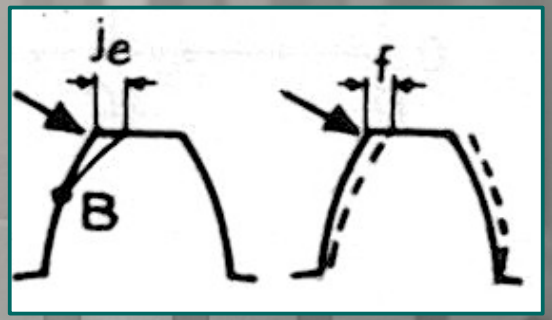
Linke „Stirnradverzahnung", 2010, S. 467

4. Verzahnungsauslegung - Makrogeometrie/Mikrogeometrie

GWJ TECHNOLOGY

Geräuschoptimierung: Profilkorrektur

- Profilkorrekturen bringen in der Regel Verbesserungen nur für einen bestimmten Lastpunkt, abweichend von diesem kommt es zu Verschlechterungen.
- Profilkorrektur oder Höhenballigkeit in Form von Kopfrücknahmen am Ritzel und Rad ca oder Kopf- und Fußrücknahme am Ritzel ca und cf sind bei Schrägverzahnung nicht zu empfehlen.
- Damit die Korrekturen zur Wirkung kommen können, sind Verzahnungsqualitäten von mindestens 6 notwendig.

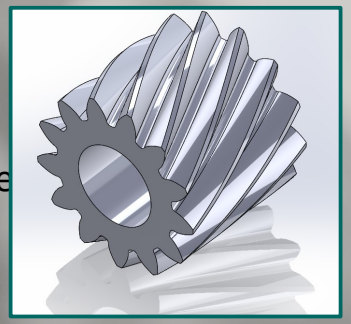


4. Verzahnungsauslegung - Makrogeometrie/Mikrogeometrie

GWJ TECHNOLOGY

Verzahnungswerkstoffe

- Viele Werkstoffe kommen bei der Zahnradherstellung zum Einsatz. Von großer Bedeutung für die Herstellung sind jedoch die Stähle aus technischen und wirtschaftlichen Gründen.
- Es ist bei nicht gehärteten Werkstoffen zu vermeiden, dass beide Zahnräder aus dem selben Werkstoff bestehen und somit die gleiche Härte aufweisen. Es besteht dann Fressgefahr, die zu vermeiden ist. Ein möglichst großer Härteunterschied zwischen den Zahnrädern wirkt sich in Bezug auf Verschleiß auf die Dauer günstiger aus.
- Sind beide Zahnräder gehärtet und geschliffen, hat man keine Probleme mit dem Verschleiß und eine geringe Fressneigung. Auch die Paarung ein gehärtetes und ein nicht gehärtetes Zahnrad ist günstig, da durch die Überrollungen das nicht gehärtete Rad ge verbessert wird.

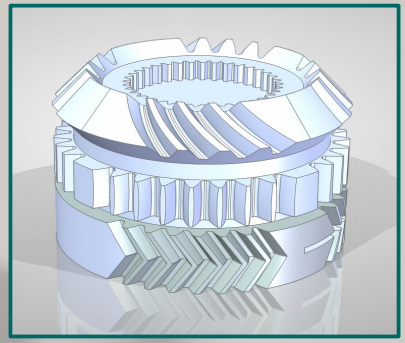


- Es kommen häufig folgende Werkstoffe bei der Herstellung von Zahnrädern zum Einsatz: Gusseisen mit Lamellengraphit, Gusseisen mit Kugelgraphit, Schwarzer Temperguss, Stahlguss, Stähle

4. Verzahnungsauslegung - Makrogeometrie/Mikrogeometrie

GWJ TECHNOLOGY

Werkstoffe: Hochreine Stähle



- Für kompakte Leistungsgetriebe oder Getriebe hoher Tragfähigkeit kommt heute sehr häufig der Einsatzstahl 18CrNiMo7-6 einsatzgehärtet zum Einsatz.
- Seit einiger Zeit bietet die Firma Ovako Stahl aus Schweden diesen Einsatzstahl in höheren Qualitäten bzw. in hochreinen Ausführungen. Die hochreinen Ovako-Stähle 159X und 159Q basieren auf dem Einsatzstahl 18CrNiMo7-6.
- Aufgrund deutlich geringerer Verunreinigungen weisen diese Stähle modifizierte Wöhlerkurven auf. D.h., im statischen Bereich sind beide Stähle vergleichbar mit dem 18CrNiMo7-6. Im Dauerfestigkeitsbereich bietet der 159Q jedoch eine um ca. 30 % höhere Leistungsfähigkeit für die Flankentragfähigkeit und um 60 % höhere Festigkeit für die Zahnfußtragfähigkeit. Diese höheren Dauerfestigkeitswerte basieren auf internen Untersuchungen der Firma Ovako und wurden mit Untersuchungen am WZL in Aachen sowie am FZG in München verifiziert.

4. Verzahnungsauslegung - Makrogeometrie/Mikrogeometrie

GWJ TECHNOLOGY

Werkstoffe: Hochreine Stähle

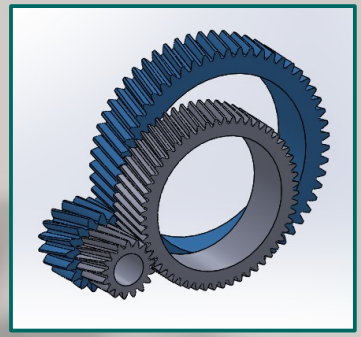
- Der Stahl 159X weist eine etwas kleinere Leistungssteigerung gegenüber dem 18CrNiMo7-6 auf und eignet sich damit u.a. gut bei notwendiger Verbesserung bereits bestehender Konstruktionen.
- Das Potential des 159Q lässt sich besonders bei Neuauslegungen nutzen. Dabei kann es von Vorteil sein, den Fokus mit auf eine optimierte Fresstragfähigkeit zu legen. Dadurch ergeben sich in der Regel neben der höheren Leistungsdichte bessere Verzahnungswirkungsgrade und somit geringere Verlustleistungen.

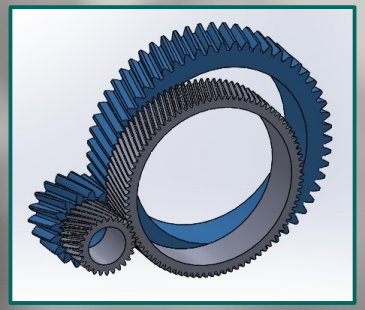
4. Verzahnungsauslegung - Makrogeometrie/Mikrogeometrie

GWJ TECHNOLOGY

Werkstoffe: Hochreine Stähle

- Prinzipiell lässt sich die ***Zuverlässigkeit*** von bereits vorhandenen Bauteilen durch den Einsatz hochreiner Stähle ***erhöhen***. Vorausgesetzt die Ursachen für einen möglichen Ausfall sind nicht z. B. schlechte Oberflächen oder Fluchtungsfehler etc.
- Neben der Erhöhung der Zuverlässigkeit lässt sich auch die ***mögliche Belastung*** bereits vorhandener Bauteile durch den Werkstoffwechsel auf hochreine Stähle, wie z. B. 159Q, ***erhöhen***. Hierbei ergibt sich eine ***leichte Preissteigerung*** bei den Materialkosten, die aber den Mehrgewinn an übertragbarem Moment liefert.
- Alternativ kann eine ***Bauteilverkleinerung*** bei Beibehaltung der ursprünglichen Belastungen erfolgen. Hierbei ergibt sich auf Grund der ***Reduzierung des Bauteilgewichtes*** eine entsprechende ***Verringerung der Materialkosten***.



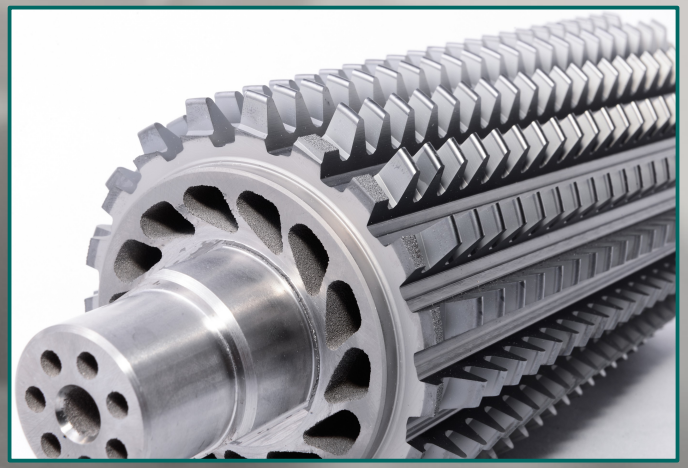


GWJ TECHNOLOGY

Beispiel für Potenzial des 3D-Drucks hochreiner Metalle

- ***VBN Components***: Schwedisches Unternehmen 2008 gegründet
- VBN hat verschiedene patentierte Materialien für das Metall-SLS entwickelt und bietet die Herstellung vom 3D-konturnahen Bauteilen aus diesen Materialien an.
- Das mögliche Potenzial wird am Beispiel eines Wälzfräsers dargestellt.
- Zum Einsatz kam der Werkstoff ***Vibenite© 280*** im Vergleich mit 22 Referenzwerkzeugen aus sehr guten Werkstoffen.

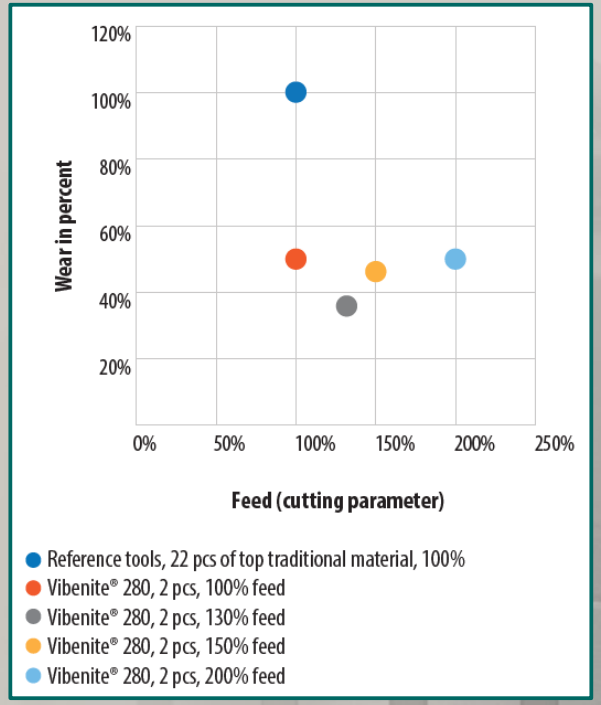
VBN COMPONENTS



4. Verzahnungsauslegung - Makrogeometrie/Mikrogeometrie

GWJ TECHNOLOGY

Wälzfräser aus Vibenite© 280



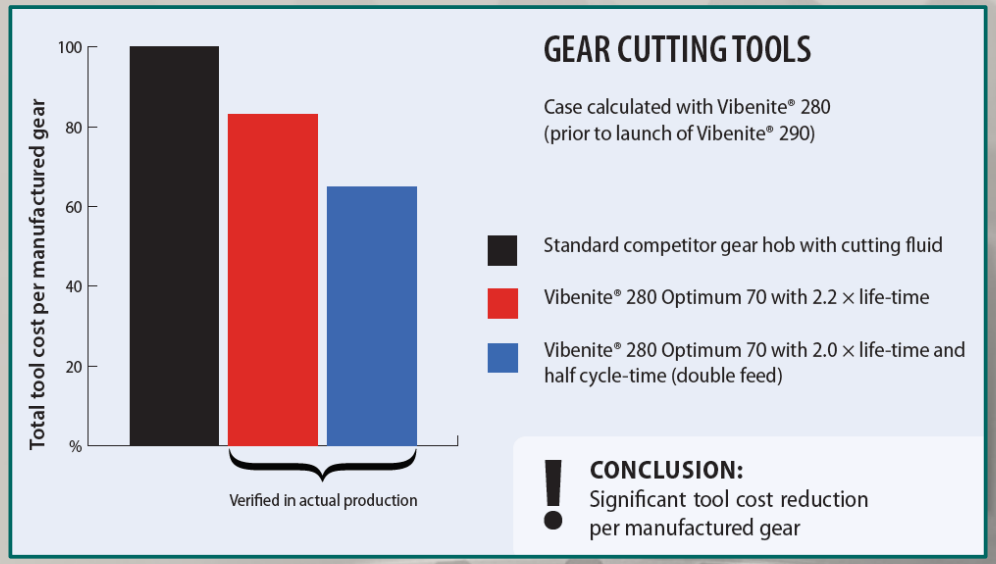
Ergebnisse der Lebenszyklusanalyse für Zahnradfräsen:
(20.000 Einheiten pro Jahr)

- Gesamt-Werkzeugkosten pro hergestelltem Zahnrad reduziert um 15–20 % aufgrund der doppelten Lebensdauer des Vibenite® Werkzeugs.
- Doppelter Schnittvorschub kürzt Kosten um weitere 15–20 %.
- Daraus ergeben sich reduzierte Gesamt-Werkzeugkosten pro hergestelltem Zahnrad von 30–40 %.

4. Verzahnungsauslegung - Makrogeometrie/Mikrogeometrie

GWJ TECHNOLOGY

Wälzfräser aus Vibenite© 280



Vorteile:

- Reduzierte Anzahl an Werkzeugwechseln

➡ weniger Stopps für Werkzeugwechsel steigert Produktivität

- Mehr Vorschub/Schnitttiefe bei jedem Schnitt

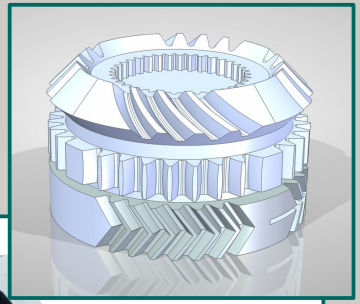
➡ kürzere Zyklenzeit = höhere Produktivität

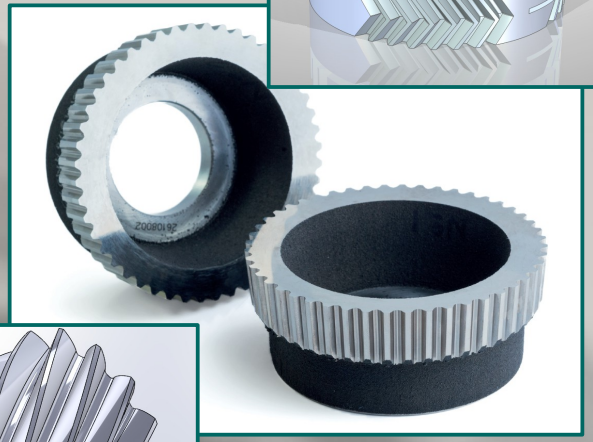
4. Verzahnungsauslegung - Makrogeometrie/Mikrogeometrie

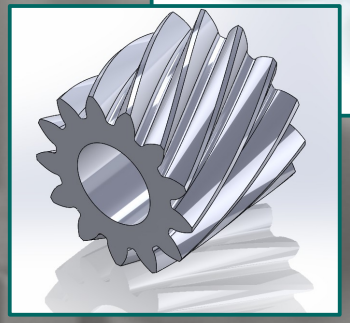
GWJ TECHNOLOGY

Werkzeuge & Zahnräder

- Neben der Herstellung von Wälzfräsern können natürlich auch Stoß- bzw. Schneidräder in gleicher Art und Weise mit diesen Vorteilen hergestellt werden.
- Die Herstellung von Zahnrädern auf diese Art und Weise ist ebenfalls möglich.
- Aufgrund der konturnahen Herstellung mittels 3D-Druck (SLS) und des sehr homogenen Gefüges ergeben sich geringere Verzüge beim Härten und ein geringerer notwendiger Materialabtrag beim Schleifen.
- Die Werkstoffentwicklung geht auch hier noch weiter. So gibt es seit Anfang 2019 den neuen Werkstoff ***Vibenite® 480***. Dieser Werkstoff bietet eine exzellente Verschleißfestigkeit und eine größere Härtestabilität bei hohen Temperaturen.





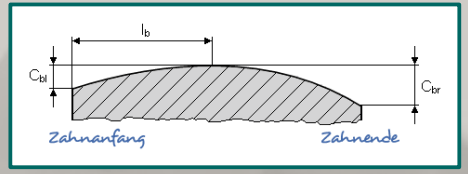


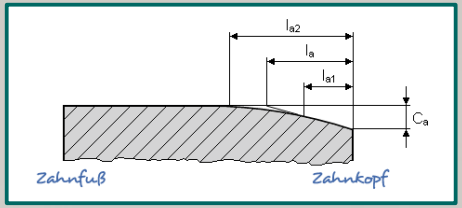
4. Verzahnungsauslegung - Makrogeometrie/Mikrogeometrie

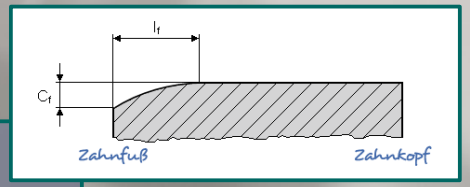
GWJ TECHNOLOGY

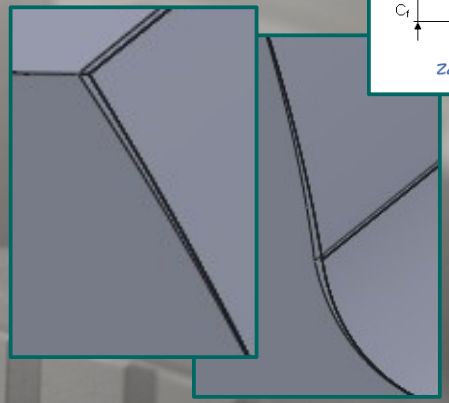
Stirnräder: Modifikationen zur weiteren Optimierung

- Kopf- und Fußrücknahmen
- Höhenballigkeiten
- symmetrische und asymmetrische Breitenballigkeiten
- Endrücknahmen









Für die Auslegung der Mikrogeometrie ist eine detaillierte Betrachtung des Verzahnungsumfeldes sinnvoll bzw. notwendig!

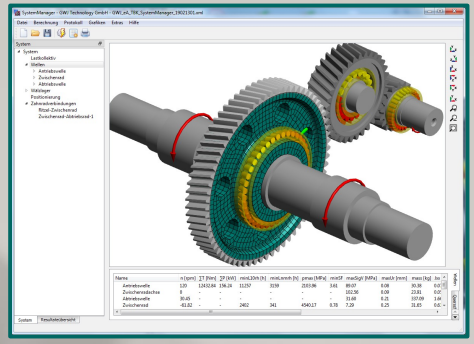
=> Systemberechnung

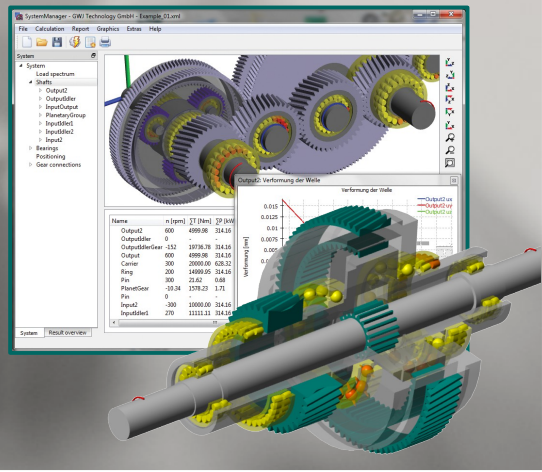
4. Verzahnungsauslegung - Makrogeometrie/Mikrogeometrie

GWJ TECHNOLOGY

Berechnung kompletter Systeme von Maschinenelementen

- Schneller, einfacher und übersichtlicher Aufbau von Mehrwellensystemen gekoppelt mit Verzahnungen
- Koaxiale Wellen und achsparallele Wellensysteme für mehrstufige Stirnrad-getriebe
- Konzentrische Wellensysteme für Planetengetriebe / allgemeine Umlaufräder-getriebe
- Winklige Wellensysteme für Kegelradgetriebe und Kombination mit Stirnrad- und Umlaufgetriebestufen
- Alle Geometrieinformationen sind in einer Datei abgelegt.
- Es ist keine Übertragung von Schnittgrössen von einer Berechnung zu einer zweiten Berechnung nötig.



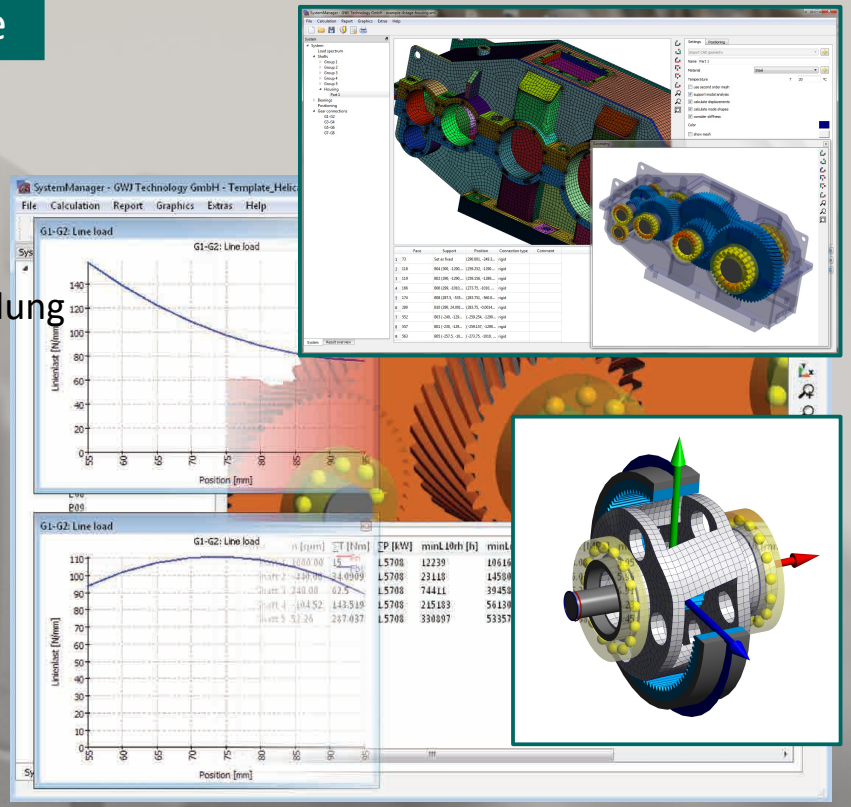


4. Verzahnungsauslegung - Makrogeometrie/Mikrogeometrie

GWJ TECHNOLOGY

Berücksichtigung von Einflüssen auf Mikrogeometrie

- Nichtlineare Wälzlagersteifigkeit
- Verformung (Biegung / Torsion) der Wellen
- Gehäuse importieren und automatisch vernetzen zur Ermittlung der Gehäusesteifigkeitsmatrix
- Planetenträger und Radkörper ebenfalls als 3D elastische Bauteile mit automatischer Vernetzung importieren und deren Verformung auf Flankenlinienabweichung des Zahneingriffs mit berücksichtigen

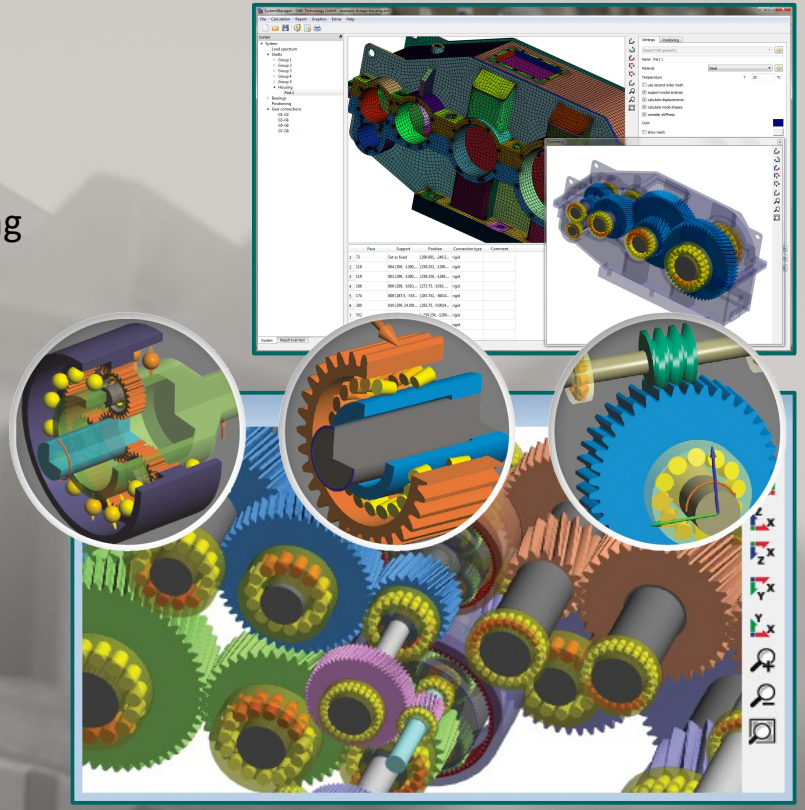


4. Verzahnungsauslegung - Makrogeometrie/Mikrogeometrie

GWJ TECHNOLOGY

Vorteile einer Systemberechnung

- Drastische Verkürzung von Entwicklungszeiten!
- Eine Systemberechnung, die sich bereits in der Vorprojektierung und Angebotsphase bis hin zur späteren Detailoptimierung nutzen lässt!
- Alle Geometrieinformationen sind in einer Datei abgelegt.
- Keine Übertragung von Schnittgrössen nötig.
- Festigkeitsnachweis für Wellen, Verzahnungen und Wälzlager in einer Berechnung
- Übersicht über die Resultate im gesamten System;
  kritische Elemente schnell identifizierbar;
  3D Grafik zur Kontrolle

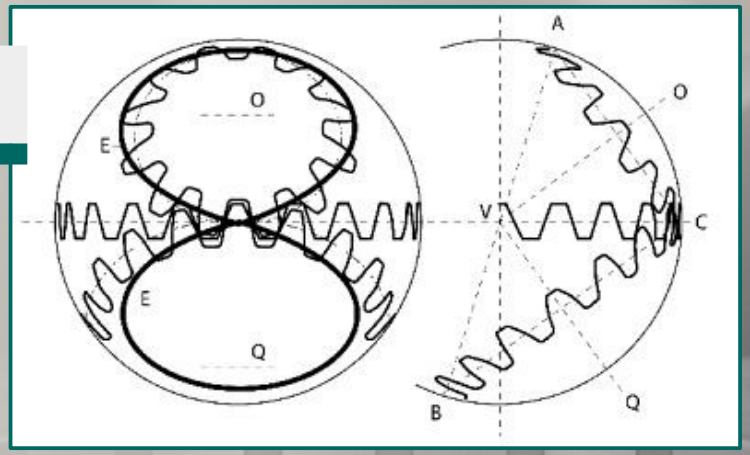


GWJ TECHNOLOGY

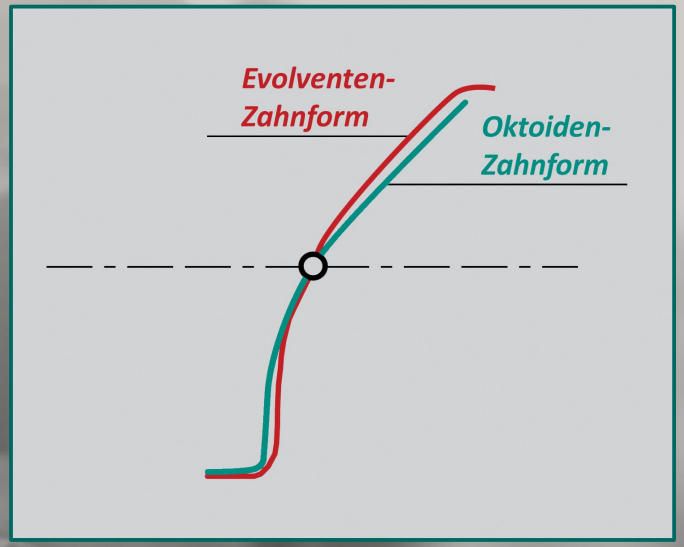
Kegelräder: Oktoide

- Im Gegensatz zu Stirnrädern weisen traditionell gefertigte ***Kegelräder keine Evolvente***, sondern eine ***Oktoide*** als Zahnprofil auf.

Oktoide



Quelle: Niemann G., Winter H.; Maschinenelemente Vol. 3, Springer-Verlag, 1986



Vergleich Oktoide und Evolvente

4. Verzahnungsauslegung - Makrogeometrie/Mikrogeometrie

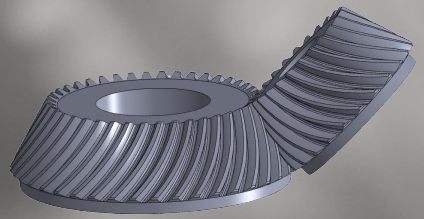
GWJ TECHNOLOGY

Kegelräder: Oktoide

- Geringe Anzahl an verfügbaren Softwarelösungen für Berechnung der realen und damit korrekten 3D-Zahnform von Kegelrädern, da mathematische Herstellsimulation notwendig. Dies ist mit nicht unerheblichem Entwicklungsaufwand verbunden.

→ Inzwischen gibt es Softwarelösungen am Markt, welche die ***3D-Kegelradgeometrie vereinfacht*** auf Basis einer ***Ersatz-Stirnradverzahnung*** berechnen. Diese besitzen ***keine*** Oktoide, sondern ***Evolvente als Zahnprofil***.

- Kegelräder auf Basis einer Ersatz-Stirnradverzahnung mit Evolventenprofil besitzen im Vergleich zu korrekter/realer Zahnform geringere Zahnfußfestigkeiten von 10 % bis 28 % für nichtachsversetzte Kegelräder und 45 % für achsversetzte Kegelräder (siehe Hünecke, TU Dresden).
- Geringere Zahnfußfestigkeit resultiert aus Unterschieden im Zahnprofil u. a. hinsichtlich Zahnfußdicke, Biegehebelarm und Winkel für den Kraftangriff und der Fußkurve.



4. Verzahnungsauslegung - Makrogeometrie/Mikrogeometrie

GWJ TECHNOLOGY

Kegelräder: Oktoide

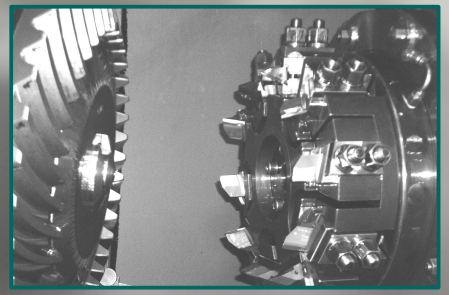
- Oktoide als Zahnprofil bewirkt bei Kegelrädern eine höhere Verlagerungsunempfindlichkeit (analog der Evolvente bei Stirnrädern).
- Traditionell gefertigte Kegelräder weisen eine konjugierte Verzahnung auf.
- Konjugierte Verzahnungen gewährleisten ein einwandfreies Laufverhalten. Um so größer die Abweichungen von der konjugierten Verzahnungen z.B. durch Modifikationen sind, desto schlechter das Laufverhalten sowie erhöhte Schwingungen / Laufgeräusche ...;
- Kegelräder auf Basis einer evolventischen Ersatz-Stirnradverzahnung weisen eine nicht konjugierte Verzahnung auf.
- Laufverhalten vereinfachter, angenäherter Kegelräder schlechter im Vergleich zu realen Kegelradsätzen (gemäß Anwendererfahrungen sowie aufgrund nicht konjugierter Verzahnung).
- Bisherige Erfahrungswerte für Modifikationen sind für vereinfachte, angenäherte Kegelräder nicht nutzbar.

4. Verzahnungsauslegung - Makrogeometrie/Mikrogeometrie

GWJ TECHNOLOGY

Kegelräder: Oktoide

- Vereinfachte Kegelräder eignen sich nicht für Reparaturfälle, wenn z.B. nur Ritzel getauscht wird; da diese in der Regel nicht zusammen mit realen bzw. traditionell gefertigten Kegelrädern laufen.
- Kegelräder, die mittels mathematischer Herstellsimulation korrekt berechnet wurden, können auch mit konventionell gefertigten Kegelrädern gepaart werden!
- Lauf- und Schwingungsverhalten korrekt berechneter Kegelräder ist identisch zu realen / traditionell gefertigten Kegelrädern!



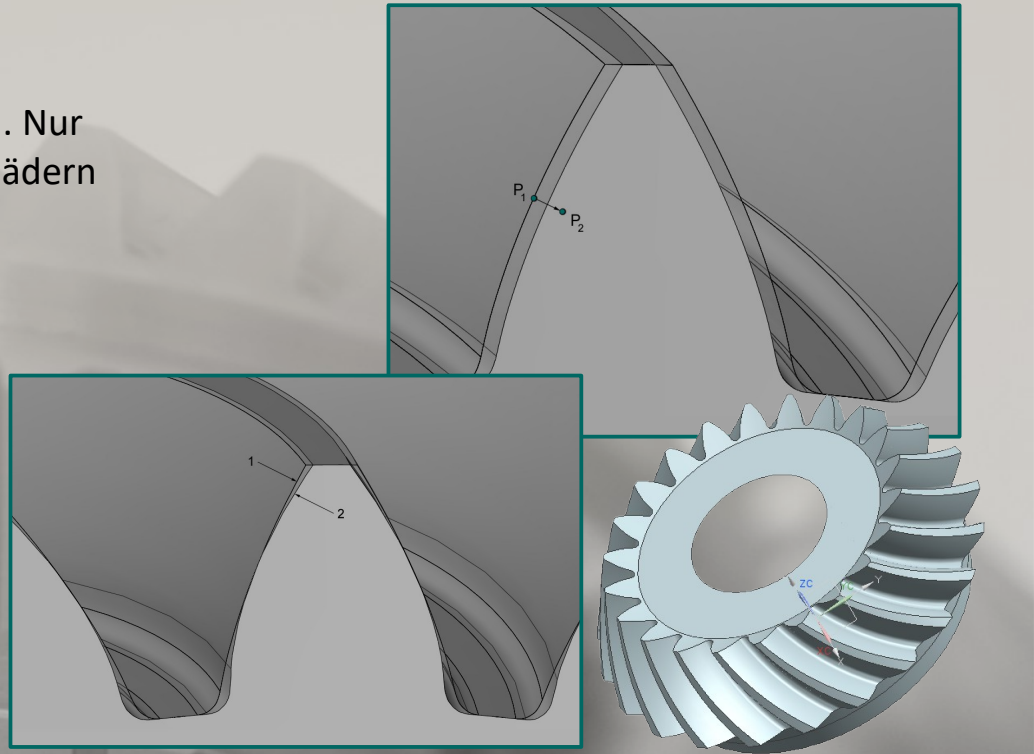
4. Verzahnungsauslegung - Makrogeometrie/Mikrogeometrie

GWJ TECHNOLOGY

Spiralkegelräder: Modifikationen

- Breitenballigkeiten vorgebbar an beiden Flanken, d.h. Nur für Ritzel oder nur für Rad möglich, oder an beiden Rädern
- Höhenballigkeiten für jede Flanke vorgebbar
- Erfahrungswerte für die Wahl von Balligkeiten
- Eingriffswinkelmodifikation
- Spiralwinkelmodifikation

Festlegung der Modifikationen nur über eine Tragbildsimulation möglich!

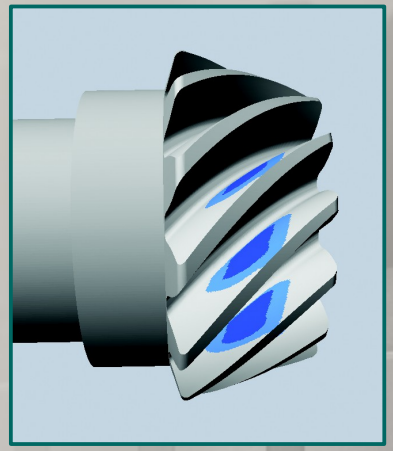


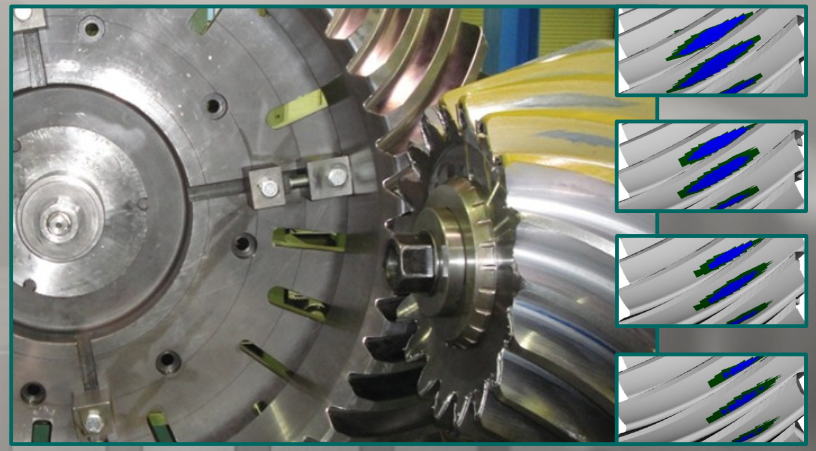
4. Verzahnungsauslegung - Makrogeometrie/Mikrogeometrie

GWJ TECHNOLOGY

Kegelräder: Tragbild

- Zur Berechnung und Darstellung von Tragbildern ohne Last wurde eine Zahnkontaktanalyse (TCA) in die Software GearEngineer integriert. Diese ist für alle Verzahnungstypen verfügbar.
- Zusätzlich beinhaltet die Zahnkontaktanalyse eine Kollisionsprüfung.

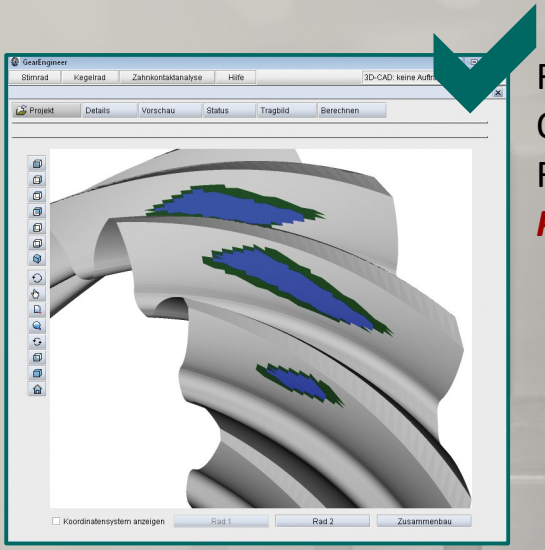




GWJ TECHNOLOGY

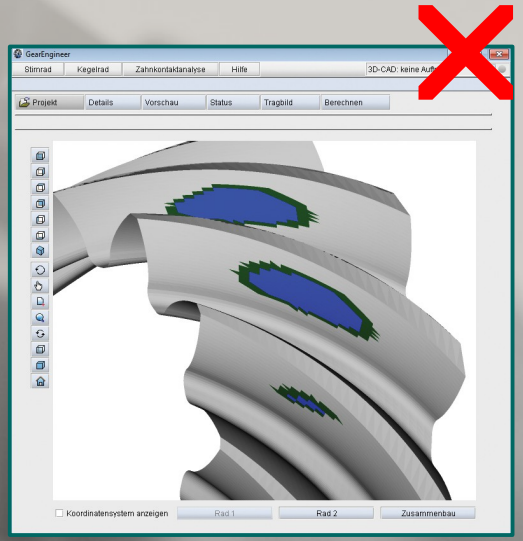
Kegelräder: Tragbild

- Ob es sich bei einem Spiralkegelrad um eine angenäherte oder reale Zahnformgeometrie handelt, lässt sich anhand des Tragbildes identifizieren.



Reale Spiralkegelräder mit einer Oktoide als Zahnprofil weisen in der Regel ein Tragbild in Form eines ***Parallelogramms*** auf.

Bei angenäherter Zahnform mit Evolventenprofil ergibt sich ein ***elliptisches*** Tragbild.

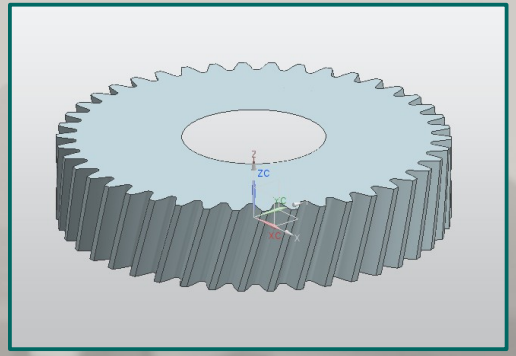


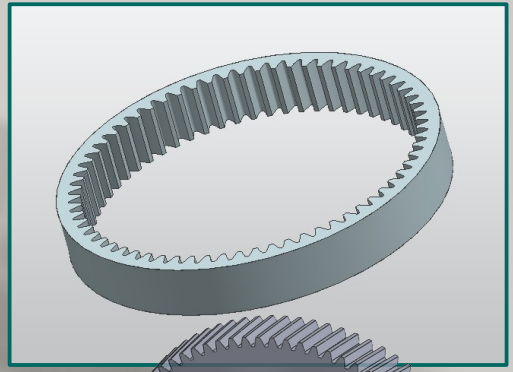
5. Verzahnungen, die GWJ für die Fertigung unterstützt

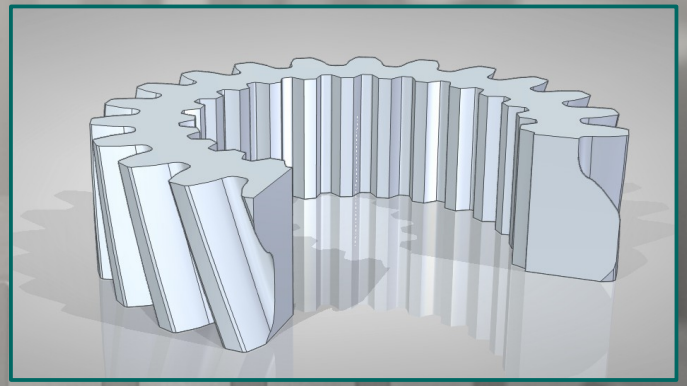
GWJ TECHNOLOGY

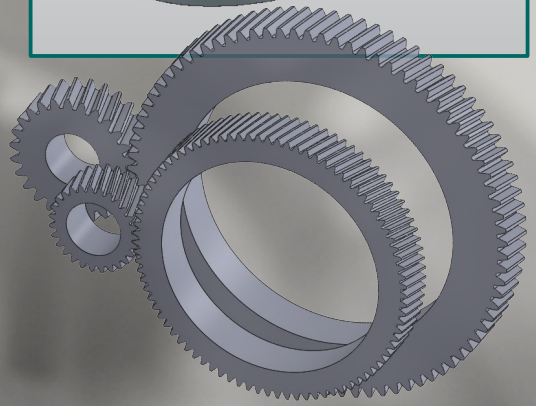
Unterstützte Verzahnungstypen

- Gerad- und Schrägverzahnungen
- Außen- und Innenverzahnungen
- Zahnwellen und Zahnwellennaben
- Hirthverzahnungen







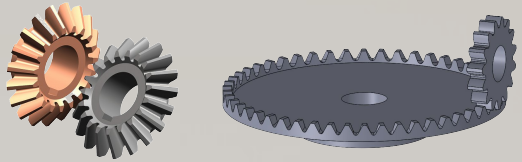


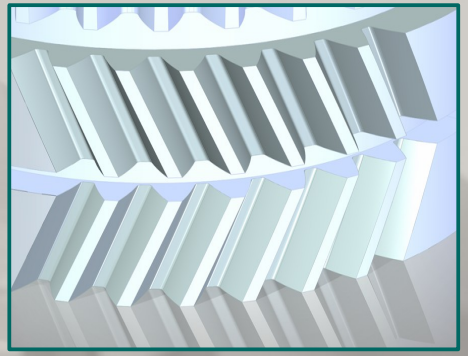
5. Verzahnungen, die GWJ für die Fertigung unterstützt

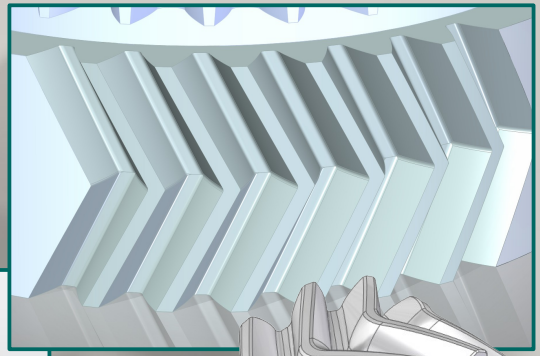
GWJ TECHNOLOGY

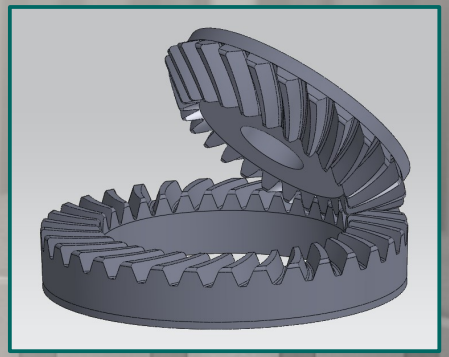
Unterstützte Verzahnungstypen

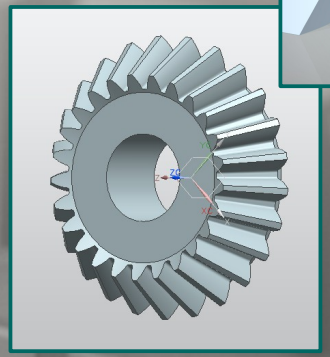
- Gerad- und Schrägkegelräder
- Spiralkegelräder
- Spiralkegelräder mit ßm = 0 (Zerol)
- Doppelschräg- & Pfeilverzahnungen
- Kronenräder
- Weitere auf Anfrage ...











Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

GWJ TECHNOLOGY

Berechnung von Verzahnungen: Potenzial & Möglichkeiten

INDEX Technologie Campus

GWJ Technology GmbH
Celler Straße 67-69
38114 Braunschweig

t +49 (0)531 / 129 399-0
f +49 (0)531 / 129 399-29

e info@gwj.de
i www.gwj.de

i www.TBKsoft.com
i www.eAssistant.eu
i www.GearEngineer.eu