

KLAUS FELTEN



Verzahntechnik

**Das aktuelle Grundwissen
über Herstellung und Prüfung
von Zahnrädern**

5. Auflage



Innovative Verzahnungsmesstechnik

Seit 40 Jahren ist FRENCO Ihr Spezialist für:

- Messtechnik für Lauf- und Passverzahnungen • Wälzscannen
- Verzahnte Höchstpräzision • Zweiflankenwälzprüfgeräte
- Messlehren und Zweikugelmaßfassung
- Universelle Rotationsmessung von Wellen
- DAkkS-akkreditiertes Prüflaboratorium

FRENCO Buch Band 5:

Das Zahnrad ist ein häufig genutztes Symbol für Industrie, Technik, komplexe Sachverhalte und nicht zuletzt für die industrielle Revolution. Es erschien jedoch nicht plötzlich als neue Idee des 19. Jahrhunderts, sondern war das Ergebnis einer jahrtausendlangen Entwicklung. Noch bis zum frühen 20. Jahrhundert waren Verzahnungen wegen ihrer schwierigen Fertigung und großen Lärmentwicklung verhasst. Doch die Weiterentwicklung und stetige Verbesserung verzahnter Systeme machten Zahnräder bald unersetzlich.



Eine der wichtigsten Voraussetzungen für die dadurch entstandene Zuverlässigkeit ist die Messtechnik. Sie wirkt meist im Hintergrund und ist dann am effektivsten, wenn ihre Ergebnisse vom Endnutzer nicht bemerkt werden. Wenn sie also so exakt ist, dass Fehler schon bei der Produktion von Zahnrädern ausgeschlossen werden können.

Wie sich Zahnräder historisch entwickelt haben, welchen Anforderungen die Verzahnungsmesstechnik in den letzten einhundert Jahren gegenüberstand und welche Veränderungen stattfanden, soll in diesem Buch genauer betrachtet werden. Anschließend an die umfassende Darstellung der aktuellen, modernen Messtechnik wird ein Ausblick auf neue, weiterführende Methoden gegeben, die durch Fortschritte aus der Informationstechnik induziert wurden.

Auf der FRENCO-Homepage finden Sie das Inhaltsverzeichnis mit Leseprobe.
ISBN 3-9810208-5-5

www.frenco.de

pure
perfection

FRENCO

Klaus Felten

Verzahntechnik

Verzahntechnik

**Das aktuelle Grundwissen
über Herstellung und Prüfung
von Zahnrädern**

Dr.-Ing. Klaus Felten

5. Auflage

expert ›

Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://www.dnb.de> abrufbar.

Bibliographic Information published by Die Deutsche Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available on the internet at <http://www.dnb.de>

ISBN 978-3-8169-3441-7

5. Auflage 2018
- 4., durchgesehene Auflage 2016
3. Auflage 2012
- 2., neu bearbeitete Auflage 2008
1. Auflage 1999

Bei der Erstellung des Buches wurde mit großer Sorgfalt vorgegangen; trotzdem lassen sich Fehler nie vollständig ausschließen. Verlag und Autoren können für fehlerhafte Angaben und deren Folgen weder eine juristische Verantwortung noch irgendeine Haftung übernehmen.
Für Verbesserungsvorschläge und Hinweise auf Fehler sind Verlag und Autoren dankbar.

© 1999 by expert verlag GmbH, Wankelstr. 13, D-71272 Renningen
Tel.: +49 (0)71 59-92 65-0, Fax: +49 (0)71 59-92 65-20
E-Mail: expert@expertverlag.de, Internet: www.expertverlag.de
Alle Rechte vorbehalten
Printed in Germany
Covergestaltung: r² - röger & röttenbacher, büro für gestaltung, Leonberg /
Ludwig-Kirn Layout, Ludwigsburg

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlags unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Vorwort

Vorwort zur 1. Auflage

Der Inhalt des vorliegenden Bandes entstand begleitend zur Vorlesung „Verzahntechnik“ des Instituts für Werkzeugmaschinen und Betriebstechnik (wbk) an der Technischen Universität Karlsruhe. Daraus erklärt sich auch der Charakter der Abhandlung, in der ein Versuch gemacht wird, die überaus komplexen Zusammenhänge der verzahntechnischen Herstell- und Meßverfahren so einfach verständlich darzustellen, daß keine verzahnspezifischen Vorkenntnisse notwendig sind. Zielsetzung des Buches ist es also nicht, dem Verzahnungsfachmann ein weiteres Fachbuch an die Hand zu geben; es soll vielmehr den interessierten Maschinenbauer an die Verzahntechnik heranzuführen und so eine Brücke zur Spezialliteratur bauen.

Bei der Erstellung des Manuskriptes und der Abbildungen war das wbk eine überaus wertvolle Hilfe. Aus diesem Grunde sei den verantwortlichen Professoren, ganz besonders aber Herrn Dipl.-Ing. Oliver Doerfel, der auch bei der Abfassung des Textes mit kritischem Rat zur Seite stand, herzlich gedankt. Bedanken will ich mich auch bei den Instituten, Firmen und Verlagen, die die Entstehung des Buches mit Fotos und eigenen Veröffentlichungen unterstützt haben. Ein besonderer Dank gilt Herrn Robert Wais von der Maschinenfabrik Lorenz GmbH, der die gesamte Gestaltung von Text- und Bildmaterial durchgeführt hat.

Zum Inhalt und zur Gliederung des Buches ist folgendes zu sagen. Nach einer kurzen Abhandlung der Geschichte des Zahnrades werden die wichtigen Grundlagen der Verzahnungsgeometrie erläutert. Die anschließende Erläuterung der einzelnen Verzahnverfahren für Stirn- und Kegelräder orientiert sich an einer systematischen Einteilung dieser Verfahren in Gruppen, die jeweils alternativ für dieselbe Aufgabe angewandt werden können. Einmal für Stirn-, dann für Kegelräder werden folgende Verfahrensgruppen gebildet:

- Spanlose Verfahren
- Verfahren zur Vorverzahnung weicher Werkstoffe
- Verfahren zur Feinbearbeitung weicher vorverzahnter Werkstoffe
- Verfahren zur Bearbeitung gehärteter Verzahnungen mit geometrisch unbestimmter Schneide
- Verfahren zur Bearbeitung gehärteter Verzahnungen mit geometrisch bestimmter Schneide

Mit jeder dieser Verfahrensgruppen werden die zum Verständnis notwendigen Grundlagen erläutert, also z.B. die Prinzipien der Spanbildung bei den spanenden Verfahren oder die Grundlagen der Wärmebehandlung vor den Hartbearbeitungsverfahren.

Innerhalb der Erläuterung einzelner Verfahren werden jeweils die technologischen Grundlagen, die Kinematik der entsprechenden Werkzeugmaschinen sowie typische Werkzeugausbildungen erklärt. Eine Abhandlung der Verzahnungsmeßgrößen und typischer Verzahnungsabweichungen beschließt das Buch.

Für den Autor bleibt zu hoffen, daß das Buch *Verzahntechnik* dem Anspruch, „ungeübte Verzahner“ an die komplexe Materie heranzuführen, in vollem Umfang gerecht wird.

K. Felten

Vorwort zur 2. Auflage

Die vorliegende 2. Auflage des Bandes *Verzahntechnik* wurde gegenüber der ersten Fassung aktualisiert und dem Stand der Technik angepasst. Die Verfahren „Hartschaben“, „Läppen“ und „Schälwälzstoßen“ sind eliminiert worden; die Verfahren „Harträumen“ sowohl mit geometrisch bestimmter als auch unbestimmter Schneide sind neu aufgenommen worden. Zudem wurde das Kapitel „Quellenverzeichnis und weiterführende Literatur“ durch Veröffentlichungen bis in die jüngste Zeit ergänzt.

Ich bedanke mich auch diesmal herzlich bei den Herstellern und Anwendern von Verzahnmaschinen, die Text- und Bildmaterial zur Verfügung gestellt haben. Mein Dank gilt auch den Verantwortlichen des Instituts für Produktionstechnik (wbk) an der Universität Karlsruhe, besonders den Herren Dr.-Ing. Andreas Bechle und Christoph Kühlewein, die mir bei der Überarbeitung des Manuskriptes stets mit Rat und Tat zur Seite standen.

K. Felten

Vorwort zur 4. und 5. Auflage

Das Buch *Verzahntechnik* liegt nun nach recht kurzer Zeit nach der 4., durchgesehenen bereits in der 5. unveränderten Auflage vor. Der Versuch, mit dieser Abhandlung explizit die Grundlagen der Verzahntechnik zusammen zu fassen, ist offensichtlich gelungen, und die Konzeption des Buches hat sich bewährt. Ich bin überzeugt, dass es auch weiterhin den Zugang zur komplexen Materie der "Verzahntechnik" erleichtert.

K. Felten

Inhaltsverzeichnis

VORWORT

1	GESCHICHTE VON ZAHNRAD UND VERZAHNMASCHINE.....	1
1.1	Das Zahnrad als Symbol	1
1.2	Erste technische Anwendungen	1
1.3	Zahnräder im Mittelalter.....	3
1.4	Wissenschaftliche Entwicklung der Zahnform	6
1.5	Entstehung der Verzahnmaschinen.....	9
2	GRUNDLAGEN DER VERZÄHNUNGSGEOMETRIE	11
2.1	Verzahnungsgesetz.....	11
2.2	Verzahnungsarten	12
2.2.1	Wildhaber-Novikov-Verzahnung.....	13
2.2.2	Zykloidenverzahnung	13
2.2.3	Evolventenverzahnung.....	14
2.3	Begriffe an Zahn und Zahnrad.....	16
2.3.1	Schrägverzahnung	22
2.4	Begriffe an Radpaarungen	24
2.4.1	Radpaarungen mit parallelen Achsen.....	24
2.4.2	Radpaarungen mit sich schneidenden Achsen.....	32
2.4.3	Radpaarungen mit sich kreuzenden Achsen	34
3	VERFAHREN ZUR WEICHBEARBEITUNG VON STIRNRÄDERN	37
3.1	Übersicht der Verfahren	37
3.2	Spanlose Verfahren.....	40
3.2.1	Gießen.....	40
3.2.2	Sintern/Pulverschmieden.....	41
3.2.3	Präzisionsschmieden.....	44
3.2.4	Pressen	45
3.2.5	Feinschneiden	47
3.2.6	Walzen/Rollen	49

3.3	Spanende Verfahren zur Zylinderradherstellung	54
3.3.1	Wälzfräsen/Formfräsen.....	58
3.3.2	Wälzstoßen/Formstoßen.....	66
3.3.3	Wälzhobeln	75
3.3.4	Wälzschälen.....	77
3.3.5	Räumen	80
3.4	Weichfeinbearbeitung	83
3.4.1	Schaben.....	83
4	VERFAHREN ZUR HARTBEARBEITUNG VON STIRNRÄDERN	87
4.1	Grundlagen der Hartbearbeitung	87
4.2	Hartbearbeitung mit geometrisch unbestimmten Schneiden.....	91
4.2.1	Übersicht Form (Profil-) – Wälzschleifen.....	94
4.2.2	Wälzschleifen.....	97
4.2.3	Profil- (Form-) Schleifen	101
4.2.4	Honen (Schabschleifen).....	105
4.2.5	Harträumen (Hubschleifen).....	107
4.3	Hartbearbeitung mit geometrisch bestimmten Schneiden.....	108
4.3.1	Schälwälzfräsen.....	108
4.3.2	Hartschälen.....	109
4.3.3	Harträumen	111
5	VERFAHREN ZUR HERSTELLUNG VON KEGELRÄDERN.....	113
5.1	Weichbearbeitung.....	114
5.1.1	Spanlose Verfahren	114
5.1.2	Spanende Verfahren.....	116
5.2	Hartbearbeitung	122
5.2.1	Läppen.....	122
5.2.2	Schleifen	123
5.2.3	HPG-Verfahren	124
5.2.4	HPG-S-Verfahren.....	124
6	MESSEN UND PRÜFEN VON VERZÄHNUNGEN	125
6.1	Grundlagen	125
6.2	Abweichungen der Bezugs- und Lagerflächen	129
6.3	Teilungsabweichungen	129

6.3.1	Kreisteilungsprüfgeräte.....	130
6.3.2	Eingriffsteilungsprüfgeräte.....	131
6.3.3	Teilungsmessung mit Koordinatenmessgeräten.....	131
6.4	Flankenabweichungen.....	134
6.4.1	Profilabweichungen	137
6.4.2	Flankenlinienabweichungen	139
6.4.3	Abweichungen der Erzeugenden.....	141
6.5	Rundlaufabweichungen	141
6.6	Zahndicken- und Zahnweitenabweichungen	142
6.7	Wälzabweichungen	144
6.7.1	Einflankenwälzprüfung	145
6.7.2	Zweiflankenwälzprüfung	145
7	DIE HERSTELLUNG VON GETRIEBETEILEN	147
8	QUELLENVERWEIS UND WEITERFÜHRENDE LITERATUR	149
9	INDEX.....	157

1 Geschichte von Zahnrad und Verzahnmaschine

1.1 Das Zahnrad als Symbol

Das Zahnrad ist ein altes und bewährtes Maschinenelement. Trotz des zahlenmäßigen Rückgangs der technischen Anwendungen wird es nicht nur in Maschinen, sondern auch im übertragenen Sinne als Symbol für Verbindung, Zusammenwirken, Vertrauen und Solidität verwendet. Das mag damit zusammenhängen, dass Zahnräder nie einzeln, sondern immer mehrfach auftreten und dass ein einwandfreier Lauf von Zahnrädern nur mit Hilfe sehr hochwertiger Herstellmethoden möglich ist. So gilt das Zahnrad auch heute noch als Symbol für hochwertige Technik und dies sogar in Bereichen, die mit Mechanik oder Maschinenbau nichts mehr zu tun haben, wie z.B. im Bereich elektronischer Produkte, in der Werbung von Unternehmensberatungen oder auch als Verbandssymbol.

1.2 Erste technische Anwendungen

Über die Erfindung des Zahnrades oder die Nutzung der ersten Zahnräder ist nichts bekannt. In ersten Überlieferungen über technische Anwendungen wird so selbstverständlich vom Zahnrad berichtet, dass man annehmen kann, dass es lange vor diesen Beschreibungen bereits einen breiten Einsatz einfacher Zahnräder gab. Mit Sicherheit waren die ersten Zahnräder aus Holz hergestellt, so dass von ihnen nichts übrig geblieben ist. Die erste bekannte Erwähnung, hinter der man Zahnräder vermuten muss, stammt von Aristoteles um 350 v. Chr. Er beschreibt in seinen „mechanischen Problemen“ unter anderem auch Drehräder aus Erz und Eisen, um drehende Bewegungen umzukehren.

Archimedes, geb. 287 v. Chr., benutzte ein neunstufiges Zahnradgetriebe mit Schneckenantrieb, um ein Kriegsschiff mit 4200 t Gewicht, das mit menschlicher Kraft nicht mehr zu bewegen war, vom Stapel laufen zu lassen. Eine der Beschreibung entsprechende Rekonstruktion dieses Getriebes ist auf **Bild 1-1** dargestellt. Die Beschreibung dieser technischen Lösung stammt aus dem „mathematischen Sammelwerk“ von Pappus um 300 n. Chr., also

500 bis 600 Jahre nach ihrer Anwendung. Trotz dieser langen Zeitspanne wird an der technischen Beschreibung nicht gezweifelt, da die Konstruktion des Getriebes auch in anderen Geschichtswerken, z.B. bei Heron, in gleicher Weise auftaucht. In verschiedenen späteren Abhandlungen wurde der Begriff „helix“ fälschlicherweise mit „Hebel“ übersetzt. Der griechische Begriff „helix“ meint jedoch „Schnecke“. Der Wortstamm von „helix“ findet sich auch im englischen Wort „helical“, das Schrägverzahnung bedeutet.

Der Sinn des Zahnradantriebs ist offensichtlich. Im Gegensatz zum Hebel ist eine kontinuierliche Bewegung möglich. Durch Mehrstufigkeit kann man die Kraft praktisch nahezu beliebig verstärken. Bei Zahnrädern tritt kein Schlupf auf, und zusätzlich lässt sich mit Hilfe von Zahnrädern auch ein Abstand zwischen Antrieb und Abtrieb überbrücken.

Der nächste historische Name, der mit Zahnrädern verbunden ist, ist Vitruv. Vitruv lebte unter Cäsar und Augustus und schrieb 30 bis 16 v. Chr. ein Buch über Architektur, die damals auch den Bau von Uhren und Maschinen umfasste. In der Beschreibung einer römischen Wassermühle nimmt Vitruv Bezug auf Schöpfräder ägyptischer Sakies, die 200 bis 300 Jahre v. Chr. in Ägypten entstanden waren. Sakies sind von Kamelen oder Ochsen angetriebene Wasserschöpfmaschinen, die für die Bewässerung großer Flächen eingesetzt wurden und die ebenfalls mit einfachen Zahnrädern arbeiteten. Vitruv beschreibt ein ähnliches Antriebsprinzip, das dazu dient, mit Wasserkraft und einem nachgeschalteten Getriebe Mühlsteine in Umdrehung zu versetzen /SPU-91/.

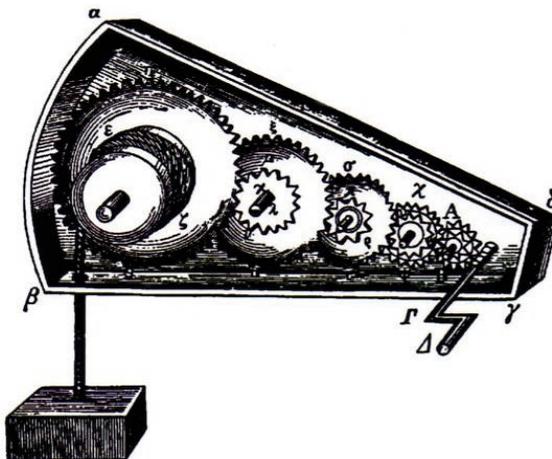


Bild 1-1: Zahnradwinde des Archimedes /MAT-40/

1.3 Zahnräder im Mittelalter

Getriebekonstruktionen und Zahnräder haben sich nach den ersten Erwähnungen über Hunderte von Jahren kaum verändert. Zahnräder wurden vorwiegend in Mühlen zur Nutzung der Wasserkraft eingesetzt. Bildhafte und geschriebene Überlieferungen zeigen, dass bis zum Jahr 1500 n. Chr. nahezu kein technischer Fortschritt im Getriebebau zu verzeichnen war. Dabei war die technische Vielfalt der Anwendungen weit geringer als sie bereits bei Archimedes dokumentiert ist. Ab 1200 n. Chr. wurden auch Uhren mit einfachen Verzahnungen angetrieben, vorwiegend im Zusammenhang mit dem Bau von Kirchen. Solche Zahnräder wurden auch aus Guss hergestellt, ohne dass die Zähne der Räder anschließend bearbeitet wurden. Auf die Ganggenauigkeit der Uhren hat dies keinen Einfluss, da diese durch das Übersetzungsverhältnis und nicht durch die Zahnqualität bestimmt wird.

Erst ab ca. 1500 n. Chr. sind neue Impulse in der Entwicklung von Zahnrädern und Zahnradgetrieben feststellbar. Großen Anteil daran hatte Leonardo da Vinci, dessen Zeichnungen neben den bekannten Verzahnungsarten auch Schraubräder, Schneckenräder und Schrägverzahnungen zeigen. Triebfeder dieser Entwicklungen war aber auch die aufkommende Mechanisierung in der Wehr- und Kriegstechnik. So hat Leonardo auch Zahnräder für ungleichförmige Bewegungen gezeichnet, die zum Spannen einer Armbrust eingesetzt werden sollten. Auch die Globoidschnecke mit zugehörigem Ritzel findet sich bereits bei Leonardo.

Den Stand der Mühlentechnik zu dieser Zeit zeigt **Bild 1-2**. Die Zeichnung wurde von Jacopo de Strada (1523 bis 1588) für sein Maschinenbuch (erschienen 1617) erstellt. Interessant dabei ist, dass als Antrieb nicht mehr die Wasserkraft dient, sondern ein Pferdegöpel. Unter Göpel versteht man einen radialen Hebel an einer Rotationsachse als Zugvorrichtung. Darüber hinaus ist bei der im Bild gezeigten Mühle neben dem nach oben abgezweigten Antrieb der Mühlsteine auch der zusätzliche Antrieb einer Schleifvorrichtung über eine Seilscheibenübersetzung gezeigt.

Ende des 17., Anfang des 18. Jahrhunderts waren die einzigen verfügbaren Antriebsquellen Wasserkraft, Windkraft, Tiere oder die eigene manuelle Betätigung. Als Material für die Zähne wurde fast ausschließlich Holz verwendet. Man musste die Erfahrung machen, dass Getriebe am Anfang sehr schwergängig waren. Erst mit dem durch das Einlaufen bedingten Verschleiß an den Zähnen wurden die Getriebe leichtgängiger und sehr gut eingelaufene Zähne brachen häufig wegen Überlastung. Aus dieser Erkenntnis heraus entstanden Versuche, neue Zähne vor dem ersten Einsatz zu bearbeiten,

um sie leichtgängiger zu machen. Eine Vielzahl in Museen ausgestellter Beispiele zeigt alte Getriebe mit ausgelaufenen Holzzähnen.

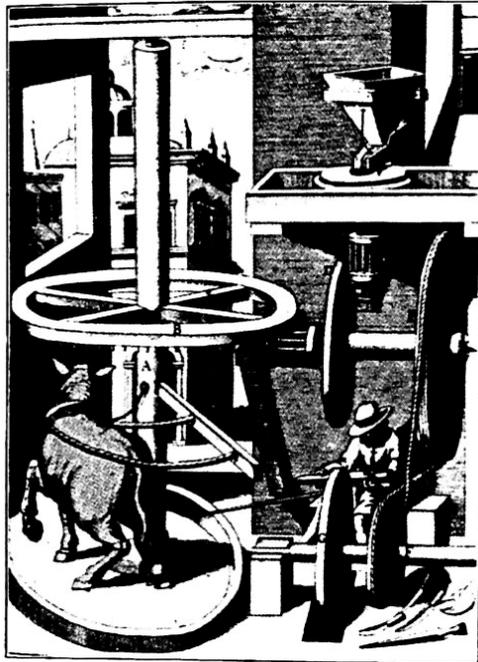


Bild 1-2: Mühle mit Göpelantrieb (1580) /SPU-91/

Literatur über Maschinen und Maschinenteile, also auch über Zahnräder, war im Mittelalter nur wenig verbreitet. Die Gelehrten schrieben in der Regel lateinisch und die Praktiker schrieben keine Bücher. Zu dieser Regel gibt es nur wenige Ausnahmen. Hier einige Beispiele:

- Acricola (1490 bis 1555): „De re metallica“
- Zeising (1612): „Theatrum machinarum“ (Mechanische Künste)
- Böckler (1661): „Theatrum machinarum novum, neu vermehrter Schauplatz der mechanischen Künste“
- Sturm (1718): „Vollständige Maschinenbaukunst“
- Leupold (1724): „Theatrum machinarum“

Unter den Mühlenbauern war die Abhandlung von Sturm aus dem Jahre 1718 mit dem Titel: „Vollständige Mühlenbaukunst“ stark verbreitet. Sie enthält wichtige Angaben über Form, Werkstoff und Bearbeitung der Zähne. Bei Sturm finden sich auch Angaben über die Teilung von Zahnrädern, über Wälzkreise und über sinnvolle Rundungen der Zahnflanken, abhängig davon, ob es sich um ein Kamm- oder um ein Sternrad handelt. Bei einem Kammrad befinden sich die Zähne auf der Planseite des Rades, beim Sternrad sind sie in radialer Richtung angeordnet (Stirnrad). Sturm schlägt vor, Radien an Zahnflanken abhängig von der Teilung zu wählen; er macht auch Vorschläge für die Holzqualität der Zahnräder und bemerkt, dass sich am besten trockenes Holz eignet, das bei abnehmendem Mond im Winter gehauen wird.

Das wichtigste technische Werk zur damaligen Zeit war das „Theatrum machinarum“ von Jacob Leupold von 1724. Es umfasst 8 Bände mit 1764 Seiten und 472 Kupfertafeln und ist geschrieben für „Leuthe, die keine Sprachen noch andere Studia besitzen“. Das 5. Kapitel in diesem umfassenden Werk ist dem Thema „Rad und Getriebe“ gewidmet. Auch Leupold macht Vorschläge zur Gestaltung der Zähne an Zahnrädern, wobei er nahezu alle Größen aus der Teilung ableitet.

Die ersten mathematischen Untersuchungen über theoretische Zahnkurven fanden nahezu gleichzeitig – wenn auch an anderer Stelle – statt. Sie waren Leupold völlig unbekannt. Bei hölzernen Rädern ist eine strenge theoretische Auslegung auch nicht besonders sinnvoll, da Holz unter Einfluss von Feuchtigkeit quillt. Leupold erwähnt zwar auch Räder aus Eisen, Messing oder Bronze, war damit aber seiner Zeit wohl noch voraus. Karl Neumann, ein preußischer Wasserbauinspektor, gibt in seinem Buch „Wasser-Mahl-Mühlenbau“ von 1810 noch Empfehlungen zur richtigen Behandlung von Holzzähnen. Neumann weist darauf hin, dass die richtige Form der Zähne für einen gleichförmigen Lauf einer Mühle von entscheidender Wichtigkeit ist und dass in dieser Hinsicht ein erheblicher Nachholbedarf besteht.

Mit dem Aufkommen von Dampfmaschinen und moderneren Verkehrsmitteln wie Eisenbahnen wurden für Zahnradgetriebe neue Anwendungen erschlossen. Bei Eisenbahnen wurden zunächst grundsätzlich Zahnradantriebe eingesetzt, d.h. Schienen als Zahnstange ausgeführt oder durch Zahnstangen ergänzt; später wurde dieses Prinzip nur noch für die Überwindung von Steigungen benützt. Als Material für diese Zahnräder wurde nun mehr und mehr Metall anstatt Holz verwendet. Vor dieser Zeit fand sich eine breitere Anwendung von Metallzahnrädern ausschließlich in Uhren. Mit diesen neuen Anwendungsgebieten entstanden auch der Wunsch und die Forderung, Me-