

Dimensionieren II

Verzahnungen



ETH

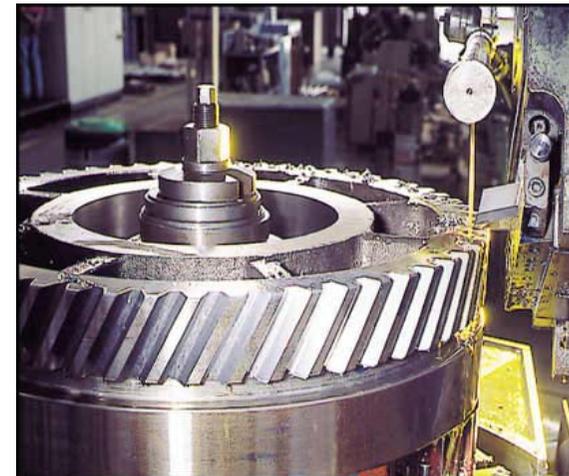
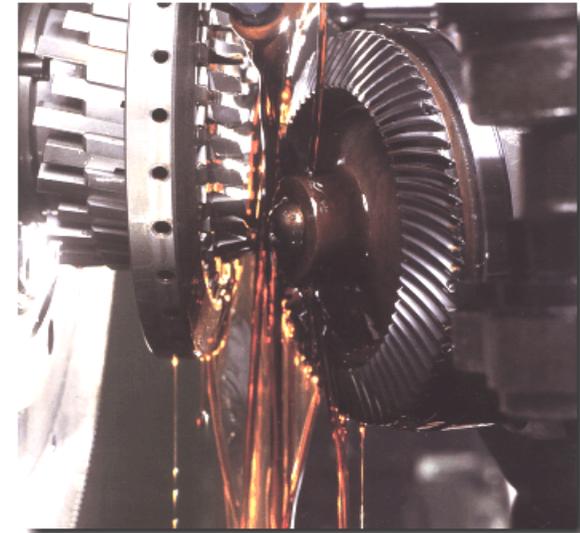
Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

IWF

Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigung
Institute of Machine Tools and Manufacturing

Inhaltsübersicht

- Einleitung
- Anwendungen für Zahnräder
- Anforderungen an Verzahnungen
- Getriebetypen
- Eingangsparmeter für die Zahnrädergeometrie
- Werkstoffe für Zahnräder
- Dimensionierung von Zahnräder
- Grundlagen der Verzahnung
- Technisch brauchbare Flankenformen
- Geometrie der Stirnräder
- Kräfte am Zahn
- Zahnflankenschäden
- Auslegung von Getrieben
- Herstellverfahren für Verzahnungen



ETH

Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

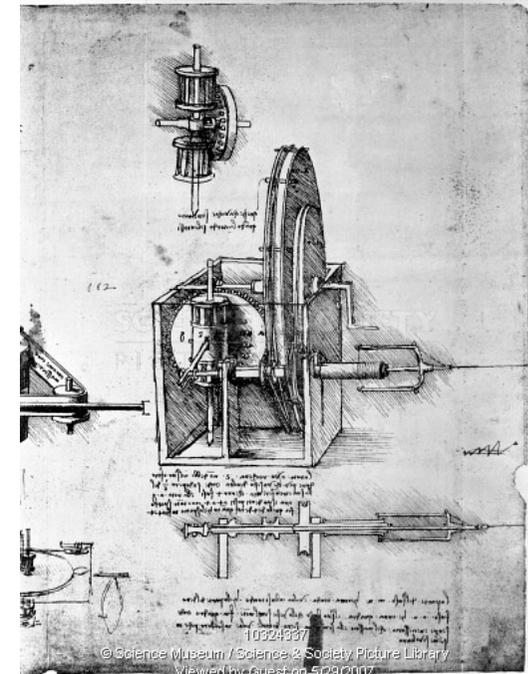
IWF

Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigung
Institute of Machine Tools and Manufacturing

Einleitung

Entwicklung und Anwendung der Zahnräder

- Erste überlieferte Anwendungen im 1. Jahrhundert – Zeitrechnungsgeräte
- Ab dem 13. Jahrhundert - Zahnräder von Räderuhren
- Im 15. Jahrhundert - mehrere Vorschläge und Entwürfe von Leonardo da Vinci im Bereich der Verzahnungen
- Im 16. Jahrhundert - Entwicklung von Verzahnungen für Wasserhebung, Windmühlen, Planetenlaufuhrwerke und Kalenderwerke, ...
- Im 19. Jahrhundert - Entwicklung der Schiffsantriebe zur Übersetzung ins Schnelle oder ins Langsame
- Die zunehmende Anwendung der Elektromotoren und Verbrennungskolbenmotoren erforderte eine breitere Anwendung und Entwicklung von Zahnradgetrieben



ETH

Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

Examples of gearing by Leonardo da Vinci, 15th century.

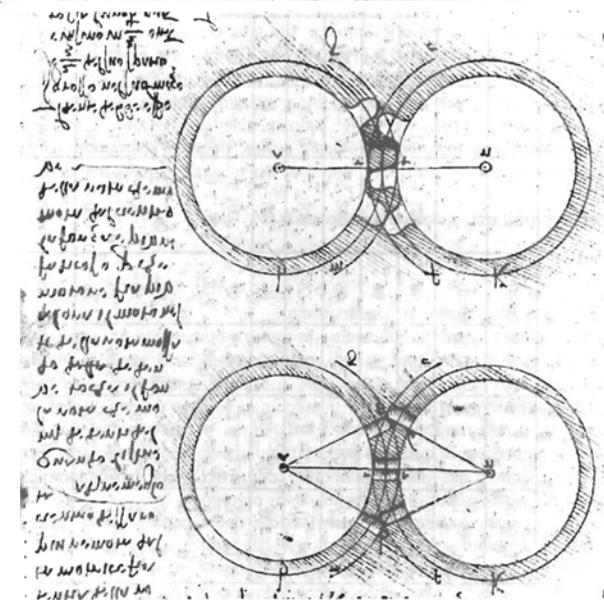
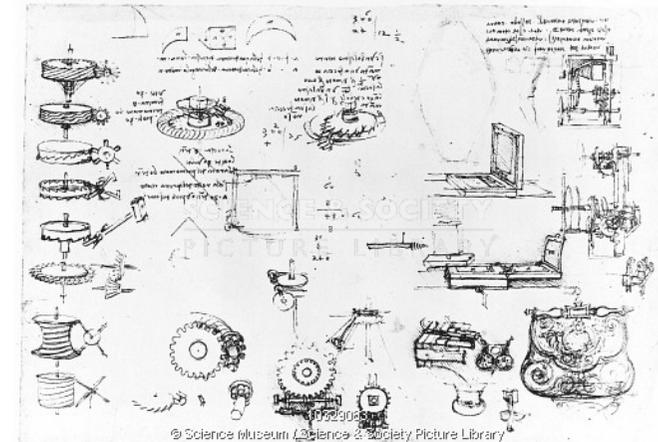
IWF

Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigung
Institute of Machine Tools and Manufacturing

Einleitung

Entwicklung der Verzahnungsgeometrie

- Als Begründer der Verzahnungslehre gilt Ph. de la Hire (1695) - Entwicklung einer Verzahnung mit konstanter Übersetzung
- Anwendung einer Rollkurve zur Erzeugung einer Paarverzahnung von Abbé Camus (1699-1768)
- Die Evolvente als Zahnform wurde zuerst von L. Euler behandelt (ab 1752)
- Formulierung einem Vorläufer des Verzahnungsgesetzes (Robert Buchanan - 1808)
- Patentmeldung für Schrägverzahnung (James White – 1808)
- Gegen Ende des 19. Jahrhunderts setzte sich die Evolventenverzahnung durch



ETH

Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

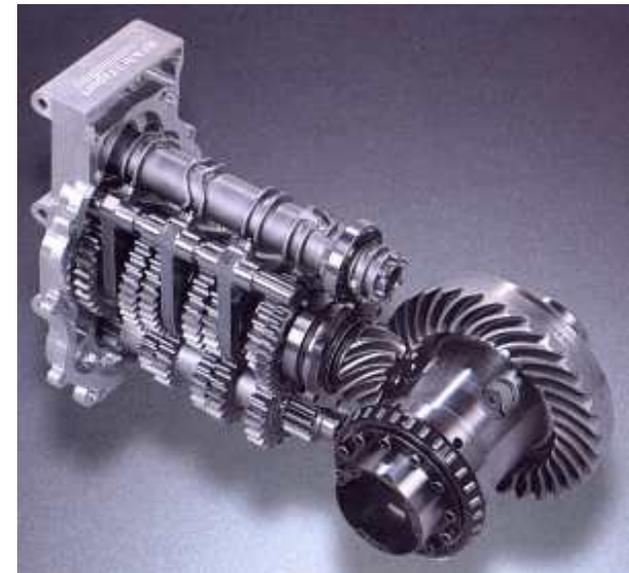
IWF

Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigung
Institute of Machine Tools and Manufacturing

Einleitung

- Zahnräder sind die am meisten vom Konstrukteur beeinflussbaren Maschinenelemente
- Einsatz, Dimensionierung, Gestaltung, Fertigung, Entwicklung und Erprobung erfordern die Anwendung verschiedenster Fachgebiete wie Geometrie, Werkstofftechnik, Fertigungstechnik, Tribologie, Lärmbekämpfung und Gütesicherung
- Die Entwicklung neuer Fachgebiete hat die Bedeutung von Zahngetrieben nicht zurückgedrängt
- Auf einigen Gebieten ist die rein elektrische Lösung die bessere, dafür stiegen aber Bedarf und Anforderungen bei anderen Anwendungen

(H. Linke)



ETH

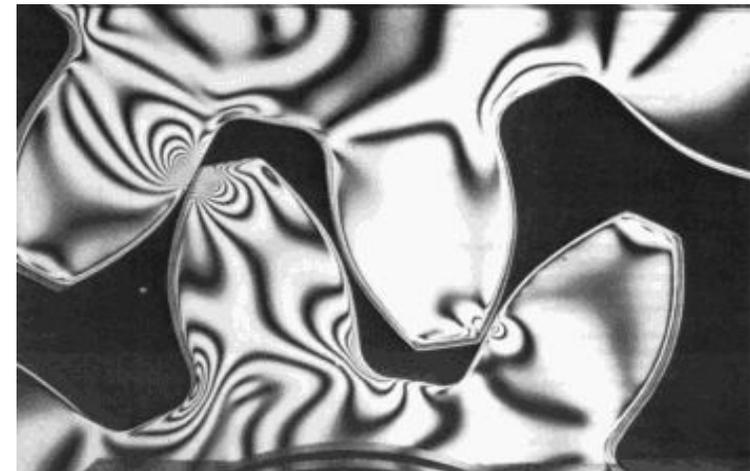
Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

IWF

Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigung
Institute of Machine Tools and Manufacturing

Einleitung

- Zahnräder sind um eine Achse drehbare Maschinenelemente, die aus dem Radkörper mit seinen Lagerflächen und den aus dem Radkörper vorstehenden Zähnen bestehen
- Häufig werden Zahnräder benutzt, um die Zahl und die Richtung der Umdrehungen von einer Achse zu anderer zu ändern
- Zahnräder sind komplexe Maschinenelemente sowohl bei der Konstruktion als auch bei der Herstellung und bei der Wartung



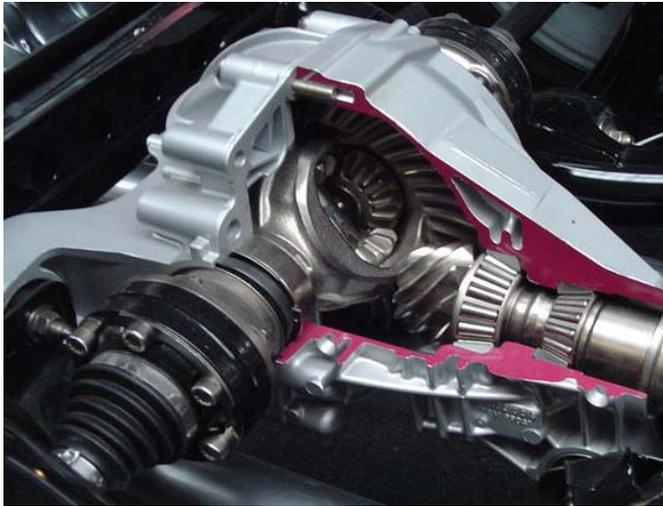
ETH

Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

IWF

Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigung
Institute of Machine Tools and Manufacturing

Anwendungen für Zahnräder



- Transportmittel (Flugzeuge, Schiffe, Landwirtschaft, Automobilindustrie)
- Allgemeine Industrie (Zerspanungstechnik, Produktionstechnik, Transportindustrie, Gütertransporte, Qualitätskontrolle, Roboter, ...)
- Wirtschaft (Prüf- und Registriermaschinen, elektronische Komponenten, ...)
- Haushaltsgeräte (Mixer, Uhren, Espresso-, Wasch-, Nähmaschinen, Küchengeräte, ...)



ETH

Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

IWF

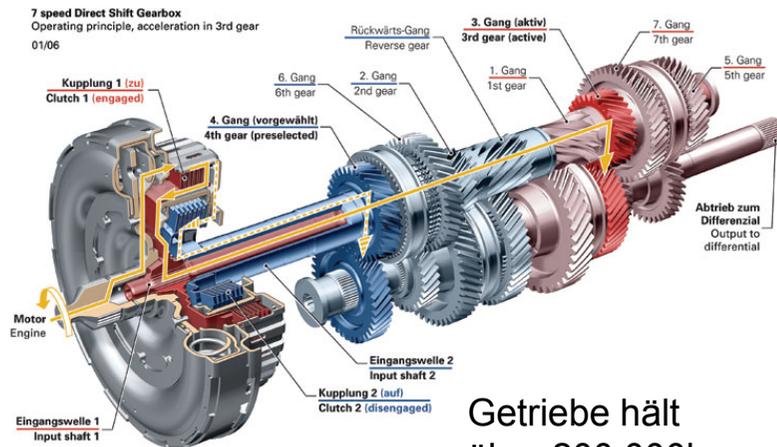
Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigung
Institute of Machine Tools and Manufacturing

Anforderungen an Verzahnungen

- Größere Leistung +
- Höhere Lebensdauer +
- Geringere Kosten -
- Geringeres Gewicht -
- Geringere Geräusche -



Lxel Maersk mit 88.235 kW



Getriebe hält über 200.000km



Bugatti Veyron mit 1.001 PS



ETH

Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

IWF

Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigung
Institute of Machine Tools and Manufacturing

Anforderungen an Verzahnungen

Erreichte Grenzwerte ausgeführter Getriebe (nach Linke)

GETRIEBE		Leistung in kW		Drehzahl max min	Wälzgeschwindigkeit v in m/s		Übersetzung i		Wirkungsgrad (Stufe) η in %		Volumen/ Leistung dm ³ /kW	Gewicht/ Leistung kg/kW
		normal	extrem		normal	extrem	normal	extrem	von	bis		
Zahnradgetriebe	Stirnrad-Getriebe	2 000	100 000	150 000	80	200	1 ... 800	1 000	97	99,5	0,5 ... 0,2	2,0 ... 0,1
	Planeten-Getriebe	5 000	35 000	(20 000)	80	100	3 ... 13	(3 ... 35) ¹⁾	98	99,5	0,4 ... 0,15	1,0 ... 0,2
	Kegelrad-Getriebe	500	4 000	50 000	40	120	1 ... 5	8	97	99	0,8 ... 0,4	2,5 ... 0,6
	Hypoidgetriebe	300	1 000	20 000	30	50	4 ... 8	1 ... 50	50	< 90	1,0 ... 0,5	3,0 ... 0,7
	Kegel-Stirnrad-Getriebe	1 000	3 000								0,7 ... 0,3	2,0 ... 0,5
	Schneckengetriebe	90	1 000	30 000	25	70	5 ... 50	1 ... 300	20 ²⁾	97 ²⁾	0,6 ... 0,2	4,5 ... 2,0
	Zylinder-Schn.-Getriebe	5	75	10 000	20	50	1 ... 5	100	40	95	2,5 ... 1,0	3,0 ... 1,5
Reibradgetriebe		20	200	10 000	25	50	1 ... 6	10	90	98	20 ... 3,0	30 ... 8,0
Zugmittelgetriebe	Kettengetriebe	200	3 000	10 000	10	40	1 ... 6	10	97	98	2,0 ... 0,5	10 ... 4,0
	Flachriemengetriebe	150	3 000	200 000	60	120	1 ... 5	20	96	98	4,0 ... 0,5	6,0 ... 1,5
	Keilriemengetriebe	100	4 000	6 000	30	40	1 ... 10	15	93	94	3,0 ... 0,4	5,0 ... 1,0
	Zahnriemengetriebe	100	(400)	30 000	40	70	1 ... 10	12	96	98	1,0 ... 0,25	4,0 ... 1,0
Hydraulische Getriebe	hydrostatische Getriebe	200	1 000	10 000 ³⁾			... 7		85 (max)	90 (max)		1,3 ... 1,7
	hydrodynamisches Getriebe	1 000	10 000	5 000			1 ... 5		85 (max)	90 (max)		0,5 ... 1,5



ETH

Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

IWF

Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigung
Institute of Machine Tools and Manufacturing

Getriebetypen

Bauarten von Zahnradgetriebe

- **Zylinderräder** (parallele Achsen)
aussen- und innenverzahnt;
gerad-, schräg oder doppelschräg-
verzahnt
- **Kegelrad** (senkrecht oder radial
gegeneinander versetzte Achsen)
gerad-, schräg- und bogenverzahnt
- **Zylinderschraubräder** (gekreuzten
Achsen)
- **Zylinderschneckengetriebe**



ETH

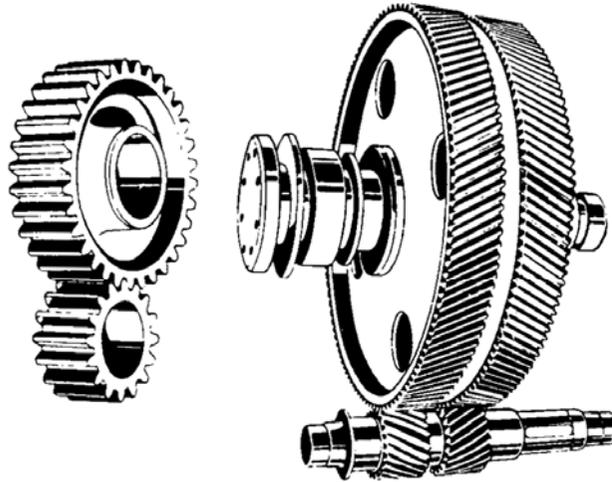
Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

IWF

Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigung
Institute of Machine Tools and Manufacturing

Getriebetypen

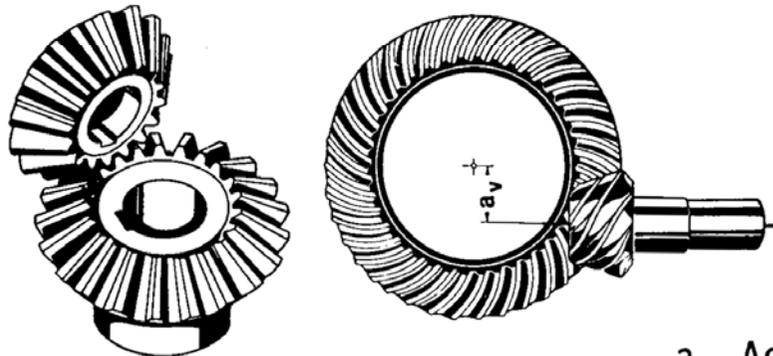
Zylinderräder



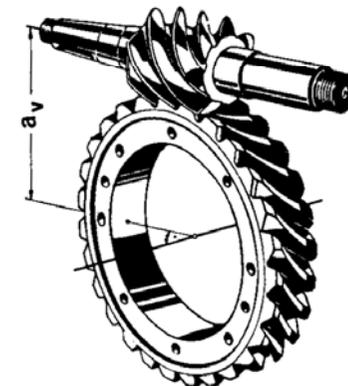
Zylinderschraubräder



Kegelräder



Schneckentrieb



a_v Achsversatz



ETH

Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

IWF

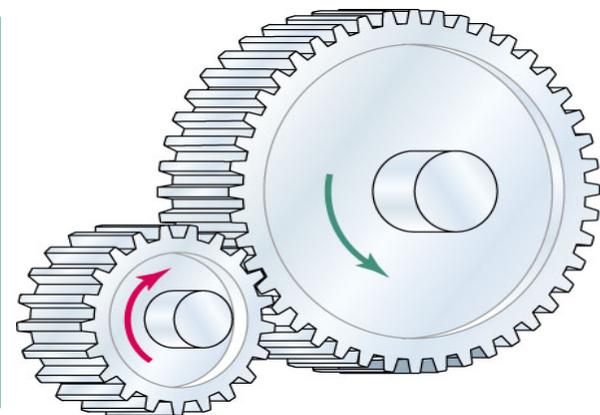
Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigung
Institute of Machine Tools and Manufacturing

Getriebetypen

Stirnradgetriebe



weitverbreiteter, häufiger Typ
geradverzahnt, parallele Wellen
gesamte Breite auf einmal im
Eingriff → laut
keine axiale Kraft
billig, einfache Herstellung ▶



ETH

Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

IWF

Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigung
Institute of Machine Tools and Manufacturing

Getriebetypen

Stirnradgetriebe

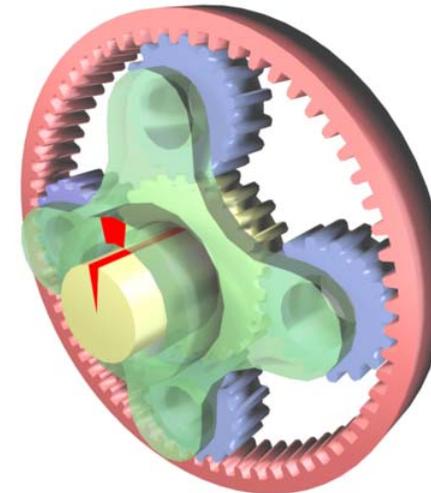
schrägverzahnt



parallele Wellen
für längeren Zahneingriff
höhere Geschwindigkeit
ruhiger
axiale Kräfte, teure Lager



innenverzahnt (Hohlrad)

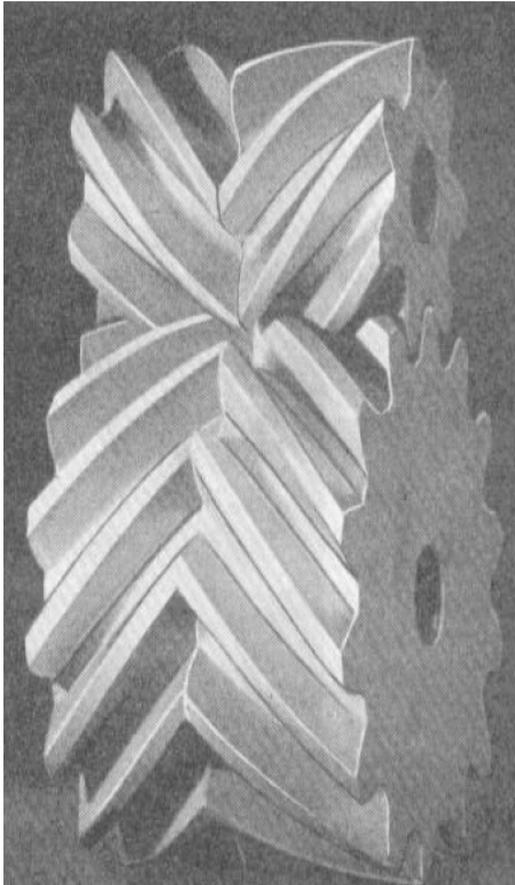


geradverzahnt
parallele Achsen
für kleine Achsdistanzen
Herstellung schwieriger
Lagerung schwieriger
gleiche Drehrichtung



Getriebetypen

Doppelschräggetriebe und Kegelaradgetriebe



Doppelschrägverzahnung
Ausgleich axialer Kräfte
teuer in der Herstellung



Kegelradgetriebe
nicht parallele Achsen
meist 90 °
schrägverzahnt möglich
bogenverzahnt möglich



ETH

Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

IWF

Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigung
Institute of Machine Tools and Manufacturing

Getriebetypen

Schneckengetriebe



nicht parallele Achsen
nicht schneidende Achsen
grosse Übersetzungen
(bis 300:1 möglich)
nur eine Antriebsrichtung
selbsthemmend, Reibung
axiale Kräfte



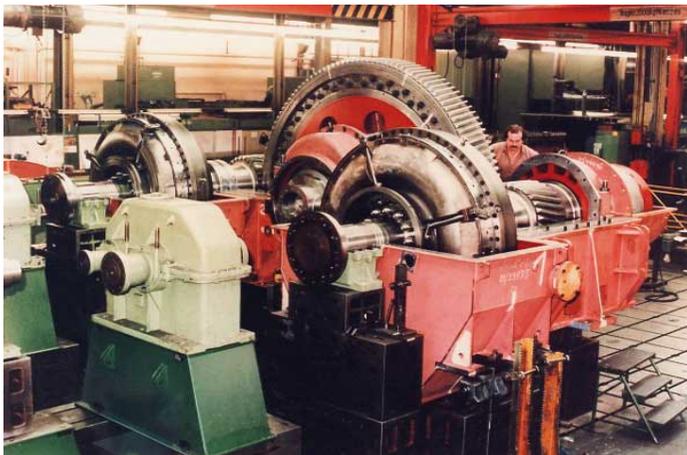
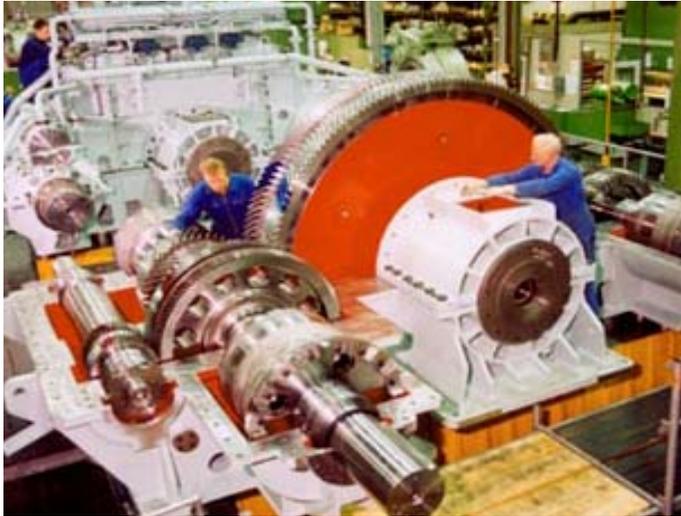
ETH

Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

IWF

Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigung
Institute of Machine Tools and Manufacturing

Eingangsparameter für Zahnräderkonstruktion



- Werkstoff
- Fertigungskosten
- Fertigungsverfahren
- Werkzeugmaschinen
- Dimensionen
- Menge
- Montage



ETH

Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

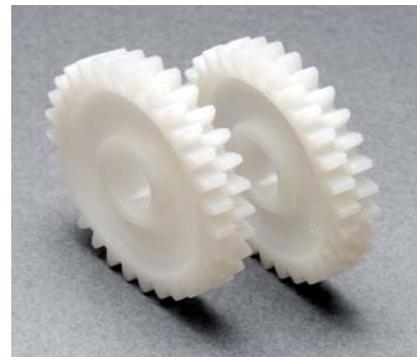
IWF

Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigung
Institute of Machine Tools and Manufacturing

Werkstoffe für Zahnräder



- Zahnräder können aus vielen verschiedenen Materialien hergestellt werden
- Die Zahnräderwerkstoffe sind stark von der Anwendung abhängig
- Häufiger Werkstoffe für Zahnräder: Stahl, Gusseisen, Bronze, Aluminium, diverse Kunststoffe, keramische Werkstoffe, Holz,



ETH

Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

IWF

Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigung
Institute of Machine Tools and Manufacturing

Werkstoffe für Zahnräder

Werkstoffauswahl

- Stähle sind noch die meistverwendete Werkstoffe für Zahnräder im Bereich des Maschinenbaus, grosse Zahnräder aus GJS
- Die Entwicklung und Herstellung leistungsfähiger Zahnradgetriebe erfordert umfassendes Wissen über die möglichen Zahnradwerkstoffe und deren Eigenschaften (diverse Stahlsorten zu Verfügung, andere Materialien)
- Da die komplexe Beanspruchung der Zähne an der Oberfläche und bis in eine bestimmte Tiefe wirkt, sind vor allem an die Randschicht Anforderungen zu stellen
- Nur im Ausnahmefall werden Werkstoffe ohne Wärmebehandlung und Randschichtverfestigung bei der Zahnradherstellung verwendet
- Ziele von Werkstoffauswahl, Wärmebehandlung und Randschichtverfestigung sind die Auswahl eines kostengünstiges Werkstoffs, der alle konstruktiven und fertigungstechnischen Forderungen erfüllt



ETH

Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

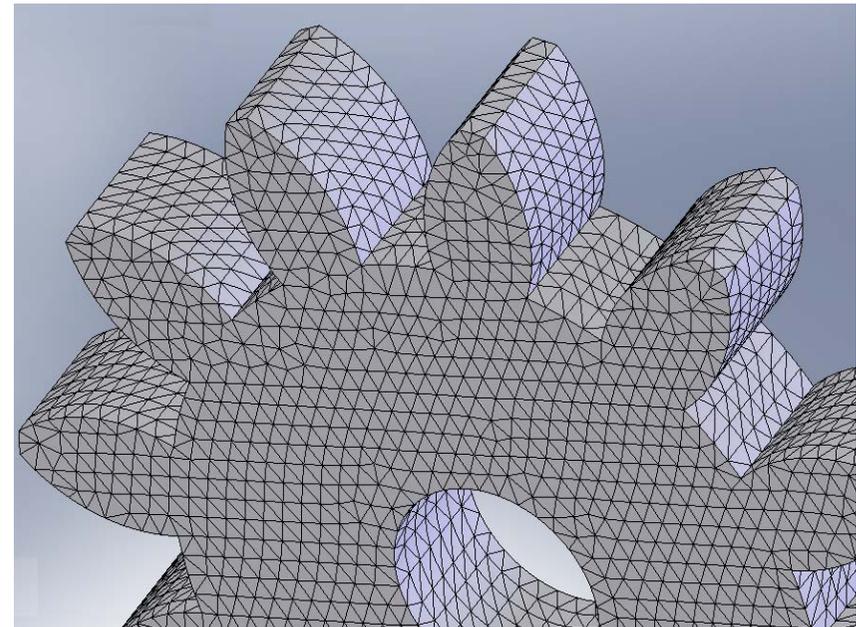
IWF

Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigung
Institute of Machine Tools and Manufacturing

Dimensionierung der Zahnräder

Dimensionierung der Zahnräder ist abhängig von:

- Übersetzungsverhältnis
- Umdrehungen
- Leistung
- Werkstoff
- Abstand zwischen Zahnräder
- Beanspruchung und Lebensdauer



ETH

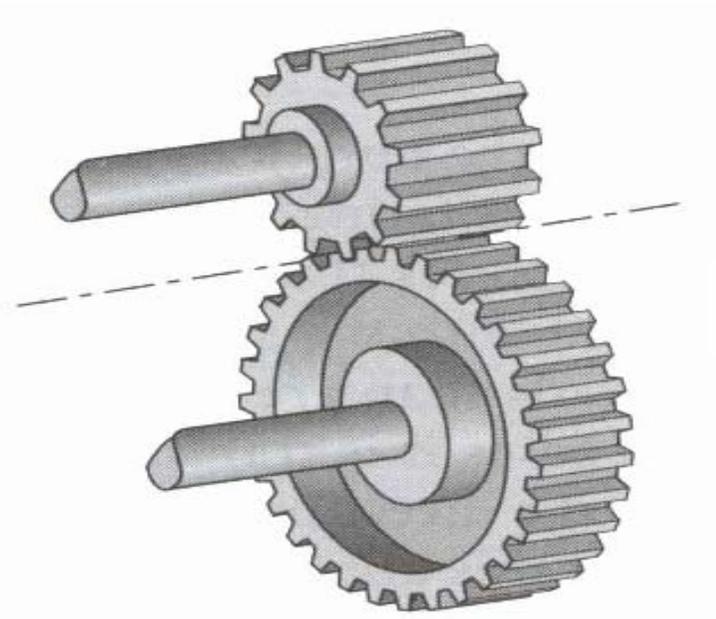
Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

IWF

Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigung
Institute of Machine Tools and Manufacturing

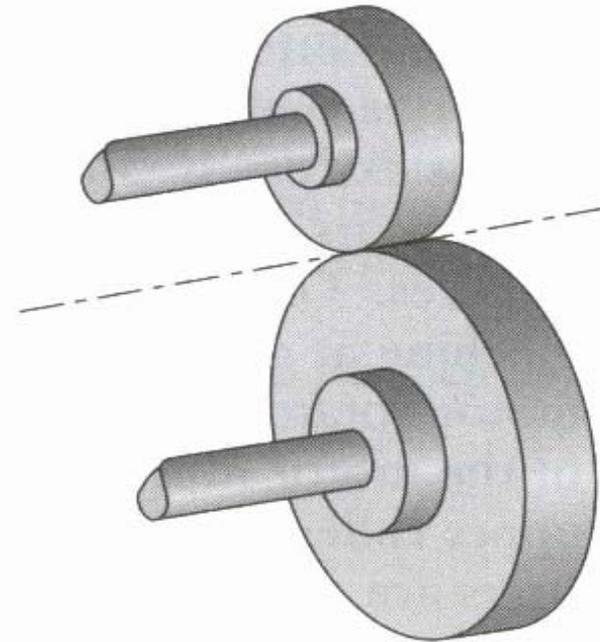
Grundlagen der Verzahnung

Formschluss ohne Schlupf



höhere Momentübertragung
kleinere radiale Kräfte (grösster Anteil geht in azimutale Momenterzeugung)

Reibschluss mit Schlupf (1-3%)



kleinere Momentübertragung
grössere radiale Kräfte (nur rund 10% azimutale Momenterzeugung)



ETH

Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

IWF

Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigung
Institute of Machine Tools and Manufacturing

Grundlagen der Verzahnung

Die Aufgaben des Getriebes sind:

- Änderung kinematisch-dynamischer Grössen (Drehzahl, Drehrichtung, Drehmoment, ...)
- Änderung der Lage des Abtriebes zum Antrieb (Achsabstand, Winkellage zwischen An- und Abtrieb, ...)
- Mechanische Leistung teilen oder zusammenführen



Übersetzungsverhältnis (i)

Das Verhältnis der Drehzahlen in einem Getriebe in Richtung des Leistungsflusses wird als Übersetzungsverhältnis (i) bezeichnet

$$i = \frac{\omega_1}{\omega_2}$$



ETH

Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

IWF

Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigung
Institute of Machine Tools and Manufacturing

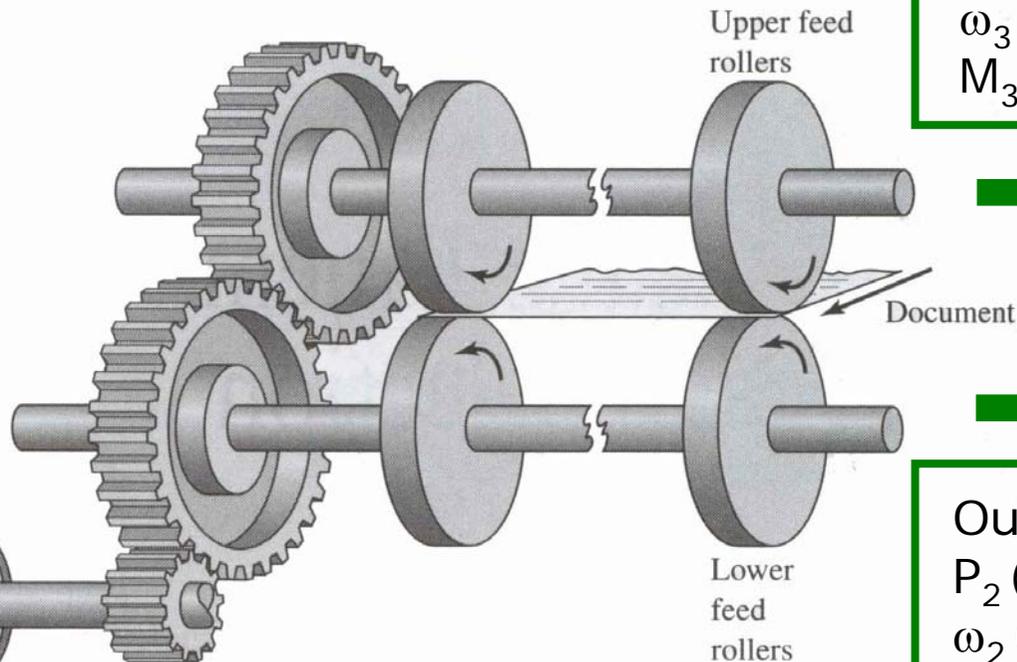
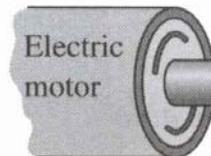
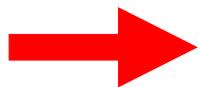
Grundlagen der Verzahnung

Leistungsfluss durch Getriebestufe

Input, Output von

- Leistung, Drehmoment, Drehgeschwindigkeit

Input:
 P_1 (W)
 ω_1 (rad/sec)
 M_1 (Nm)



Output:
 P_3 (W)
 ω_3 (rad/sec)
 M_3 (Nm)



Output:
 P_2 (W)
 ω_2 (rad/sec)
 M_2 (Nm)

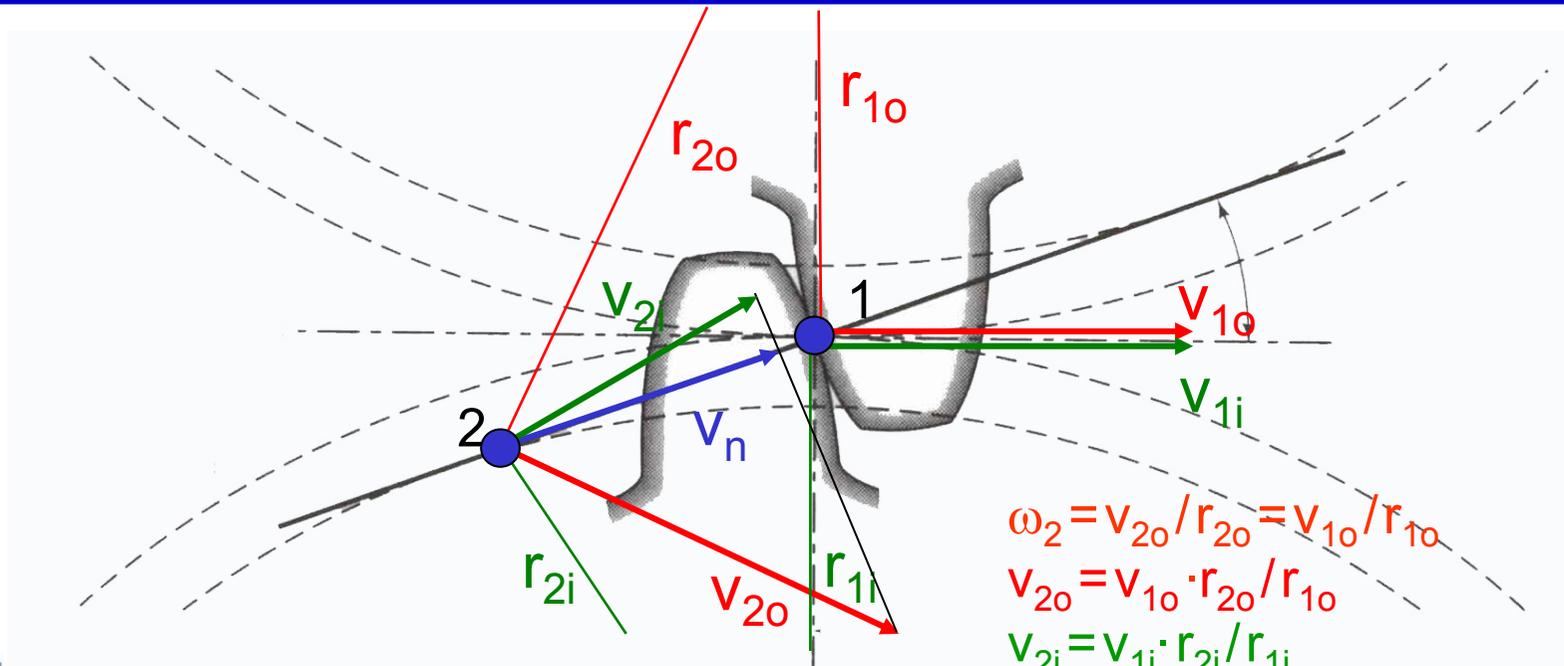


Grundlagen der Verzahnung

Voraussetzungen zur gleichförmiger Bewegungsübertragung

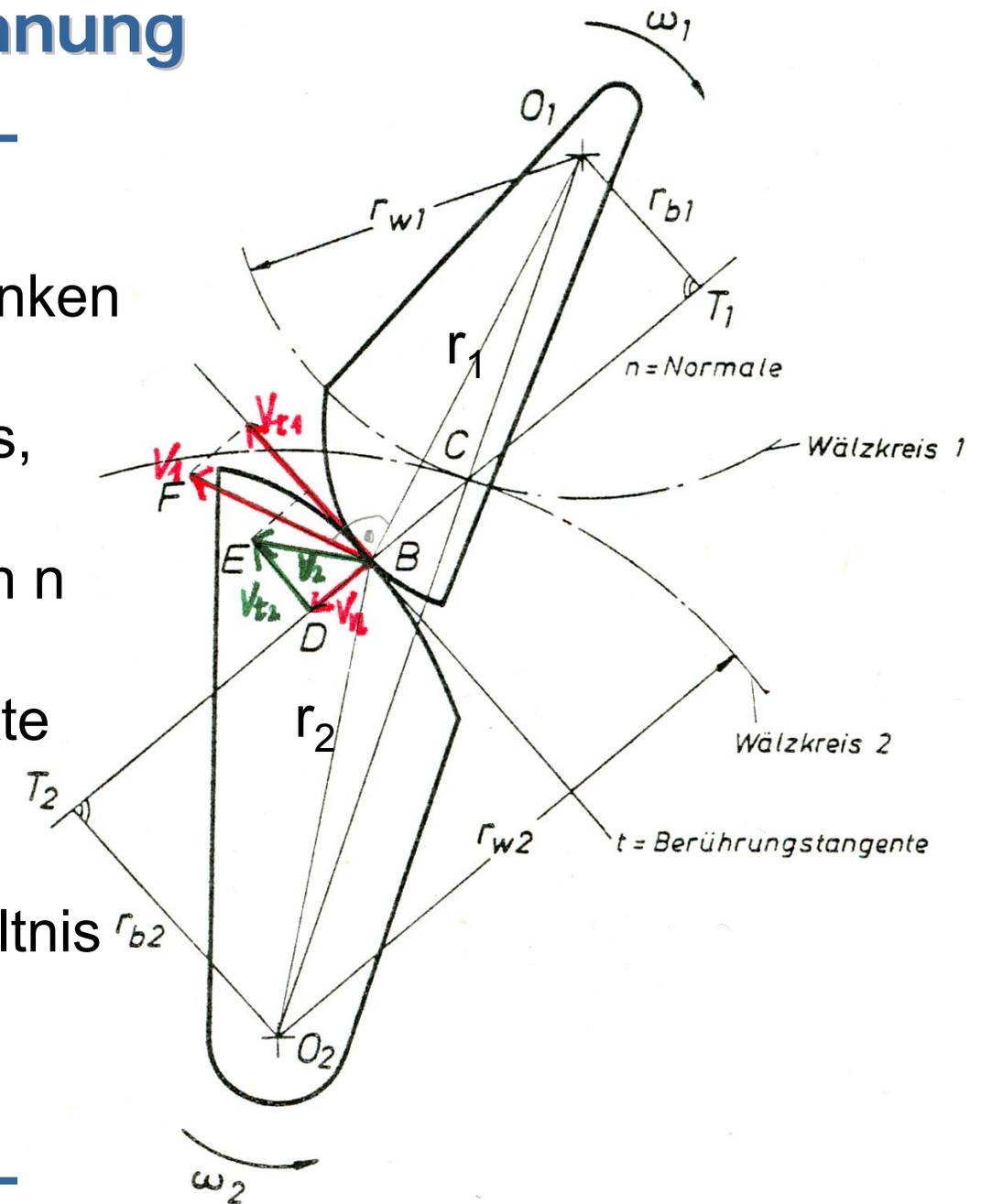
Das Geschwindigkeitsverhältnis zwischen den beiden Rädern muss konstant sein (konstante Geschwindigkeit des angetriebenen Zahnrades)

Die Geschwindigkeitskomponenten senkrecht zu den Berührungstangenten müssen identisch sein (permanenten Kontakt)



Grundlagen der Verzahnung

Allgemeine Wälzbedingung:
Zwei im Eingriff befindliche Zahnflanken übertragen die Drehbewegung mit konstantem Übersetzungsverhältnis, wenn die in allen Berührungspunkten errichteten gemeinsamen Normalen n stets durch den auf der Verbindungsgeraden der Drehpunkte liegenden Wälzpunkt C gehen und dieser die Verbindungsgerade der Drehpunkte im umgekehrten Verhältnis der Winkelgeschwindigkeit teilt.



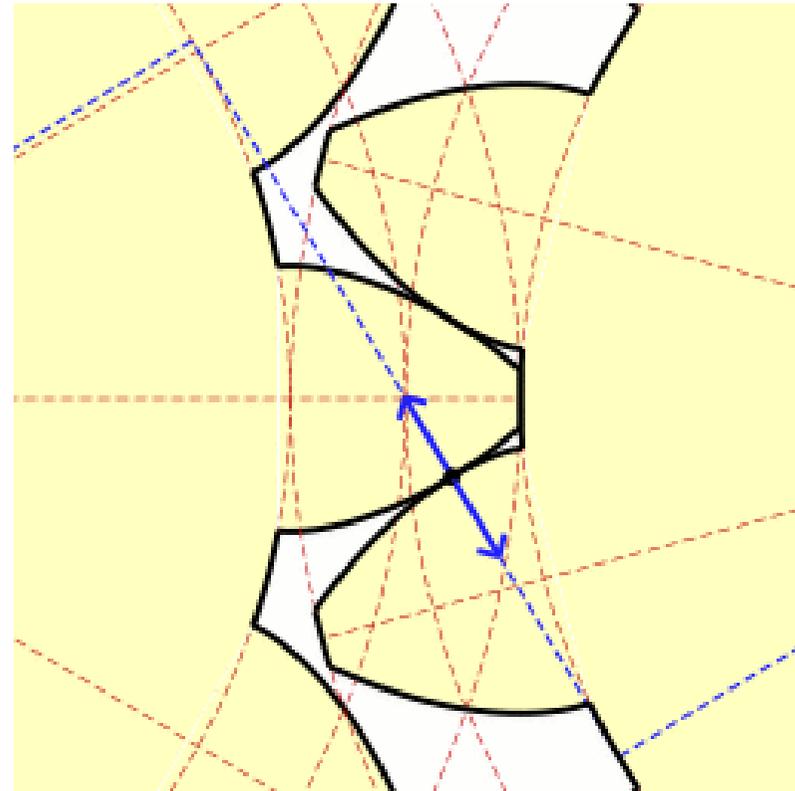
ETH

Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

Grundlagen der Verzahnung

Verzahnungsgesetz

Soll eine Winkelgeschwindigkeit mit gleichförmiger Übersetzung von einer Welle auf eine zweite durch Zahnflanken übertragen werden, muss die gemeinsame Normale der beiden als Flankenprofile verwendeten Kurven in jedem Berührungspunkt durch den Wälzpunkt (C) gehen



ETH

Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

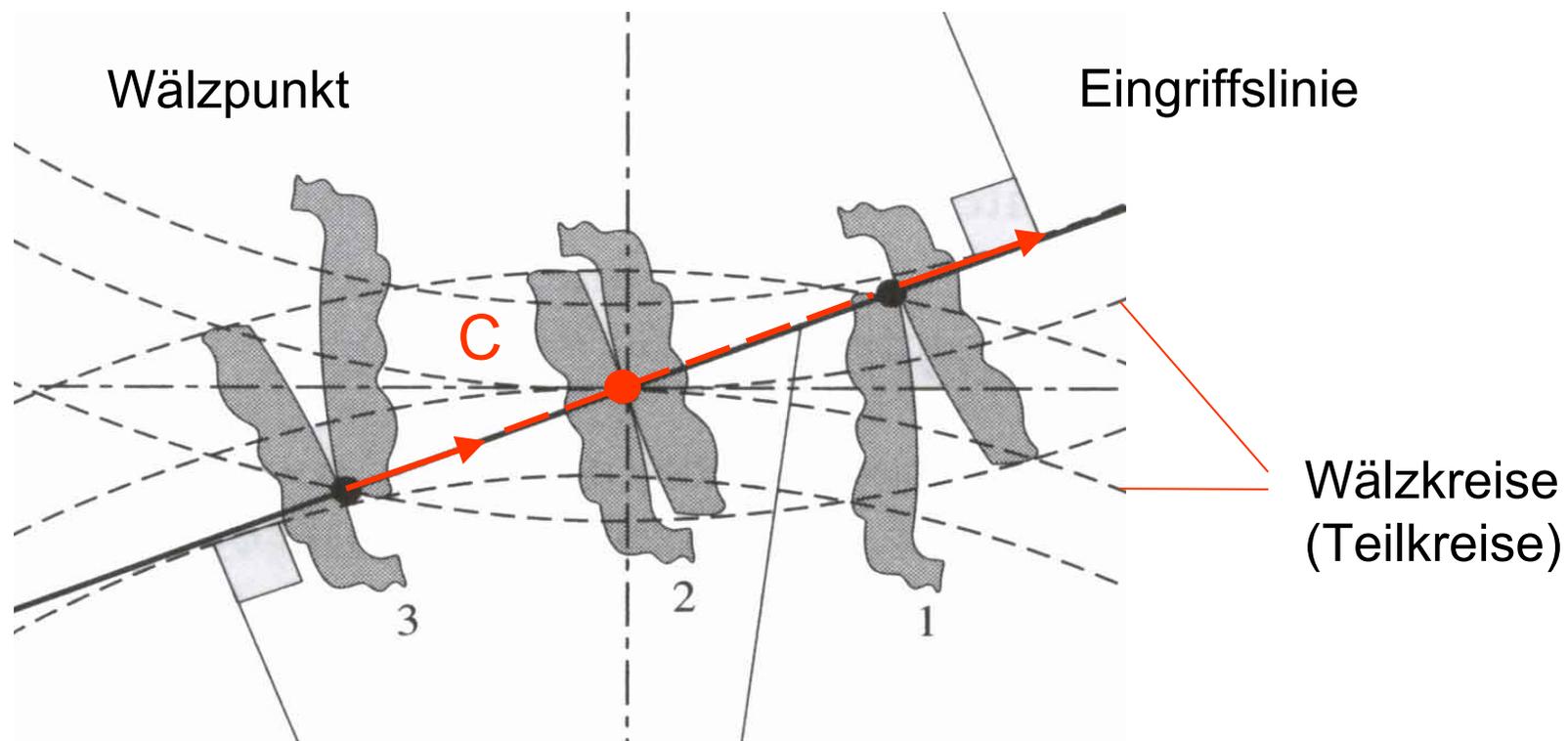
IWF

Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigung
Institute of Machine Tools and Manufacturing

Grundlagen der Verzahnung

Verzahnungsgesetz

Jede Normale auf der Berührungstangente eines Eingriffpunktes zeigt durch den Wälzpunkt (C)



ETH

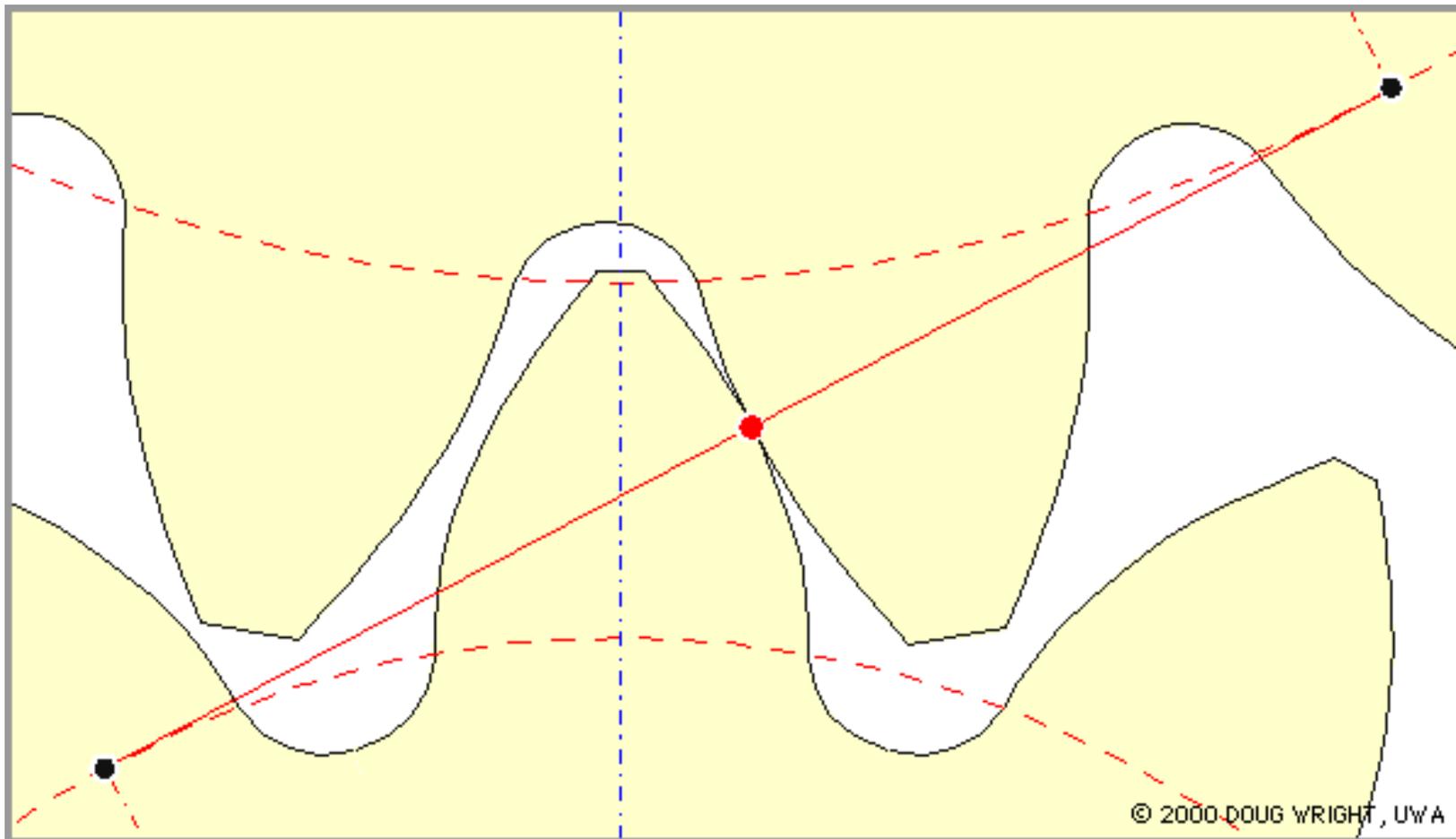
Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

IWF

Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigung
Institute of Machine Tools and Manufacturing

Grundlagen der Verzahnung

Berührungstangente eines Eingriffpunktes zeigt durch den Wälzpunkt



ETH

Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

Profilüberdeckung!

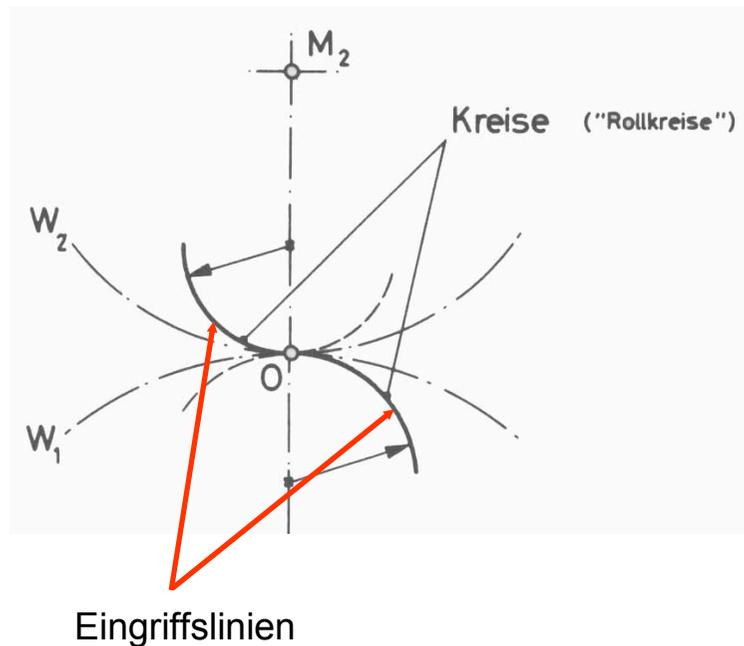
IWF

Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigung
Institute of Machine Tools and Manufacturing

Grundlagen der Verzahnung

Im weiteren gilt:

- Im Wälzpunkt wälzen die Räder und kein Gleiten findet statt
- In allen anderen Berührungspunkten, welche nicht auf dem Wälzkreis liegen, liegt ein tangenciales Gleiten vor (ungleiche Tangentialkomponenten) - Reibarbeit = Verlust
- Die Eingriffslinie kann prinzipiell eine beliebige Form aufweisen; wenn die Eingriffslinie festgelegt ist, dann ist auch die Flankenform definiert



Technisch brauchbare Flankenformen

- Theoretisch möglich, aber praktisch unbrauchbar sind Profile, zu denen sich als Gegenprofile Spiralen, Schleifen o. ä. ergeben (nicht herstellbar)
- Die wesentlichen Arten von Profilformen sind Zykloidenverzahnungen, Triebstockverzahnungen, Wildhaber-Novikov-Verzahnungen und Evolventenverzahnungen
- Praktische Bedeutung als Verzahnungsprofile besitzen nur die zyklischen Kurven. Sie entstehen durch Abrollen eines Kreises auf einem anderen Kreis (Zykloide) oder einer Gerade auf einem Kreis (Evolvente)
- Entscheidend für die Durchsetzung der Evolventenverzahnung waren die fertigungstechnischen Vorteile wie Unempfindlichkeit gegen Achsabstandsänderungen und Möglichkeiten der Profilverschiebung



ETH

Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

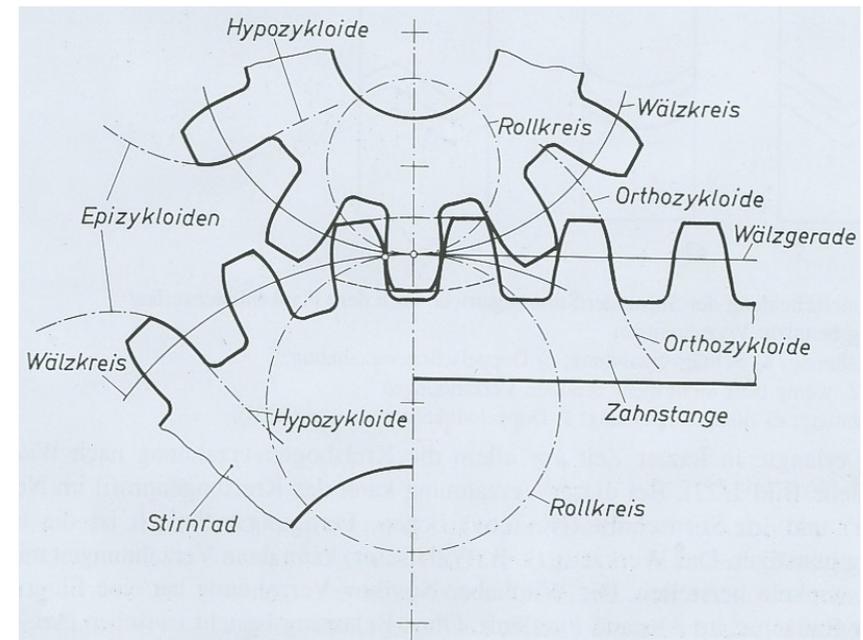
IWF

Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigung
Institute of Machine Tools and Manufacturing

Technisch brauchbare Flankenformen

Zykloidenverzahnung

- Wird durch Hypo- und Epizykloiden gebildet
- Vorteil: hohe Flankentragfähigkeit (niedrige Hertzsche Pressung) und leichter kleinere Zähnezahlen (gegenüber Evolventengeradverzahnungen) möglich
- Nachteil: Werkzeuge mit Zykloidenverzahnungen sind nicht geradflankig und deshalb teurer, und Zykloidenverzahnungen sind sehr empfindlich gegen Achsabstandabweichungen
- Wird nur in Ausnahmefällen angewendet: Uhrenindustrie

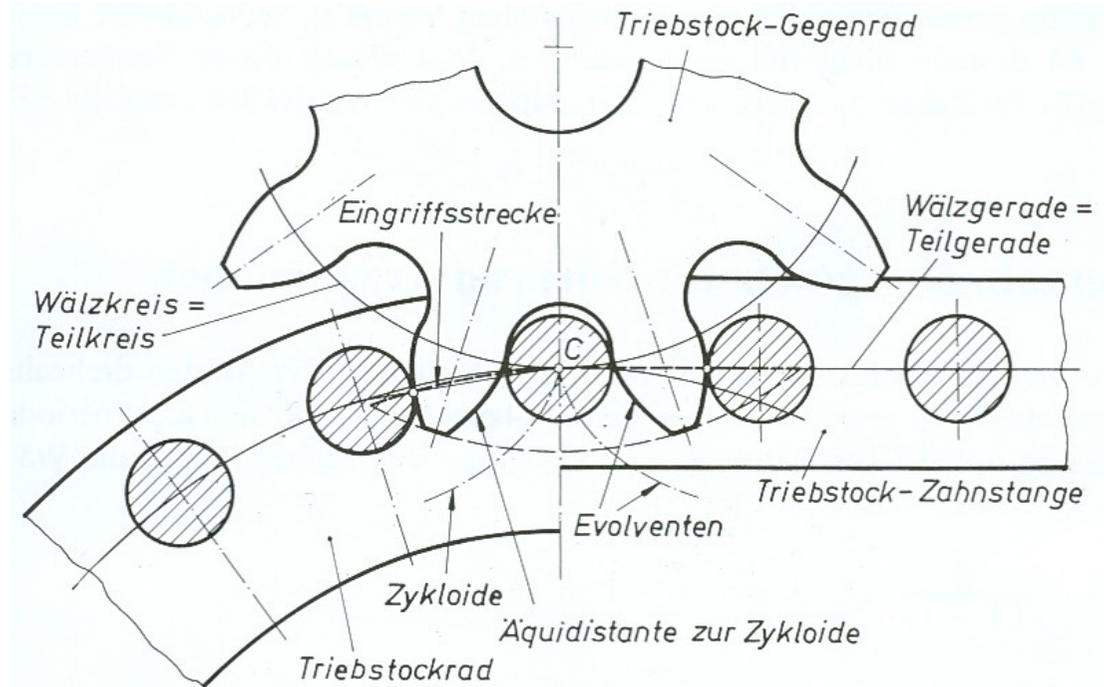


Zykloidenverzahnung

Technisch brauchbare Flankenformen

Triebstockverzahnung

- Stellt eine entartete Zykloidenverzahnung dar (Punktverzahnung erweitert durch Zapfen)
- Anwendung vorwiegend bei grossen Drehkränzen der Fördertechnik
- Fertigung einfacher
- Wegen des Verschleisses kommen nur kleine Umfangsgeschwindigkeiten in Betracht

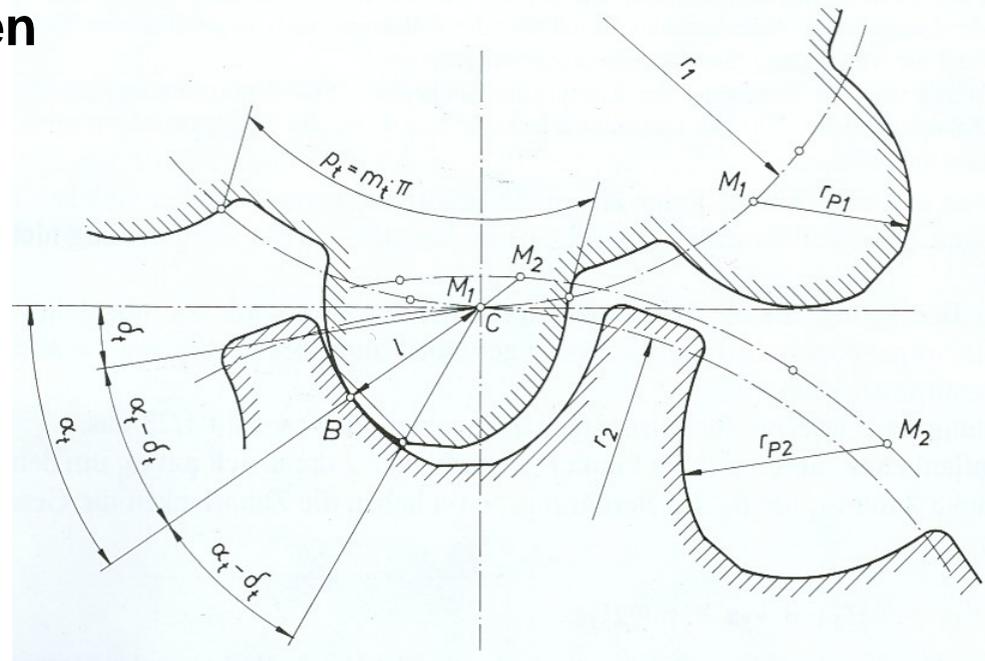


Triebstockverzahnung

Technisch brauchbare Flankenformen

Wildhaber-Novikov-Verzahnungen

- Der Vorteil der Wildhaber-Novikov-Verzahnungen gegenüber der Evolventenverzahnung ist die 1,5 bis 3-fach höhere Zahnflanken-tragfähigkeit
- Zu den Nachteilen gehören die wegen der konzentrierten Belastung meist geringere Zahnfusstragfähigkeit gegenüber der Evolventenverzahnung, Empfindlichkeit bei Achsabstandsänderungen, Herstellungskosten und Beschränkung auf vergütete Verzahnungen

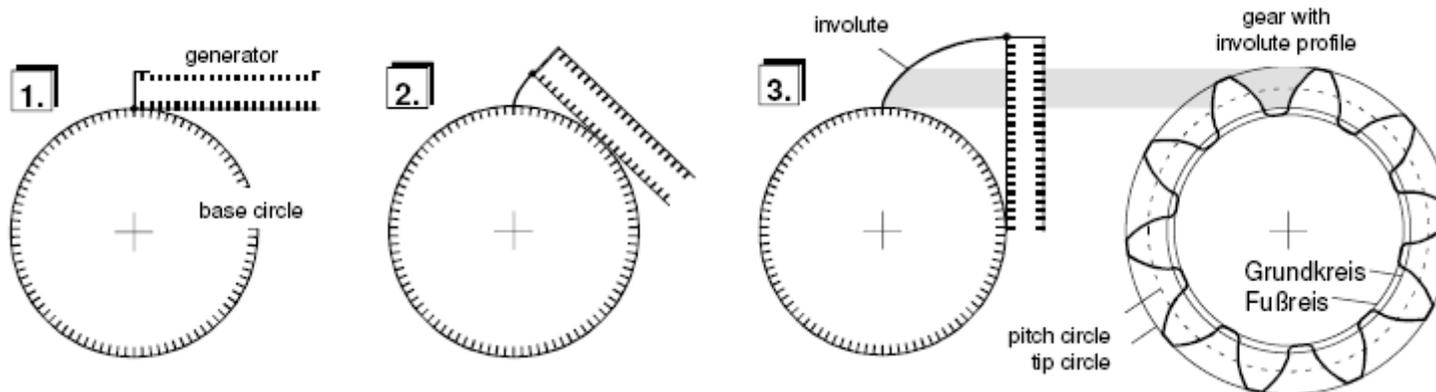
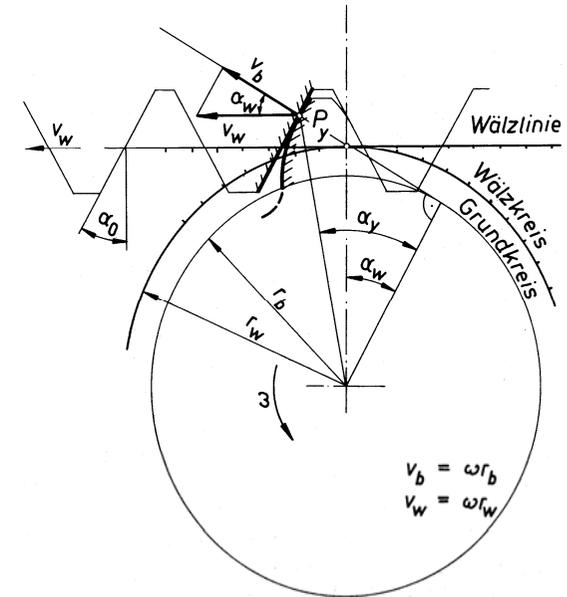


Wildhaber-Novikov-Verzahnungen

Technisch brauchbare Flankenformen

Evolvente

- Die Form ist nur zwischen Kopfkreis und Grundkreis definiert. Unterhalb des Grundkreises ist möglichst grosse Rundung (Festigkeit, Kerbwirkung)!
- Kann auch durch eine auf dem Wälzkreis abwälzende Zahnstange, deren Flankenwinkel mit dem Eingriffswinkel übereinstimmt, beschrieben werden

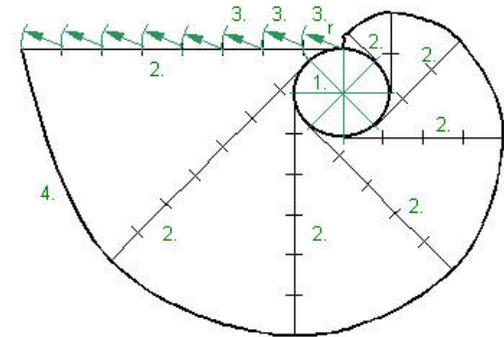


Technisch brauchbare Flankenformen

Evolvente

VORTEILE

- Der Berührungspunkt wandert auch über die Flanke der Zahnstange → gleichmässiger Verschleiß als Ursache, dass alle Herstellverfahren auf dem Abwälzen eines zahnstangenähnlichen Bezugsprofils beruhen
- Die Winkelgeschwindigkeit ändert sich nicht mit dem Abstand zu den Mittelpunkt des Wälzkreises
- Profilverschiebung ist möglich
- Die Richtung der Kräfte zwischen Zähnen bleibt konstant
- Einfache Werkzeuge sind möglich (Geradflankige)
- Unempfindlichkeit bei Achsabstandsänderungen



NACHTEILE

- Unterschnitt bei kleineren Zähnezahlen
- Berührung von Flanken, die konvexe Profile haben (Aussenverzahnung)



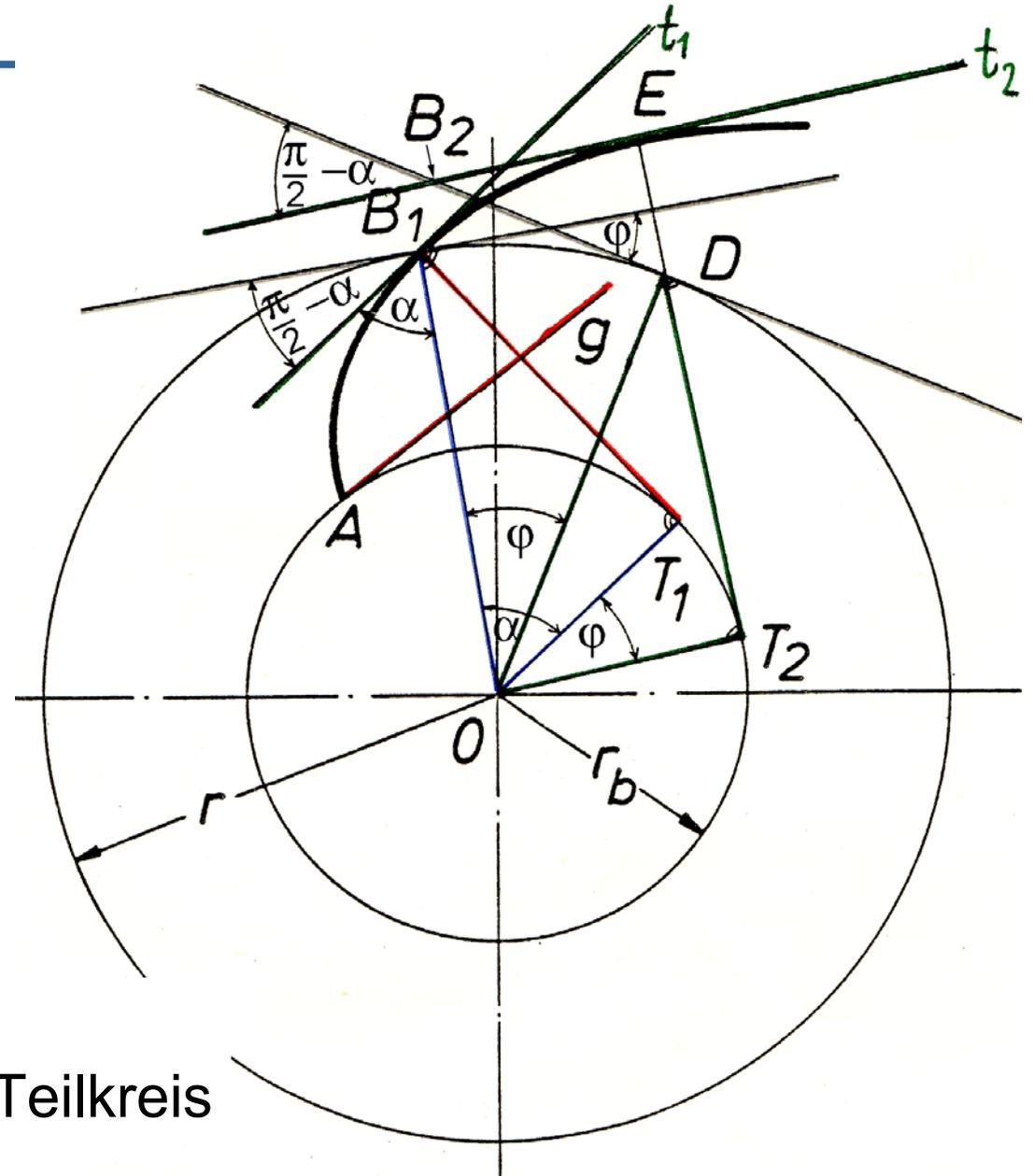
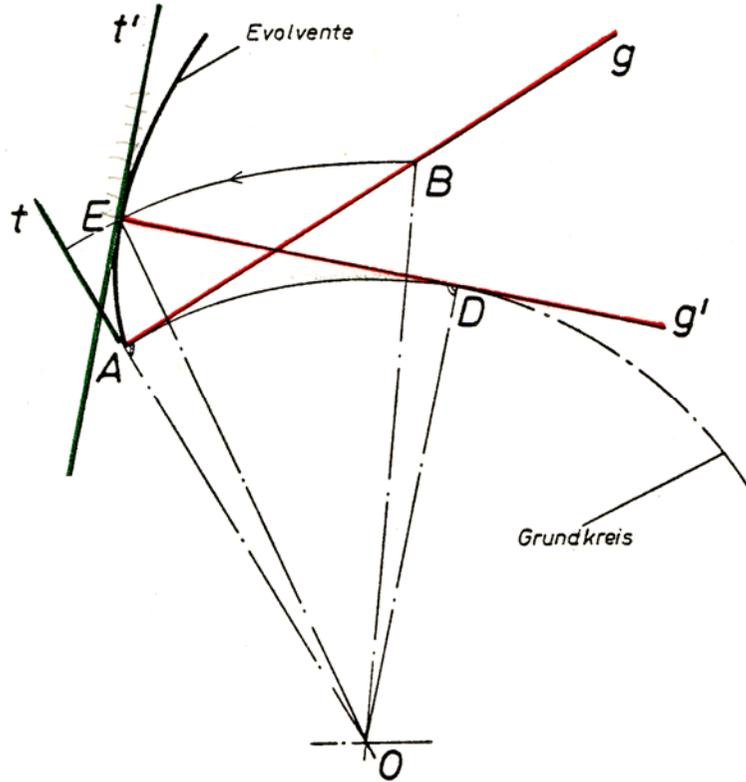
ETH

Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

IWF

Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigung
Institute of Machine Tools and Manufacturing

Hülsenkonstruktion



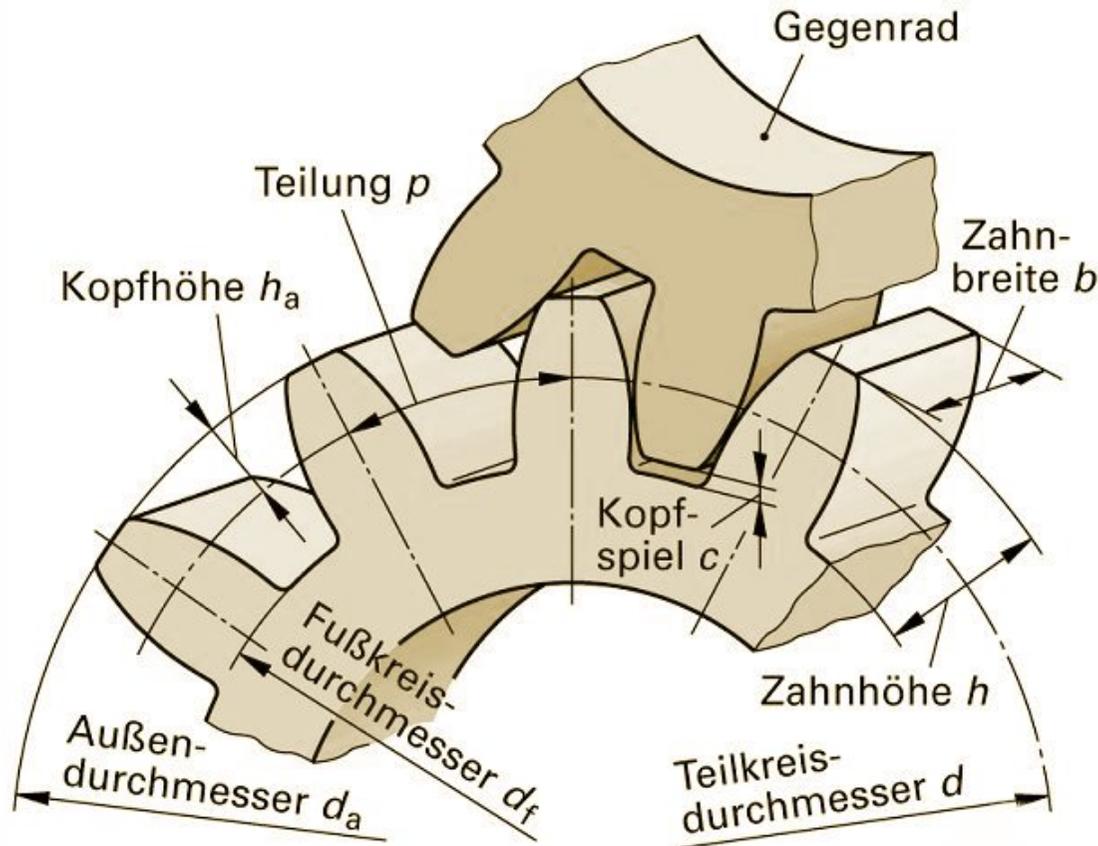
$$r_b = r \cos \alpha$$

$d_b = 2r_b = \text{Grundkreis}$

$d = 2r = \text{Erzeugungswälzkreis} = \text{Teilkreis}$

Geometrie geradverzahnter Stirnräder

Grundbegriffe



- Teilung: $p = \pi d / z$
- Anzahl Zähne: z
- Zahnbreite: b
- Zahnhöhe: h
- Zahnkopfhöhe: h_a
- Zahnfusshöhe: h_f
- Kopfspiel: c
- Teilkreisdurchmesser: d
- Kopfkreisdurchmesser: d_a
- Fusskreisdurchmesser: d_f
- Grundkreisdurchmesser: d_b
- Achsabstand: a



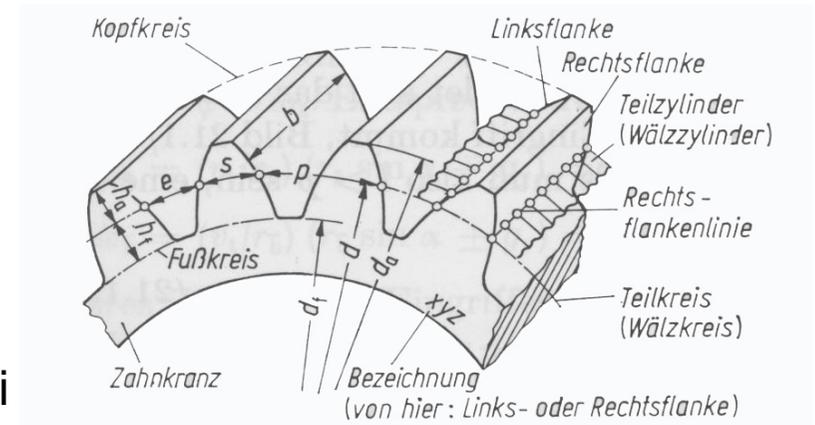
ETH

Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

Geometrie geradverzahnter Stirnräder

Grundbegriffe

- **Achsabstand a :** Abstand zwischen getriebenem und angetriebenem Rad
- **Teilkreisdurchmesser d :** Durchmesser des Teilkreises (Wälzkreises). Kreis auf dem die zwei Ersatzzylinder sich ohne Schlupf abwälzen würden
- **Kopfkreisdurchmesser d_a :** Durchmesser des Kopfkreises. Äusserster Durchmesser des Zahnrades
- **Fusskreisdurchmesser d_f :** Durchmesser des Fusskreises. Kreis auf dem die Zähne stehen
- **Grundkreisdurchmesser d_b :** Durchmesser des Grundkreises. Kreis von dem aus die Zahnflanken konstruiert werden



ETH

Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

IWF

Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigung
Institute of Machine Tools and Manufacturing

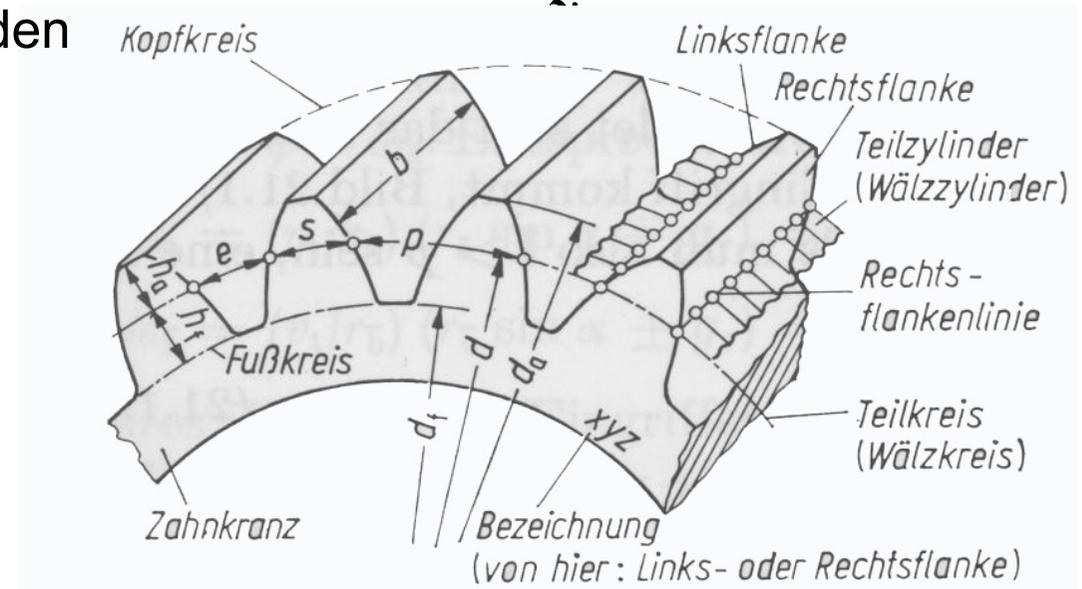
Geometrie geradverzahnter Stirnräder

Grundbegriffe

- **Zähnezahl z** : Anzahl der Zähne des Zahnrads
- **Teilung p** : Ist die Distanz von einer Zahnflanke zur nächsten gleichseitigen Zahnflanke auf dem Teilkreis. Sie kann aus der Zähnezahl und dem Teilkreisdurchmesser berechnet werden

$$p = \frac{\pi d}{z}$$

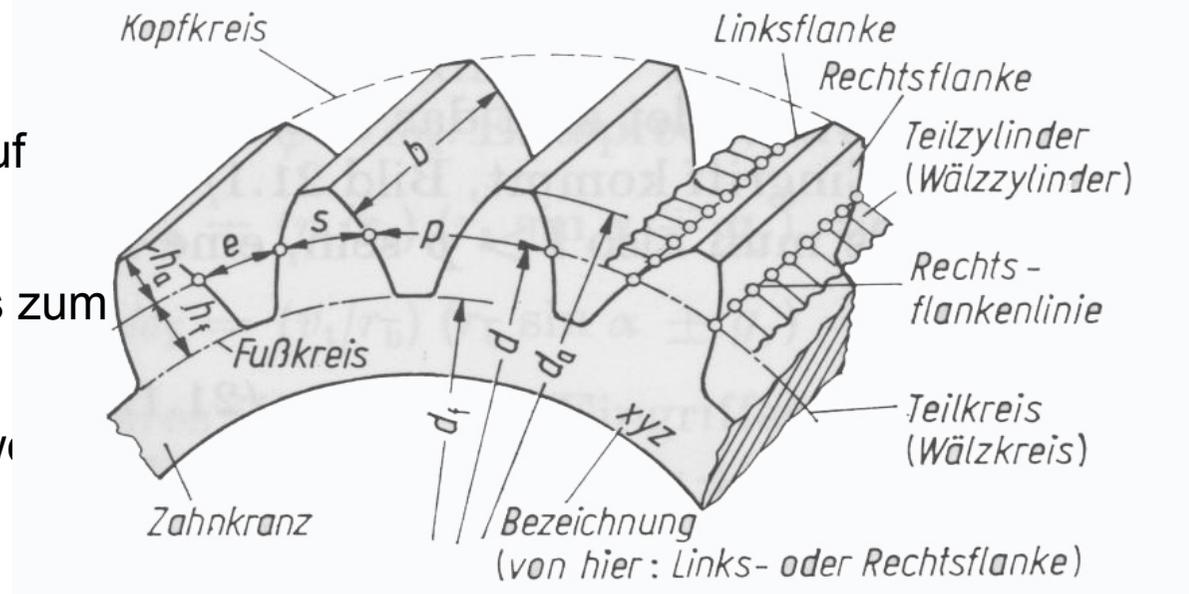
- **Zahnbreite b** : Länge der Zähne parallel zur Zylinderachse
- **Zahnkopfhöhe h_a** : Radiale Distanz zwischen Teilkreis und Kopfkreis
- **Zahnfusshöhe h_f** : Radiale Distanz zwischen Fusskreis und Teilkreis
- **Zahnhöhe h** : Radiale Distanz zwischen Fusskreis und Kopfkreis, und Summe von Kopfhöhe und Fusshöhe
- **Zahndicke s** : Dicke des Zahns auf Teilkreishöhe



Geometrie geradverzahnter Stirnräder

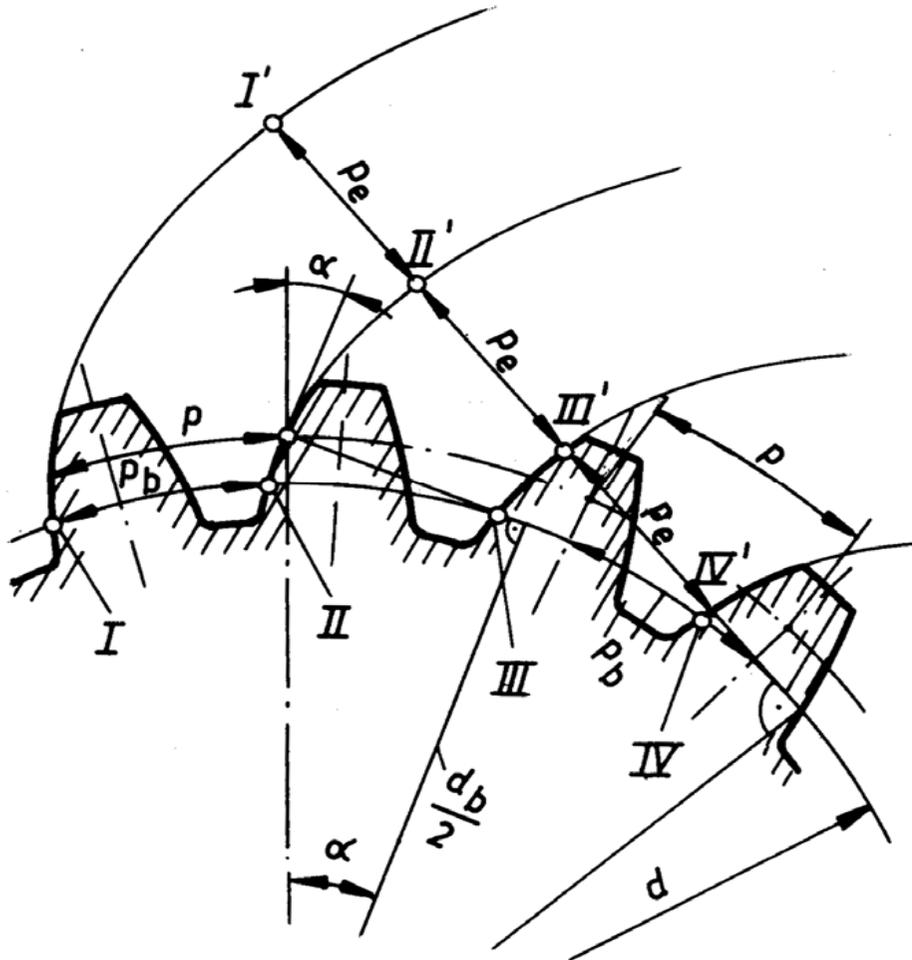
Grundbegriffe

- **Zahnweite e** : Breite der Zahnlücke auf Teilkreishöhe
- **Kopfspiel c** : Abstand des Kopfkreises zum Fusskreis des Gegenrads
- **Flankenspiel j** : Spiel zwischen Zahnweite und Zahndicke des Gegenrads
- **Eingriffslinie**: Linie, die durch die Berührungspunkte der zwei Zahnräder gebildet wird. Sie kann prinzipiell eine beliebige Form aufweisen und hängt direkt mit der Flankenform zusammen (sie definieren sich gegenseitig)
- **Eingriffslänge l** : Bogenlänge, die während der Bewegungsübertragung auf dem Teilkreis durchlaufen wird, Länge der Eingriffsgersten
- **Eingriffswinkel α** : Winkel zwischen der Wälzebene und der Normalen auf die Zahnoberfläche im Wälzpunkt (Eingriffslinie)



Geometrie geradverzahnter Stirnräder

Eingriffsteilung



Abstand zweier paralleler
Tangentialebenen, die an
aufeinanderfolgenden
gleichgerichteten Flanken anliegen

$$p_b = p_e = \frac{\pi d_b}{z} = \frac{\pi d}{z} = p \cos \alpha$$



Geometrie geradverzahnter Stirnräder

Modul (m)

Wichtiges Verzahnungsmass. Viele der weiteren Masse werden auf den Modul bezogen. Mit runden Werten für m erhält man auch für d und a

runde Masse $m = d / z$

- **Teilkreisdurchmesser (d):** $d = m \cdot z$
- **Fusskreisdurchmesser (d_f):** $d_f = d - 2 h_f$
- **Zahnhöhe (h):** $h = h_a + h_f$
- **Zahnkopfhöhe (h_a):** $h_a = m$
- **Zahnfusshöhe (h_f):** $h_f = 1,166 \cdot m$ (nach DIN-Norm)



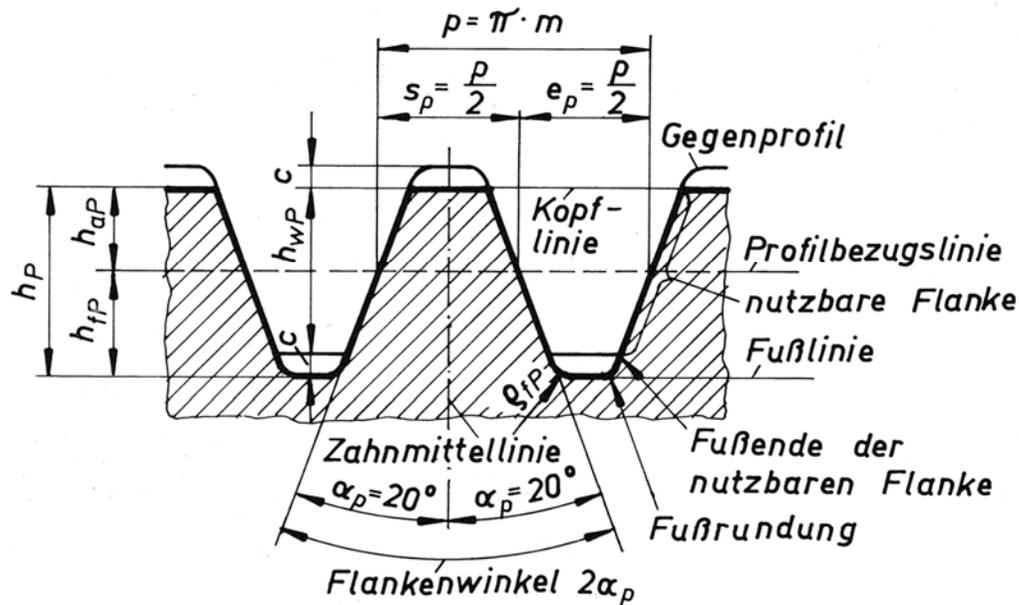
ETH

Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

IWF

Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigung
Institute of Machine Tools and Manufacturing

Geometrie geradverzahnter Stirnräder

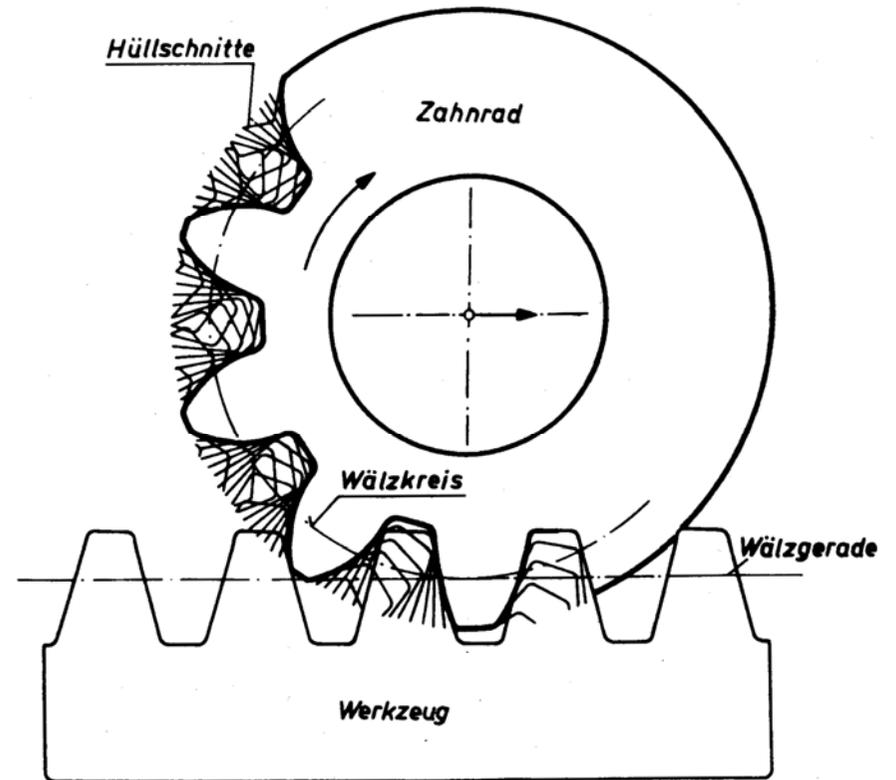


$h_{aP} = 1m$

$h_{fP} = h_{aP} + c$

$c = 0,1 \dots 0,3 \cdot m$ Sonderfälle $c = 0,4 m$

zul. Eingriffswinkel =
 14,5°, 20°, 25°; meist: 20°



Entstehen der Zahnflanken nach dem Abwälzverfahren

- Zahndicke: s
- Zahnweite: e



Wiederholung

- Verzahnungsgesetz
- Eingriffslinie
- Evolventenfunktion
- Hüllschnittverfahren
- Modul



ETH

Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

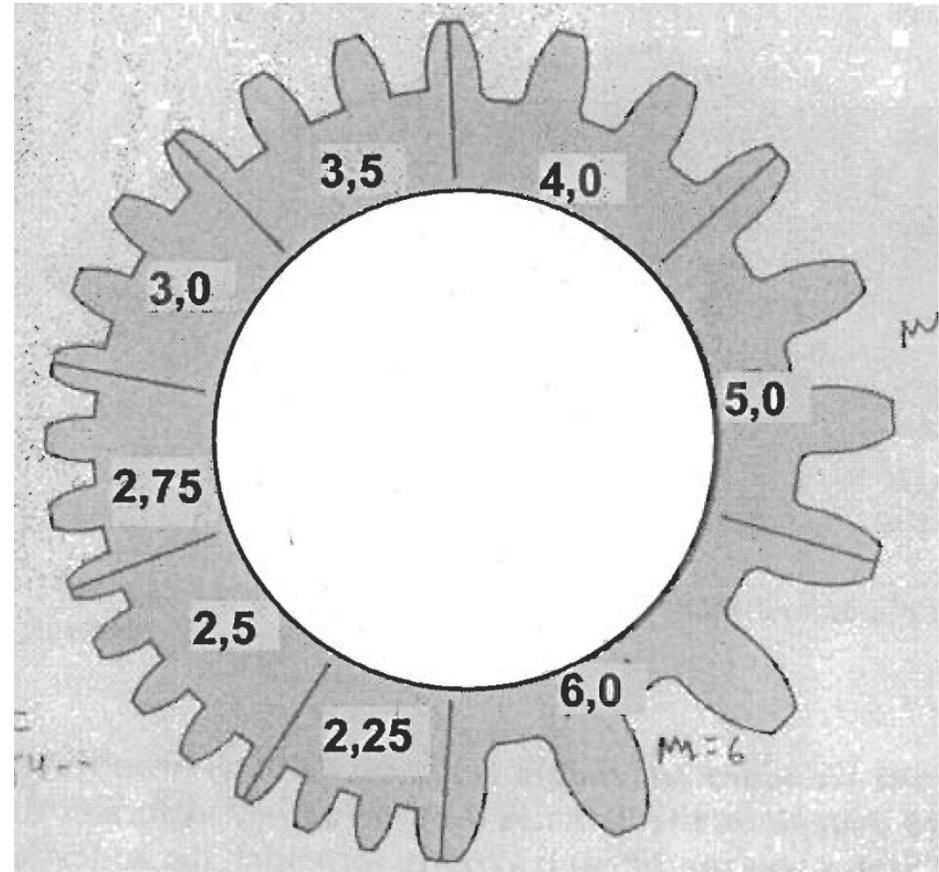
IWF

Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigung
Institute of Machine Tools and Manufacturing

Geometrie geradverzahnter Stirnräder

Modul (m)

- International standardisiert
- Zwei Zahnräder im Eingriff müssen denselben Modul aufweisen
- Achtung: in USA umgekehrt definiert,
Diametral pitch $P_d = z / d$ [1/in]
→ grosse Zahl = kleiner Zahn!



Zusammenhang zwischen Modul und Zahngrösse



ETH

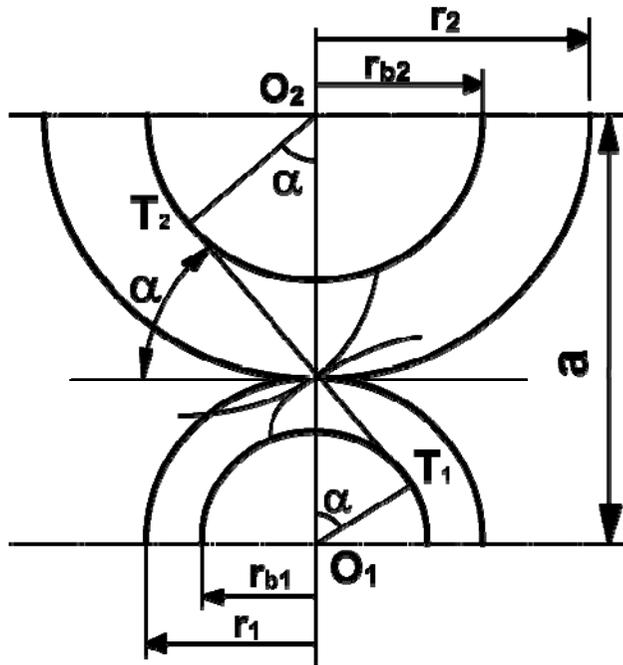
Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

IWF

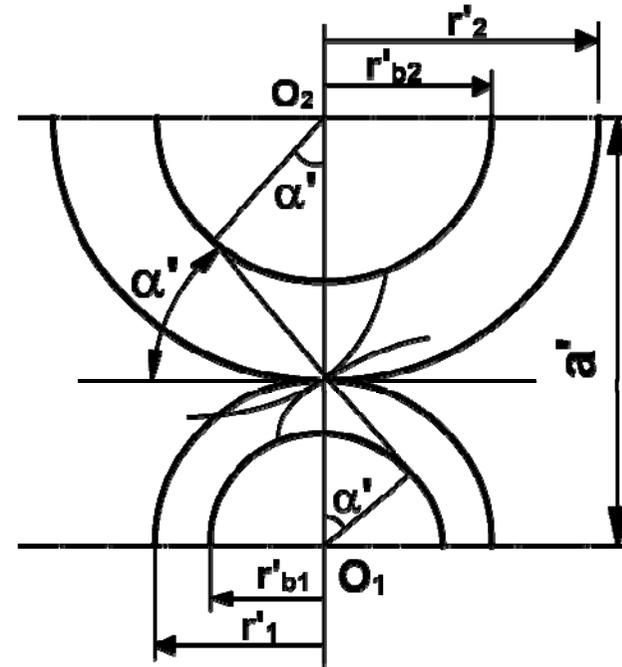
Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigung
Institute of Machine Tools and Manufacturing

Geometrie geradverzahnter Stirnräder

Eingriffswinkel



▪ Eingriffswinkel: α



▪ Eingriffswinkel = $14,5^\circ, 20^\circ, 25^\circ$; meist: 20°

$$\alpha_1 = \arccos \frac{r_{b1}}{r_1} \quad \alpha_2 = \arccos \frac{r_{b2}}{r_2} \quad r_1 = \frac{r_{b1}}{\cos \alpha_1} \quad r_2 = \frac{r_{b2}}{\cos \alpha_2}$$



ETH

Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

IWF

Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigung
Institute of Machine Tools and Manufacturing

Geometrie geradverzahnter Stirnräder

Eingriff zwischen Rädern

- Um Klemmen zu vermeiden, ist ein Flankenspiel erforderlich
- Flankenspiel j : für Flankenspiel bzw. Schmierfilm wird Zahnbreite schmaler, Lücke breiter gestaltet

$$j = 0,05 + (0,025 \dots 0,1) \cdot m$$

- Flankenspiel = Zahnspiel wird auch stark von Toleranz des Achsabstands beeinflusst
- Für gleichgerichtet drehende Räder darf Spiel grösser sein
- Profilüberdeckung: mindestens 1 Zahn muss immer im Eingriff sein
- Angestrebt wird: $m_p > 1,2$ bzw. $> 1,4 - 1,5$ für robustere und weichere Übertragung; die Anzahl der Eingriffszähne ist während der Drehung ungleich



ETH

Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

IWF

Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigung
Institute of Machine Tools and Manufacturing

Geometrie geradverzahnter Stirnräder

Unterschnitt (Interferenz)

- Interferenz tritt oft beim Verwenden zweier sehr unterschiedlich grosser Zahnräder auf
- Das Ritzel (das kleinere Zahnrad) hat in einem solchen Fall zu wenige Zähne
- Es muss gewährleistet sein, dass das Zähneverhältnis zwischen den beiden Rädern Interferenz verhindert
- Gleichung bestimmt die grösstmögliche Anzahl Zähne z_2 für das grössere Rad im Getriebe, wenn die Zähnezahl z_1 für das Ritzel gegeben ist



$$z_2 < \frac{z_1^2 \cdot \sin^2 \alpha - 4 \cdot k}{4 \cdot k - 2 \cdot z_1 \cdot \sin^2 \alpha}$$

$$\text{Wobei } k = \frac{h_{aP0}}{m}$$



ETH

Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

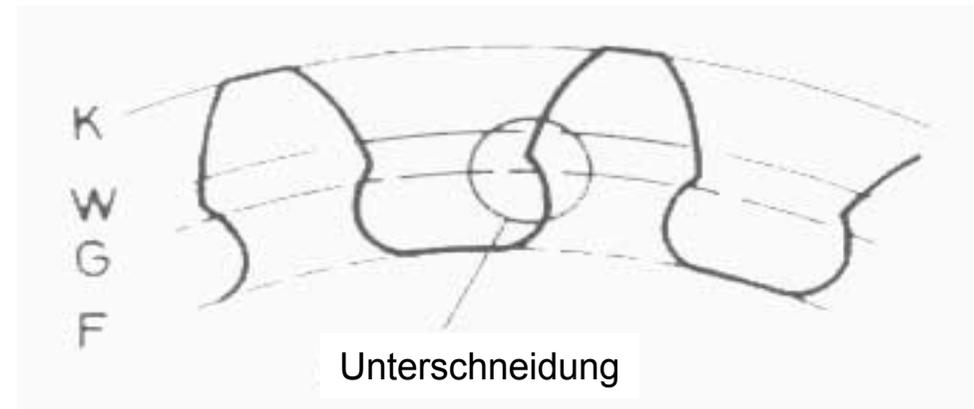
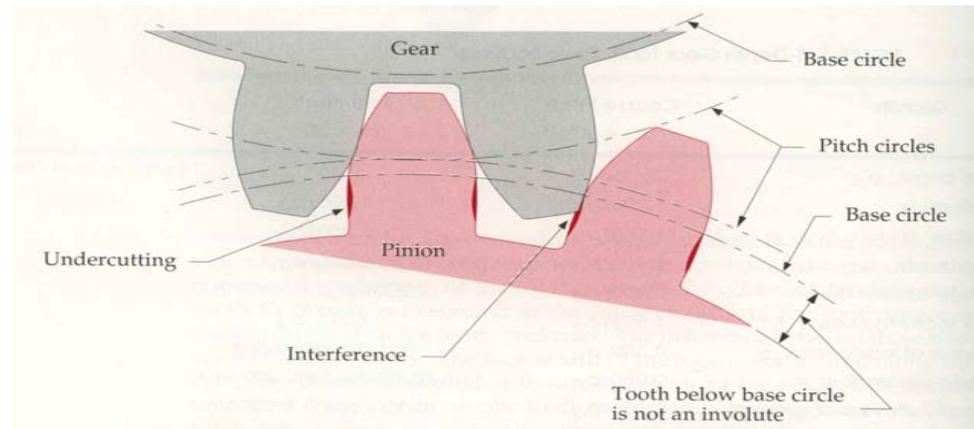
IWF

Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigung
Institute of Machine Tools and Manufacturing

Geometrie geradverzahnter Stirnräder

Minimale Zähnezah (Grenzzähnezahl)

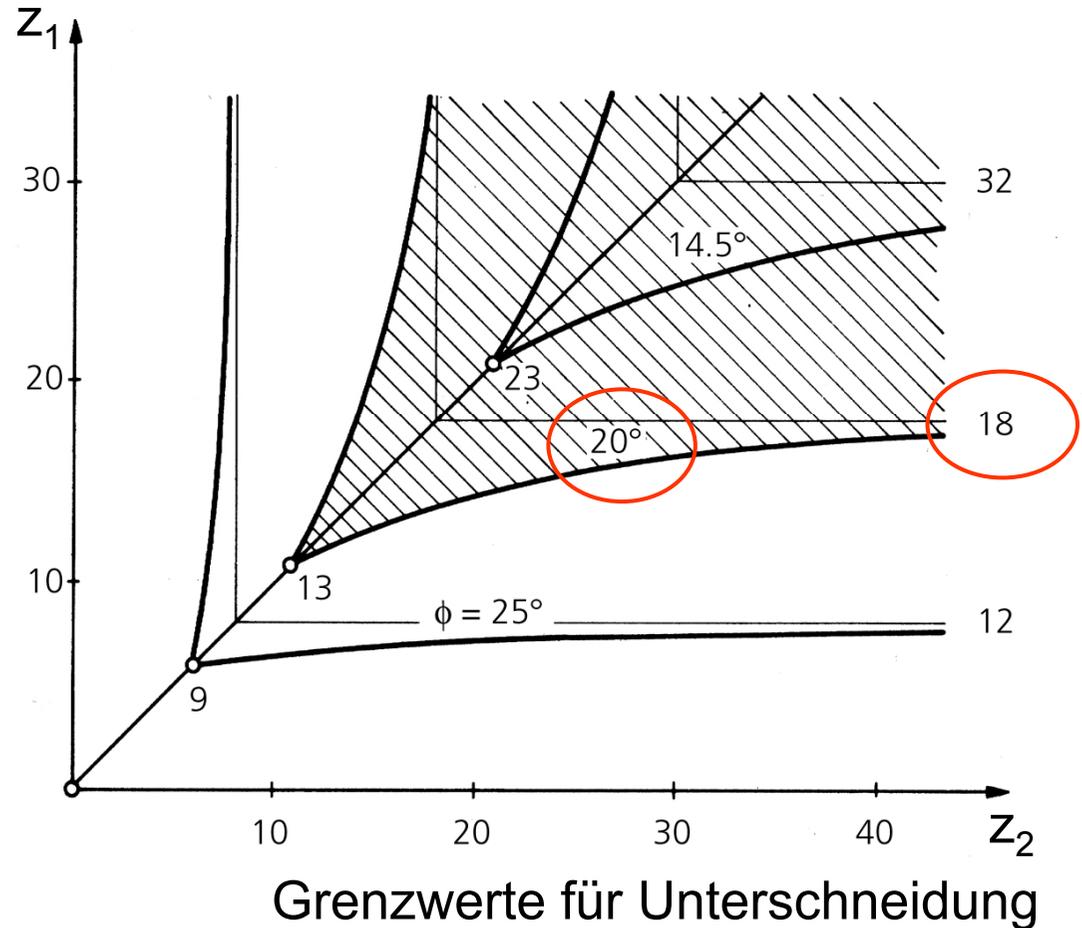
- Trotz grosser Übersetzungen werden kleine Räder angestrebt
- Die minimale Überdeckung und die Gefahr des Eindringens des Kopfes in die Flanke des Gegenrades unterhalb Grundkreis (Unterschneidung) ergibt maximale Grössenverhältnisse zwischen kleinerem und grösserem Rad



Geometrie geradverzahnter Stirnräder

Minimale Zähnezahl

- Unterhalb der Zähnezahlgrenzen 23 (14,5°), 13 (20°) und 9 (25°) für das Ritzel zwingend Interferenz auftritt
- Oberhalb von 32 (14,5°), 18 (20°) und 12 (25°) kann das grosse Rad theoretisch unendlich viele Zähne haben
- Für $z_1 \rightarrow \infty$: $z_2 > \frac{2 \cdot k}{\sin^2 \alpha}$



ETH

Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

IWF

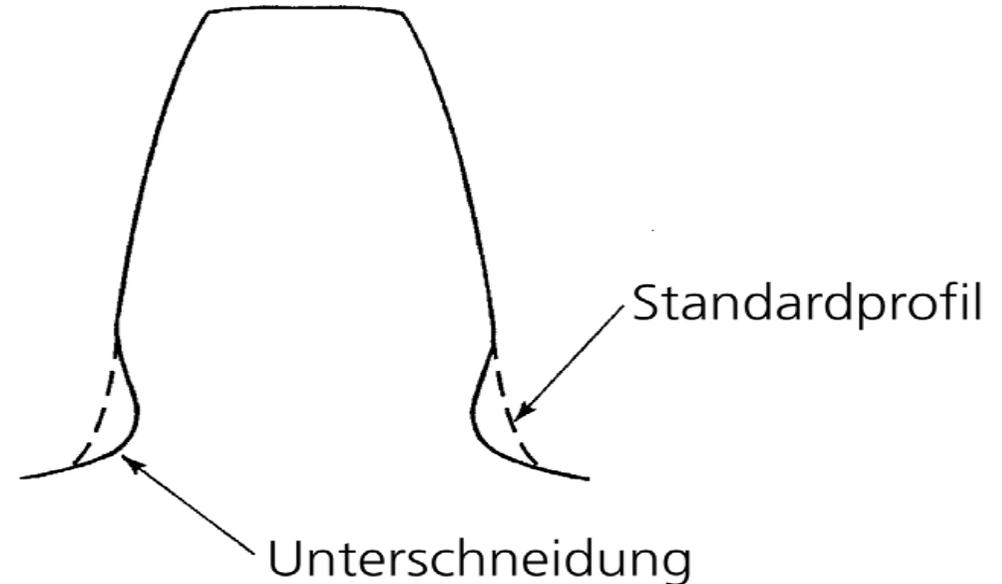
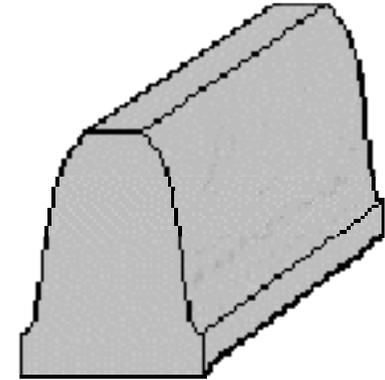
Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigung
Institute of Machine Tools and Manufacturing

Geometrie geradverzahnter Stirnräder

Minimale Zähnezahl

Lösungsmöglichkeiten bei Unterschneidung:

- Kürzung der Zahnhöhe (kleinere Eingriffslänge)
 - verschlechtert Laufruhe und erhöht Lärm
- Grössere Eingriffswinkel (grössere radiale Kräfte)
- Vergrösserung Achsabstand (Profilverschiebung)
- Unterschneidung akzeptieren (Reduktion des Momentes)



ETH

Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

IWF

Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigung
Institute of Machine Tools and Manufacturing

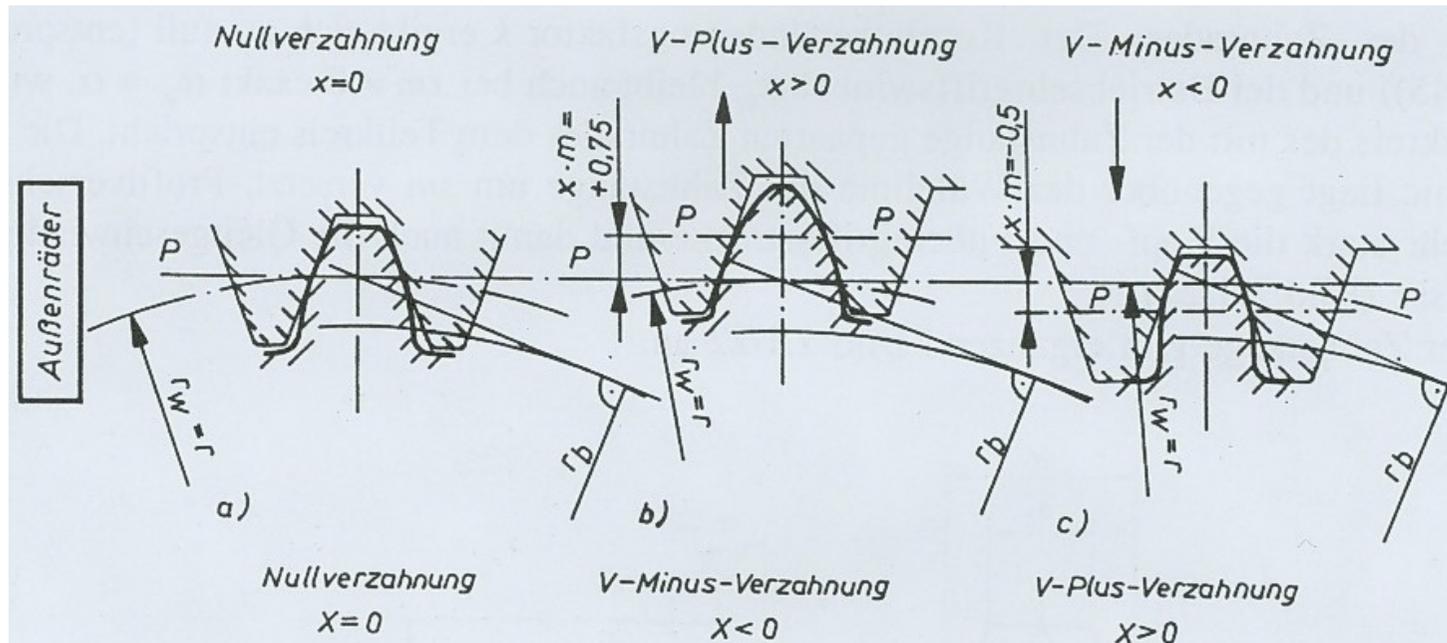
Geometrie geradverzahnter Stirnräder

Profilverschiebung

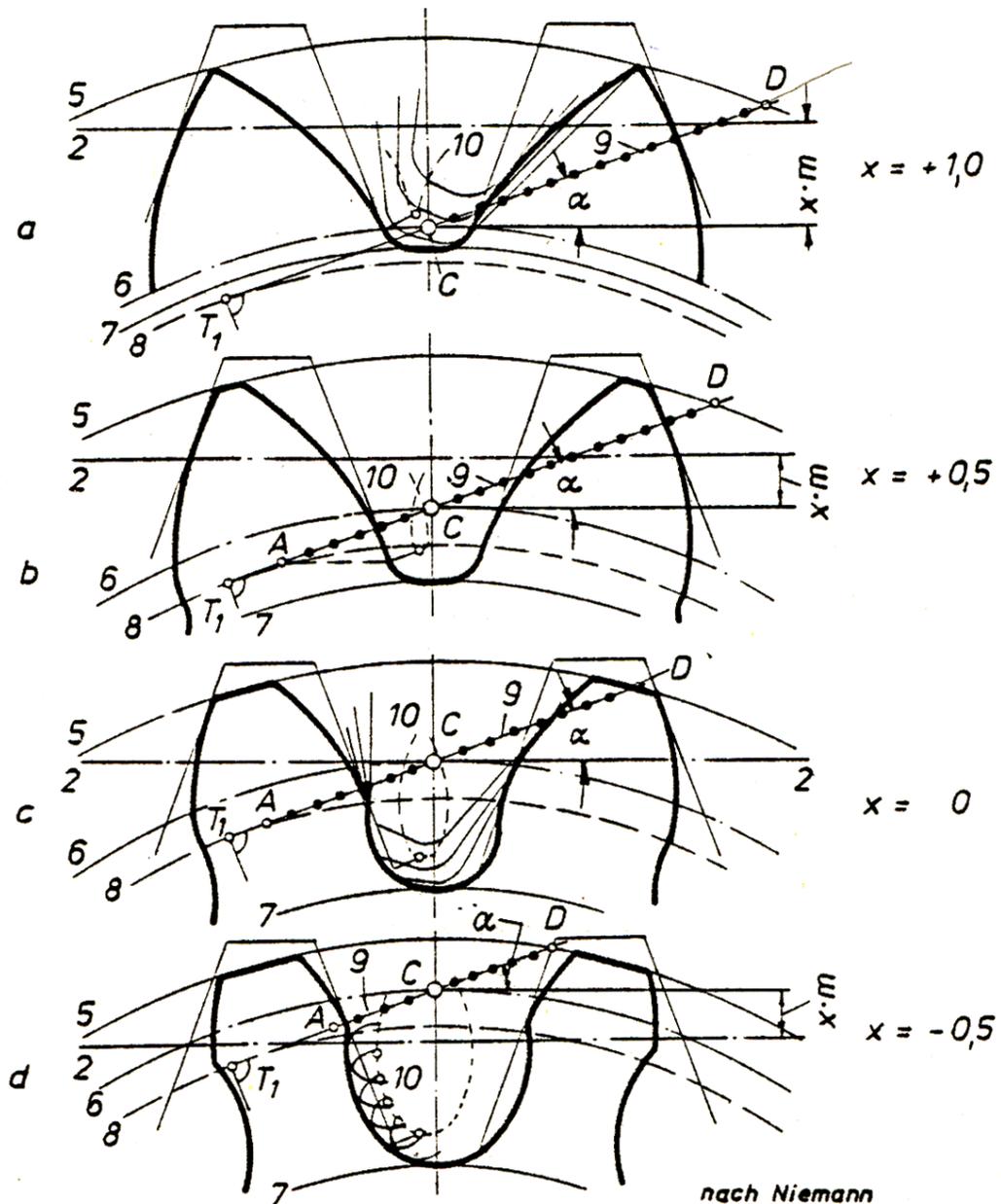
VORTEILE

- Profilüberdeckung-Veränderung möglich
- bessere Biegesteifigkeit
- weniger Hinterschnitt
- besserer Wirkungsgrad
- weniger Geräusche

Evolvertenverzahnungen haben den Teilkreisdurchmesser erst bestimmt, wenn die Profile der Verzahnung in Kontakt kommen!

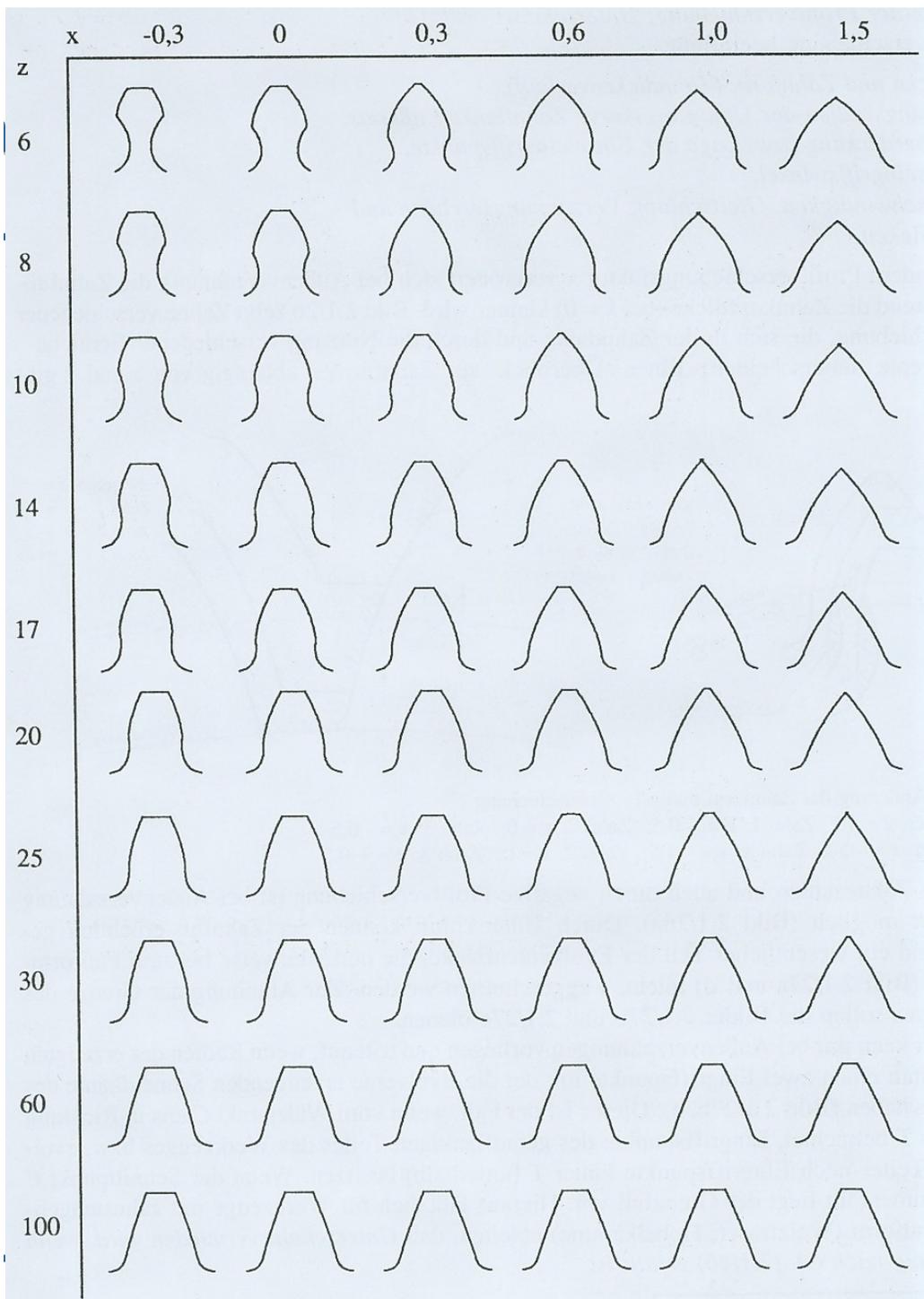


$$V_p = m \cdot x$$



2 Mittellinie d. Bezugsprofils
 5 Kopfkreis
 6 Wälzkreis = Teilkreis
 10 Bahnkurve Kopfwerkzeug

7 Fußkreis
 8 Grundkreis
 9 Eingriffslinie



Geometrie geradverzahnter Stirnräder

Profilverschiebung

- Der grosse Vorteil der Evolventenverzahnung ist, dass auch bei verändertem Achsabstand das Verzahnungsgesetz erfüllt bleibt ($i = \text{konst.}$)
- Profilverschiebung zur Vermeidung hinterschnittener Zahnfüsse und zu spitzer Zahnköpfe als Anteil des Moduls: $v = x \cdot m$
- $x > 0 \rightarrow$ Verschiebung nach aussen \rightarrow weniger Hinterschnitt an den Füßen, spitzere Köpfe
- **Nullrad:** keine Profilverschiebung



ETH

Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

IWF

Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigung
Institute of Machine Tools and Manufacturing

Geometrie geradverzahnter Stirnräder

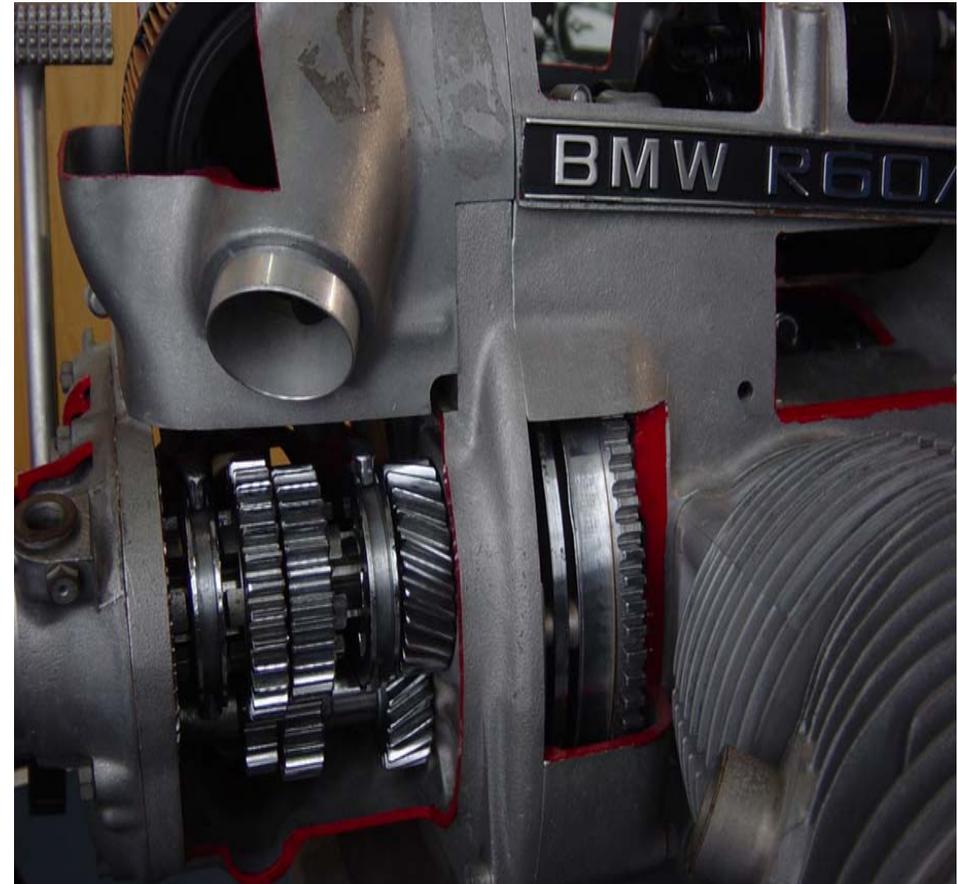
Profilverschiebung

Getriebe: Zahnradpaarung

Alle profilverschobenen Zahnräder können aufeinander abwälzen, weil das Bezugsprofil gleich ist.

Null-Getriebe: Summe der Profilverschiebungen ist null.

V-Getriebe: Veränderung der Achsabstände durch von null verschiedene Profilverschiebungssumme $v_{\text{ges}} = (x_1 + x_2) \cdot m$



ETH

Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

IWF

Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigung
Institute of Machine Tools and Manufacturing

Profilverschiebung

α_w Betriebseingriffswinkel

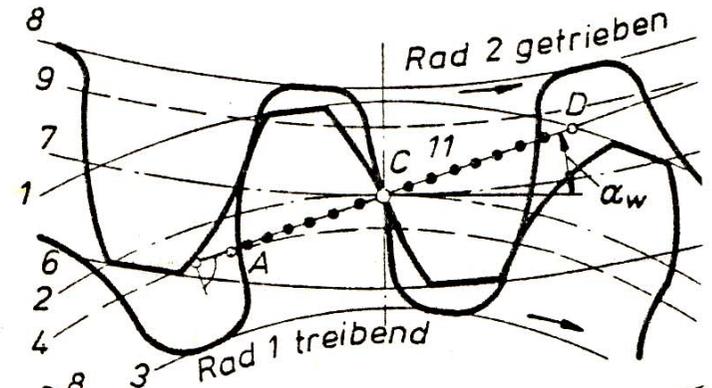
d_{w1}, d_{w2} Betriebswälzkreise

Normalverzahnung

$$x_1 = x_2 = 0;$$

$$\alpha_w = \alpha = 20^\circ;$$

$$\varepsilon_\alpha = 1,28$$

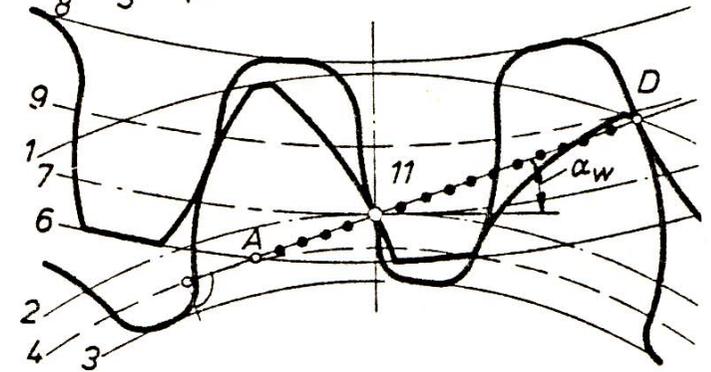


V-Null - Verzahnung

$$x_1 = -x_2 = 0,5;$$

$$\alpha_w = \alpha = 20^\circ;$$

$$\varepsilon_\alpha = 1,43;$$

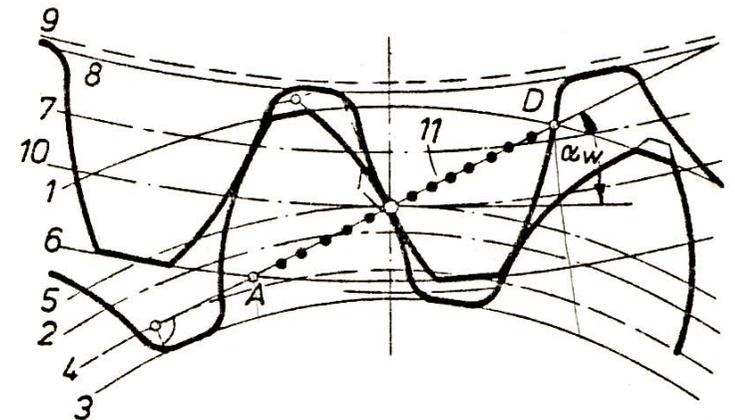


V- Verzahnung

$$x_1 = x_2 = 0,5;$$

$$\alpha_w = 25,15^\circ; \alpha = 20^\circ$$

$$\varepsilon_\alpha = 1,19$$



Zahnpaarung mit $z_1 = 12$; $z_2 = 25$;

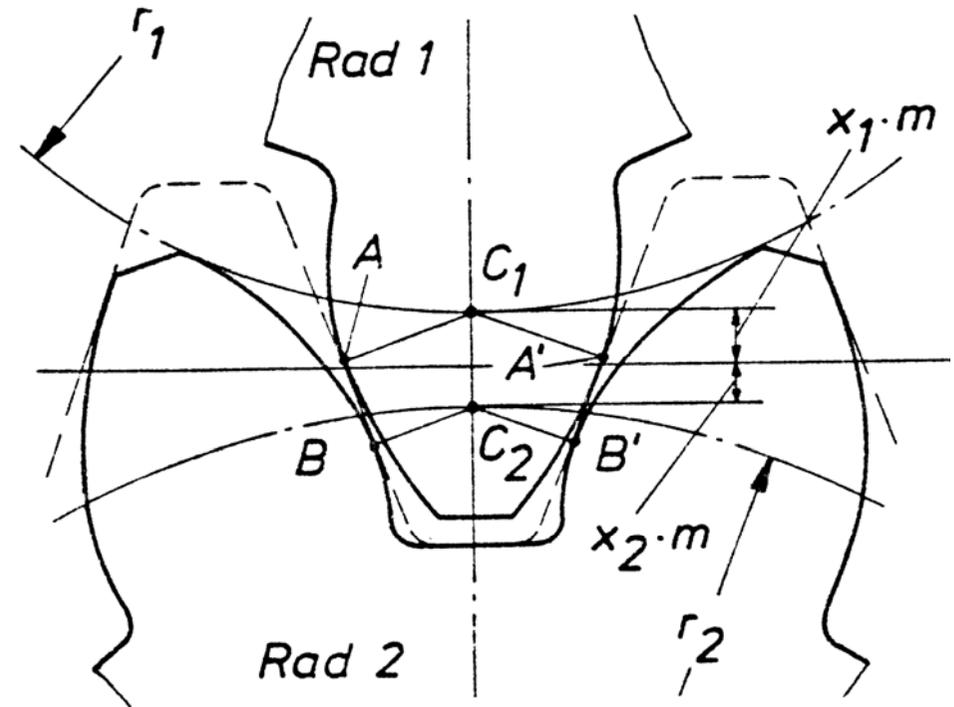
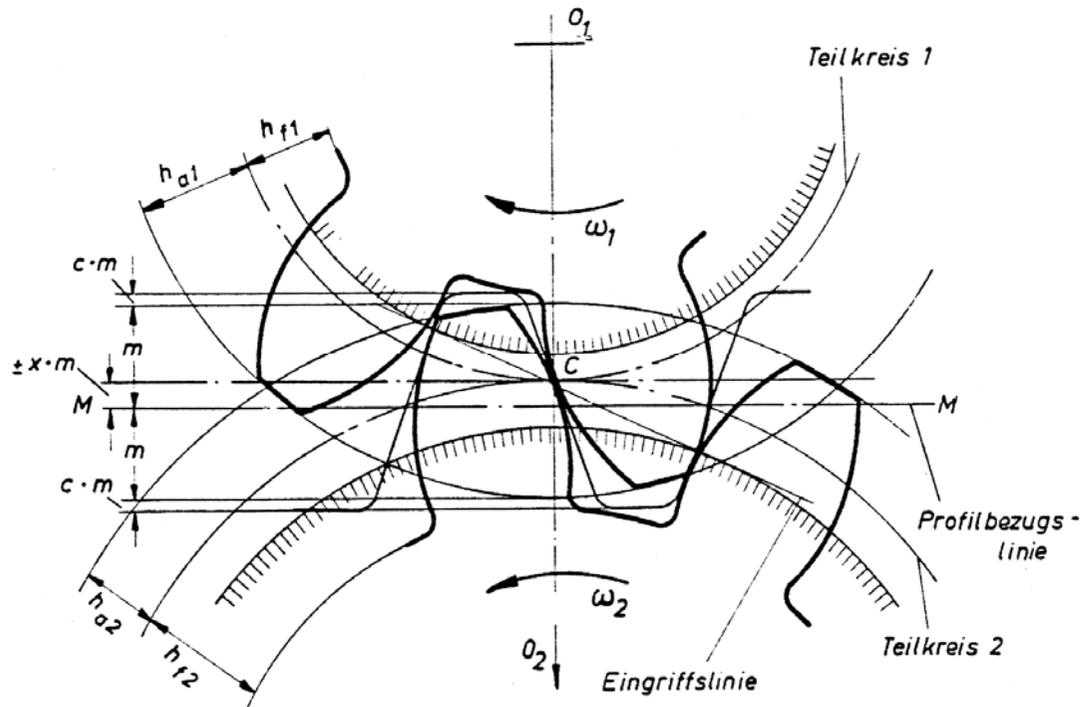
1,6 Kopfkreis ; 2,7 Teilkreis ; 3,8 Fußkreis ; 4,9 Grundkreis ;
5,10 Wälzkreis ; 11 Eingriffslinie;



ETH

Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

Profilverschiebung



V0: Bezugsprofil berührt beide Zähne
am gemeinsamen Kontaktpunkt
→ keine Veränderung des
Achsabstands

V: Bezugsprofil berührt beide Zähne
an unterschiedlichen Punkten
→ Veränderung des Achsabstands



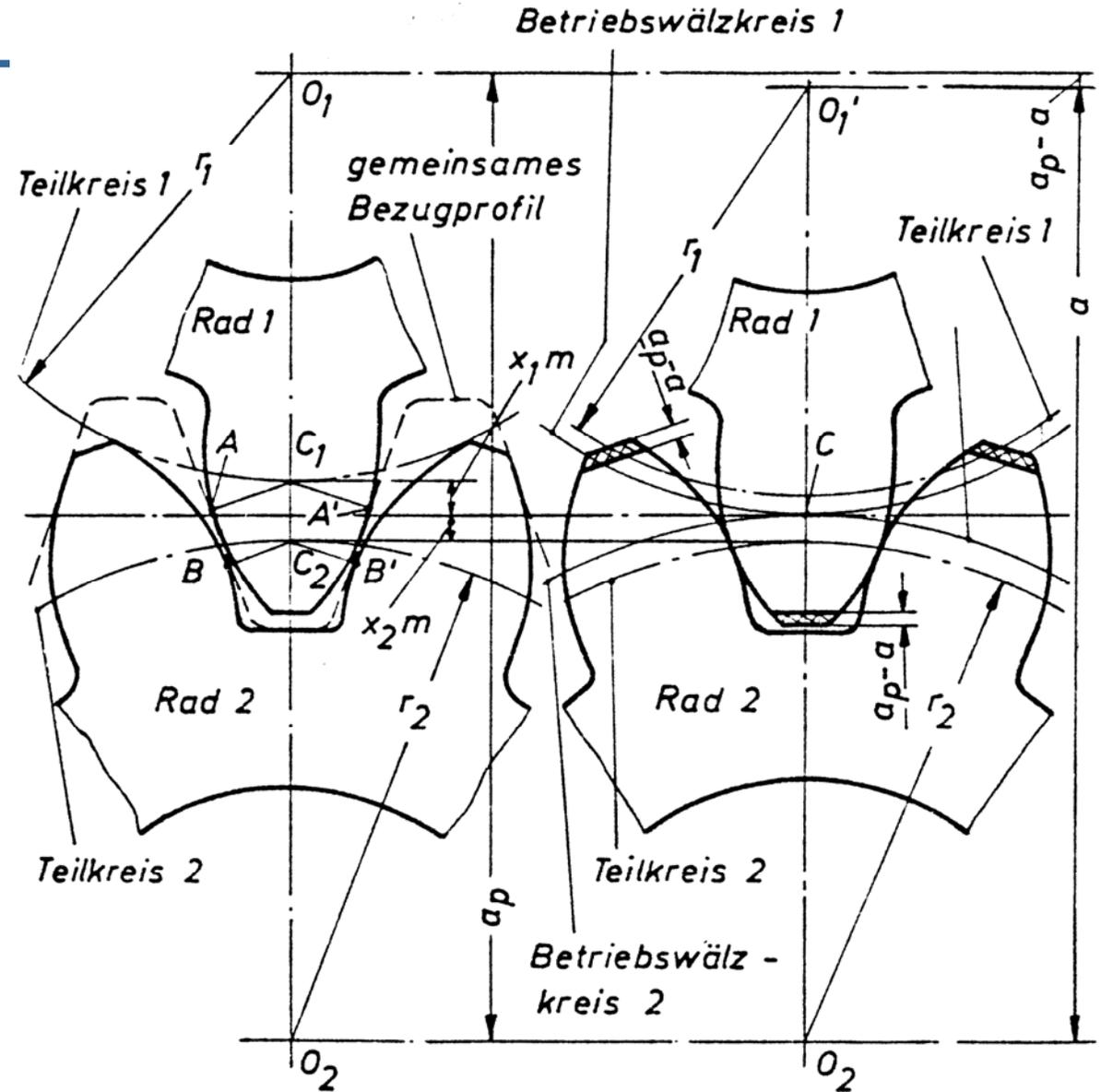
ETH

Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

IWF

Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigung
Institute of Machine Tools and Manufacturing

Profilverschiebung



Deckung der Bezugsprofile

Spielfreier Eingriff



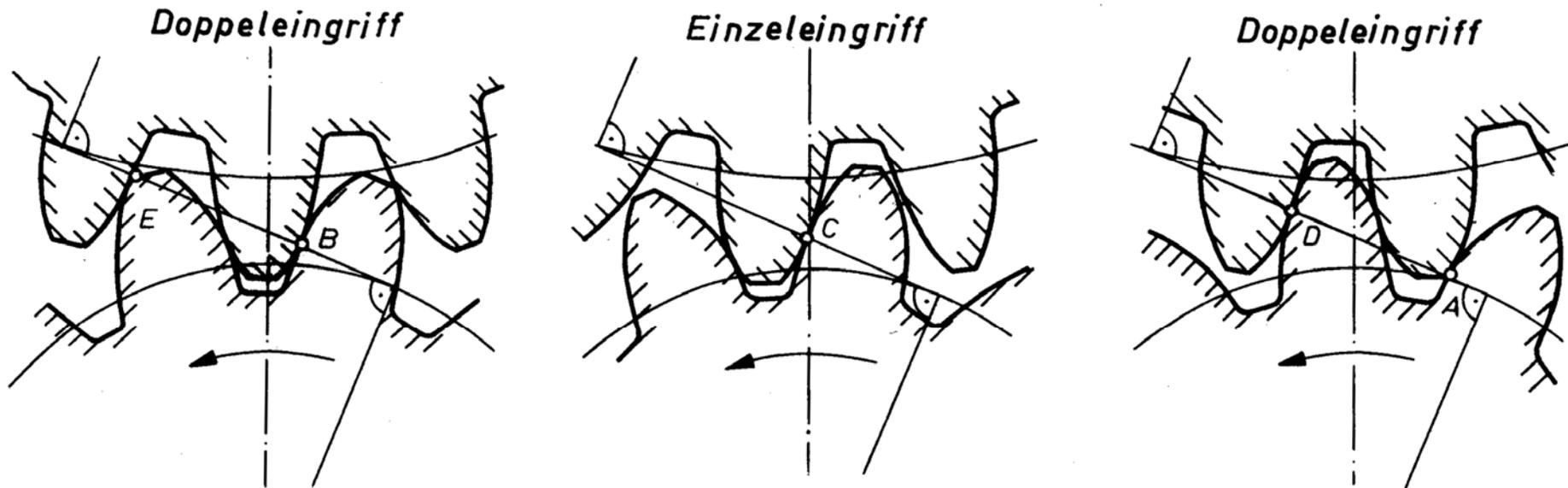
ETH

Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

Geometrie geradverzahnter Stirnräder

Einzel- und Doppeleingriff

Der Wechsel von Einzel- und Doppeleingriff muss trotz unterschiedlicher Steifigkeiten der Verzahnung schwingungsarm erfolgen → Profilkorrekturen an Kopf und Fuss



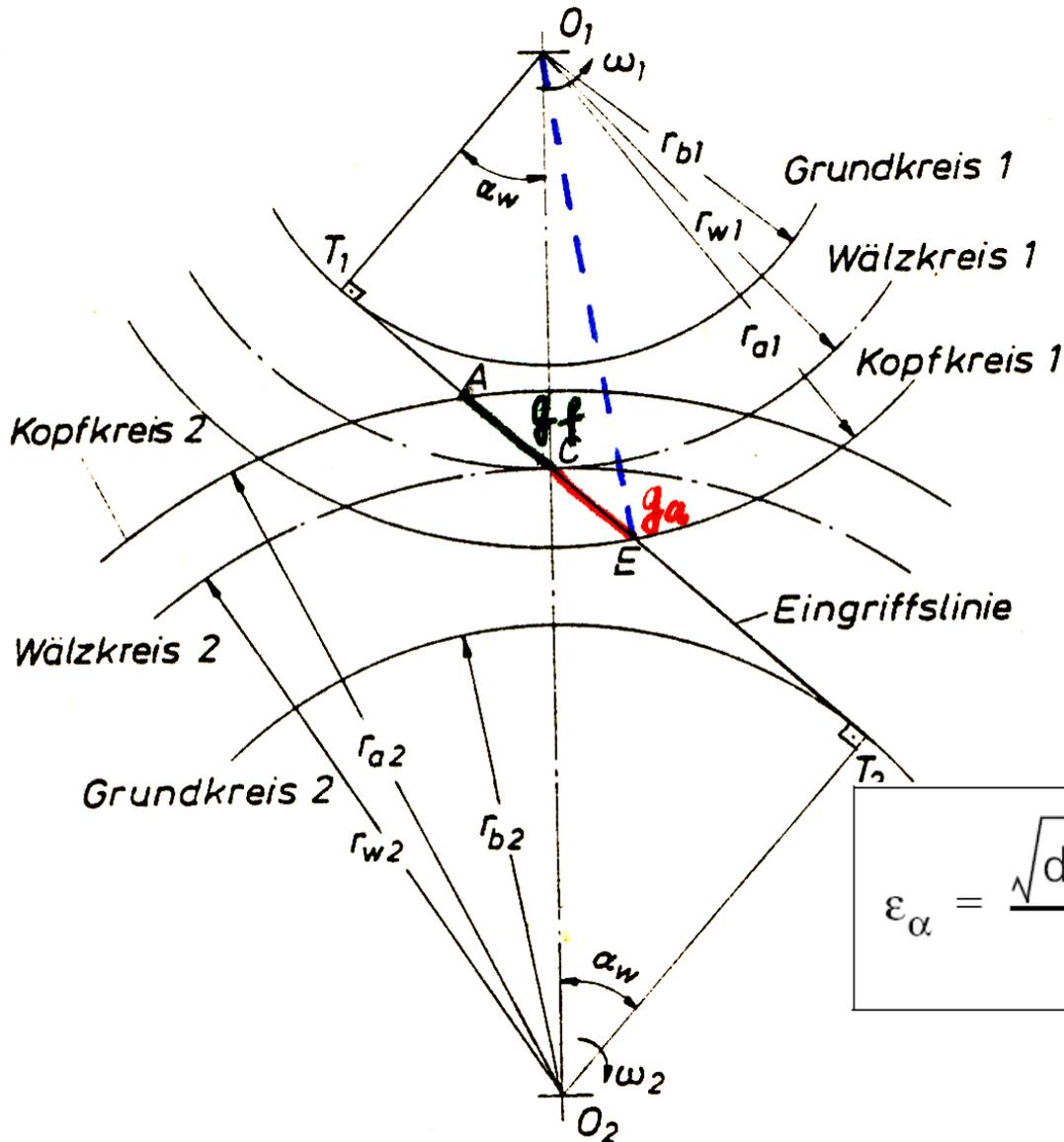
ETH

Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

IWF

Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigung
Institute of Machine Tools and Manufacturing

Profilüberdeckung



$$\varepsilon_\alpha = \frac{\overline{AE}}{p_e}$$

$$\varepsilon_\alpha = \frac{\sqrt{d_{a1}^2 - d_{b1}^2} + \sqrt{d_{a2}^2 - d_{b2}^2} - (d_{b1} + d_{b2}) \tan \alpha_w}{2 \cdot m \cdot \pi \cdot \cos \alpha}$$

Formeln incl. Profilverschiebung

Benennung	Ritzel 1	Rad 2
Zähnezahl	z_1	z_2
Profilverschiebungsfaktor	x_1	x_2
Modul	m	
Teilkreisdurchmesser	$d_1 = m \cdot z_1$	$d_2 = m \cdot z_2$
Betriebseingriffswinkel	$\operatorname{inv}\alpha_w = \operatorname{inv}\alpha + 2 \cdot \frac{x_1 + x_2}{z_1 + z_2} \cdot \tan\alpha$	
Betriebswälzkreisdurchmesser	$d_{w1} = d_1 \cdot \frac{\cos\alpha}{\cos\alpha_w}$	$d_{w2} = d_2 \cdot \frac{\cos\alpha}{\cos\alpha_w}$

Formeln incl. Profilverschiebung

Achsabstand	$a = m \cdot \frac{z_1 + z_2}{2} \cdot \frac{\cos \alpha}{\cos \alpha_w}$	
Kopfhöhen- änderungsfaktor	$k = -x_1 - x_2 + \frac{z_1 + z_2}{2} \cdot \left(\frac{\cos \alpha}{\cos \alpha_w} - 1 \right)$	
Kopfkreisdurchmesser	$d_{a1} = d_1 + 2m(h_a^* + x_1 + k)$	$d_{a2} = d_2 + 2m(h_a^* + x_2 + k)$
Fusskreisdurchmesser	$d_{f1} = d_1 - 2m \cdot (h_f^* - x_1)$	$d_{f2} = d_2 - 2m \cdot (h_f^* - x_2)$
Grundkreisdurchmesser	$d_{b1} = m \cdot z_1 \cdot \cos \alpha$	$d_{b2} = m \cdot z_2 \cdot \cos \alpha$
Profilüberdeckung	$\alpha = \frac{\sqrt{d_{a1}^2 - d_{b1}^2} + \sqrt{d_{a2}^2 - d_{b2}^2} - (d_{b1} + d_{b2}) \cdot \tan \alpha_w}{2m \cdot \pi \cdot \cos \alpha}$	

Geometrie geradverzahnter Stirnräder

Beispiel

In einer Werkstatt funktioniert das Getriebe einer Drehmaschine nicht mehr. Es wird festgestellt, dass ein Zahnrad gebrochen ist. Es handelt sich um ein geradverzahntes Stirnrad mit 60 Zähnen, einer Breite von 16mm und einem Durchmesser von 124 mm. Ausgehend von diesen Informationen, berechnen Sie ein neues Zahnrad, so dass das gebrochene ersetzt werden kann (Modul, Teilkreisdurchmesser, Fusskreisdurchmesser, Zahnhöhe, Zahnkopfhöhe, Zahnfusshöhe, Teilung).



Geradverzahntes Stirnrad



ETH

Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

IWF

Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigung
Institute of Machine Tools and Manufacturing

Geometrie geradverzahnter Stirnräder

Lösung

Modul (m):

$$m = d / z = p / \pi$$

$$d_a = d + 2 \cdot m$$

$$d_a = m \cdot z + 2 \cdot m$$

$$d_a = m (z + 2)$$

$$124 = m \cdot (60 + 2)$$

$$124 = m \cdot 62$$

$$m = 124 / 62$$

$$m = 2$$

Teilkreisdurchmesser (d):

$$d = m \cdot z$$

$$d = 2 \cdot 60$$

$$d = 120\text{mm}$$

Zahnkopfhöhe (h_a):

$$h_a = m$$

$$h_a = 2\text{mm}$$

Zahnfußhöhe (h_f):

$$h_f = 1,166 \cdot m$$

$$h_f = 1,166 \cdot 2$$

$$h_f = 2,332$$

$$h_f = 2,332\text{mm}$$

Zahnhöhe (h):

$$h = h_a + h_f$$

$$h = 2 + 2,332$$

$$h = 4,332\text{mm}$$

Fusskreisdurchmesser (d_f):

$$d_f = d - 2 \cdot h_f$$

$$d_f = 120 - 2 \cdot 2,332$$

$$d_f = 115,34\text{mm}$$

Teilung (p):

$$p = (\pi \cdot d) / z = m \cdot \pi$$

$$p = 2 \cdot \pi$$

$$p = 6,28\text{mm}$$



ETH

Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

IWF

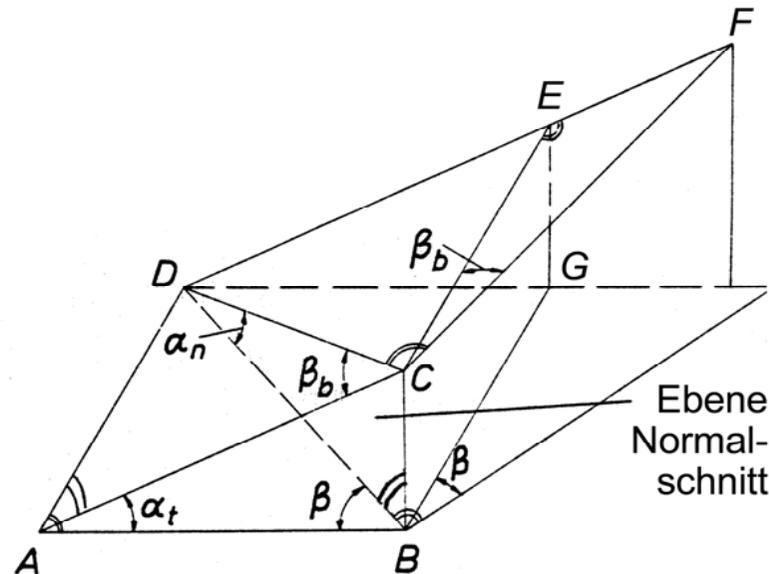
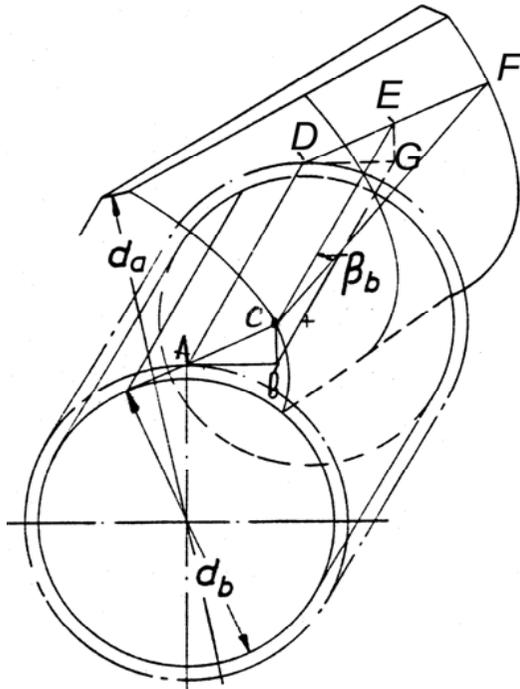
Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigung
Institute of Machine Tools and Manufacturing

10.5 Geometrie schrägverzahnter Stirnräder

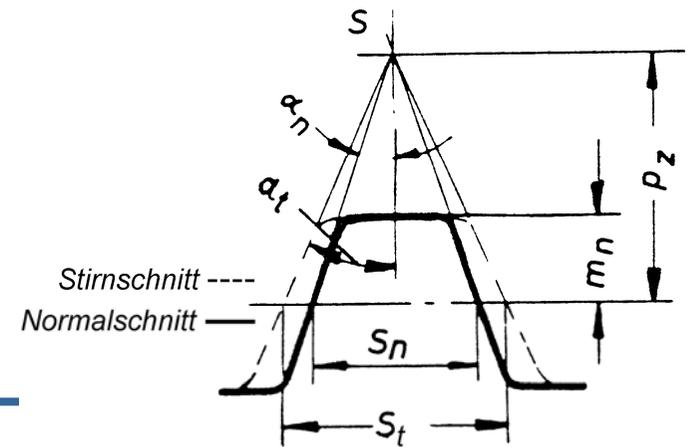
Geradverzahnte und schrägverzahnte Zahnräder

Geradverzahnte Räder:
Flankenlinien laufen zur
Radachse parallel.

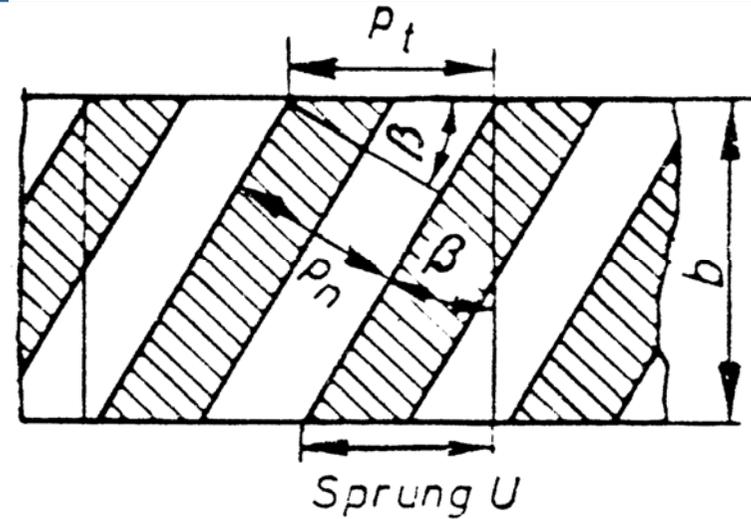
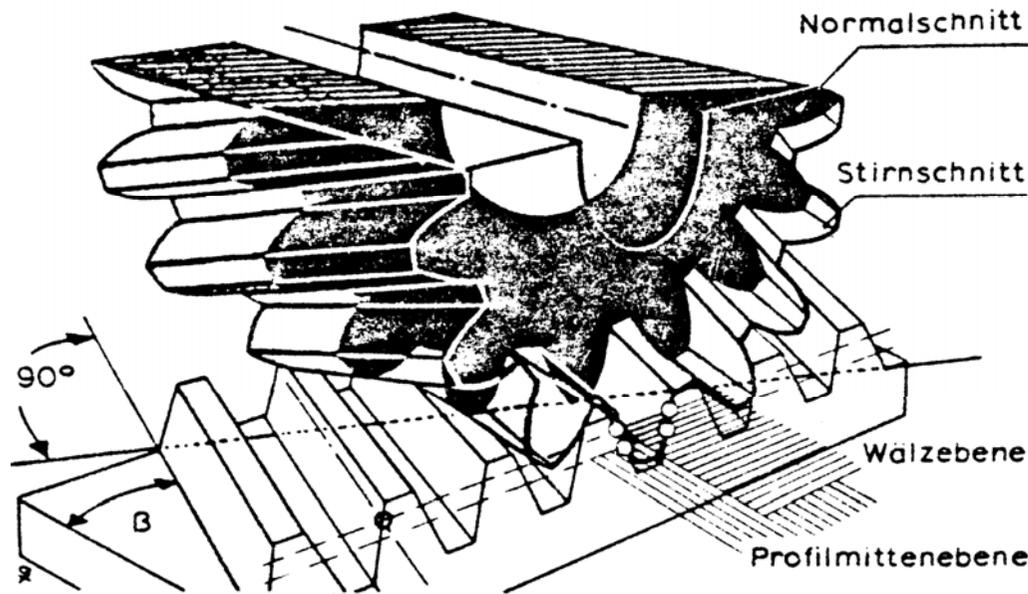
Schrägverzahnte Zahnräder:
Zahnflanke auf dem Teilzylinder gemessen um den
Schrägungswinkel β gegen die Radachse geneigt.



$$\tan \alpha_t = \frac{\tan \alpha_n}{\cos \beta}$$



10.5 Geometrie schrägverzahnter Stirnräder



Herstellung durch schräg verzahnte Zahnstange.

➔ Betrachtung auf abgewickeltem Wälzkreis

Stirnschnitt: Schnitt senkrecht zur Achse, Index t

Normalschnitt: Schnitt senkrecht zur Flanke, Index n

Bezugsprofil im Normalschnitt nach DIN 860

$$\cos \beta = \frac{p_n}{p_t} \Rightarrow m_n = m_t \cos \beta$$

$$d = m_t z = \frac{p_t z}{\pi}$$

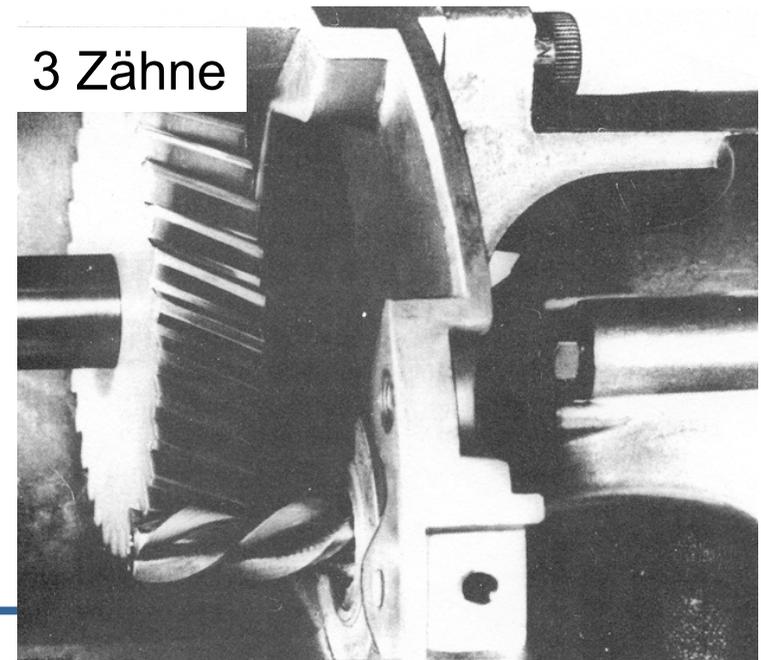
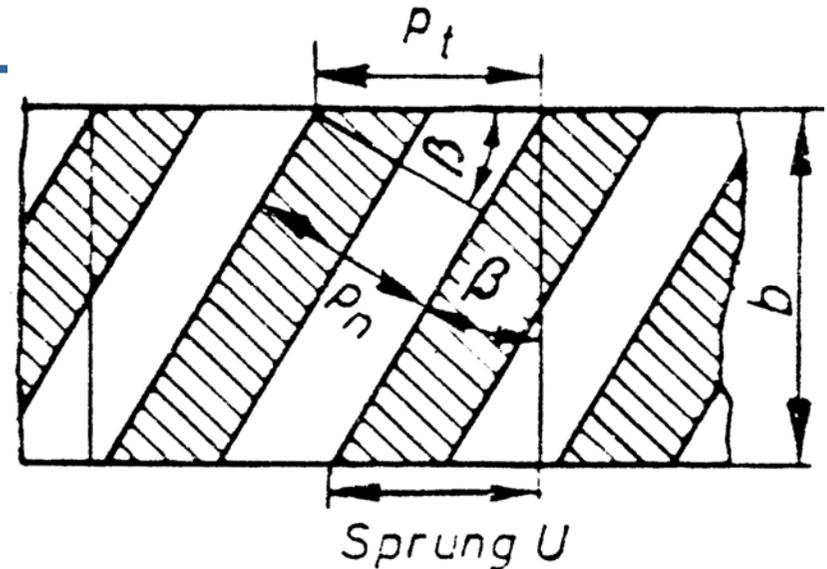
10.5 Geometrie schrägverzahnter Stirnräder

Gesamtüberdeckung ϵ_γ
 aus Profilüberdeckung ϵ_α
 und Sprungüberdeckung ϵ_β

$$\epsilon_\gamma = \epsilon_\alpha + \epsilon_\beta \geq 1.1$$

$$\epsilon_\beta = \frac{U}{p_t} = \frac{b \tan \beta}{m_t \pi} = \frac{b \sin \beta}{m_n \pi}$$

$$\epsilon_\alpha = \frac{\sqrt{d_{a1}^2 - d_{b1}^2} + \sqrt{d_{a2}^2 - d_{b2}^2} - (d_{w1} + d_{w2}) \sin \alpha_{wt}}{2m_t \pi \cos \alpha_t}$$



ETH

Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
 Swiss Federal Institute of Technology Zurich

10.5 Geometrie schrägverzahnter Stirnräder

Benennung	Ritzel 1	Rad 2
Zähnezahl	z_1	z_2
Profilverschiebungsfaktor	x_1	x_2
Modul im Normal-schnitt	m_n	
Schrägungswinkel	β	
Modul im Stirnschnitt	$m_t = \frac{m_n}{\cos\beta}$	
Teilkreisdurchmesser	$d_1 = \frac{m_n}{\cos\beta} \cdot z_1$	$d_2 = \frac{m_n}{\cos\beta} \cdot z_2$

10.5 Geometrie schrägverzahnter Stirnräder

Stirneingriffswinkel	$\tan \alpha_t = \frac{\tan \alpha_n}{\cos \beta}$	
Betriebseingriffswinkel	$\operatorname{inv} \alpha_{wt} = \operatorname{inv} \alpha_t + 2 \cdot \frac{x_1 + x_2}{z_1 + z_2} \cdot \tan \alpha_n$	
Achsabstand	$a = \frac{m_n}{\cos \beta} \cdot \frac{z_1 + z_2}{2} \cdot \frac{\cos \alpha_t}{\cos \alpha_{wt}}$	
Kopfhöhenänderungsfaktor	$k = -x_1 - x_2 + \frac{z_1 + z_2}{2 \cos \beta} \cdot \left(\frac{\cos \alpha_t}{\cos \alpha_{wt}} - 1 \right)$	
Kopfkreisdurchmesser	$d_{a1} = d_1 + 2m_n \cdot (h_a^* + x_1 + k)$	$d_{a2} = d_2 + 2m_n \cdot (h_a^* + x_2 + k)$
Fusskreisdurchmesser	$d_{f1} = d_1 - 2m_n \cdot (h_f^* - x_1)$	$d_{f2} = d_2 - 2m_n \cdot (h_f^* - x_2)$

10.5 Geometrie schrägverzahnter Stirnräder

Grundkreisdurchmesser	$d_{b1} = \frac{m_n}{\cos \beta} \cdot z_1 \cdot \cos \alpha$	$d_{b2} = \frac{m_n}{\cos \beta} \cdot z_2 \cdot \cos \alpha$
Betriebswälzkreisdurchmesser	$d_{w1} = d_1 \cdot \frac{\cos \alpha_t}{\cos \alpha_{wt}}$	$d_{w2} = d_2 \cdot \frac{\cos \alpha_t}{\cos \alpha_{wt}}$
Profilüberdeckung (gilt nur bei unterschnittfreien Verzahnungen)	$\alpha = \frac{\sqrt{d_{a1}^2 - d_{b1}^2} + \sqrt{d_{a2}^2 - d_{b2}^2} - (d_{b1} + d_{b2}) \cdot \tan \alpha_v}{2m \cdot \pi \cdot \cos \alpha}$	
Sprungüberdeckung	$\varepsilon_\beta = \frac{b \cdot \sin \beta}{m_n \cdot \pi}$	



ETH

Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

IWF

Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigung
Institute of Machine Tools and Manufacturing

10.5 Geometrie schrägverzahnter Stirnräder

Vorteile schräg verzahnter Zahnräder:

- Bei gleicher Zahnbreite grössere Tragfähigkeit
- Grössere Gesamtüberdeckung
- Kleinere Grenzzähnezahl
- Geringere Geräuschentwicklung
- Gleichmässigerer Übertragung der Bewegung

Nachteile:

- Höhere Herstellkosten
- Gefahr des Zahneckenbruchs
- Axialkräfte



ETH

Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

IWF

Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigung
Institute of Machine Tools and Manufacturing

10.6 Tragfähigkeitsberechnung

Schaden an	Betriebsbeanspruchung		Herstellung
	Dauernd	Einmalig	
Zahnkörper	Dauerbruch Zahnfuss	Gewaltbruch	Härterisse Materialrisse
Zahnflanke	Grübchenbildung Fressen		Schleifrisse

➔ Auslegung auf Flankentragfähigkeit und Zahnfussfestigkeit, da dort der höchst beanspruchte Querschnitt ist.



ETH

Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

IWF

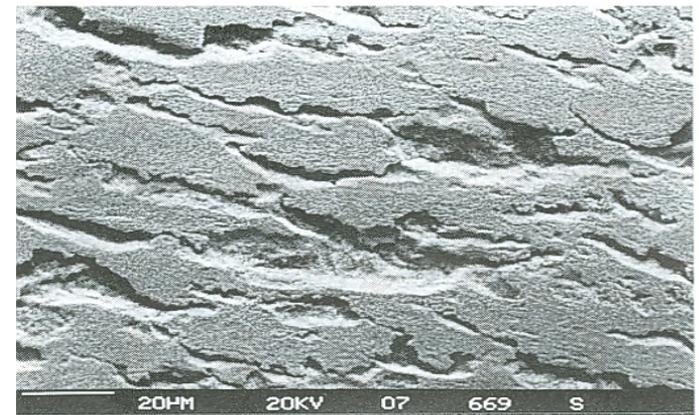
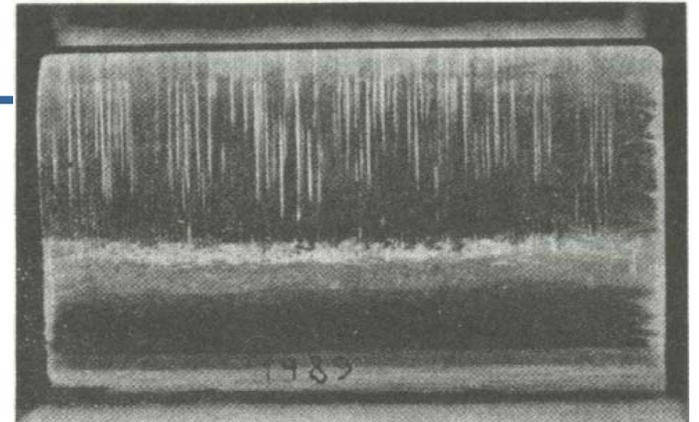
Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigung
Institute of Machine Tools and Manufacturing

10.6 Zahnflankenschäden

Einteilung der Zahnflankenschäden

Schäden infolge Flankenbeanspruchung

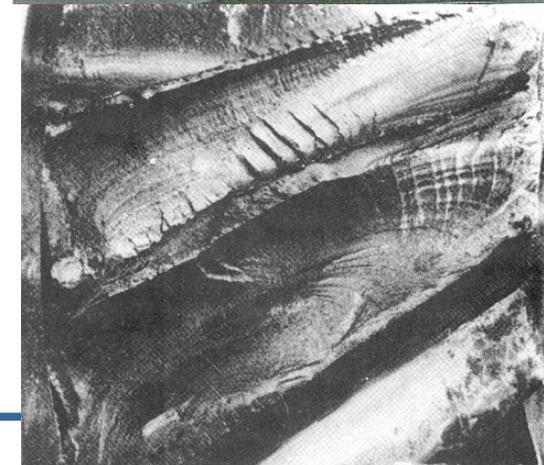
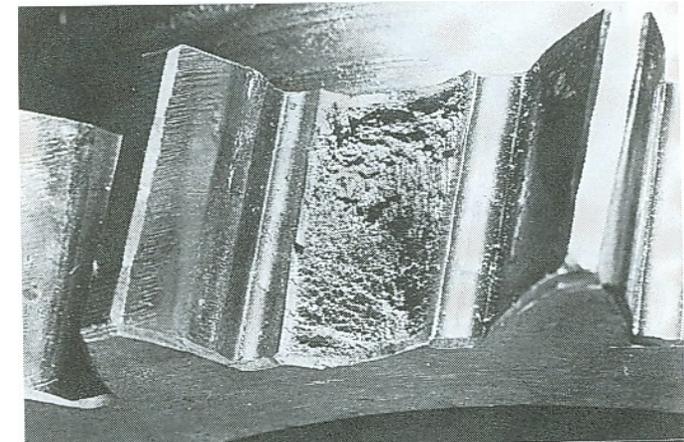
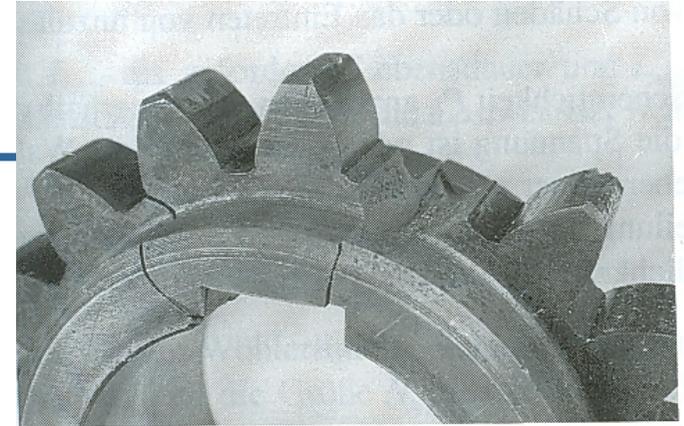
- Grübchen (pittings) – ist die Folge der Ermüdung des Werkstoffes im oberflächennahen Bereich durch Hertzsche Pressung. Materialtrennungen erfolgen aufgrund maximaler Schubspannungen unter der Oberfläche. Schliesslich werden Materialteilchen herausgesprengt
- Graufleckigkeit – ist ebenfalls Folge der Werkstoffermüdung (dünneren Schichten)
- Fressen – wenn die Schubbeanspruchung der Oberfläche die Festigkeit überschreitet
- Verschleiss – Adhäsiv/Abrasiv



10.6 Zahnfusssschäden

Einteilung der Zahnfusssschäden

- Schäden infolge Fussbeanspruchung
- Überschreiten der Bruchfestigkeit, Verformungsgrenze oder Anrissgrenze
 - Kann die Folge von Blockierungen z.B. infolge einer Havarie sein
 - Führt die Überlastung nicht zum Bruch, so kann jedoch vorher selbst bei einsatzgehärteter Verzahnung eine plastische Verformung auftreten
 - Überschreiten der Biegewechselfestigkeit



ETH

Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

Kräfte am Zahn

Wirkende Belastung

Nennbelastung

- Ausgangspunkt ist die Nennleistung P

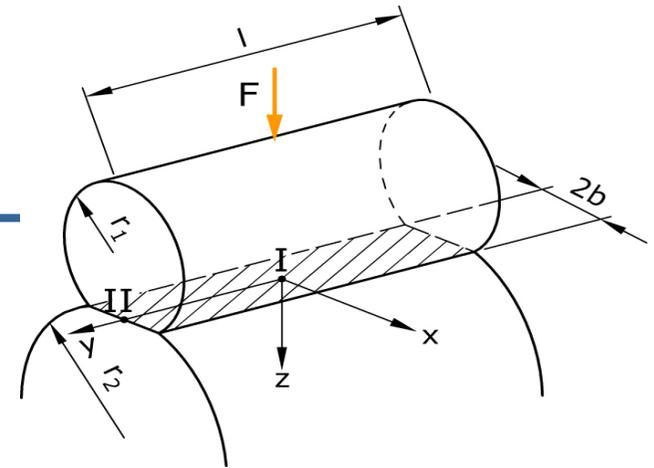
$$P = T \cdot \omega = 2 \cdot \pi \cdot n \cdot T$$

$$T = \frac{P}{\omega} = \frac{P}{2 \cdot \pi \cdot n}$$

Dimensionen: P in W, n in s^{-1} , T in Nm

- Die Nenn-Umfangskraft wird am Teilkreis berechnet

$$F_t = \frac{2 \cdot T}{d_t}$$



Wichtig: Für die Tragfähigkeitsberechnung massgebend ist nicht die Umfangs- sondern die auf die Zahnflanke wirkende Normalkraft!

$$F_{bt} = \frac{F_t}{\cos \alpha_t} \quad ; \quad F_{bn} = \frac{F_t}{\cos \alpha_n \cdot \cos \beta}$$



ETH

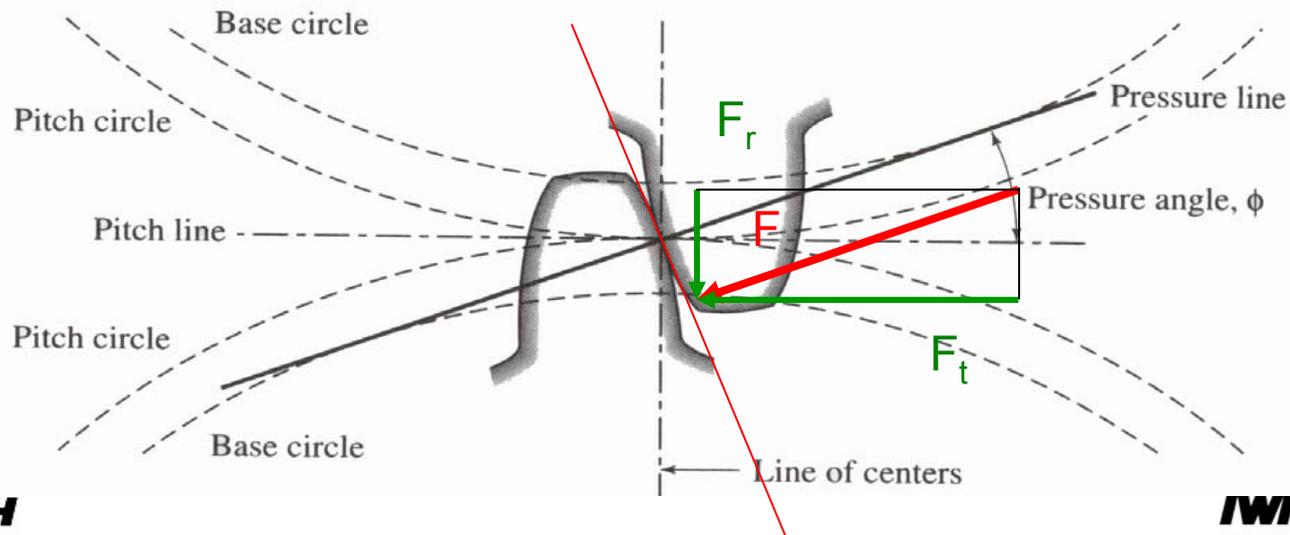
Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

IWF

Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigung
Institute of Machine Tools and Manufacturing

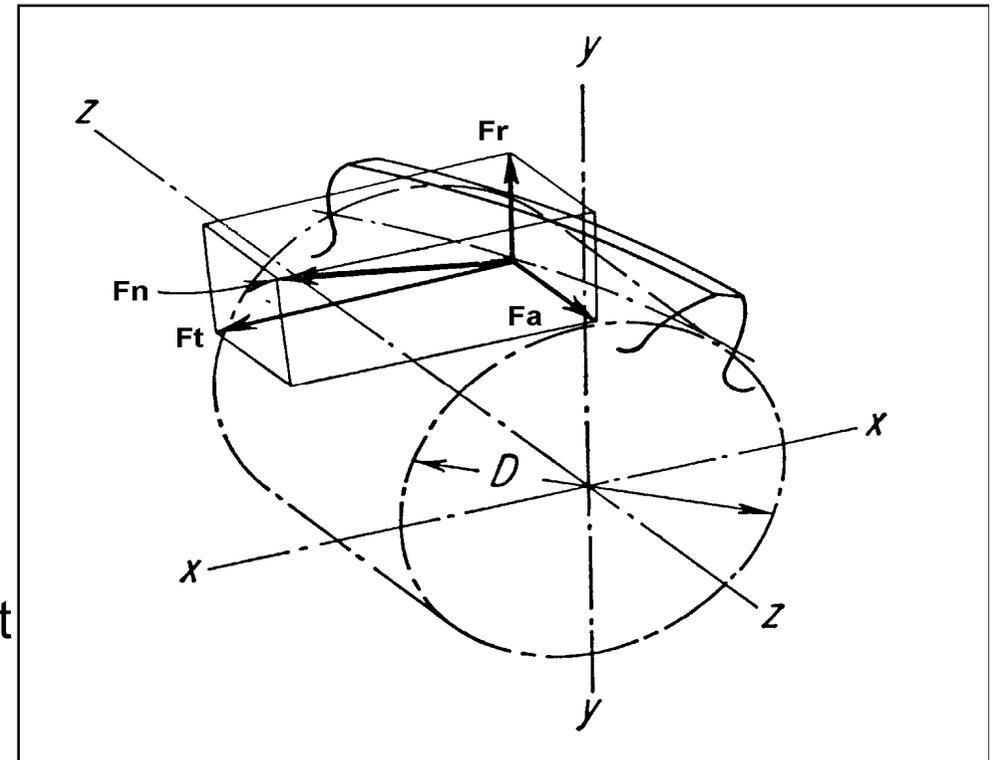
Kräfte am Zahn

- Die Berührung am Zahn lässt sich über Zahnbreite als Linie und im Querschnitt als Punkt idealisieren
- An diesem Punkt greift die Normalkraft rechtwinklig zur Flankentangentiale an
- Gesamte Normalkraft setzt sich aus azimuthaler und radialer Komponente zusammen
- Das Moment wird über die azimuthale Kraftkomponente übertragen und definiert



Kräfte am Zahn

- Kleinerer Eingriffswinkel überträgt das Moment effektiver
- Bei Schrägverzahnung kommt zusätzlich axiale Kraft
- Zahn sind auf Biegung und Querkraft beansprucht
- Durch Drehung des Rads wandert der Berührungspunkt und der Angriffspunkt der Kräfte und auch die Zahl der eingreifenden Zähne variiert
- Die Beanspruchung im Zahn verändert sich laufend und macht das Überprüfen der Dauerfestigkeit notwendig



$$\vec{F}_n = \vec{F}_a + \vec{F}_r + \vec{F}_t$$

Kräfte am Zahn

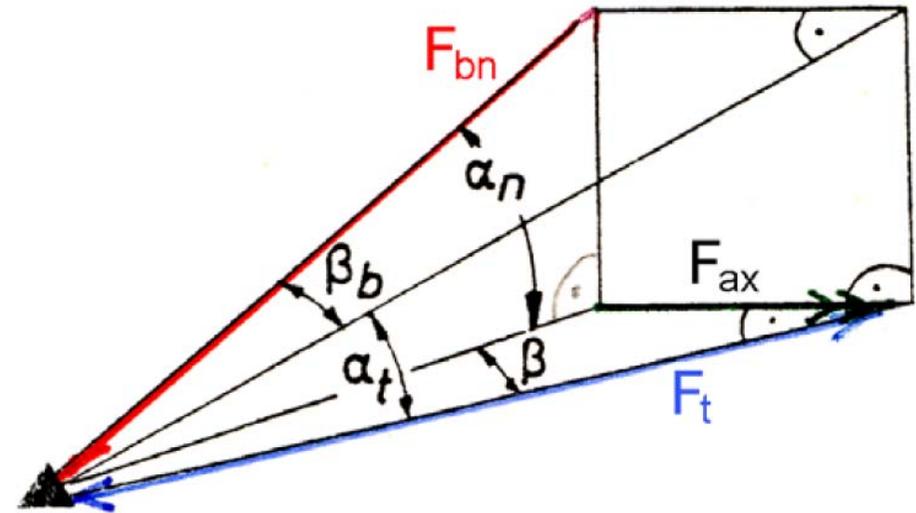
Wirkende Belastung

Massgeblich ist die Umfangskraft F_t

Übertragen wird nur eine Normalkraft
(reibungsfrei)

$$F_{bt} = \frac{F_t}{\cos \alpha_t} \quad F_{bn} = \frac{F_t}{\cos \alpha_n \cos \beta}$$

$$F_a = F_t \tan \beta$$



Für die Tragfähigkeitsberechnung bezieht man die Umfangskraft F_t auf die Zahnbreite. Für die Nennumfangskraft w_{tN} gilt:

$$w_{tN} = \frac{F_t}{b}$$

Wichtig: Sind die Zahnbreiten von Ritzel und Rad ungleich, so ist beim breiterem Zahnrad höchstens ein Überstand von 1 mal Modul mittragend anzunehmen

Kräfte am Zahn

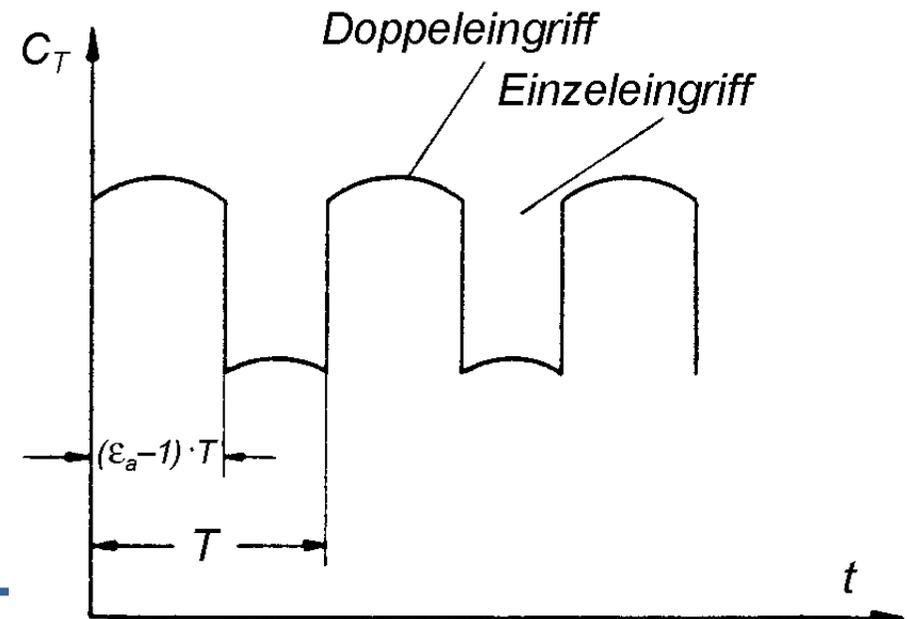
Wirkende Belastung

Massgebliche Umfangskraft

- Für die Tragfähigkeitsberechnung darf nicht ausschliesslich die Nennumfangskraft herangezogen werden. In Getrieben unter Betriebsbedingungen treten vielmehr zusätzliche Belastungen auf durch:
 - äussere dynamische Zusatzkräfte (Betriebsfaktor K_A , siehe Tabelle, VDI 2151)
 - innere dynamische Zusatzkräfte (Dynamikfaktor K_v)

$$w_t = K_A \cdot K_v \cdot w_{tN}$$

$$w_t = K_A \cdot K_v \cdot \frac{F_t}{b}$$



ETH

Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

10.6 Kräfte am Zahnfuss

Wirkende Belastung

Berechnung der Zahnfussbeanspruchung

- Der Nachweis der Zahnfussfestigkeit (nach DIN 3990) wird auf der Modellvorstellung aufgebaut, dass die nominale Zahnnormalkraft am Zahnkopf angreift
- Im Zahnfuss wirken folgende Spannungen:

$$\sigma_b = \frac{F_{by} \cdot \cos \alpha_{nF} \cdot h_F}{\frac{b \cdot s_{nF}^2}{6 \cdot \cos \beta}}$$

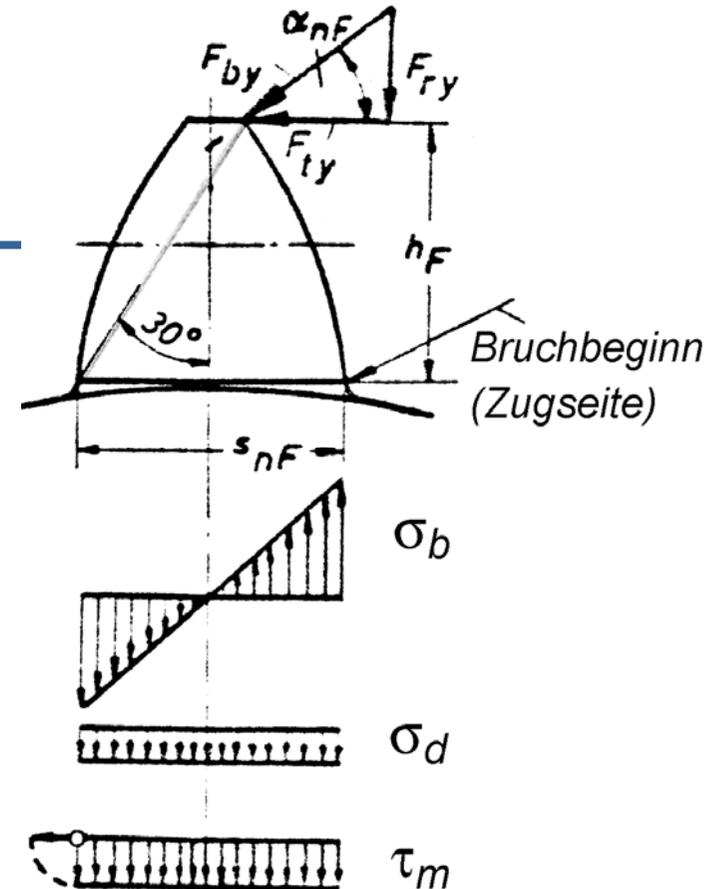
Biegespannung
(massgebend)

$$\sigma_d = \frac{F_{by} \cdot \sin \alpha_{nF}}{\frac{b \cdot s_{nF}}{\cos \beta}}$$

Druckspannung

$$\tau = \frac{F_{by} \cdot \cos \alpha_{nF}}{\frac{b \cdot s_{nF}}{\cos \beta}}$$

Schubspannung



10.6 Kräfte am Zahnfuss nach DIN 3990

$$\sigma_F = \frac{W_{Ft}}{m_n} Y_F Y_\beta Y_\varepsilon$$

$$W_{Ft} = \frac{F_t}{b} K_A K_v K_{F\alpha} K_{F\beta}$$

$$Y_F = \frac{6 \cdot \frac{h_F}{m_n} \cdot \cos \alpha_{nF}}{\left(\frac{s_{nF}}{m_n}\right)^2 \cos \alpha_n} \quad F_{by} = \frac{F_t}{\cos \beta \cos \alpha_n}$$

Y_β Schrägenfaktor für Einfluss der Schrägung auf Lastverteilung

$Y_\varepsilon = 1/\varepsilon_\alpha$ Lastanteilfaktor Umrechnung Kraftangriff am Zahnkopf auf den äusseren Einzeleingriff



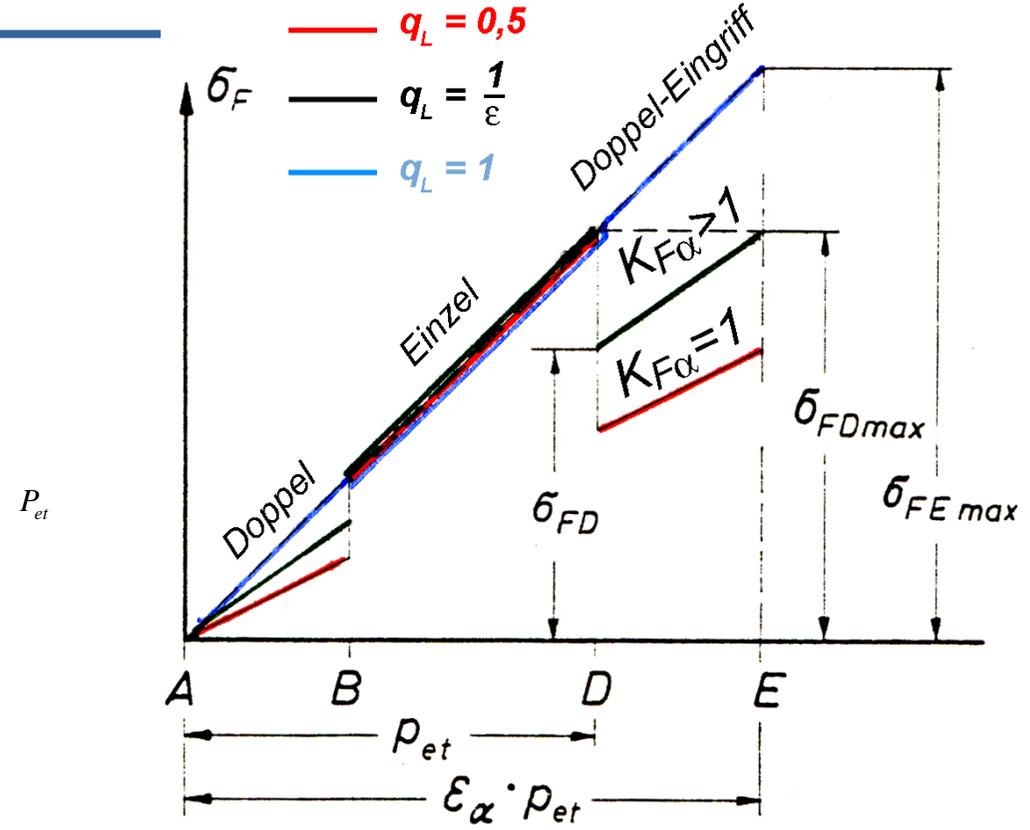
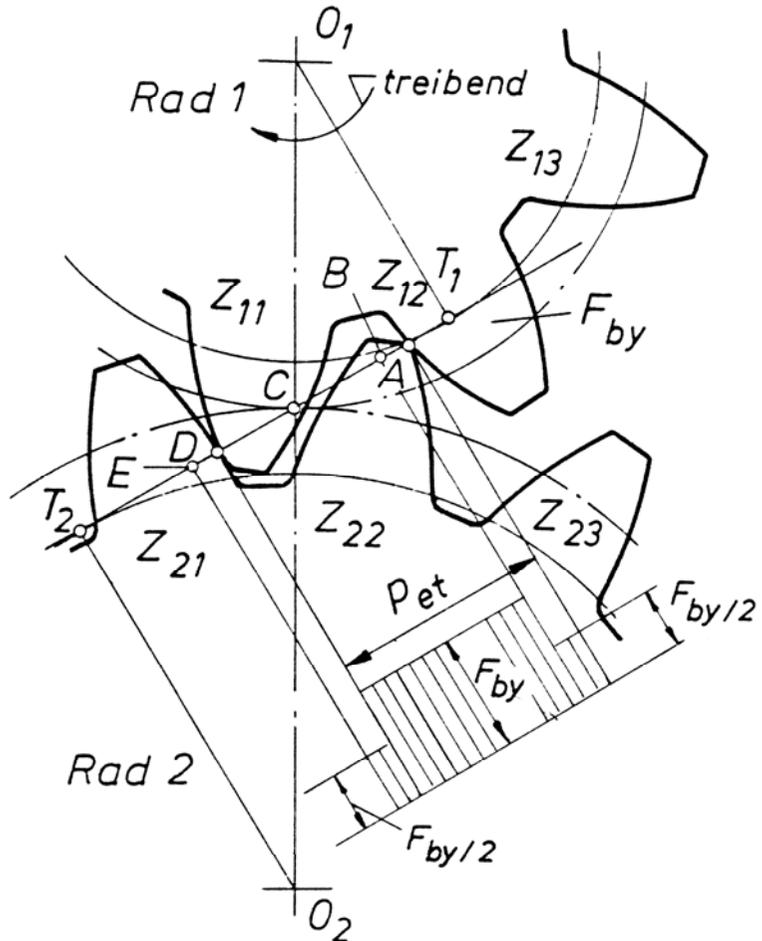
ETH

Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

IWF

Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigung
Institute of Machine Tools and Manufacturing

10.6 Kräfte am Zahnfuss nach DIN 3990



Lastanteilfaktor Umrechnung Kraftangriff am Zahnkopf auf den äusseren Einzeleingriff

$$Y_\epsilon = \frac{\sigma_{FDmax}}{\sigma_{FEmax}} = \frac{P_{et}}{\epsilon_\alpha P_{et}}$$

10.6 Kräfte am Zahnfuss nach DIN 3990

$$\sigma_F = \frac{W_{Ft}}{m_n} Y_F Y_\beta Y_\varepsilon$$

$$W_{Ft} = \frac{F_t}{b} K_A K_v K_{F\alpha} K_{F\beta}$$

$K_{F\alpha}$ Stirnlastverteilungsfaktor: für ungleichmässiges Tragen von zwei im Eingriff befindlichen Zähnen

$K_{F\beta}$ Breitenlastverteilungsfaktor: für den Zahnfuss für ungleichmässiges Tragen über der Zahnbreite



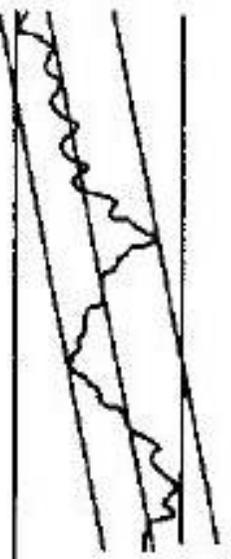
ETH

Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

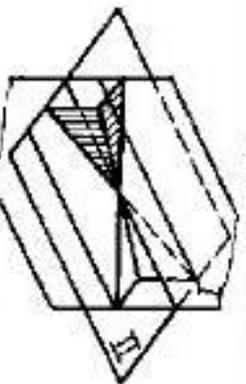
IWF

Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigung
Institute of Machine Tools and Manufacturing

Wichtige Anteile der Kontaktlinienabweichung



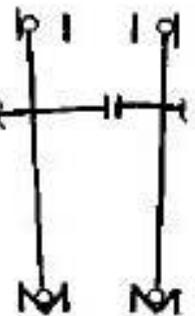
Verzahnungsabweichungen



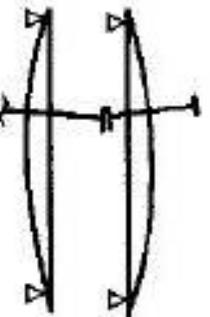
Bohrungslageabweichungen



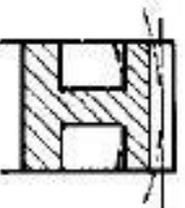
Lagerverformungen



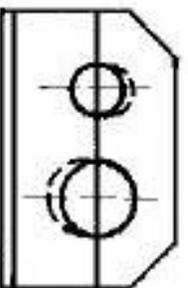
Lagerspiel



**Wellenverformung
Biegung, Torsion
(Biegung dargestellt)**



Radkörperverformungen



Gehäuseverformungen

10.6 Kräfte am Zahnfuss nach DIN 3990

Dimensionieren gegen zulässige Zahnfussspannung

$$\sigma_F \leq \sigma_{FP} = \frac{\sigma_{F \text{ lim}}}{S_{F \text{ min}}} Y_S K_{FX}$$

Y_S Zahnfusskerbfaktor: berücksichtigt die Ausrundung des Zahnfusses

K_{FX} Grössenfaktor: Veränderung der Dauerfestigkeit mit zunehmender Zahngrösse

$$S_F = \frac{\sigma_{F \text{ lim}}}{\frac{F_t}{b \cdot m_n} \cdot Y_F \cdot Y_\varepsilon \cdot Y_\beta} \cdot \frac{1}{K_1 \cdot K_v \cdot K_{F\alpha} \cdot K_{F\beta}} \geq S_{F \text{ min}}$$



ETH

Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

IWF

Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigung
Institute of Machine Tools and Manufacturing

10.6 Zahnflankenbeanspruchung nach DIN 3990

$$\sigma_H = \sqrt{\frac{w_{Ht}}{d_1} \frac{i+1}{i}} Z_H Z_E Z_\varepsilon Z_\beta Z_B$$

Hertzische Pressung im Wälzpunkt

$$w_{Ht} = \frac{F_t}{b} K_A K_v K_{H\alpha} K_{H\beta}$$

Umfangskraft pro Zahnbreite

K_A

Betriebsfaktor / Anwendungsfaktor

K_v

Dynamikfaktor (innere Dynamik)

$K_{H\alpha}$

Stirnlastverteilungsfaktor (Einzel / Doppelengriff)

$K_{H\beta}$

Breitenlastverteilungsfaktor

d_1

Teilkreisdurchmesser des Antriebsrads



ETH

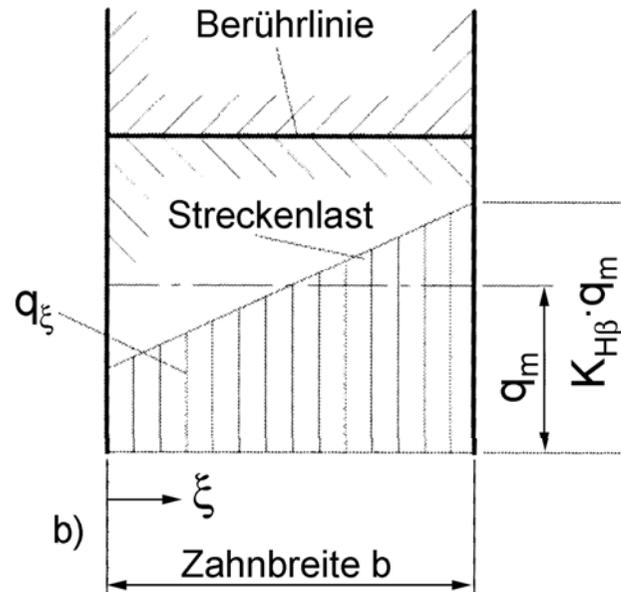
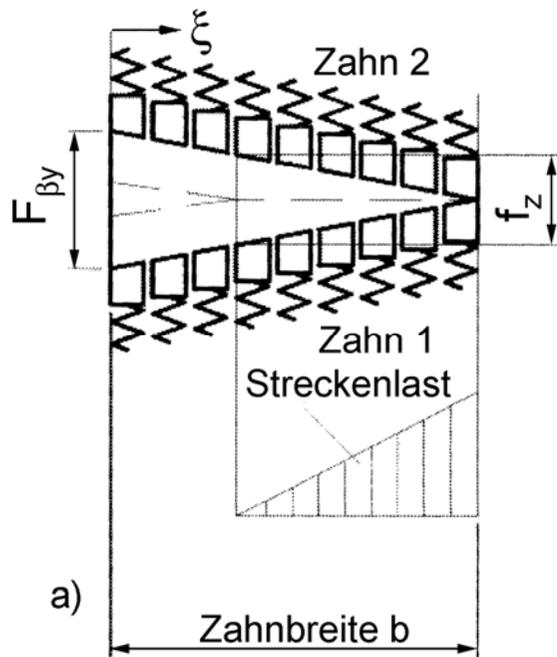
Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

IWF

Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigung
Institute of Machine Tools and Manufacturing

10.6 Zahnflankenbeanspruchung nach DIN 3990

Breitenlastverteilungsfaktor $K_{H\beta} = \frac{q_{\max}}{q_m} = \frac{f_z}{f_{z0}}$



$F_{\beta y}$ wirksame Berührlinienabweichung
 f_z Zahnpaarverformung
 q_m mittlere Streckenlast auf Zahnflanke



ETH

Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
 Swiss Federal Institute of Technology Zurich



Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigung
 Institute of Machine Tools and Manufacturing

10.6 Zahnflankenbeanspruchung nach DIN 3990

$$\sigma_H = \sqrt{K_A K_v K_{H\alpha} K_{H\beta}} \sqrt{\frac{F_t}{bd_1} \frac{i+1}{i}} Z_H Z_E Z_\varepsilon Z_\beta Z_B$$

Z_H

Zonenfaktor Umrechnung Krümmungen vom Teil- auf Betriebswälzkreis

$$Z_E = \left[\sqrt{\pi \left(\frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right)} \right]^{-1}$$

Materialfaktor

Z_ε

Überdeckungsfaktor

$$Z_\beta = \sqrt{\cos \beta}$$

Schrägenfaktorwirksame Berührlinienabweichung

Z_B

Einzeleingriffsfaktor zur Umrechnung der Krümmungen auf den inneren Einzeleingriffspunkt



ETH

Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

IWF

Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigung
Institute of Machine Tools and Manufacturing

10.6 Zahnflankenbeanspruchung nach DIN 3990

$$\sigma_{HP} = \frac{\sigma_{H \lim}}{S_{H \min}} K_L K_{HX} Z_R Z_V \quad \text{zul. Hertzsche Pressung}$$

K_L Schmierstofffaktor

K_{HX} Grössenfaktor

Z_R Rauigkeitsfaktor (steigt mit Rauigkeit)

Z_V Geschwindigkeitsfaktor (steigt mit Umfangsgeschwindigkeit)

$$S_H = \frac{\sigma_{H \lim}}{\sqrt{\frac{u+1}{u} \cdot \frac{F_t}{b \cdot d_1} \cdot Z_H \cdot Z_E \cdot Z_\varepsilon \cdot Z_\beta \cdot Z_B}} \cdot \frac{Z_V \cdot K_{HX} \cdot Z_R \cdot K_L}{\sqrt{K_1 \cdot K_V \cdot K_{F\alpha} \cdot K_{F\beta}}} \geq S_{H \min}$$



ETH

Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

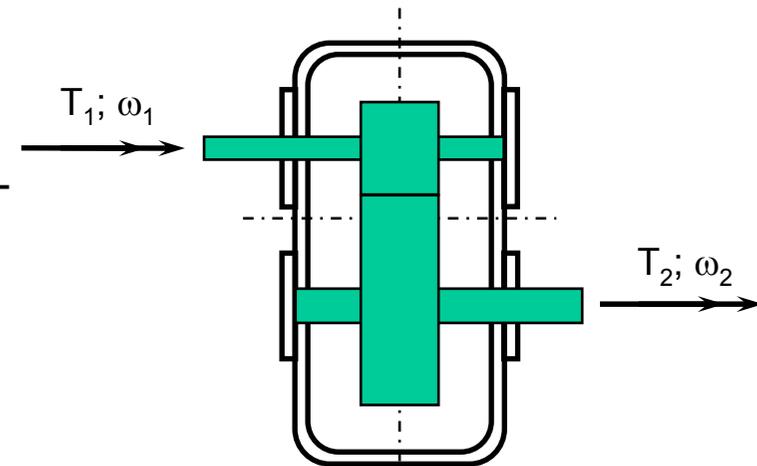
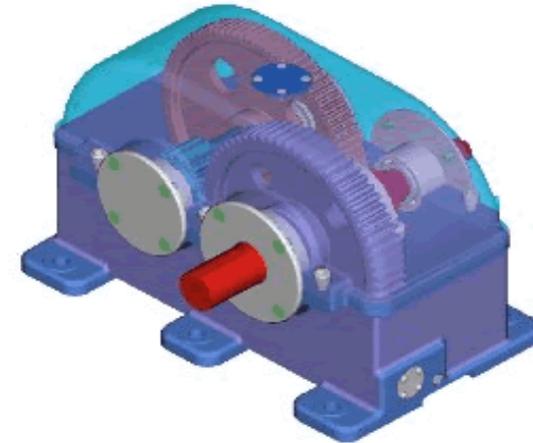
IWF

Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigung
Institute of Machine Tools and Manufacturing

Auslegung von Getrieben

Vorbetrachtungen

- Bei der Auslegung von Getrieben sind eine Vielzahl von Gesichtspunkten zu berücksichtigen
- Ausgangspunkt ist die Funktion (Drehmoment bzw. Drehzahl wandeln)
- Die Funktion wird im Übersetzungsverhältnis erfasst
- Entsprechend den Anforderungen an ein Getriebe können beispielsweise minimale Einzelabmessungen, kleine Massenträgheitsmomente oder geringe Getriebeverluste Gütekriterien sein
- Häufig wird auf mehrere Kriterien Wert gelegt



ETH

Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

IWF

Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigung
Institute of Machine Tools and Manufacturing

Auslegung von Getrieben

Vorgehen bei Entwurf und Konstruktion

- Aufstellen eines Pflichtenheftes (Checkliste), das neben den Hauptfunktionen (Leistung, Drehzahlen, Gesamtübersetzung usw.) möglichst alle Anforderungen enthalten soll, die bei der Konstruktion zu beachten sind
- Wahl von Getriebeart sowie Anschluss an Antrieb und Abtrieb
- Aufteilen der Gesamtübersetzung auf die Getriebestufen
- Bestimmung der vorläufigen Hauptabmessungen der Getriebestufen (Durchmesser, Breite)
- Festlegung von Verzahnungsdaten (Modul, Zähnezahl, Schrägungswinkel, Profilverchiebung) und Verzahnungsgenauigkeit, sowie Werkstoff, Wärmebehandlung und Herstellverfahren
- Entwerfen des Getriebes und der wichtigen Einbau- und Anbauelemente nach Anforderungen des Pflichtenheftes (Checkliste)
- Nachrechnung, Bestätigung, Detailarbeit, ...



ETH

Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

IWF

Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigung
Institute of Machine Tools and Manufacturing

Auslegung von Getrieben

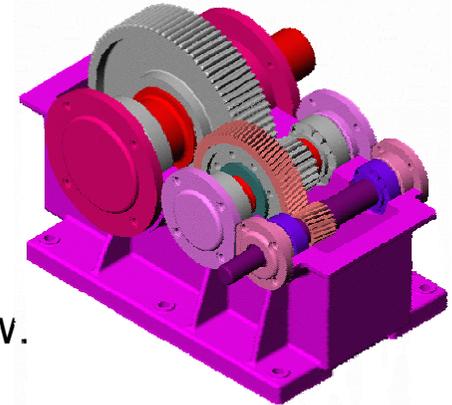
Pflichtenheft für Zahnradgetriebe

Hauptfunktionen

- An-/Abtriebsdrehzahlen, Drehrichtung
- Art der Arbeitsmaschine, der Antriebsmaschine
- Vorschriften zu den Hauptfunktionen, Getriebeart, Einbauart usw.
- Lage der Arbeitsmaschine zur Antriebsmaschine (Achsabstand)
- Leistung, Dauerbetriebsmoment, Maximalmoment, Anfahrmoment usw.

Sonstige Funktionen

- Betriebsdaten
- Fertigungsdaten
- Kräfte am Getriebe
- Kundenforderungen
- Schmierung
- Umgebung, Aufstellungsort, ...



ETH

Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

IWF

Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigung
Institute of Machine Tools and Manufacturing

Auslegung von Getrieben

Entwurf und Konstruktion von Getrieben

Getriebebauform, Anschluss an Motor und Arbeitsmaschine

- Achsabstand und Abmessungen der Wellen und Zahnräder werden oft bestimmt durch die Art der Verbindung mit Motor und Arbeitsmaschine, sowie durch Art und Grösse der Lager



Aufteilung der Gesamtübersetzung in Getriebestufen

- Meist ist es wirtschaftlich für die schneller laufende Stufe (kleineres Drehmoment) die grössere Übersetzung zu wählen
 - 1 Stufe: Gesamtübersetzung bis 8 (extrem bis 18)
 - 2 Stufen: Gesamtübersetzung von 8 bis 35 (extrem bis 60)
 - 3 Stufen: Gesamtübersetzung 45 bis 200 (extrem bis 300)



ETH

Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

IWF

Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigung
Institute of Machine Tools and Manufacturing

Auslegung von Getrieben

Entwurf und Konstruktion von Getrieben

Bestimmung der Hauptmessungen: Durchmesser, Achsabstand

- Als Tragfähigkeitskennwert wird der K -Faktor (K^*) benutzt aus Erfahrungswerten in Tabellen gegeben

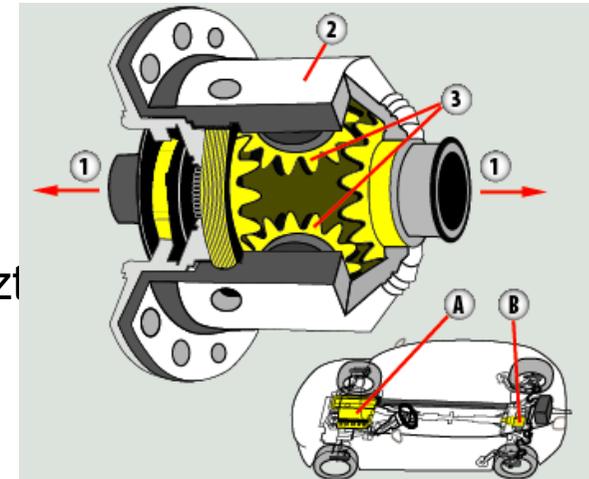
$$d_1 = \sqrt{\frac{4 \cdot T_1 \cdot (i + 1)}{K^* \cdot b \cdot i}}$$

Wahl der Zahnbreite b

- Kompakte Getriebe sind kostengünstiger, also es werden grosse b/d -Werte angestrebt

Geradverzahnung – Schrägverzahnung/Schrägungswinkel

- Eigenschaften und Gesichtspunkte für die Wahl nach Tragfähigkeit, Lagerung, Geräuschverhalten und weitere Aufgaben



ETH

Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

IWF

Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigung
Institute of Machine Tools and Manufacturing

Auslegung von Getrieben

Entwurf und Konstruktion von Getrieben

Wahl der Zähnezahl z_1 und Modul m

- Bei gegebenem Achsabstand und gegebener Übersetzung ändern sich Tragfähigkeit und Betriebsverhalten mit zunehmender Zähnezahl (Norm). Z. B.
 - $z_1 = 12$; $n_1 < 1400$ rpm
 - $z_1 = 16$; $n_1 \cong 1400$ rpm
 - $z_1 = 22$; $n_1 > 1400$ rpm
 - $z_1 = 30$ für Schiffsgetriebe (Turbinen)

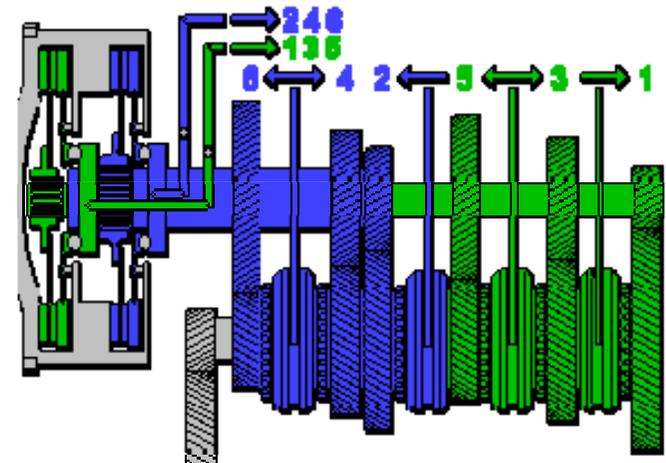
$$m = \frac{d_1}{z_1}$$

Wahl des Bezugsprofils und der Profilverschiebung

- Nach gewünschten Eigenschaften, nach Norm, ...

Berechnung der Verzahnungsdaten

- Nach Gleichungen



ETH

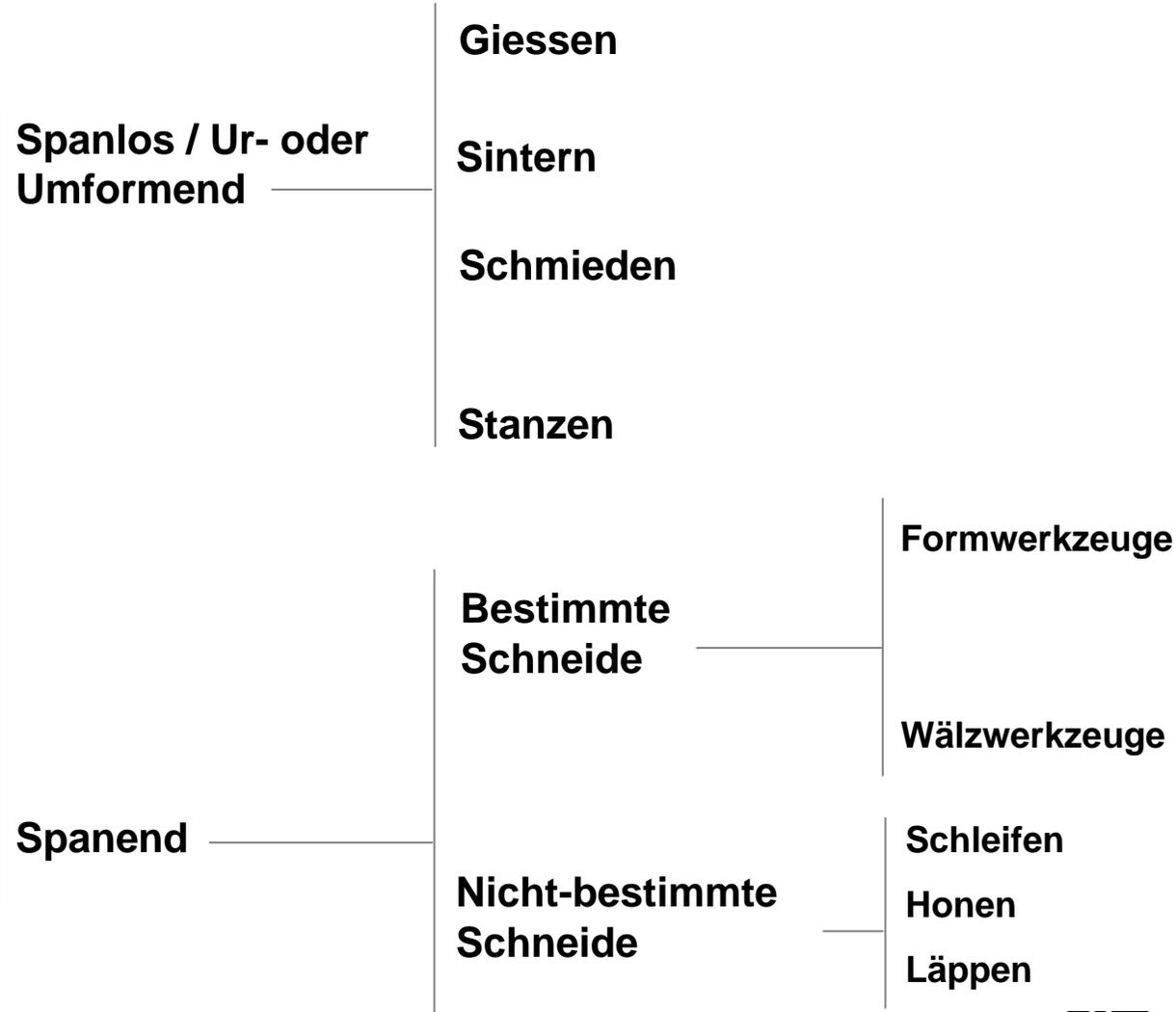
Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

IWF

Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigung
Institute of Machine Tools and Manufacturing

Herstellungsverfahren für Zahnräder

Verfahren



ETH

Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

IWF

Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigung
Institute of Machine Tools and Manufacturing

Herstellverfahren für Zahnräder

- Zum Herstellen von Verzahnungen sind hochgenau arbeitende Werkzeugmaschinen erforderlich
- Die Werkzeugmaschinen haben häufig komplexe Bewegungskopplungen der Maschinenachsen
- Die geometrische Vielfalt der Verzahnungswerkstücke ist durch die Vielzahl der gebräuchlichen Verzahnungs- und Getriebearten bedingt



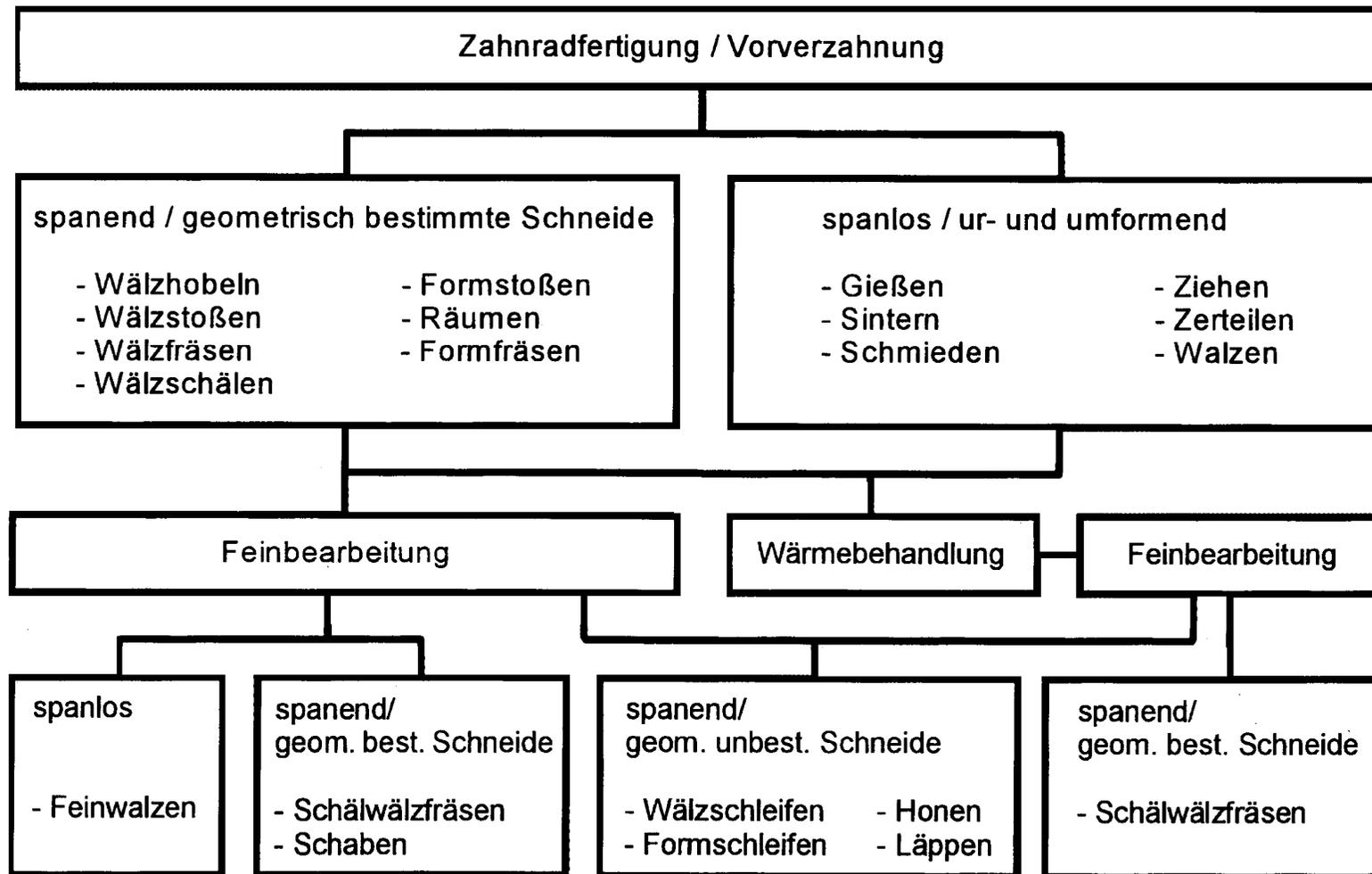
ETH

Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

IWF

Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigung
Institute of Machine Tools and Manufacturing

Herstellungsverfahren für Zahnräder



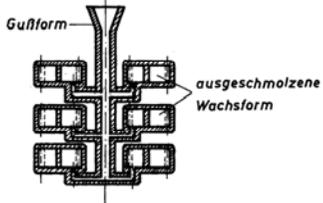
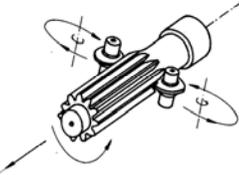
ETH

Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

IWF

Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigung
Institute of Machine Tools and Manufacturing

Herstellungsverfahren für Zahnräder

lfd. Nr.	Verfahren /Funktionsweise	Abmessungsbereich, Qualität nach DIN 3962/63	Anwendungsbereich	Hinweise
1. Urformende Verfahren				
1	<u>Feingießen</u> Wachsausschmelzverfahren 	Gußteile bis ca. 100 kg	niedrig belastbare Stirnräder, kleine Stückzahlen	verzahnte Werkstücke komplizierter Geometrie, Toleranzen zwischen $\pm 0,3 \dots \pm 0,7 \%$ vom Nennmaß, meist spanende Fertigbearbeitung
2	<u>Sintern</u> üblicher Ablauf: 1. Mischen des aufbereiteten Metallpulvers 2. Volumendosierung und Pressen 3. Verfestigung des abgeformten Rohteils	$l < 50 \text{ mm}$ $l/d < 2,5$ Wandstärke $> 2 \text{ mm}$ 0,1 bis 1 kg	Eisenlegierungen, Messing, Bronze, Al-Legierungen, Geringe Belastbarkeit, Massenfertigung $> 10\,000$ Stück	hohe Produktivität, hohe Pulver- und Werkzeugkosten
2. Umformtechnische Verfahren				
3	<u>Strangpressen</u> Pressen von Rundstahl durch Negativprofil oberhalb Rekristallisationstemperatur	$d \leq 25 \text{ mm}$	Ritzel aus unlegiertem Stahl, Großserien- und Massenfertigung	meist spanende Fertig- oder Feinbearbeitung
4	<u>Präzisionsschmieden</u> Wampressen einzeln im Gesenk	$d \leq 110 \text{ mm}$ (geradverzahnt); $d \leq 240 \text{ mm}$ (konisch verzahnt) Qualität bis 6	geradverzahnte Stirnräder Konozyklverzahnung (konisch)	meist spanende Nachbearbeitung erforderlich
5	<u>Kaltwalzen</u> GROB-Verfahren 	$d_a \leq 214 \text{ mm}$ $z = 10 \text{ bis } 60$ $l_z \leq 900 (1450) \text{ mm}$ Qualität bis 6	Fertigverzahnen vorgefräster Zylinderräder und dünnwandiger zylindrischer Hohlteile mit Innen- und Außenverzahnung, Mittelserienfertigung	kurze Taktzeiten, niedrige Werkzeugkosten, hohe Genauigkeit, Festigkeitserhöhung, Gefügeverbesserung



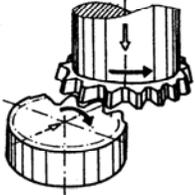
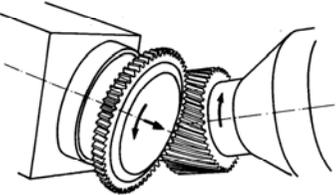
ETH

Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

IWF

Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigung
Institute of Machine Tools and Manufacturing

Herstellungsverfahren für Zahnräder

Ifd. Nr.	Verfahren /Funktionsweise	Abmessungsbereich, Qualität nach DIN 3962/63	Anwendungsbereich	Hinweise
3. Spanende Verfahren mit geometrisch bestimmter Schneide				
6	<p><u>Wälzhobeln</u> Wälzverfahren mit zahnstangenförmigem Werkzeug</p> 	$m < 50 \text{ mm}$ $d \leq 14\,000 \text{ mm}$ Qualität bis 5	Großmodulige ungehärtete und gehärtete Verzahnung (MHC-Hobeln), Einzel- bis Kleinserienfertigung	
7	<p><u>Wälzstoßen</u> Wälzverfahren mit stirnrädförmigem Werkzeug</p> 	$m < 12 \text{ (14) mm}$ $d < 1250 \text{ mm}$ Qualität bis 6	Ungehärtete nicht wälzfräsbare Verzahnung, Einzel- bis Mittelserienfertigung	
8	<p><u>Wälzschälen</u> Schraubwälzverfahren mit stirnrädförmigem Werkzeug</p> 	$m \leq 3 \text{ mm}$ $d < 160 \text{ mm}$ Qualität bis 6	Gehärtete Verzahnung, Großserienfertigung	



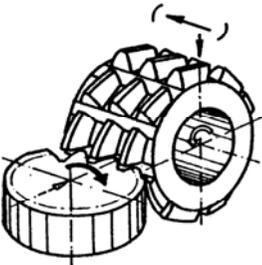
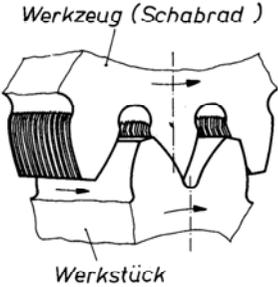
ETH

Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

IWF

Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigung
Institute of Machine Tools and Manufacturing

Herstellungsverfahren für Zahnräder

lfd. Nr.	Verfahren /Funktionsweise	Abmessungsbereich, Qualität nach DIN 3962/63	Anwendungsbereich	Hinweise
9	<p><u>Wälzfräsen</u> Schraubwälzverfahren mit schneckenförmigem Werkzeug</p> 	$m = (0,1) 0,2 \dots 25 (50) \text{ mm}$ $0 < d < 5\ 000 (12\ 000) \text{ mm}$ Qualität bis 6 (7)	Ungehärtete und gehärtete Verzahnung, Einzel- bis Großserienfertigung	Hohe Werkzeugkosten beim Schälwälzfräsen gehärteter Verzahnung
10	<p><u>Wälzschaben</u> Schraubwälzverfahren mit stirnrädförmigem Werkzeug</p>  <p>Achslage analog lfd. Nr. 16/17</p>	$m < 8 (20) \text{ mm}$ $d < 320 (6000) \text{ mm}$ Qualität bis 5 abhängig von der Vorbearbeitungsgenauigkeit	Ungehärtete Verzahnung, Mittel- bis Großserienfertigung	Verzugsarmes Härteverfahren erforderlich, Auslegung des Werkzeuges werkstück- oder werkstückgruppenspezifisch



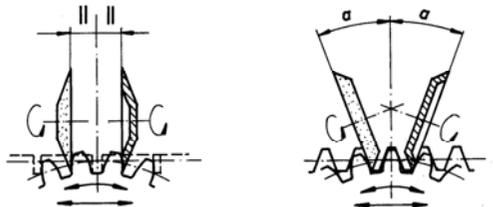
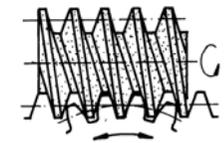
ETH

Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

IWF

Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigung
Institute of Machine Tools and Manufacturing

Herstellverfahren für Zahnräder

lfd. Nr.	Verfahren /Funktionsweise	Abmessungsbereich, Qualität nach DIN 3962/63	Anwendungsbereich	Hinweise
4. Spanende Verfahren mit geometrisch bestimmter Schneide 4.1. Schleifverfahren				
11	<p><u>Diskontinuierliches Wälzschleifen</u> MAAG Teilwälzschleifen mit Tellerschleifkörpern im</p> <p style="text-align: center;">0°-Verfahren α-Verfahren</p> 	$m \leq 36 \text{ mm}$ $d < 4\,734 \text{ mm}$ Qualität bis 2	Ungehärtete und gehärtete Präzisionsverzahnung, Einzel- und Kleinserienfertigung	Geringe Produktivität infolge Punktberührung zwischen Schleifkörper und Werkstück sowie Trockenschliff
12	<p><u>Diskontinuierliches Wälzschleifen</u> Teilwälzschleifen mit Doppelkegel-Schleifkörper (NILES, HÖFLER)</p> 	$m \leq 40 \text{ mm}$ $d < 4\,000 \text{ mm}$ Qualität bis 3 (4) je nach Größe der Verzahnung	Ungehärtete und gehärtete Verzahnung vorwiegend großer Abmessungen, Einzel- bis Kleinserienfertigung	Auf möglichen Schleifbrand oder Schleifrisse achten
13	<p><u>Kontinuierliches Wälzschleifen</u> Schraubwälzschleifen mit zylindrischer Schleifschnecke (REISHAUER)</p> 	$m \leq 8 \text{ mm}$ $d < 820 \text{ mm}$ Qualität bis 3	Ungehärtete und gehärtete Verzahnung, Klein- bis Großserienfertigung	



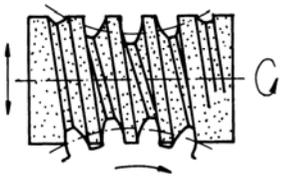
ETH

Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

IWF

Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigung
Institute of Machine Tools and Manufacturing

Herstellverfahren für Zahnräder

Ifd. Nr.	Verfahren /Funktionsweise	Abmessungsbereich, Qualität nach DIN 3962/63	Anwendungsbereich	Hinweise
14	<p><u>Diskontinuierliches Profilschleifen</u> Schraubverfahren mit Radial-Profilschleifkörpern (KAPP, NILES, PFAUTER)</p> <p style="text-align: right;">Tangential-Profilschleifkörpern (NILES, KAPP, ...)</p> 	<p>$m \leq 12$ (18)mm $d \leq 1250$ mm Qualität bis 2</p> <p>als Zusatzeinrichtung: $m \leq 25$ mm $d \leq 4\ 000$ mm Qualität bis 4 (5)</p>	<p>Ungehärtete und gehärtete Verzahnung, Klein- bis Großserienfertigung</p>	<p>Galvanisch gebundene CBN-Schleifkörper, zunehmend mit abrichtbaren keramisch gebundenen CBN-Schleifkörpern</p>
15	<p><u>Kontinuierliches Profilschleifen</u> Einstechschleifen im Schraubverfahren mit globoidischer Schleifschnecke (REISHAUER)</p> 	<p>$m \leq 3$ mm $d \leq 200$ mm Qualität bis 4</p>	<p>gehärtete Schrägverzahnung, Großserien- bis Massenfertigung</p>	<p>Hochproduktives Verfahren, vorzugsweise im PKW-Getriebebau</p>



ETH

Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

IWF

Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigung
Institute of Machine Tools and Manufacturing

Giessen

Sand, Druck- und Feingiessen

- Niedrig belastbare Stirnräder, kleine Stückzahlen
- Druckgiessen vorwiegend eingesetzt bei Kunststoffteilen, aber auch für metallische Zahnräder einsetzbar
- Druckgiessen normalerweise bei großen Mengen eingesetzt, bei geringerer Belastung, kleine Module
- Einige Verfahren ermöglichen gute Qualität der Teile



ETH

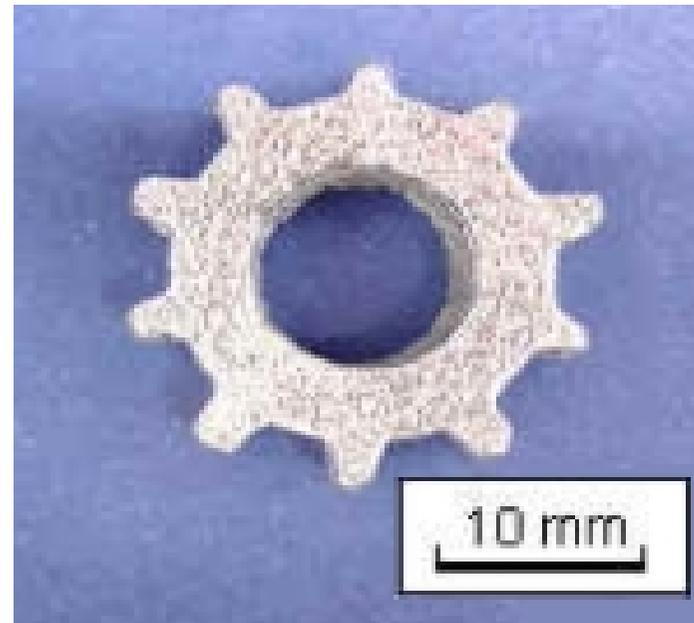
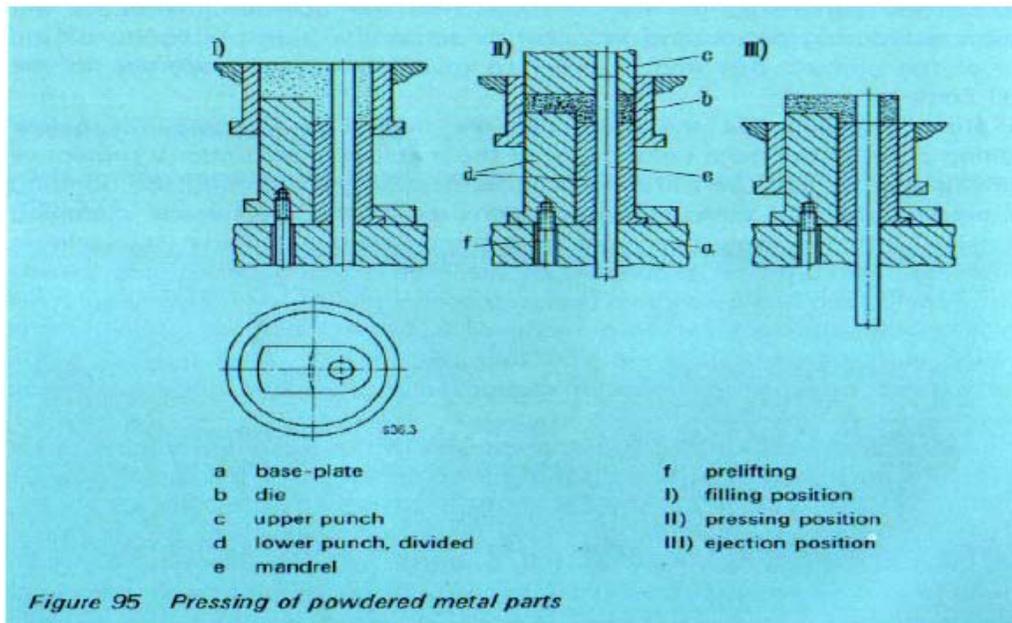
Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

IWF

Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigung
Institute of Machine Tools and Manufacturing

Sintern

- Für kleine Zahnräder
- Präzise Teile können hergestellt werden
- Hohe Produktivität
- Hohe Pulver- und Werkzeugkosten



ETH

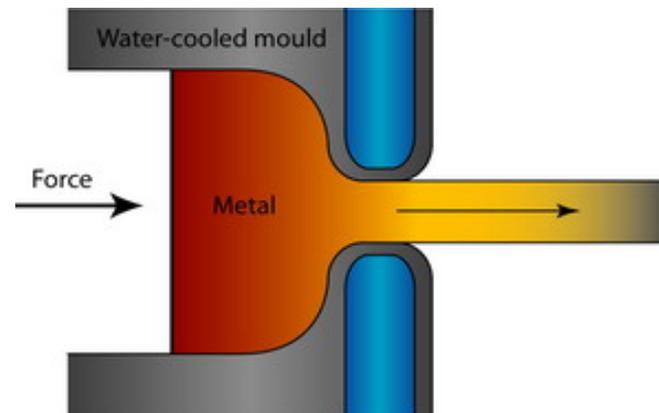
Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

IWF

Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigung
Institute of Machine Tools and Manufacturing

Strangpressen und Stanzen

- Pressen von Rundstahl durch Negativprofil oberhalb der Rekristallisationstemperatur
- Nur für kleine Durchmesser
- Kosten nur für Massenproduktion gerechtfertigt
- Oberflächenqualität kann gut sein
- Meist spanende Nachbearbeitung erforderlich



ETH

Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

IWF

Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigung
Institute of Machine Tools and Manufacturing

Präzisionsschmieden

- Warmpressen einzeln im Gesenk
- Verfahren wird noch entwickelt
- Geradeverzahnte Stirnräder oder konische Verzahnung
- Meist spanende Nachbearbeitung erforderlich
- Gute mechanischen Eigenschaften, hohe Oberflächenhärte



ETH

Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

IWF

Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigung
Institute of Machine Tools and Manufacturing

Kaltwalzen

- Zylinderräder und dünnwandige zylindrische Hohlteile mit Innen- und Außenverzahnungen
- kurze Taktzeiten, hohe Genauigkeit
- niedrige Werkzeugkosten
- Festigkeitserhöhung, Gefügeverbesserung



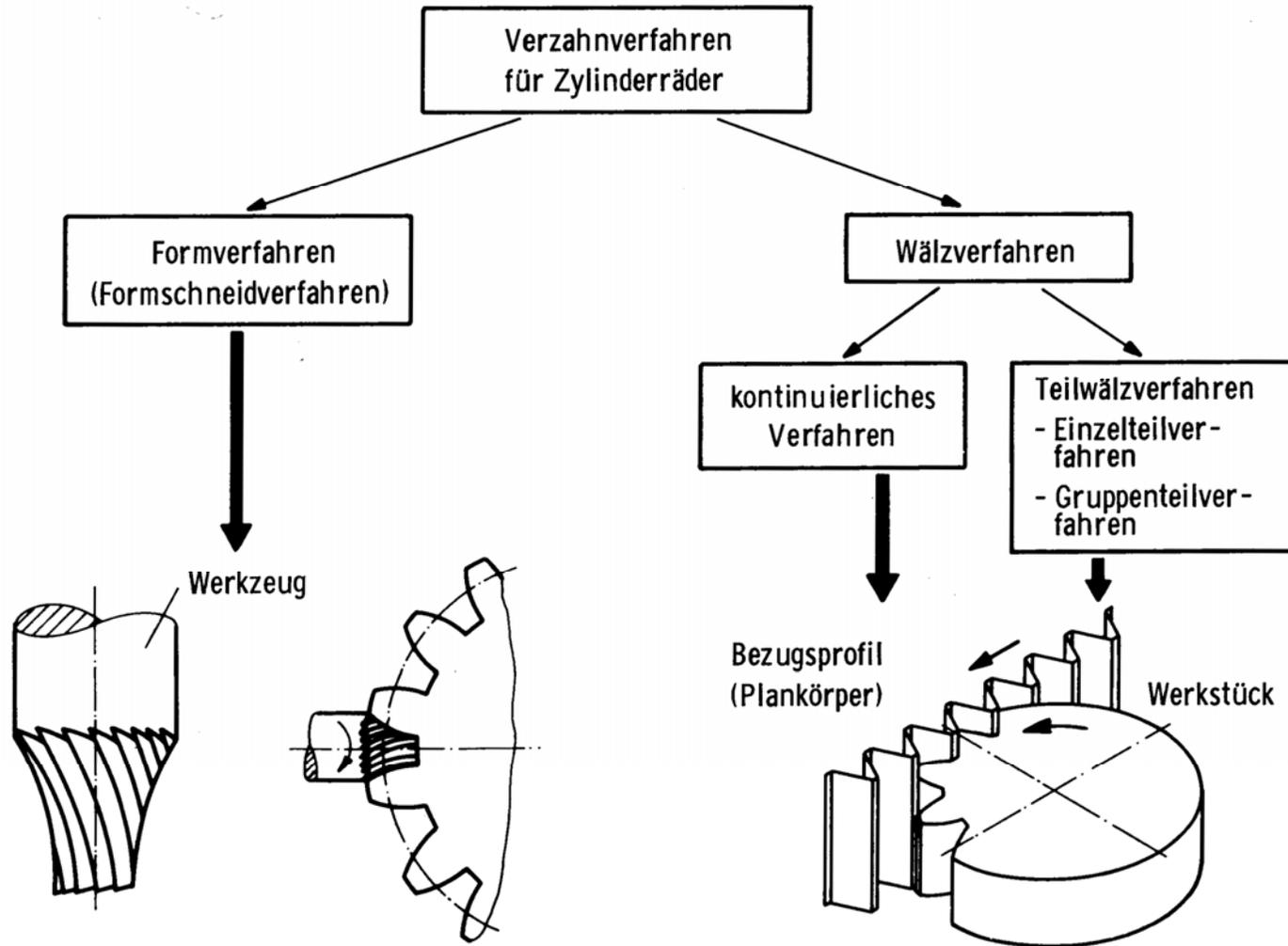
ETH

Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

IWF

Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigung
Institute of Machine Tools and Manufacturing

Spanende Verfahren



ETH

Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

IWF

Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigung
Institute of Machine Tools and Manufacturing

Formverfahren

Das Werkzeug hat die Kontur der Zahnflanke

Jede Zahnlücke wird einzeln bearbeitet, danach wird das Rad um eine Zahnteilung weitergeschaltet

→ Für jede Zahnradgeometrie wird ein eigenes Werkzeug gebraucht, daher Anwendung nur bei sehr grossen Zahnrädern oder sehr hohen Stückzahlen kleiner Zahnräder



Neues Werkzeug für:

- Profilverschiebung
- geänderte Zähnezahl



ETH

Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

IWF

Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigung
Institute of Machine Tools and Manufacturing

Räumen

- Zerspanung vor allem von Innenverzahnungen mit kleinem Durchmesser
- Sehr gute Form- und Oberflächenqualität erreichbar
- Verzahnungsspezifisch ist nur das Räumwerkzeug, welches die Form der Zahnlücke hat
- Sehr teure Werkzeuge, sehr hohe Produktionsleistung



ETH

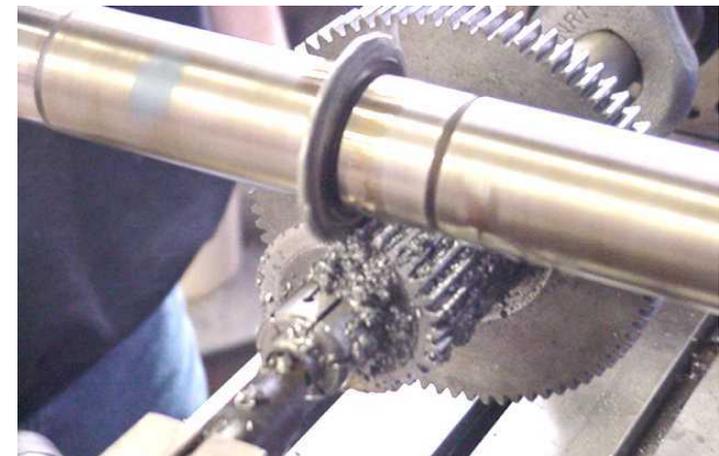
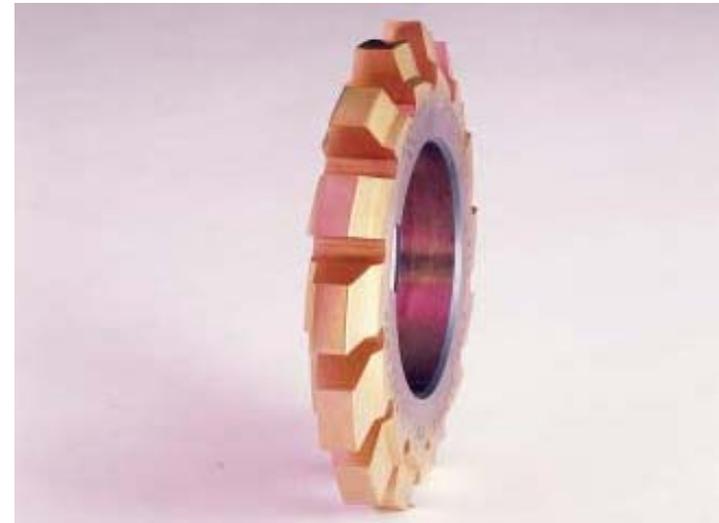
Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

IWF

Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigung
Institute of Machine Tools and Manufacturing

Profilfräsen mit Scheibenfräser

- Einfach und häufig benutzt
- Herstellung der Zahnform mit mindestens zwei radialen Vorschüben (rechte und linke Flanke). Dazwischen Repositionierung, damit die Zahnprofilverjüngung entsteht
- Anwendung auf Universalfräsmaschinen mit Teileinrichtung → geringe Produktivität, geringe Genauigkeit



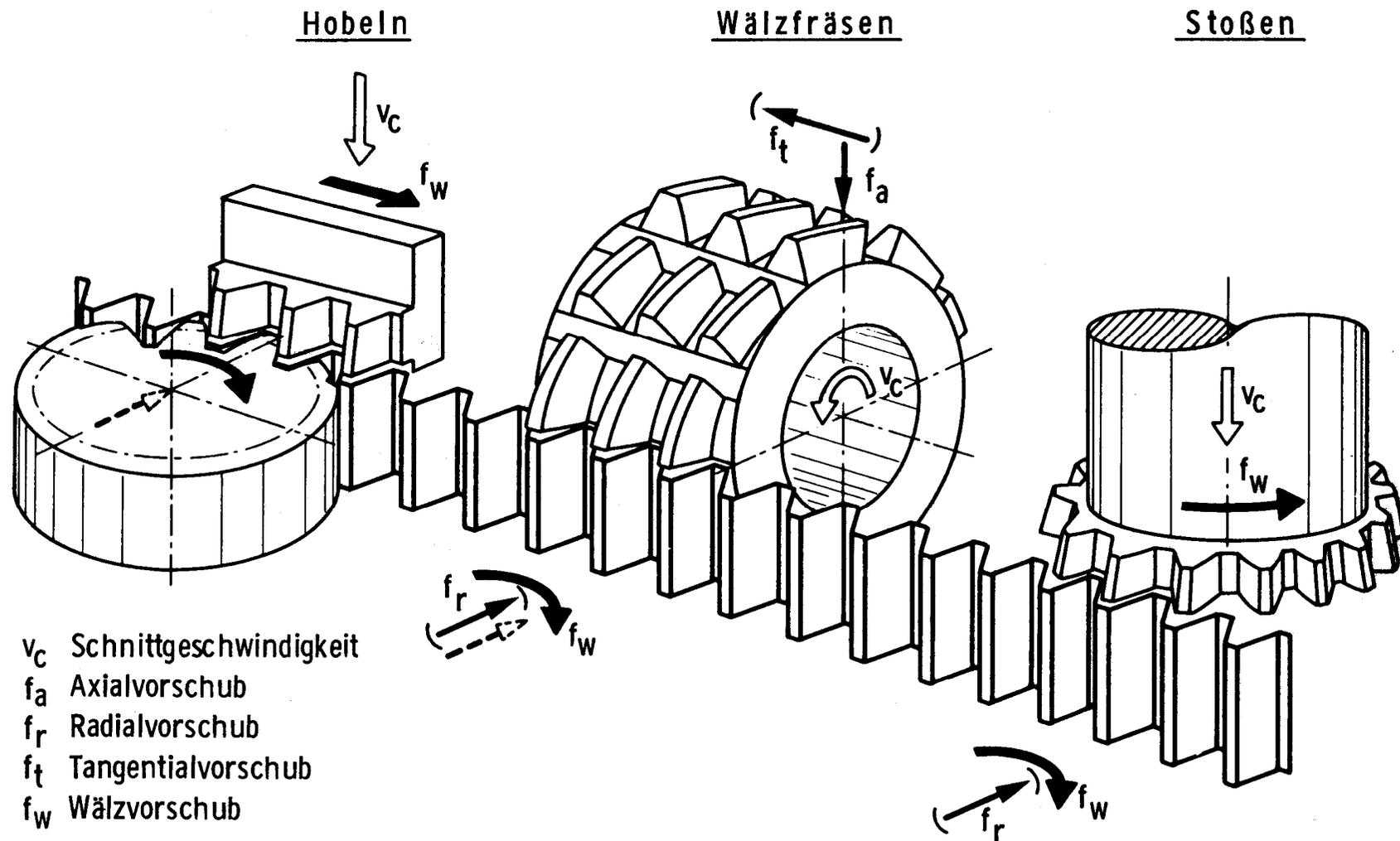
ETH

Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

IWF

Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigung
Institute of Machine Tools and Manufacturing

Wälzverfahren



ETH

Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

IWF

Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigung
Institute of Machine Tools and Manufacturing

Wälzverfahren

Zerspanprozesse → Wälzverfahren

Für präzise Verzahnungen werden die Zahnräder normalerweise durch Zerspanprozesse hergestellt

Die dominanten Zerspanverfahren sind die Wälzverfahren

- Wälzverfahren: Abbildung der Definition der Evolventen als Erzeugung mittels Bezugsprofilwerkzeug, welches auf dem Wälzkreiszyylinder abwälzt
- Die Zahnflanke entsteht als Einhüllende verschieden positionierter Werkzeug-schnittflächen



ETH

Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

IWF

Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigung
Institute of Machine Tools and Manufacturing

Wälzverfahren

Häufig angewendete Wälzverfahren

PFAUTER (Wälzfräsen)

MAAG (Wälzhobeln)

FELLOWS (Wälzstossen)

GLEASON (Teilwälzfräsen)



ETH

Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

IWF

Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigung
Institute of Machine Tools and Manufacturing

Wälzverfahren

Translatorische Wälzkomponente vom Werkzeug oder Werkrad

Rotatorische Wälzkomponente vom Werkrad

→ Maschinenachsen miteinander mechanisch oder elektronisch gekoppelt.

Mit einem Werkzeug lassen sich alle Räder gleichen Moduls fertigen, unabhängig von der Zähnezahl und der Profilverchiebung

Abschnittsweise arbeitend:
Abwälzbewegung abschnittsweise, danach Umsetzen nicht wälzend.

Kontinuierlich arbeitend:
kontinuierliches Abwälzen über den ganzen Zahnradumfang.



ETH

Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

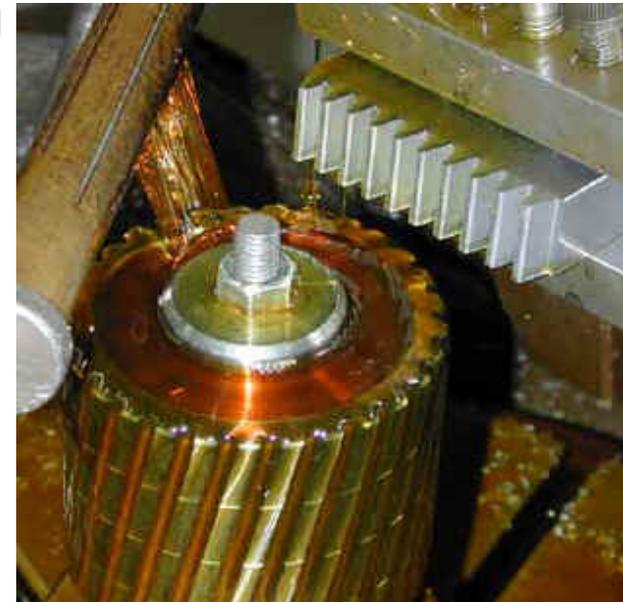
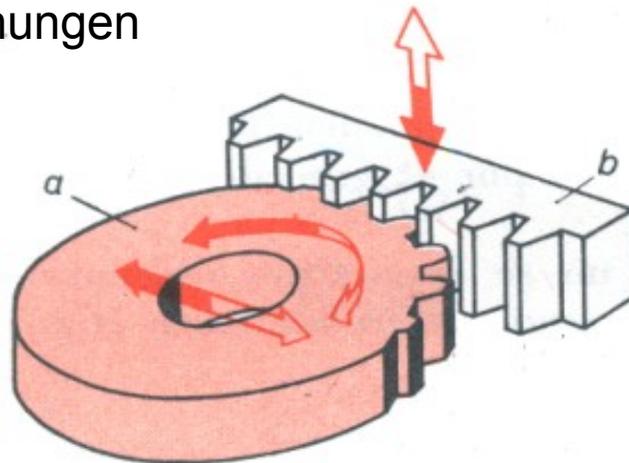
IWF

Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigung
Institute of Machine Tools and Manufacturing

Wälzhobeln

MAAG

- Wälzvorgang: Abrollen des Stirnrads auf einer Zahnstange, die das Werkzeug darstellt (Hobelkamm/Zahnstange), der so angeschliffen ist, dass Span- und Freiwinkel auf allen Schneidkanten entstehen.
- Oszillierende Schnittbewegung, Wälzvorschub steht still während des Schnittes
- Rückhub ohne Bearbeitung, derweil Weiterschaltung der Abwälzbewegung
- nur Außenverzahnungen



ETH

Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

IWF

Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigung
Institute of Machine Tools and Manufacturing

Wälzhobeln

MAAG

- Zerspanung durch ein Zahnstangenwerkzeug
- Hobelkamm weniger Zähne als Werkrad → Reversierbewegung erforderlich
- Dazu Reversiermotor, der im Eilgang um genau gerade Teilungen des Hobelkamms den Wälzschlitten verschiebt
- Modul und Zähnezahl bestimmen den Durchmesser des Werkrads und damit das Verhältnis zwischen Rotation und Wälzvorschub
- Bei schrägverzahnten Rädern: Schwenkung der Stösselführung um den Schrägungswinkel



ETH

Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

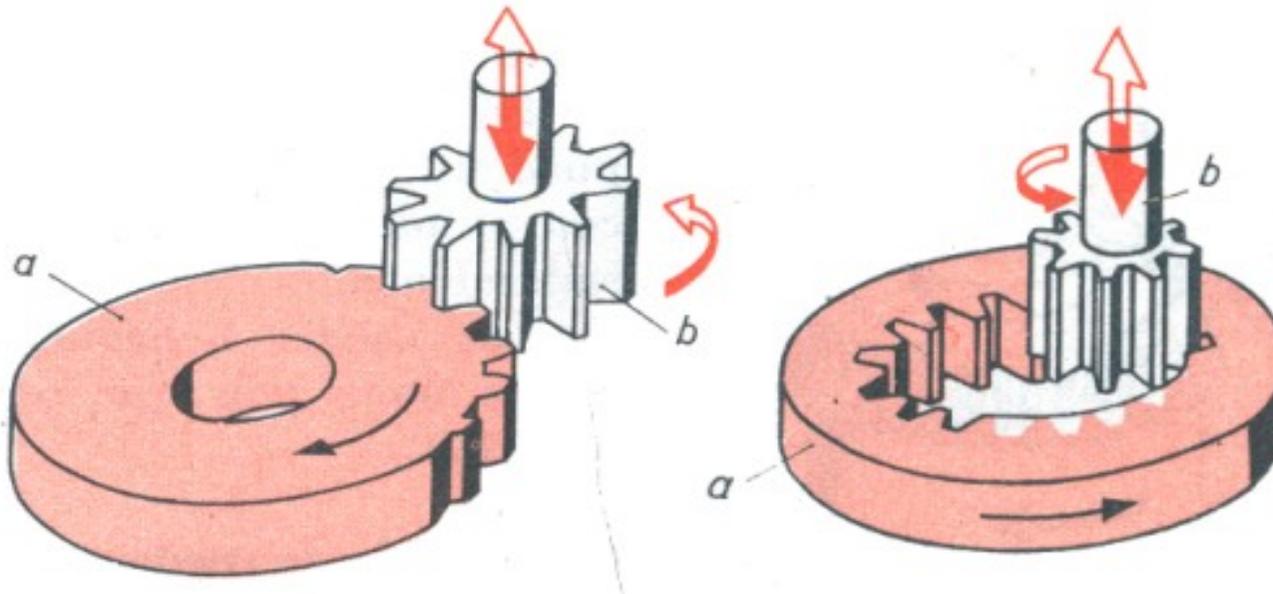
IWF

Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigung
Institute of Machine Tools and Manufacturing

Wälzstossen

Felows

- Ähnlich wie MAAG-Verfahren, aber Werkzeug hat die Form eines Zahnrades
- Viele verschiedene Arten Zahnräder können hergestellt werden (geradeverzahnte, innenverzahnte, schägverzante, ...)



ETH

Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

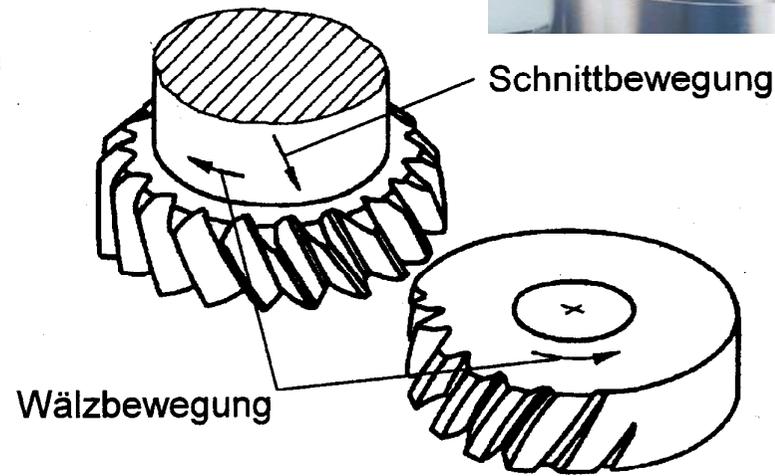
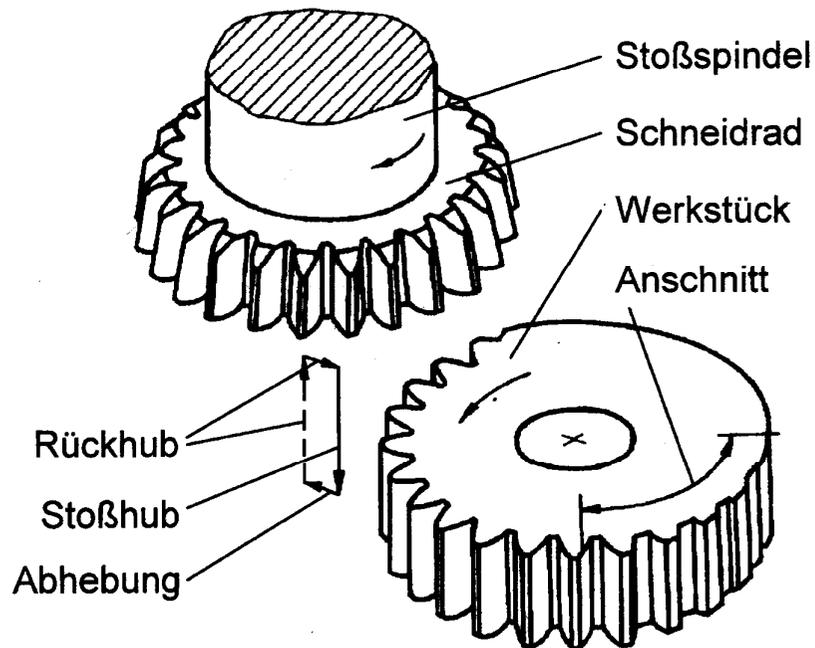
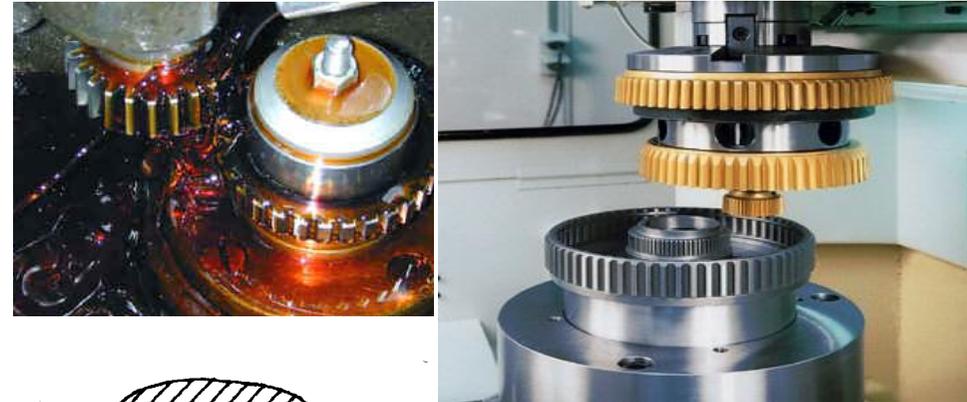
IWF

Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigung
Institute of Machine Tools and Manufacturing

Wälzstossen

Fellows

Geradverzahnung



ETH

Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

IWF

Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigung
Institute of Machine Tools and Manufacturing

Wälzfräsen

Pfauter

Herstellung von Gerad- und Schrägverzahnungen

Wälzvorgang: Abrollen des Stirnrads auf einer gedachten Zahnstange, die die Einhüllende der Schneiden des Fräswerkzeugs ist

- Fräswerkzeug ist eine Trapezschncke, deren Gänge durch Spannuten unterbrochen sind
- Schnittbewegung aus Drehung der Schnecke, tangentielle Bewegung aufgrund der Steigung der Schnecke
- Zusätzlich axiale Vorschubbewegung zur Bearbeitung der Zahnbreite
- Shiften: Verschieben der Schnecke, um gleichmässige Abnutzung zu erreichen.
- Diagonalfräsen: Gleichzeitig Shiften und Axialbewegung.



ETH

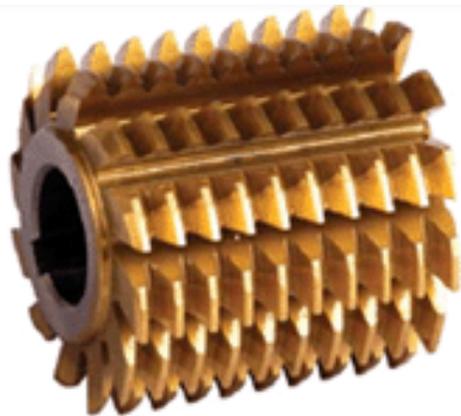
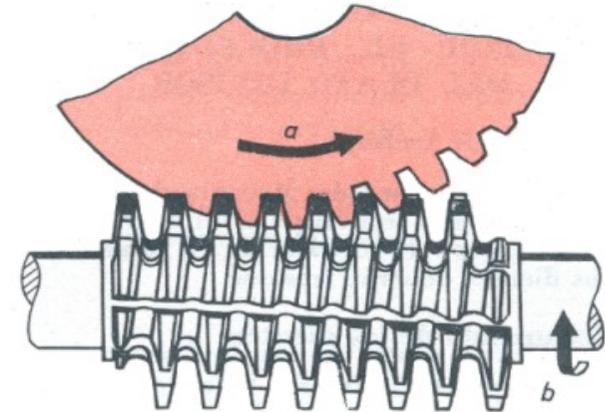
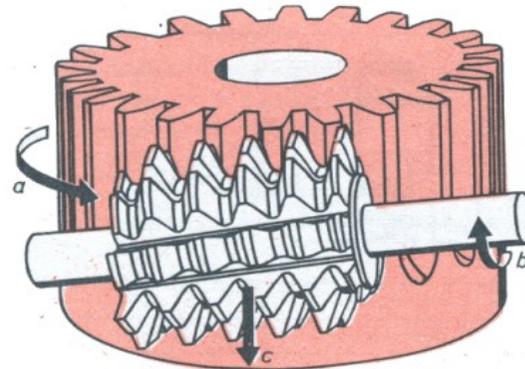
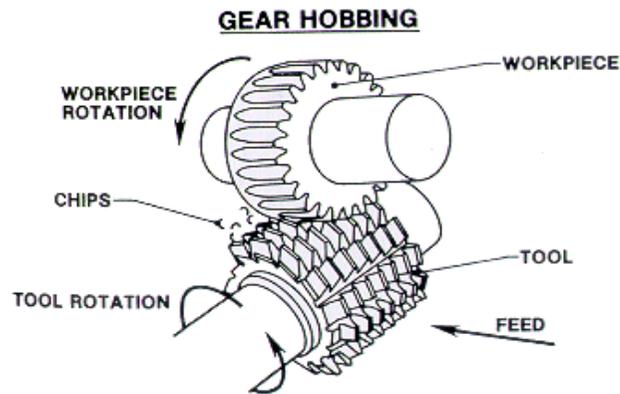
Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

IWF

Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigung
Institute of Machine Tools and Manufacturing

Wälzfräsen

Pfauter



ETH

Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

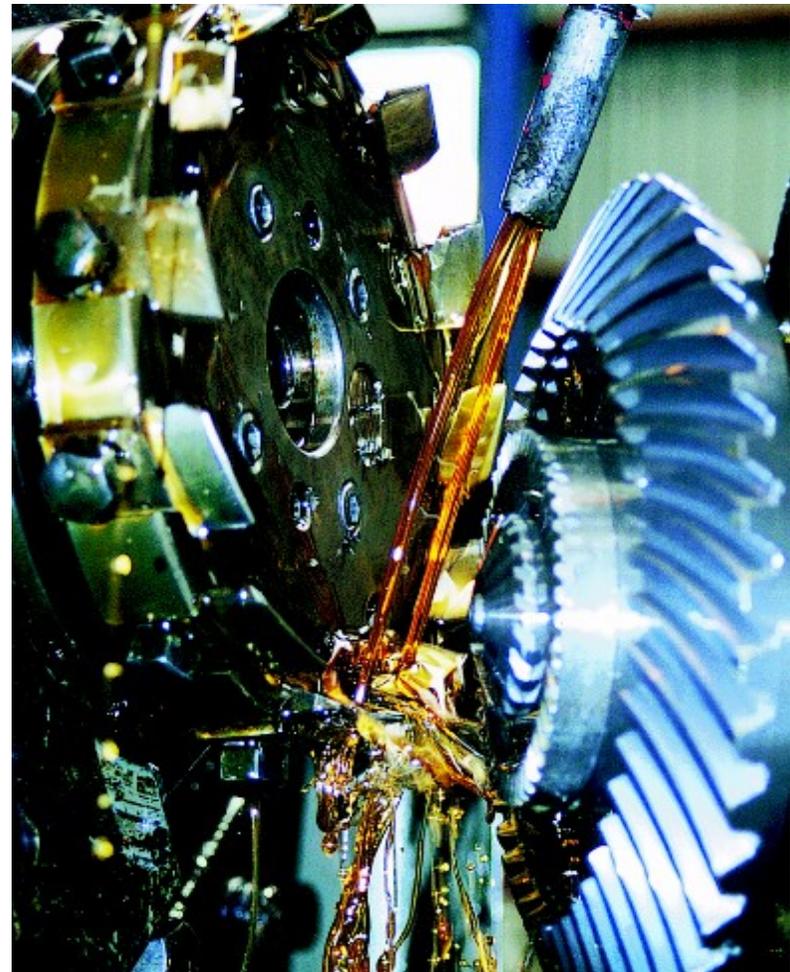
IWF

Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigung
Institute of Machine Tools and Manufacturing

Teilwälzfräsen

Gleason

- Teilwälzverfahren zur Erzeugung kreisbogenförmiger Flanken
- Nach jeder Flanke Weiterteilung ohne Wälzen
- Schneiden (trapezförmig) beschreiben durch Werkzeugdrehung eine Kreisbahn und bearbeiten zugleich rechte und linke Flanke eines Zahns
- Die die Zahnlücken begrenzenden Zahnflanken sind parallel
- Gegenrad muss so gefertigt werden, dass die den Zahn begrenzenden Flanken parallel sind
→ Hohlwerkzeug



ETH

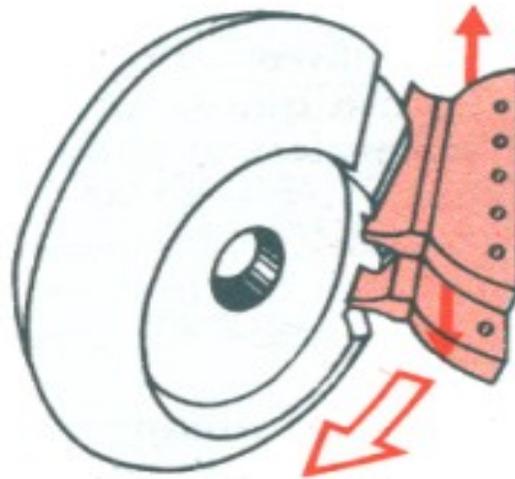
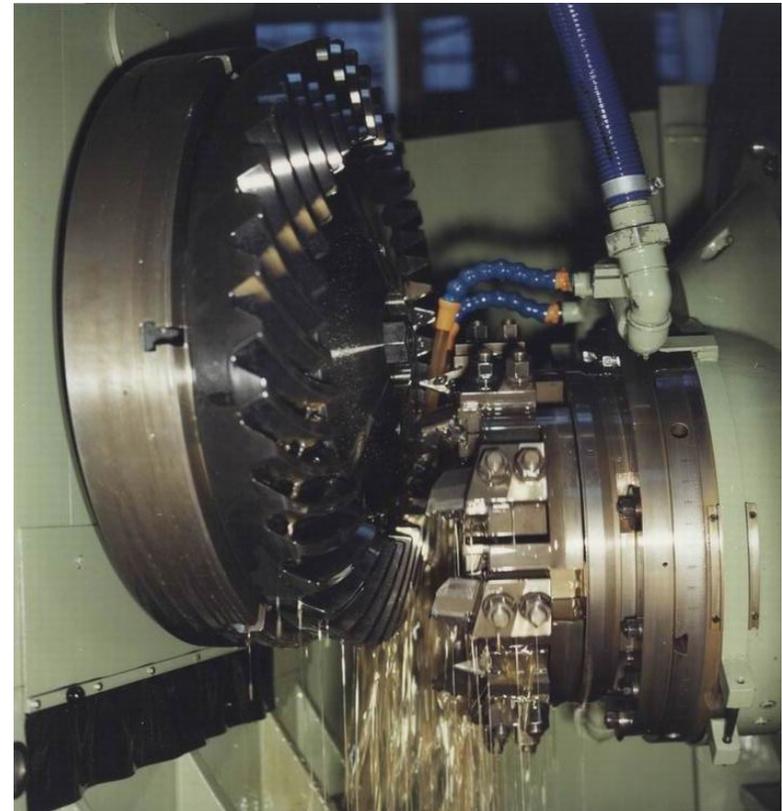
Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

IWF

Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigung
Institute of Machine Tools and Manufacturing

Teilwälzfräsen

Gleason



ETH

Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

IWF

Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigung
Institute of Machine Tools and Manufacturing

Wälzschaben

Endbearbeitung (Schlichten)

Kann das Schleifen ersetzen

- Werkzeuge normalerweise aus HSS
- Korrigiert praktisch 70% aller Fehler der vorigen Bearbeitung
- Einsetzbar für Innen- und Außenverzahnungen, Gerad- und Schrägverzahnungen
- Häufig angewendet nach dem Härten
- Minimiert Geräusche



ETH

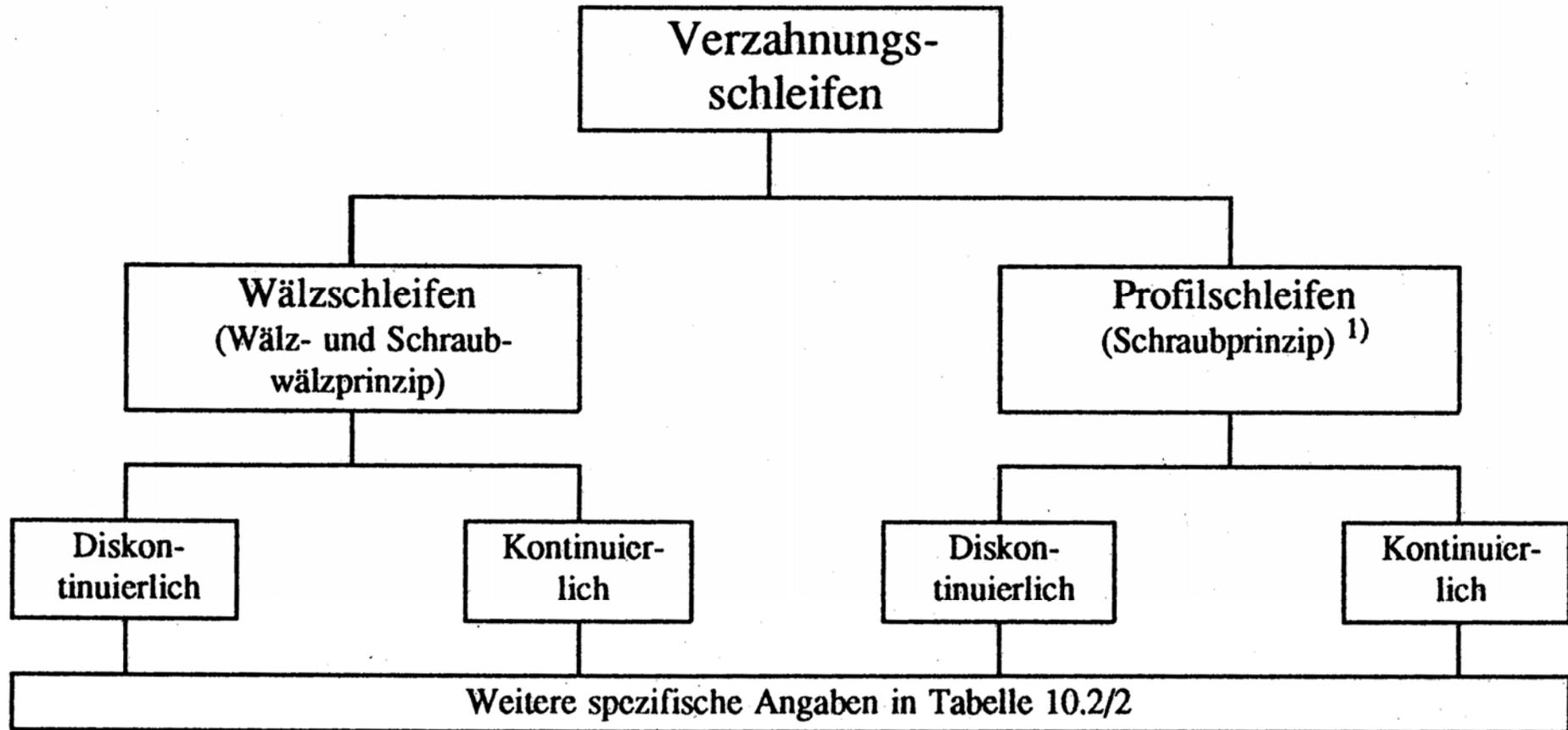
Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

IWF

Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigung
Institute of Machine Tools and Manufacturing

Schleifen

Spanen mit geometrisch unbestimmten Schneiden zur Fein- und Endbearbeitung



ETH

Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

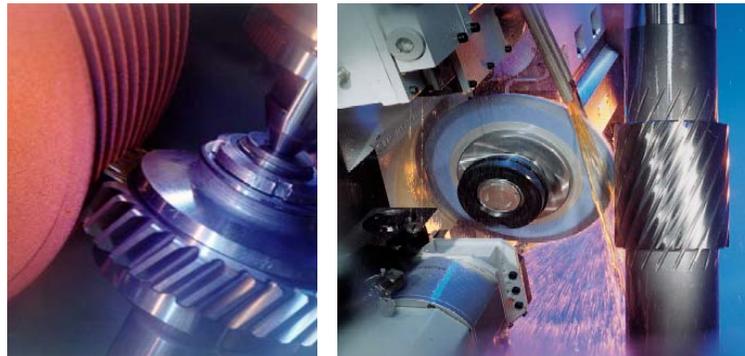
IWF

Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigung
Institute of Machine Tools and Manufacturing

Schleifen

Ziele

- Ausgleich von Verzug aus der Wärmebehandlung
- Beseitigung von Hüllschnittabweichungen
- IdR. werden dabei die Profil- und Flankenmodifikationen eingebracht
- Abwälzbewegung allein erzeugt wegen der (unendlich) dicht stehenden Schneidkanten eine exakte Evolvente
- Bessere Qualität des Rades



ETH

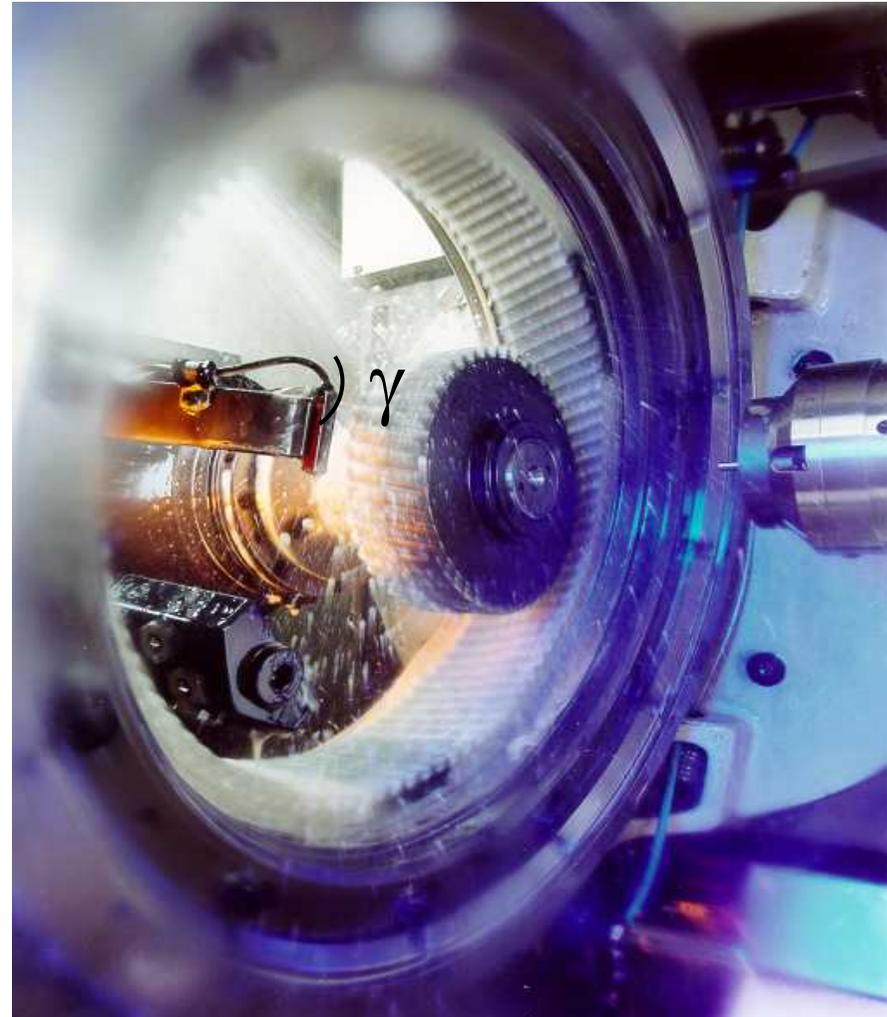
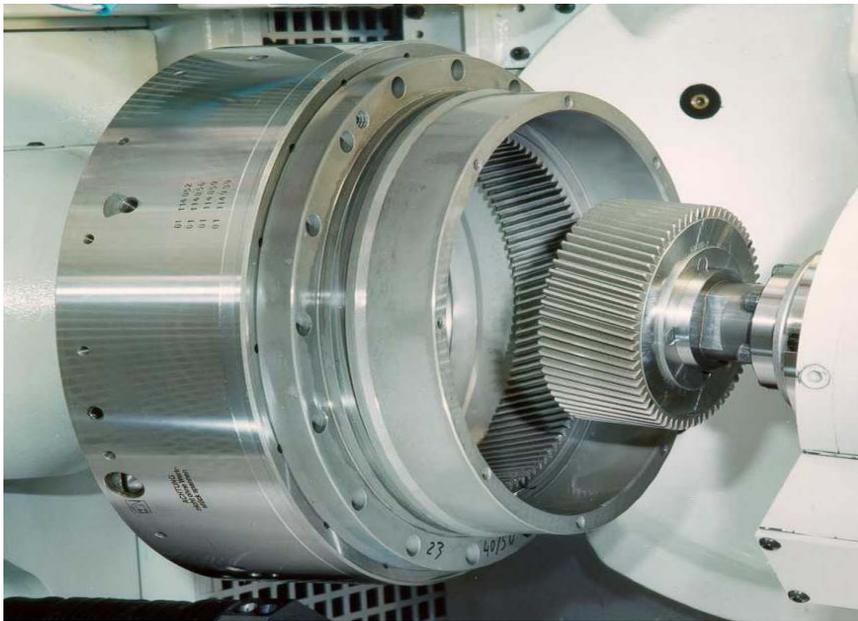
Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

IWF

Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigung
Institute of Machine Tools and Manufacturing

Honen

- Endbearbeitung
- Korrigiert kleine Fehler
- Ähnlich wie Schleifen
- Für Außen- und Innerverzahnungen



ETH

Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

IWF

Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigung
Institute of Machine Tools and Manufacturing

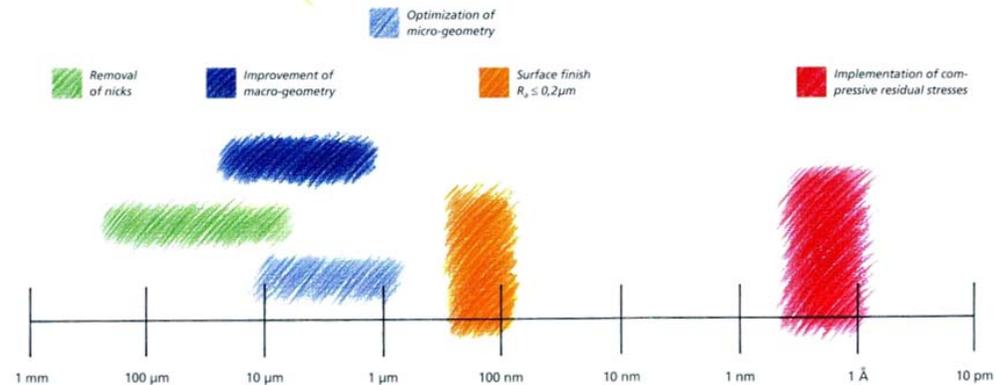
Honen

Zahnradhonen

Achskreuzwinkel → axiale Schnittbewegung wie beim Schaben.
Gehonte Räder haben besseres Geräuschverhalten

Honstein als Hohlrاد.
Abrichtung durch
Einsatz eines
diamantbelegten
Meisterrades

- + stock removal of up to 100 μm per flank
- + maximum noise reduction
- + no thermal damages
- + great improvement of flank and profile geometry
- + excellent surface finish
- + increased residual compressive stresses (up to 1500 N/mm^2 after honing)
- + quite good improvement of accumulate pitch error



Leistungshonen: synchroner Antrieb Werkzeug und Werkstück



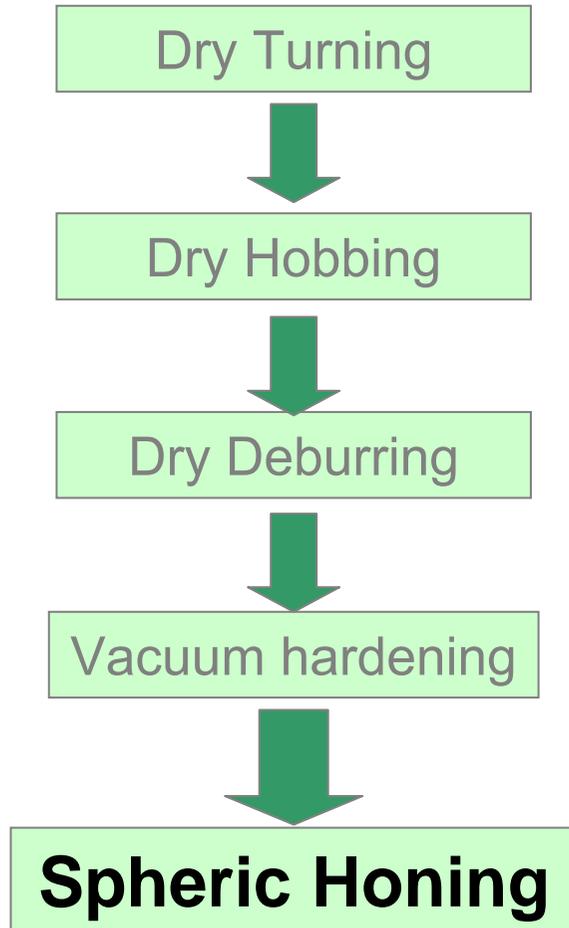
ETH

Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

IWF

Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigung
Institute of Machine Tools and Manufacturing

Honen



ETH

Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich



IWF

Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigung
Institute of Machine Tools and Manufacturing

Läppen

- Einlaufen des Werkrads mit einem Läpprad und Läppmittel
- Korrektur von kleinen Fehlern
- Ein Zahnrad getrieben, das andere gebremst
- Läppmittel: Suspension von feinem Läppkorn und Öl



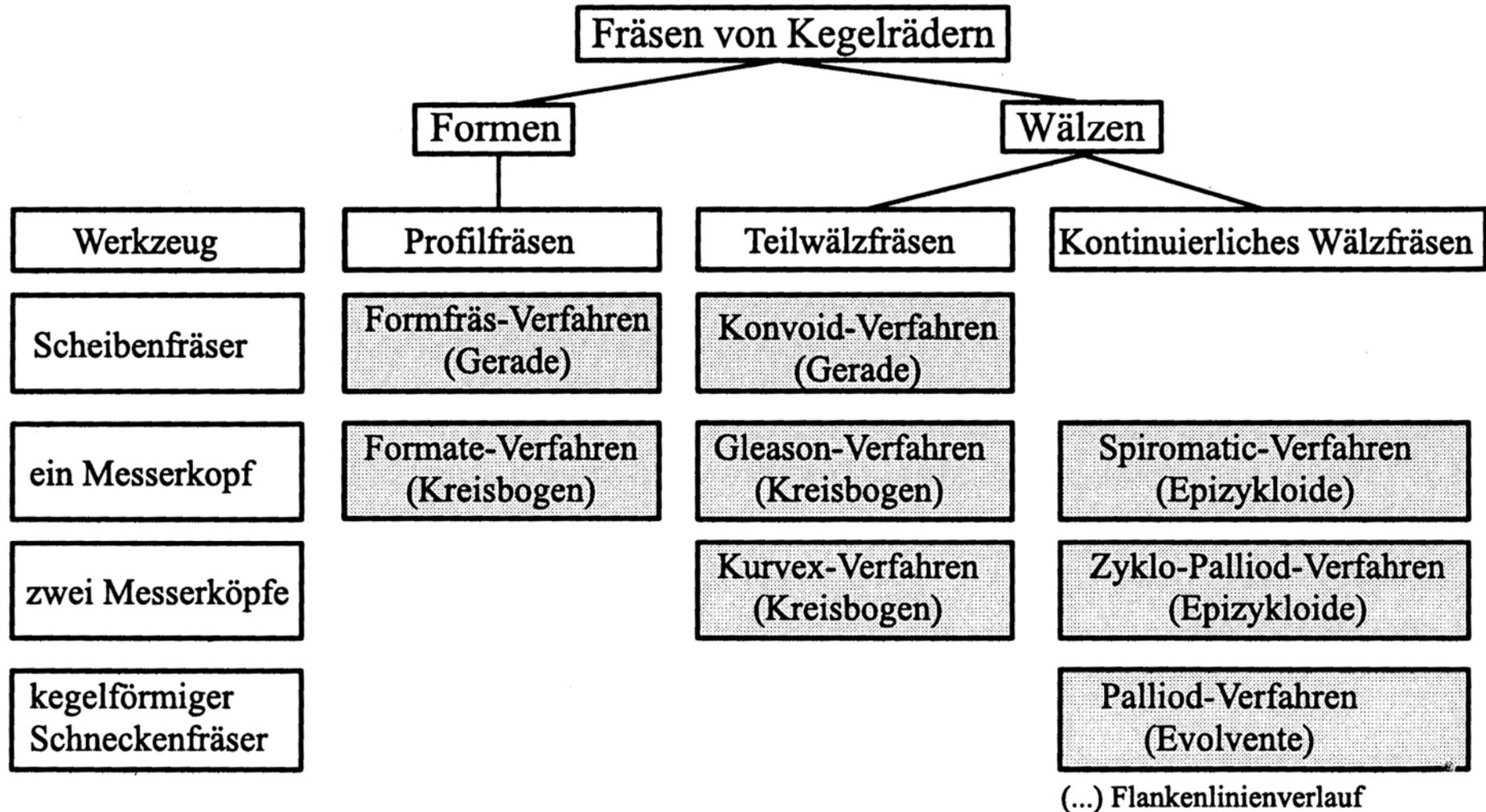
ETH

Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

IWF

Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigung
Institute of Machine Tools and Manufacturing

Herstellung von Kegelrädern



ETH

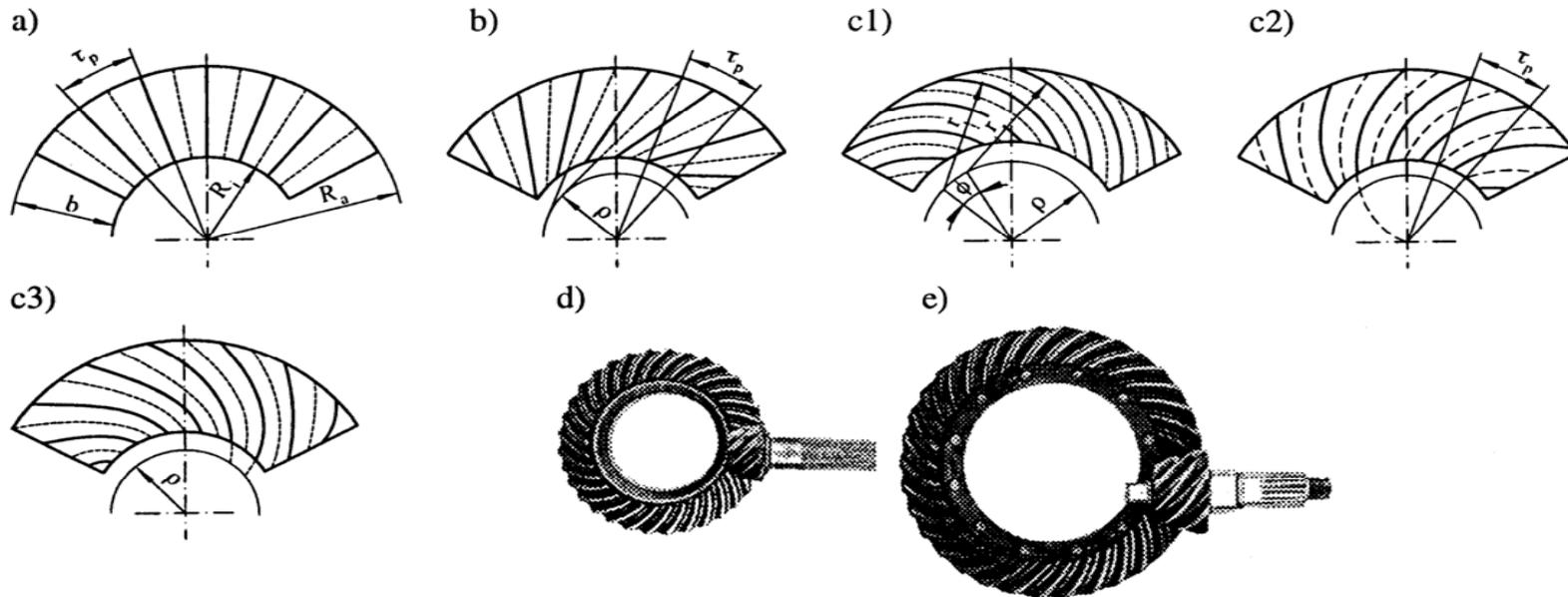
Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

IWF

Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigung
Institute of Machine Tools and Manufacturing

Herstellung von Kegelrädern

Zykloide: Bahn, die ein Punkt eines Rades beschreibt, welches auf einem Grundkreisrad abwälzt



Kegelräder: Ermöglichen die Übertragung von Drehbewegungen über einen Achskreuzwinkel. Im Gegensatz zu Schraubrädern haben diese geringere Flankenreibung



ETH

Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

IWF

Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigung
Institute of Machine Tools and Manufacturing

Herstellung von Kegelrädern

- Kegelwälztriebe: Achsen schneiden sich und stehen senkrecht aufeinander
- Kegelschraubtriebe, Hypoidgetriebe: Kegelradstufe mit Achsversatz

Bauformen von Kegelradverzahnungen:

1. Geradverzahnung
2. Schrägverzahnung
3. Bogenverzahnung
 - Kreisbogenverzahnung
 - Evolventenbogenverzahnung
 - Zykloidenverzahnung

- Rechts (links) steigend: von der Kegelspitze aus zeigen Flanken nach rechts (links)
- Wahl der Spiralsteigung so, dass bei Hauptdrehrichtung das Ritzel von der Tellerachse weggedrängt wird
- Flankenform überwiegend Evolventen



ETH

Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

IWF

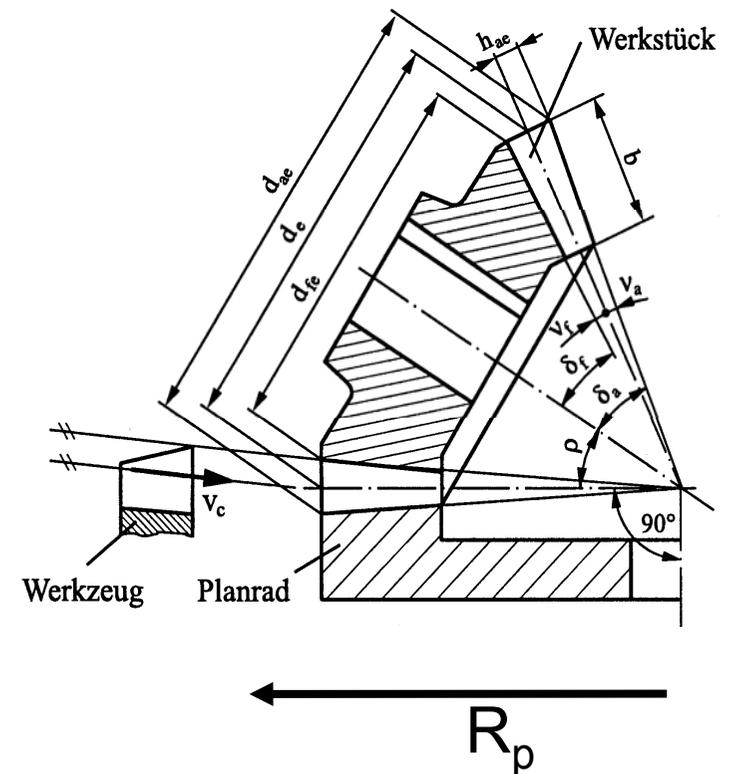
Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigung
Institute of Machine Tools and Manufacturing

Herstellung von Kegelrädern

Form und Abmessungen werden durch die Definition einer Planradverzahnung (DIN 3971) festgelegt:

- Planradteilkreis, Bezugsprofil, Flankenverlauf
- Werkzeuge so, das es während seiner Bewegung einen Zahn oder eine Zahnflanke des gedachten Planrads darstellt

Bezugsprofile ähnlich Stirnradverzahnung, allerdings für einen Kreisbogen mit Radius R_p in der Abwicklung.



Herstellung von Kegelrädern

Wälzstossen für gerad- und schrägverzahnte Kegelräder

Einmeisselverfahren:

Stossmeißel mit zwei Flankenwinkeln, Planradzahn entsteht in drei Schnitten radial. Planradzahn muss auf dem Werkrad abgewälzt werden.

Zweimeisselverfahren:

Zwei zueinander angestellte Meißel arbeiten entweder in einer Lücke oder in zwei verschiedenen Zahnluken

Erforderliche Bewegung: Hubbewegung

- Wälzbewegung bestehend aus Drehung des Werkstücks (rotatorischer Vorschub) und Drehung des gedachten Planrads (Werkzeugkopf) zur Erzeugung des Flankenpaares
- Eintauchen radial oder tangential
- Teilbewegung zur Weiterschaltung des Werkzeugs auf andere Flanken / Zähne (Aussetzen der Werkzeugkopfdrehung)



ETH

Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

IWF

Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigung
Institute of Machine Tools and Manufacturing

Herstellung von Kegelrädern

Profilfräsen mit Scheibenfräser:

Herstellung der Zahnform mit mindestens zwei radialen Vorschüben (rechte und linke Flanke).

Dazwischen Repositionierung, damit die Zahnprofilverjüngung entsteht

Anwendung auf Universalfräsmaschinen mit Teileinrichtung → geringe Produktivität, geringe Genauigkeit

Formateverfahren:

Werkzeug als Messerkopf ähnlich Räumwerkzeug

Bei einer Umdrehung des Werkzeugs wird eine Zahnlücke vollständig ausgearbeitet, danach das Werkstück weitergeteilt, wofür ein grösseres Segment ohne Schneiden dient



ETH

Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

IWF

Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigung
Institute of Machine Tools and Manufacturing

Herstellung von Kegelrädern

Konvoidverfahren:

Wälzfräsverfahren zur Herstellung geradverzahnter Kegelräder.

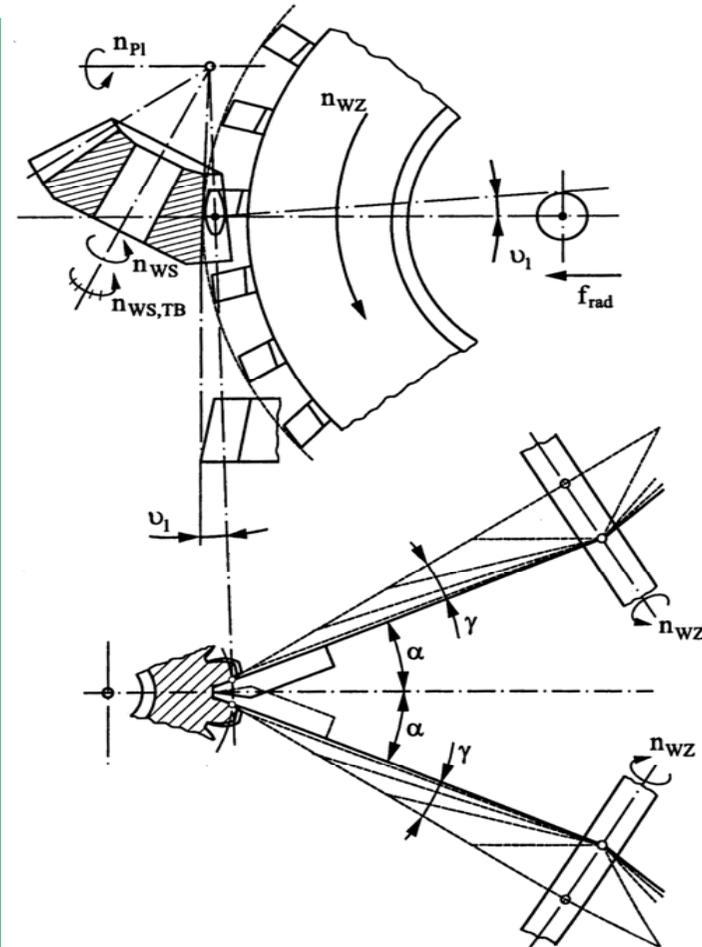
Keine Vorschubbewegung in Richtung der Zahnflanken → gekrümmter Zahngrundverlauf

Die beiden Scheiben verkörpern je eine Flanke des Planrads.

Verbesserung des Tragbilds durch ballige Profile → Scheiben leicht kegelige

Flanken entstehen durch Wälzen des Werkstücks auf den Scheiben

Grosse Moduln: zuerst Vorschruppen aller Zahnluken durch radiales Eintauchen



ETH

Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

IWF

Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigung
Institute of Machine Tools and Manufacturing

Herstellung von Kegelrädern

Spiromatic-Verfahren

kontinuierliches Wälzfräsverfahren
Schneiden auf dem Messerkopf in einer Spirale angeordnet
→ Drehung des Messerkopfes um eine Drehung führt zur Verschiebung um einen Teilungswinkel. Die Schneiden verkörpern ein Planradzahn.

Bewegungen:

1. Drehung des Werkzeugs: Schnittbewegung und gleichzeitig die Wälzbewegung 1. → Kinematische Rauigkeit abhängig von der Anzahl Schneiden auf dem Umkreis.
2. Wälzbewegung 2: Drehung des Werkstücks in Abhängigkeit von der Werkzeugdrehung zugleich Teilbewegung

