

# Handbuch Zahnriementechnik

Raimund Perneder

# Handbuch Zahnriementechnik

Grundlagen, Berechnung, Anwendungen

Dipl.-Ing. Raimund Perneder  
Milinowskistr. 37a  
14169 Berlin  
Deutschland  
Perneder.whm@t-online.de

ISBN 978-3-540-89321-9

e-ISBN 978-3-540-89322-6

DOI 10.1007/978-3-540-89322-6

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

© 2009 Springer-Verlag Berlin Heidelberg

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funk-sendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwider-handlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk be-rechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

*Satz und Herstellung:* le-tex publishing services oHG, Leipzig

*Einbandgestaltung:* eStudioCalamar S.L., F. Steinen-Broo, Girona, Spain

Gedruckt auf säurefreiem Papier

9 8 7 6 5 4 3 2 1

springer.de

# Vorwort

Zahnriemengetriebe stehen für eine große Vielfalt innovativer Antriebslösungen. In modernen Konstruktionen vereinigen sich Mechanik, Sensorik und Steuerung zu mechatronischen Systemen. Die Servotechnik ermöglicht dabei frei programmierbare und dezentrale Antriebslösungen, in denen unterschiedliche Maschinenelemente nebeneinander zum Einsatz kommen. Unter diesen Rahmenbedingungen hat der Zahnriemen eine breite Anwendung gefunden und er hat selbst zu technologischen Neuerungen beigetragen. Er ermöglicht spielarmen Betrieb in Robotersystemen, arbeitet in der Automatisierungs- und Handhabungstechnik unter hoher Dynamik beim Anfahren, ist wartungsarm im Dauerbetrieb und garantiert exaktes Positionieren aus hoher Geschwindigkeit heraus.

Das vorliegende Handbuch ist für den Anwendungstechniker in Entwicklung und Konstruktion bestimmt, und es ist zugleich als Ratgeber für Studierende an Universitäten, Hoch- und Fachschulen geeignet. Wenn es um Antriebsaufgaben geht, wird nach eleganten Lösungen gesucht. Gemeint sind einfache und robuste mechanische Konzepte, die kostengünstig zu realisieren sind, und die auch dem Anspruch „innovativ gelöst“ genügen. Die Zahnriementechnik bietet dazu vielerlei Ansätze. Aus langjähriger Erfahrung abgeleitet werden hierfür, basierend auf kurzgefassten Grundlagen zur Dimensionierung von Zahnriemengetrieben, erprobte und verallgemeinerbare Beispiele aus der Antriebs-, Transport- und Linear-technik vorgestellt. Zudem erfolgt die Behandlung ungünstiger Betriebsbedingungen sowie die von Zahnriemenschäden, und der Betriebsingenieur erhält Hinweise zur Optimierung der Getriebe. Es sollen aber auch Richtlinien für das Gestalten von Antriebsdetaillens sowie für die Umgebungskonstruktion vermittelt werden. Gute Kenntnisse über die Wirkmechanismen stützen eine funktionsgerechte Dimensionierung.

Das Handbuch basiert auf eigener 30-jähriger beruflicher Beschäftigung mit dem Maschinenelement Zahnriemen. Über diesen Zeitraum konnte sich ein junges Antriebsselement nach und nach eine herausragende Stellung am Markt erobern. Zeitgleich mit dem Fortschritt und dieser Akzeptanz verfeinerten die Hersteller Fertigungsverfahren für die Zahnriemenproduktion. Sie wurden einerseits sichtbar

durch die Weiterentwicklung des Produktes Zahnriemen selbst und gingen andererseits mit einer reichhaltigen Anwendervielfalt einher. Beim industriellen Zahnriemeneinsatz wird stets nach funktionell-ökonomischen Lösungen gesucht. Aus der Zeit eigener Tätigkeit und aufgrund zahlreicher persönlicher Kontakte zu Industriebetrieben gelang es, beispielhafte Antriebskonzepte zu dokumentieren und diese zunächst in einer Loseblattsammlung zusammenzustellen. Die Beispiele stammen aus verschiedenen Fachbereichen, wobei der Weg der selbsterklärenden Bilddokumentation beschriftet wurde. Diese Anwendungen sind Hauptbestandteil des vorliegenden Handbuchs, und sie sind auch der Anlass für eine Veröffentlichung in einem gesammelten Werk.

Die Einheiten in Gleichungen sind durch das SI-System definiert. Auf Ableitungen wurde verzichtet. Die Zahlenwertgleichungen sind so dargestellt, dass der physikalische Zusammenhang erkennbar bleibt.

## **Dank**

Für die reichhaltigen Anregungen zur inhaltlichen und redaktionellen Gestaltung danke ich Allen, die sich am Zustandekommen des Buches beteiligt haben.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. hc. Werner Krause von der Technischen Universität Dresden, denn er gab den Anstoß zu diesem Buchprojekt. Ohne seine wertvollen wie wohlwollenden und ermutigenden Anregungen wäre die Arbeit nicht begonnen worden. Er begleitete meine Bemühungen von Beginn an und unterstützte die fachlichen Inhalte in Struktur und Ordnung sprachlich umzusetzen. Ferner gilt der besondere Dank Herrn Prof. Dr. Henning Meyer von der Technischen Universität Berlin, der die wissenschaftliche Betreuung an meinem Heimatort fortsetzte. Er stellte die Kontakte zum Verlag her, und es entwickelte sich eine angenehme Kooperation mit einem engagierten Team aus Mitarbeitern des Springer-Verlages in Heidelberg, dem Satzbetrieb LE-TEX publishing services in Leipzig und der Technischen Universität in Berlin.

Eine wesentliche Belebung der im Grunde nüchternen Materie „Zahnriementechnik“ ist auf die Wiedergabe authentischer Anwendungen zurückzuführen. Sie wurden von zahlreichen Industriebetrieben zur Verfügung gestellt, und denen gilt der Dank für die Erlaubnis zum Abdruck. Am Zusammenstellen der Dokumentationen haben sich die Berufskollegen aus den F+E-Abteilungen beteiligt. Ich danke Herrn Mathias Arndt (Cybertron GmbH), Herrn Jens Eisenhaber (Stemme GmbH), Herrn Michael Hupka (Schiffswerft Genthin GmbH), Herrn Peter Leihacker (Ratiotec GmbH), Herrn Ralf Lukat (Focke GmbH), Herrn Helmut Zeddies (Korsch AG), Herrn John Pallutt (Colt GmbH), Herrn Guido Paulsen (Promess GmbH). Eine Beteiligung besonderer Art stellt der Fachbeitrag von Herrn Hermann Schulte (Contitech GmbH) dar mit dem Sonderkapitel 3.11 „Zahnriemen-Steuerantriebe in der KFZ-Technik“.

Die Entstehung dieser Arbeit war entscheidend geprägt durch meine lange Zugehörigkeit zur Wilhelm Herm. Müller GmbH & Co. KG, sowie zur MULCO-Arbeitsgemeinschaft. Ich danke deshalb allen mir und meinem Buchprojekt zuge-

neigten Kollegen und Vorgesetzten. Aus diesem Berufsumfeld richte ich meinen besonderen Dank an Herrn Rudi Kölling für die Druckfreigabe der Inhalte aus der BRECO-Dokumentation.

Die vorliegende Arbeit wurde des Weiteren durch die Beteiligung an der jährlich stattfindenden Tagung „Zahnriemengetriebe“ durch die Technische Universität Dresden positiv beeinflusst. Mein besonderer Dank gilt den Teilnehmern Herrn Dr. Walter Terschüren (Cordus GmbH) sowie Herrn Bert Vanderbeken (NV Bekaert SA), die über ausgewiesene Fachkenntnisse der Zugstrangtechnologie verfügen und darüber referierten. Aus diesem Kreis danke ich auch den Kollegen Herrn Burghard König (SIT Antriebselemente GmbH) und Herrn Hendrik Kaden (TU Chemnitz) für deren anregende Diskussionsbeiträge.

Mein guter Freund Helmut Luther hat gegengelesen. Danke.

Meine liebe Frau Annegret hat zu diesem Buch umfangreiche Zeichenarbeit geleistet und die Textformatierung ausgeführt. Danke.

## **Zukunft**

Die vorliegende Arbeit ist als Handbuch deklariert. Daraus kann der Leser leicht den Anspruch ableiten, dass bei Fragen zur Zahnriementechnik erschöpfende und vor allem zuverlässige Auskünfte über alle Themen und Nebenthemen bereitstehen. Eine 100%-ige Abhandlung ist nicht machbar. Ferner sind eventuelle Fehler dem Autor anzulasten. Hinweise auf diese, sowie Anregungen oder konstruktive Kritik nimmt der Autor unter

`perneder.whm@t-online.de`

entgegen. Die angestrebte Option ist, dieses Handbuch zur jeweils nächsten Auflage immer auf den aktuellen Kenntnisstand zu ergänzen. Der Zahnriemen ist ein relativ junges Antriebselement und Schritte zur nächsten Weiterentwicklung kündigen sich an. Dieses Buch soll eine ausgewogene Mischung aus wissenschaftlicher Theorie und betrieblicher Praxis widerspiegeln. Es soll spannende Fachdiskussionen mit praxistauglichen Lösungen fördern. Der interessierte Leser und Nutzer der Zahnriementechnik kann dazu sein Antriebslayout dem Autor zur vertraulichen Einsicht überlassen. Eine eventuelle Freigabe zur Bereicherung des Handbuches ist dabei nur durch den Einsender selbst auszulösen.

Ich hoffe, die Lektüre des Handbuches bringt soviel Nutzen, wie mir seine Abfassung Freude bereitet hat.

Berlin, im Oktober 2008

Raimund Perneder

# Inhaltsverzeichnis

|          |                                                    |          |
|----------|----------------------------------------------------|----------|
| <b>1</b> | <b>Per Mausclick zum richtigen Antrieb.....</b>    | <b>1</b> |
| <b>2</b> | <b>Grundlagen.....</b>                             | <b>3</b> |
| 2.1      | Warum Zahnriemen? .....                            | 3        |
| 2.2      | Hauptgeometrische Abmessungen.....                 | 5        |
| 2.3      | Riemenprofile .....                                | 11       |
| 2.3.1    | Standardprofil in Zollteilung .....                | 13       |
| 2.3.2    | Standardprofil mit metrischer T-Teilung .....      | 14       |
| 2.3.3    | Hochleistungsprofil AT.....                        | 15       |
| 2.3.4    | Hochleistungsprofil H.....                         | 16       |
| 2.3.5    | Hochleistungsprofil R .....                        | 17       |
| 2.3.6    | Hochleistungsprofil S.....                         | 18       |
| 2.3.7    | Hochleistungsprofil Omega .....                    | 19       |
| 2.3.8    | Hochleistungsprofil GT3.....                       | 20       |
| 2.3.9    | Hochleistungsprofil PC-MGT2.....                   | 21       |
| 2.3.10   | Hochleistungsprofil ATP .....                      | 22       |
| 2.3.11   | Sonderprofil Spurzahnriemen .....                  | 23       |
| 2.3.12   | Sonderprofil SFAT.....                             | 24       |
| 2.3.13   | Sonderprofil Bogenzahnriemen .....                 | 25       |
| 2.3.14   | Sonderprofil Pfeilverzahnung .....                 | 26       |
| 2.3.15   | Sonderprofil Noppenriemen.....                     | 27       |
| 2.3.16   | Sonderprofil mit Steckmuttern.....                 | 28       |
| 2.4      | Fertigungsverfahren und Elastomere.....            | 29       |
| 2.4.1    | Aus Polyurethan gegossene Zahnriemen .....         | 29       |
| 2.4.2    | Aus Synthekautschuk vulkanisierte Zahnriemen ..... | 32       |
| 2.4.3    | Aus Polyurethan extrudierte Zahnriemen .....       | 33       |
| 2.4.4    | Aus Polyurethan extrudierte Meterware .....        | 34       |
| 2.4.5    | Weitere Herstellverfahren .....                    | 35       |
| 2.4.6    | Meterware endlos verschweißt.....                  | 35       |
| 2.4.7    | Zahnriemenschluss.....                             | 36       |

|          |                                                                    |            |
|----------|--------------------------------------------------------------------|------------|
| 2.4.8    | Anwendung und Einsatzbereiche .....                                | 37         |
| 2.4.9    | Leistungssteigerungen und Entwicklungsreserven .....               | 38         |
| 2.5      | Zugstrang.....                                                     | 39         |
| 2.6      | Kräfte im Zahnriemengetriebe.....                                  | 46         |
| 2.7      | Kraftwirkmechanismus und Vorspannkraft.....                        | 48         |
| 2.8      | Vorspannkraft in Mehrwellenantrieben.....                          | 52         |
| 2.9      | Zahntragfähigkeit .....                                            | 54         |
| 2.10     | Riemenführung, Bordscheiben .....                                  | 58         |
| 2.11     | Ungleichmäßigkeiten, Schwingungen, Dynamik .....                   | 67         |
| 2.12     | Geräuschverhalten .....                                            | 74         |
| 2.13     | Übertragungsgenauigkeit, Verdrehsteifigkeit.....                   | 80         |
| 2.14     | Mechatronischer Antriebsstrang.....                                | 87         |
| 2.15     | Zahnriemenscheiben, Zahnlückengeometrie .....                      | 89         |
| 2.16     | Tangentialeingriff.....                                            | 94         |
| 2.17     | Riemenmontage, Einstellen der Vorspannkraft .....                  | 99         |
| 2.18     | Minstdurchmesser für Umlenkungen und Spannrollen.....              | 104        |
| 2.19     | Messen der Wirklänge .....                                         | 106        |
| 2.20     | Wirkungsgrad .....                                                 | 108        |
| <b>3</b> | <b>Zahnriemen in der Antriebstechnik.....</b>                      | <b>111</b> |
| 3.1      | Raum-Riemen-Anordnungen.....                                       | 111        |
| 3.2      | Spindelhubelement .....                                            | 122        |
| 3.3      | Zuschnittapparat für Verpackungsmittel .....                       | 123        |
| 3.4      | Pressenantrieb.....                                                | 124        |
| 3.5      | Seilfähre.....                                                     | 125        |
| 3.6      | Prüfstand.....                                                     | 126        |
| 3.7      | Einstellbare Achsabstände konstruktiv gelöst .....                 | 127        |
| 3.8      | Zahnscheiben aus Kunststoff gespritzt .....                        | 129        |
| 3.9      | Propellerantrieb für Motorsegler .....                             | 130        |
| 3.10     | Industrieroboter .....                                             | 131        |
| 3.11     | Zahnriemen-Steuerantriebe in der KFZ-Technik .....                 | 135        |
| 3.11.1   | Einleitung.....                                                    | 135        |
| 3.11.2   | Entwicklungsgeschichte<br>von Zahnriemen-Steuerantrieben .....     | 135        |
| 3.11.3   | Das Ovalrad-Schwingungstilgersystem .....                          | 138        |
| 3.11.4   | Aktuelle Kundenanforderungen<br>an Zahnriemen-Steuerantriebe ..... | 141        |
| 3.11.5   | OIL RUNNER Zahnriemen .....                                        | 142        |
| <b>4</b> | <b>Zahnriemen in der Lineartechnik .....</b>                       | <b>147</b> |
| 4.1      | Umformung der Bewegung .....                                       | 147        |
| 4.2      | Dimensionieren von Linearantrieben .....                           | 148        |
| 4.3      | Positionieren linearer Bewegungen .....                            | 155        |
| 4.4      | Dynamik und Schwingungsverhalten .....                             | 165        |
| 4.5      | Berechnungsbeispiel zum Positioniernachweis .....                  | 166        |



|          |                                                           |            |
|----------|-----------------------------------------------------------|------------|
| 4.6      | Linearachsen.....                                         | 169        |
| 4.7      | Regalbediengeräte .....                                   | 173        |
| 4.8      | Flächenportal/Kreuztisch.....                             | 180        |
| 4.9      | Teleskopantrieb .....                                     | 182        |
| 4.10     | Linear-Differenzgetriebe .....                            | 184        |
| 4.11     | Linear-Umsetzer .....                                     | 186        |
| 4.12     | Portalantriebe.....                                       | 187        |
| 4.13     | Gebäudetechnik .....                                      | 190        |
| <b>5</b> | <b>Zahnriemen in der Transporttechnik .....</b>           | <b>193</b> |
| 5.1      | Stand der Technik.....                                    | 193        |
| 5.2      | Auslegung des Transportzahnriemens .....                  | 194        |
| 5.3      | Reibung und tribologisches Verhalten.....                 | 196        |
| 5.4      | Transportflächen, Kontaktflächen und Beschichtungen ..... | 197        |
| 5.5      | Gleitender Abtrag/rollender Abtrag.....                   | 198        |
| 5.6      | Nocken Zahnriemen .....                                   | 199        |
| 5.7      | Einsatzbeispiele für Nocken Zahnriemen.....               | 203        |
| 5.8      | Einsatzbeispiele mit verstellbaren Nocken .....           | 208        |
| 5.9      | Nocken Zahnriemen und Anbauteile.....                     | 210        |
| 5.10     | Palettierer.....                                          | 214        |
| 5.11     | Bandabzüge .....                                          | 216        |
| 5.12     | Saugriemen, Magnetriemen .....                            | 219        |
| <b>6</b> | <b>Zahnriemenschäden.....</b>                             | <b>223</b> |
| 6.1      | Schadensursachen.....                                     | 223        |
| 6.2      | Schadensbilder.....                                       | 225        |
| <b>7</b> | <b>Anhang.....</b>                                        | <b>231</b> |
| 7.1      | Übersicht zur Antriebsauslegung.....                      | 231        |
| 7.2      | Die ausgewogene Antriebskonstruktion .....                | 233        |
| 7.3      | Zugstrang- und Zahnsteifigkeit.....                       | 235        |
| <b>8</b> | <b>Zeichen, Benennungen und Einheiten.....</b>            | <b>237</b> |
|          | <b>Literaturverzeichnis .....</b>                         | <b>241</b> |
|          | <b>Index .....</b>                                        | <b>245</b> |

# 1 Per Mausclick zum richtigen Antrieb

„Bitte geben Sie Ihre Antriebsbedingungen mit Drehzahl, Leistung und gewünschter Übersetzung in das PC-Programm ein. Die Antriebsaufgabe wird umgehend bearbeitet. Bitte warten ...“. Per Mausclick könnte das Ergebnis dann heißen: **„... und hierfür ist ein Zahnriemen genau die richtige Lösung!“** Das ist die Zukunft am Arbeitsplatz der Konstrukteure! In dieser oder ähnlicher Weise von Experten prognostiziert, könnten Maschinenelemente und Bausteine einer jeden technischen Konstruktion künftig durch rechnerunterstützte Auswahl- und Entscheidungsprozesse gelöst werden. Das sieht plausibel aus. Ein Angebot wäre auch wünschenswert. Solch ein Programm ist vorstellbar, doch realisierbar ist es nicht. Die Thematik der Antriebstechnik ist zu vielfältig. Wäre eine Antriebsauswahl durch Mausclick möglich, brauchte es ein Handbuch der Zahnriementechnik nicht zu geben.

Deshalb soll dieses Buch an die Thematik heranführen und aufzeigen, bei welchen Antriebsaufgaben Zahnriemengetriebe zu bevorzugen sind. Dazu werden viele Beispiele aus der Praxis vorgestellt und deren einsatzentscheidende Funktionsvorteile beschrieben. Die Kap. 3 bis 5 befassen sich mit illustrierten Darstellungen. Diese halten eine Vielzahl von Informationen und Lösungsansätzen mit ganzheitlichen Raum-Riemen-Anordnungen bereit. Die dargestellten Antriebssysteme kann man auch als Lösungsmodule betrachten und auf ähnliche Aufgabenstellungen übertragen. Damit sollen insbesondere die technisch-kreativen Potentiale der Konstrukteure angesprochen werden. Sie denken in Bildern und räumlichen Gebilden. Die Konstruktion setzt diese in logisch-rationale Funktionen um. Durch die Kombination von zwei oder mehreren bekannten Lösungen entwickelt sich eine neue innovative Variante. Vorhandene Beispiele, aus anderen Quellen entliehen, setzen den Arbeitsaufwand erheblich herab. Zweckmäßig ist ferner der schöpferische Zugriff auf Lösungselemente verschiedener Fachdisziplinen, wodurch interaktiv die gewünschte Struktur gefunden werden kann [47]. Der Denkprozess zu neuen technischen Ausführungen fordert Anstrengungen eines kreativen Geistes. Und solche Leistungen sind (noch) nicht durch Mausclick abrufbar.

Der Leser des Buches erkennt Schwerpunkte und Haupteinsatzbereiche der Zahnriemengetriebe. Bei ähnlichen Aufgabenstellungen werden somit Auswahlprozesse erleichtert. Außerdem finden sich Hinweise und Empfehlungen für die Detailausführung. Eine Umgebungskonstruktion steht mit ihren gewählten Antriebskomponenten in Wechselbeziehung. Der Zahnriemen beeinflusst das konstruktive Umfeld positiv. Die günstige Laufkultur sowie die Vorteile von wartungs freiem und geräuscharmem Lauf lassen sich damit gezielt nutzen.

Zahnriemen und zugehörige Zahnscheiben müssen richtig dimensioniert werden. Für die Antriebsauslegung sind zwei Dimensionierungsschritte erforderlich. Zunächst ist die geometrische Auslegung mit den Achsabständen, Scheibengrößen sowie der Riemenverlegung mit dem verfügbaren Einbauraum in Einklang zu bringen. Danach erfolgt der Leistungsnachweis und die Beantwortung der Frage, ob aufgrund der gewählten Geometrie die Drehmomente und Kräfte auch sicher übertragbar sind.

Für die Zahnriemenauslegung stehen in aller Regel PC-unterstützte Programme\*) bereit. Damit führt der Mausclick letztendlich doch zum Ergebnis. Aber der Weg dorthin und die Wahl des Antriebselements sowie die Abstimmung mit der Umgebungskonstruktion bleibt als Gestaltungsaufgabe in der Verantwortung des Konstrukteurs.

#### **Zahnriemen oder Synchronriemen?**

Welcher Begriff ist richtig: Zahnriemen oder, wie es DIN empfiehlt, Synchronriemen ?

Während mit Keilriemen, Rundriemen und Flachriemen jeweils die geometrische Form definiert ist, wird mit Synchronriemen auf die Funktion hingewiesen. Die Norm für Synchronriementriebe DIN ISO 5296 lässt mit erklärendem Text weiterhin die Begriffe Zahnriemen und Zahnriemenscheibe ausdrücklich bestehen. Deshalb werden sie auch mit Blick auf die weite Verbreitung in der Praxis in diesem Buch verwendet.

Die am Markt angebotenen Zahnriemenarten unterscheiden sich in den Merkmalen der Profilgeometrie sowie der Teilung, dem Aufbau des Zugstranges und den Werkstoffkomponenten des eingesetzten Elastomeres. Je nach Fabrikat sind die Riemen erhältlich aus dem Synthesekautschuk Chloropren (bedingt ölbeständig) oder aus gegossenem bzw. plastifizierbarem Polyurethan (in der Regel ölfest). Die handelsüblichen Profile und zugehörigen Maßtabellen sind in den Kapiteln 2.3.1 bis 2.3.16 aufgelistet.

---

\*) Diesem Buch liegt kein PC-Programm bei. Jedes Fabrikat am Markt hat seine spezifischen Leistungsmerkmale. Die meisten Hersteller bieten im Zusammenhang mit ihren Vertriebskatalogen auch zugehörige PC-unterstützte Berechnungsprogramme an [50].

## 2 Grundlagen

### Zusammenfassung

Eine sichere Grundlage der gewählten Komponenten für Konstruktionen mit Bewegungsabläufen erfordert umfangreiche Kenntnisse über die Funktionsmerkmale von Antriebselementen. Im vorliegenden Kapitel findet der Leser Maßtabellen zu den handelsüblichen Zahnriemenprofilen. Sie bestehen aus unterschiedlichen Elastomeren und Zugsträngen. Durch die Beschreibung der Herstellung lassen sich die Eigenschaften sowie Haupteinsatzbereiche der einzelnen Ausführungsarten ableiten. Die marktführenden Produzenten sind namentlich genannt.

Das Betriebsverhalten aller Zahnriemenprofile ist jedoch im Kraftwirkmechanismus grundsätzlich gleich. Hier findet der Anwender vielfältige Hinweise auf die erforderliche Vorspannkraft, erreichbare Übertragungsgenauigkeit, mögliche Geräusche sowie Gestaltung von Konstruktionsdetails. Die Einzelthemen bieten Berechnungen der technischen Parameter sowie Maßnahmen zur Optimierung an.

### 2.1 Warum Zahnriemen?

Wenn Antriebssysteme mit beispiellosen Werten beschleunigt und wieder gebremst werden, und wenn aus hoher Geschwindigkeit heraus punktgenau zu positionieren ist, dann sind Zahnriemen von erstrangigem Interesse.

Dieser Satz beschreibt die Kernkompetenz des Zahnriemens. Er arbeitet gleichermaßen in hohen wie auch in niederen Drehzahlbereichen, und lässt sich insbesondere hervorragend beschleunigen und bremsen. Zudem ist er massearm. Der Zahnriemen reiht sich als formschlüssiges Antriebselement in die Gruppe der Zugmittelgetriebe ein, und er erreicht seine hohe Leistungsdichte aus der günstigen Krafteinleitung im Zusammenwirken mit den Zahnscheiben. Diese werden in

der Regel aus Leichtmetalllegierungen, zum Teil auch aus Kunststoff gefertigt. In den Umschlingungsbögen der Scheiben liegt stets eine Lastverteilung über viele eingreifende Zähne vor. Je mehr Zähne am Eingriff beteiligt sind, umso geringer ist die Einzellast je Zahn d. h. umso größer kann das übertragbare Drehmoment für den Gesamtantrieb angesetzt werden.

Die hervorragende Eignung für Aufgaben im Anlauf- beziehungsweise Bremsbetrieb bezieht der Zahnriemen auch aus der Werkstoffpaarung zwischen Riemen und Scheibe. Es wird ein nachgiebiger Zahn aus Elastomere-Werkstoffen zwischen den starren Flanken der Zahnscheibenlücke aufgenommen. Da jeder Wechsel vom Anlaufen zum Bremsen und umgekehrt im Antrieb eine Drehmomenten-Umkehr bewirkt, wechseln auch die Lastflanken im Zahneingriff. Dieser Lastwechsel vollzieht sich dank der Nachgiebigkeit im Riemenzahn sanft und ohne Stöße. Dadurch weisen Zahnriemen eine überaus günstige Laufkultur auf, was sich zugleich auf vor- und nachgeschaltete Antriebsglieder positiv auswirkt. Bei wechselnden Drehrichtungen, bei häufig auftretenden Anlauf- und Bremsvorgängen oder bei ständig intermittierender Funktion gibt es kein Schlagen und Ausschlagen. Unter diesen Betriebsbedingungen beweisen Zahnriemen ihre überragende Lebensdauer, an die kein anderes Antriebsselement annähernd heranreicht.

Dank gesteuerter Schrittmotore und moderner Servotechnik werden in Produktionsanlagen oft von Punkt-zu-Punkt-Bewegungsaufgaben gelöst. Es handelt sich um Vorgänge der Handhabungstechnik wie Greifen, Verfahren und Absetzen. Genau solche Aufgabenstellungen sind gekennzeichnet durch begrenzte Bewegungsabläufe. Sie erfordern ein ständiges Anfahren, Bremsen und Positionieren. Erschwerend kommt hinzu, dass dann die Wechselkräfte im Antriebsstrang zu meist auf dieselben Umkehrpunkte wirken. Insbesondere auf diesem Gebiet wird der Einsatz des Zahnriemens deutlich zunehmen. Er lässt sich außerdem in Aufgaben der Produktionsverkettung hervorragend einbinden und passt sich unterschiedlichen Betriebsbedingungen gut an.

Der Zahnriemen verbindet die Vorzüge herkömmlicher Riemen (Flach-, Keil- und Keilrippenriemen), wie hohe zulässige Umfangsgeschwindigkeit und geräuscharmer Lauf, mit denen der Kette, besonders hinsichtlich der schlupffreien Bewegungsübertragung. Der wesentliche Unterschied zur Kette besteht darin, dass der Zahnriemen durch einen gliederlosen Aufbau gekennzeichnet ist. Dadurch ergeben sich beim Wechsel vom geraden Trum in die Scheibenkrümmung weder Gliederbewegungen noch Relativbewegungen, die Verschleiß oder eine Längung hervorrufen könnten. Zudem unterdrückt der gliederlose Aufbau den Polygoneffekt, und das Geräuschverhalten ist entsprechend günstig.

Die Einbindung in vielfältige Aufgabenstellungen für antriebstechnische Lösungen im Maschinenbau und in der Feinwerktechnik wird insbesondere dadurch erleichtert, dass der Zahnriemen ein breit angelegtes Eigenschaftsprofil hat und, ob im Schwerlast- sowie Dauerbetrieb eingesetzt, gänzlich ohne Schmierung auskommt. Andererseits ist auch der Umkehrschluss von Bedeutung: Sollte die unmittelbare Umgebungsstruktur durch Schmierstellen (Schmierfett, Öl, Ölnebel-dämpfe) belastet sein, dann ist aus dem Angebot der Riemenfabrikate ein ölfestes Produkt zu wählen.

## 2.2 Hauptgeometrische Abmessungen

Abbildung 2.1 zeigt die hauptgeometrischen Abmessungen eines Zahnriemenge-triebes. Tabelle 2.1 enthält die zugehörigen Benennungen und Beschreibungen der einzelnen Zeichen.

Innerhalb der hauptgeometrischen Abmessungen stehen einzelne Größen zu-einander in verifizierbarer Abhängigkeit. Im Folgenden sind die zur Antriebsaus-legung nützlichen Zusammenhänge aufgeführt. Es kann zum Beispiel die Riemen-länge als Produkt von Teilung und Zähnezahl ausgedrückt werden:

$$l_B = p \cdot z_B \tag{2.1}$$

Bei formgepaarten Antriebs-elementen errechnet sich die Übersetzung aus den Zähnezahlen der Scheiben. Die Übersetzung ist somit der Quotient ganzer Zahlen:

$$i = \frac{z_2}{z_1} \tag{2.2}$$

Der Achsabstand  $C$  bildet sich aus den Zähnezahlen der Scheiben und des Rie-mens gemäß der Beziehung:

$$C \approx \frac{p}{4} \left[ \left( z_B - \frac{z_2 + z_1}{2} \right) + \sqrt{\left( z_B - \frac{z_2 + z_1}{2} \right)^2 - \frac{2}{\pi^2} (z_2 - z_1)^2} \right] \tag{2.3}$$

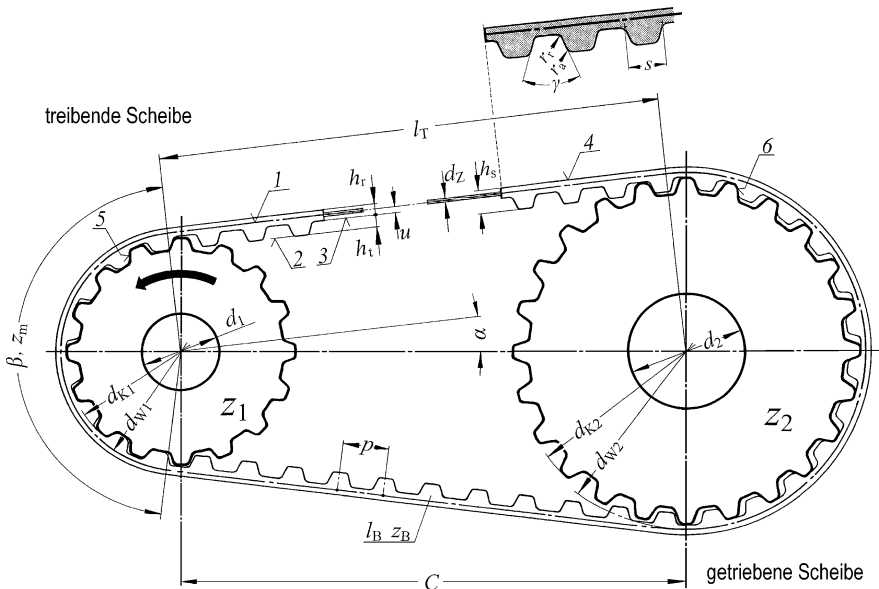


Abb. 2.1 Hauptgeometrische Abmessungen

**Tabelle 2.1** Benennung und Beschreibung der hauptgeometrischen Abmessungen

| Zeichen               | Benennung (Einheit)                              | Erläuterungen                                                                                                                                                                                                                          |
|-----------------------|--------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| –                     | Zahnriemengetriebe                               | Antriebssystem bestehend aus einem Zahnriemen und mindestens zwei Zahnscheiben.                                                                                                                                                        |
| $l$                   | Wirklinie                                        | Die Wirklinie ist jene Linie im Riemen, die auch bei dessen Krümmung ihre Länge beibehält. Die Wirklinie befindet sich in Zugstrangmitte.                                                                                              |
| 2                     | Kopflinie                                        | Die Kopflinie ist jene Linie, die die Kopfflächen der Zähne des Riemens verbindet.                                                                                                                                                     |
| 3                     | Fußlinie                                         | Die Fußlinie ist jene Linie, die den Grund der Zähne des Riemens verbindet.                                                                                                                                                            |
| 4                     | Riemenrücken, Rückenlinie                        | Der Riemenrücken bzw. die Rückenlinie bildet die Begrenzungslinie des Riemens (des Hülltriebes) nach außen.                                                                                                                            |
| 5                     | Arbeitsflanke der treibenden Scheibe             | Die Arbeitsflanke der treibenden Scheibe überträgt die Bewegung oder Kraft von der Scheibe in den Riemen.                                                                                                                              |
| 6                     | Arbeitsflanke der getriebenen Scheibe            | Die Arbeitsflanke der getriebenen Scheibe überträgt die Bewegung oder Kraft vom Riemen in die Scheibe.                                                                                                                                 |
| $C$                   | Achsabstand (mm)                                 | Der Achsabstand ist die kürzeste Entfernung zweier Zahnscheibenzentren unter Messspannkraft des Riemens.                                                                                                                               |
| $n$<br>$n_1$<br>$n_2$ | Drehzahl ( $\text{min}^{-1}$ )                   | Die Drehzahl der kleinen Scheibe bezeichnet man mit $n_1$ , die der großen Scheibe mit $n_2$ (wirkt die große Scheibe treibend, ist die Indizierung zu ändern).                                                                        |
| $l_B$                 | Riemenlänge (mm)                                 | Das Maß der Riemenlänge bezieht sich auf die Wirklinie unter Messspannkraft.                                                                                                                                                           |
| $l_t$                 | Trumlänge (mm)                                   | Die Trumlänge ist der Abstand zwischen Tangentenauslauf und Tangenteneinlauf der Nachbarscheibe.                                                                                                                                       |
| $l_1$                 | ziehende Riementeillänge (mm)<br>siehe Abb. 2.11 | Die ziehende Riementeillänge besteht aus dem belasteten Riemenabschnitt zuzüglich der jeweils halbierten Umschlingungslänge der beteiligten Scheiben.                                                                                  |
| $l_2$                 | gezogene Riementeillänge (mm)<br>siehe Abb. 2.11 | Die gezogene Riementeillänge besteht aus dem entlasteten Riemenabschnitt zuzüglich der jeweils halbierten Umschlingungslänge der beteiligten Scheiben.                                                                                 |
| $z_B$                 | Zähnezahl des Riemens                            | Die Zähnezahl des Riemens ist die Gesamtzahl der auf der Eingriffsseite zu den Zahnscheiben angeordneten Riemenzähne.                                                                                                                  |
| $z_m$                 | Eingriffszähnezahl gesamt                        | Die Eingriffszähnezahl gesamt gibt die Anzahl der auf einer Zahnscheibe im Eingriff befindlichen Riemenzähne an.                                                                                                                       |
| $z_e$                 | Eingriffszähnezahl für Traglastberechnung        | Zur Berechnung der Traglast ist die Eingriffszähnezahl $z_e$ eine auf eine ganze Zahl nach unten gerundete Zahl. Je nach Fabrikat ist die rechnerisch eingreifende Zähnezahl auf einen Maximalwert begrenzt, z. B. $z_{e \max} = 12$ . |

**Tabelle 2.1** (Fortsetzung)

| Zeichen                       | Benennung (Einheit)                    | Erläuterungen                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|-------------------------------|----------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $z$<br>$z_1$<br>$z_2$         | Zähnezahl der Scheibe                  | Die in der Scheibe korrespondierende Geometrie zur Formpaarung des Riemens bilden zur Aufnahme der Riemenzähne die Zahn­lücken und zur radialen Abstützung des Riemens die Zähne. Die Anzahl der Zähne über den Umfang der kleinen Scheibe – in der Regel treibende Scheibe – ist $z_1$ . Die Anzahl der Zähne über den Umfang der großen Scheibe ist $z_2$ . (wirkt die große Scheibe treibend, ist die Indizierung zu ändern).                     |
| $p$<br>$p_b$<br>$p_p$         | Zahnteilung (mm)                       | Die Zahnteilung bzw. Nennteilung wird gebildet aus dem Abstand zwischen zwei benachbarten Zähnen im Wirklinienverlauf unter Messspannkraft. Wenn zwischen Riemen- und Scheibenteilung unterschieden werden muss, sind zusätzliche Indizes anzuwenden:<br>$p_b$ = Riementeilung,<br>$p_p$ = Scheibenteilung.                                                                                                                                          |
| $d_w$<br>$d_{w1}$<br>$d_{w2}$ | Wirkkreis­durchmesser (mm)             | Der Wirkkreis­durchmesser liegt in Zugstrangmitte und wird durch jene Kreisbogenlinie um das Zahnscheibenzentrum gebildet, in der Teilungsgleichheit zwischen Riementeilung $p_b$ und Scheibenteilung $p_p$ besteht. Der Wirkkreis­durchmesser ist eine toleranzfreie Nenngröße, wobei das Maß der kleinen Scheibe mit $d_{w1}$ und das der großen mit $d_{w2}$ zu bezeichnen ist (wirkt die große Scheibe treibend, ist die Indizierung zu ändern). |
| $d_k$<br>$d_{k1}$<br>$d_{k2}$ | Kopfkreis­durchmesser (mm)             | Der Kopfkreis­durchmesser ist jene Mantelfläche der Zahnscheibe, auf den sich der Zahnriemen im Umschlingungs­bogen abstützt. Der Kopfkreis­durchmesser der kleinen Scheibe heißt $d_{k1}$ , der großen $d_{k2}$ (wirkt die große Scheibe treibend, ist die Indizierung zu ändern).                                                                                                                                                                  |
| $d$<br>$d_1$<br>$d_2$         | Bohrung (mm)                           | Die Bohrung in der Scheibe verläuft zentrisch zur Mantelfläche der Verzahnung, und ihre Zylinderfläche dient in der Regel zur Aufnahme der Achse. Die Bohrung in der kleinen Scheibe heißt $d_1$ , die in der großen Scheibe $d_2$ (wirkt die große Scheibe treibend, ist die Indizierung zu ändern).                                                                                                                                                |
| $\beta$                       | Umschlingungs­winkel (°)               | Der Winkel des Kreissegments, auf dem sich der Riemen auf der kleinen Zahnscheibe abstützt, ist der Umschlingungs­winkel.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| $\alpha$                      | Trumneigungs­winkel (°)                | In Riemenanordnungen mit $i \neq 1$ verlassen die Riementrome die kleine Scheibe zur großen mit dem Öffnungswinkel $2\alpha$ . Den Halbwinkel nennt man Trumneigungs­winkel.                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| $h_s$                         | Gesamtdicke des Riemens (mm)           | Die Gesamtdicke (Gesamthöhe des Riemens) ist das Maß von der Kopflinie bis zur Rückenlinie des Riemens.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| $h_d$                         | Gesamtdicke bei Doppel­verzahnung (mm) | Die Gesamtdicke des beiderseitig verzahnten Riemens ist das Maß zwischen den Kopflinien von Verzahnung zu Gegenverzahnung.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |



**Tabelle 2.1** (Fortsetzung)

| Zeichen  | Benennung (Einheit)                                   | Erläuterungen                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|----------|-------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $h_t$    | Zahnhöhe des Riemens (mm)                             | Die Zahnhöhe ist der Abstand vom Grund der Zähne bis zur Kopflinie.                                                                                                                                                                                                                               |
| $h_r$    | Rückenhöhe des Riemens (mm)                           | Die Rückenhöhe ist die Entfernung zwischen Rückenlinie und Fußlinie des Riemens.                                                                                                                                                                                                                  |
| $d_z$    | Zugstrangdurchmesser (mm)                             | Der Zugstrangdurchmesser ist das Maß des Umkreisdurchmessers.                                                                                                                                                                                                                                     |
| $s$      | Zahnfußbreite (mm)                                    | Die Zahnfußbreite wird am gestreckten Riemen bestimmt durch den linearen Abstand zwischen den Schnittpunkten der verlängerten Riemenzahnflanken mit der Fußlinie des Riemens.                                                                                                                     |
| $\gamma$ | Flankenwinkel (°)                                     | Der Riemenzahnwinkel $2\gamma$ ist der Gesamtwinkel zwischen beiden Flanken. Der Halbwinkel ist der Flankenwinkel.                                                                                                                                                                                |
| $r_a$    | Kopfradius (mm)                                       | Der Kopfradius verbindet Zahnflanke und Kopflinie des Riemens.                                                                                                                                                                                                                                    |
| $r_r$    | Fußradius (mm)                                        | Der Fußradius verbindet Zahnflanke und Fußlinie des Riemens.                                                                                                                                                                                                                                      |
| $i$      | Übersetzung                                           | Die Übersetzung wird gebildet aus dem Quotient der Zähnezahlen der Scheiben $z_2/z_1$ beziehungsweise der Drehzahlen $n_1/n_2$ .                                                                                                                                                                  |
| $b$      | Riemenbreite (mm)                                     | Die Riemenbreite ist das Maß quer zur Laufrichtung gemessen von der rechten zur linken Flanke des Zahnriemens.                                                                                                                                                                                    |
| $B$      | Verzahnungsbreite der Scheibe (mm)<br>siehe Abb. 2.24 | Die Verzahnungsbreite entspricht dem Entfernungsmaß beider an die Verzahnung der Scheibe angrenzenden Stirnflächen. Wenn die Zahnscheibe mit Bordscheiben ausgerüstet wird, ist als Verzahnungsbreite bzw. als Verzahnungsnennbreite das Maß „außen über die Bordscheiben gemessen“ zu verstehen. |
| $u$      | Wirklinsenabstand (mm)                                | Der Abstand zwischen Zugstrangmitte und Fußlinie des Zahnriemens wird als Wirklinsenabstand bezeichnet.                                                                                                                                                                                           |

Benennung und Beschreibung übernommen aus Krause, W.; Metzner, D.: Zahnriemengetriebe [46] sowie ISO 5288 [35]. Weitere Bestimmungsgrößen zur Zahnscheibe und deren Zahnlückenprofil sind in Kap. 2.14, Abb. 2.24 sowie Tabelle 2.6 definiert.

Für den Fall, dass die Antriebsgeometrie mit Achsabstand, Scheibengröße und Teilung vorgegeben ist, führt die nachfolgende Beziehung zur Riemenlänge:

$$l_B = \frac{p}{2}(z_2 + z_1) + \frac{p \cdot \alpha}{\pi}(z_2 - z_1) + 2C \cdot \cos \alpha, \quad (2.4)$$

mit

$$\alpha = \arcsin \frac{p(z_2 - z_1)}{2\pi \cdot C}, \quad (2.5)$$

oder überschläglich

$$l_B \approx \frac{\pi}{2}(d_{w2} + d_{w1}) + 2C + \frac{(d_{w2} - d_{w1})^2}{4C}. \quad (2.6)$$

Bei Antriebsanordnungen mit gleichgroßen Scheiben (Übersetzung  $i = 1$ ) vereinfacht sich die Berechnung des Achsabstandes auf die Beziehung:

$$C = \frac{p}{2}(z_B - z) = \frac{1}{2}(l_B - p \cdot z). \quad (2.7)$$

Der Wirkkreisdurchmesser von Zahnscheiben errechnet sich aus:

$$d_w = \frac{z \cdot p}{\pi}. \quad (2.8)$$

Der Wirkkreisdurchmesser ist als toleranzfreies Nennmaß die nominelle Führungsgröße, aus welcher alle weiteren Maße der Scheibe wie Kopfkreisdurchmesser, Fußkreisdurchmesser und Lage der Rückenlinie des Riemens abzuleiten sind.

Der Wirkkreisdurchmesser lässt sich durch Messmittel nicht direkt prüfen (siehe Qualitätskontrolle von Zahnscheiben in Kap. 2.15). Er liegt außerhalb der Zahnscheibe, und wird gebildet aus der Lage jener Kreisbogenlinie um das Zahnscheibenzentrum, in welcher die Zugstrangmitte des Riemens in Teilungsgleichheit mit der Zahnscheibe steht. Der Zahnriemen stützt sich in der Regel auf dem Kopfkreisdurchmesser ab, und damit beeinflussen weitere Abmessungen sowohl in der Scheibe als auch im Riemen die tatsächliche Wirklinienlage. Es kommt folglich auf die richtige Ausführung des Kopfkreisdurchmessers in der Scheibe an. Er berechnet sich aus der Beziehung:

$$d_K = d_w - 2(u - v_K) = \frac{z \cdot p}{\pi} - 2(u - v_K) \quad (2.9 a)$$

Die Größe  $v_K$  in mm wirkt dabei als radiale Profilkorrektur auf den Kopfkreisdurchmesser, um die Verkürzung der tatsächlichen Umschlingungslänge zur theoretischen Ideallänge auszugleichen. Die Verkürzung kommt zum einen aufgrund von Verformungen im Elastomere durch die Riemenabstützkräfte im Bereich der Kopfkreisauflage zustande. Durch die Stützkräfte ergeben sich zum anderen Querbelastungen auf den Zugstrang, und als Folge davon entstehen Abplattungen im Seilverbund, die sich als Verschiebung des Wirklinienabstandes  $u$  auswirken. Eine weitere Umschlingungsverkürzung verursacht der Polygoneffekt. Der tatsächliche Wirklinienverlauf um die Scheibe weist einen im Zahnteilungsrhythmus schwankenden Wert für  $d_w$  auf. Es bildet sich praktisch ein Wirkdurchmesser gegenüber dem Zahn und ein etwas kleinerer Wirkdurchmesser gegenüber der Zahnücke aus. Die in Gl. (2.9 a) erforderliche Profilverschiebung  $v_K$  hat somit die korrigierende Aufgabe, die Summe aller Verkürzungen auszugleichen. Für die angestrebte Teilungsgleichheit zwischen Riemen und Scheibe ist jener Kopfkreisdurchmesser anzustreben, bei der die theoretische Umschlingungslänge mit der tatsächlichen zusammenfällt.

Die absoluten Größen für  $v_K$  je Zahnriemenart stellen von den Herstellern empirisch ermittelte Werte dar, und sie betragen 0 bis 0,15 mm. Die Korrekturwerte für die Profilverschiebung sind abhängig von der Größe der Teilung, den Werkstoffkennwerten der Zahnriemenkomponenten, der Art der Zahnlückengeometrie in der Scheibe und insbesondere davon, ob der Zahnfuß des Riemens im Lückengrund teilweise oder vollkommen aufliegt.

Es kommt bei der Formpaarung darauf an, dass die oben beschriebenen, oft nur wenige Hundertstel mm betragenden Werte zum Erreichen der Teilungsgleichheit zwischen Riemen und Scheibe von den Herstellern richtig ermittelt und exakt eingehalten sind. Erst die Gleichheit beider Teilungen führt zu einem reibungsarmen Zahneingriff und zum gewünschten ruhigen Lauf. Die Werte der Profilverschiebung  $v_K$  haben einen entsprechend hohen Stellenwert für die Qualität der Scheibenfertigung. Es handelt sich allerdings um sehr kleine Korrekturgrößen, die von den Herstellern nicht publiziert werden.

Für den in der Konstruktionspraxis stehenden Zahnriemenanwender wirken sich die Korrekturgrößen der Profilverschiebung auf die Umgebungskonstruktion explizit nicht aus. Es genügt weiterhin die Betrachtung, als würde der Umschlingungsbogen des Riemens um die Scheibe eine ideale Kreisform aufweisen. Somit ist die Gl. (2.9 a) zu vereinfachen auf die Beziehung:

$$\begin{aligned} d_K &\approx d_W - 2u \\ &\approx \frac{z \cdot p}{\pi} - 2u. \end{aligned} \quad (2.9 \text{ b})$$

Die vereinfachte Umrechnung zwischen Wirkkreis- und Kopfkreisdurchmesser steht auch in Übereinstimmung mit weiteren Veröffentlichungen, so in DIN 7721 [12].

Bei einigen Zahnriemenarten (z. B. Hochleistungsprofil AT, siehe Kap. 2.3.3) erfolgt die Riemenabstützung ausschließlich durch Zahnfußauflage im Scheibengrund. In diesem Fall ist das Funktionsmaß, auf den sich der Riemen im Umschlingungsbogen abstützt, der Fußkreisdurchmesser  $d_F$ . Er berechnet sich aus der Beziehung:

$$\begin{aligned} d_F &= d_W - 2(h_t + u - v_K) \\ &= \frac{z \cdot p}{\pi} - 2(h_t + u - v_K). \end{aligned} \quad (2.10 \text{ a})$$

In Gl. (2.10 a) gelten die gleichen Zusammenhänge wie bereits zur Gl. (2.9 b) erläutert, und für die vereinfachte Berechnung ist die Beziehung anzuwenden:

$$\begin{aligned} d_F &\approx d_W - 2(h_t + u) \\ &\approx \frac{z \cdot p}{\pi} - 2(h_t + u). \end{aligned} \quad (2.10 \text{ b})$$

## 2.3 Riemenprofile

Die Vielzahl der angebotenen Riemenprofile ist untrennbar mit der Entwicklungsgeschichte der Zahnriementechnik verbunden. Mit den ersten Versuchseinsätzen und der Erkenntnis der offensichtlichen Funktionsvorteile ging eine zügige Markteinführung einher.

Die ersten Zahnriemen, die als Hülltriebe mit formgepaarten Scheiben arbeitsfähig waren, entwickelte US-Rubber (das Nachfolgeunternehmen ist bekannt als Uniroyal und firmiert heute unter Gates Mectrol) in den 40-er Jahren des vergangenen Jahrhunderts [24]. Sie fanden in Textilmaschinen und Industrienähmaschinen ihren Einsatz. Es ist namentlich der Erfinder Richard Case [6] überliefert, der die Synchronisation zwischen Nadel und Spule in den Singer-Nähmaschinen entscheidend verbesserte. Er erkannte als erster die Zusammenhänge zwischen neutraler Zugstranglage im Zahnriemen und Wirkkreisdurchmesser der Scheibe und er definierte die Begriffe der Zahnriementechnik, die heute noch Gültigkeit haben. Die Entwicklungsleistung der Ingenieure des damaligen U.S. Konzerns bezog sich seinerzeit auf einen speziell konzipierten *verzahnten Flachriemen* und dessen Herstellung. Die Ausführung bestand in einer Verbundkonstruktion aus Kautschuk sowie einem speziellen Festigkeitsträger und einem zahnseitigen Deckgewebe aus Baumwolle (später Polyamidgewebe). Die Herstellung solcher endlosen, verzahnten Flachriemen erfolgte durch Vulkanisation auf Formkernen. Das Lösungsprinzip erwies sich recht bald als derart erfolgreich, dass man sich entschloss, das System auch auf andere Einsatzfälle im Bereich des Maschinenbaus zu übertragen. Aufgrund des offensichtlichen Nutzens und der gezielten Entwicklung für den US-Markt wurden ab 1946 die Zahnriemen mit Zollteilung eingeführt, die heute noch weltweit im Einsatz sind. Es setzten sich insbesondere sechs Profilgeometrien am Markt erfolgreich durch. Diese sind seit 1977 für Riemen in DIN ISO 5294 [14] und für Scheiben in DIN ISO 5296 standardisiert [15].

In Deutschland begann ab ca. 1950 die Entwicklung und die Markteinführung metrisch geteilter Zahnriemen mit „T-Teilung“ durch die MULCO-Gruppe, Hannover. Die Riemen wurden gefertigt aus Contilan<sup>®</sup>, einem gießbaren Polyurethan mit dem Härtegrad 90 Shore. Als Festigkeitsträger kamen Stahlcordzugstränge zum Einsatz. Das Gießverfahren in geschlossenen Formen zur Herstellung von Endlosriemen wird heute noch genutzt. Zahnriemen der T-Teilung sind inzwischen in DIN 7721, Teil 1 für Riemen und Teil 2 [12] für Scheiben genormt. In den 60-er Jahren des 19. Jahrhunderts war es als erster PKW-Hersteller die Firma Glas, die den Zahnriemen für den Nockenwellenantrieb im Fahrzeugbau erfolgreich einsetzte. Durch die Nutzung im Automobilbau und besonders durch eine inzwischen breite Akzeptanz im allgemeinen Maschinenbau, entschlossen sich die Hersteller, weitere Fertigungsverfahren zur Zahnriemenproduktion zu erschließen. Nach der Einführung vulkanisierter und gegossener Endlosriemen entwickelte die Firma BRECO Antriebstechnik, Porta Westfalica (ein Betrieb der MULCO-Gruppe), Umformverfahren aus thermoplastischem Polyurethan. Das Ergebnis

waren gespritzte Endloszahnriemen aus geschlossener Form, extrudierte Riemen in Meterware und extrudierte Endlosriemen. Die Firma BRECO führte ca. 1970 als erster Riemenhersteller außerdem aus Meterware endlos verschweißte Zahnriemen ein. Als Folge der verstärkten Einsatzbreite entstanden Forderungen der Zahnriemenanwender nach höherer Leistungsdichte, größerer Steifigkeit und verbesserter Genauigkeit. Die dadurch ausgelösten Entwicklungen führten zu neuen Zahnriemenarten mit optimierten Werkstoffen und deutlich verstärkten Zugsträngen sowie auch zu neuen Profilen. Die erreichten Leistungssteigerungen sind in der Tat beachtlich, und die Weiterentwicklungen sind noch nicht abgeschlossen.

Vor dem Hintergrund der konsequenten Fortschritte zu einer markterfolgreichen Produktgruppe kann der heutige Anwender je nach zu lösender Antriebsaufgabe auf eine reichhaltige Auswahl verschiedener Zahnriemenarten zurückgreifen.

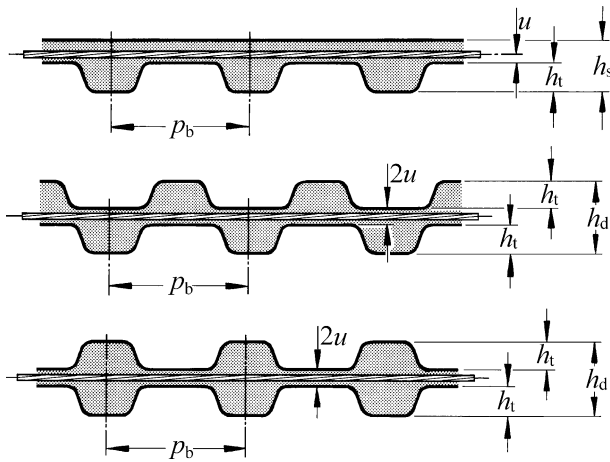
Die einzelnen Zahnriemenarten sind untereinander nicht austauschbar. Jedes Profil erfordert – nur von wenigen Ausnahmen abgesehen – eine eigene Scheiben- sowie Zahnlückengeometrie.

Im Folgenden sind zu den derzeit marktgängigen Profilen die zugehörigen Geometrien in Maßtabellen aufgelistet. Zudem werden Hinweise auf die Ersthersteller gegeben, welche in der Regel als Entwickler auch Schutzrechte für das jeweils neue Profil eintragen ließen. Nach Ablauf der Schutzrechte übernahmen weitere Hersteller die vormals neuen Profile in ihre Fertigungsprogramme. Somit kann sich der Anwender auf eine ausreichend breite Anzahl von Anbietern stützen. Für die Lieferbereitschaft vor Ort ist die sichere Bezugsquelle zumeist der Fachhandelsbetrieb. Profile mit noch wirksamen Schutzrechten (Stand März 2009) sind gekennzeichnet.

Aufgrund der großen Anzahl der Hersteller fallen zu den einzelnen Profilen nicht alle Detailmaße exakt deckungsgleich aus. Es ist festzustellen, dass insbesondere die Rückenhöhe  $h_r$  (sie beeinflusst die Riemenhöhe  $h_s$ ) im absoluten Maß und in der Häufigkeit von Abweichungen betroffen ist. Somit sind bei festgestellten Maßabweichungen die eingetragenen Tabellenwerte entweder gemittelt, oder, wenn eine Normung erfolgte, ist das durch die Norm gestützte Maß bevorzugt genannt. Da es im Einzelfall für den Anwender auf reproduzierbare Detailmaße und deren zugehörige Toleranzen sehr wohl genau ankommt, wird empfohlen, zum jeweiligen Fabrikat die zugehörige Firmendokumentation anzufordern.

Der Anwender der Zahnriementechnik kann davon ausgehen, dass bei Übereinstimmung der Teilungskurzzeichen jeweils ein maßlich austauschbares Profil vorliegt und mit den Scheiben dieses Systems lauffähig ist. Während die Geometrie identisch ist, können die technischen Daten erhebliche Abweichungen aufweisen. Die Nutzung modifizierter Elastomere (für Hoch- oder Tieftemperaturbereiche) sowie die Anwendung unterschiedlicher Kraftträger (Standard-, verstärkte oder besonders flexible Zugstränge) führen zu einer Vielzahl von Eigenschaftsmerkmalen. Bei der Berechnung der Leistungsfähigkeit ist man somit auf die technischen Daten des jeweiligen Fabrikats angewiesen.

### 2.3.1 Standardprofil in Zollteilung



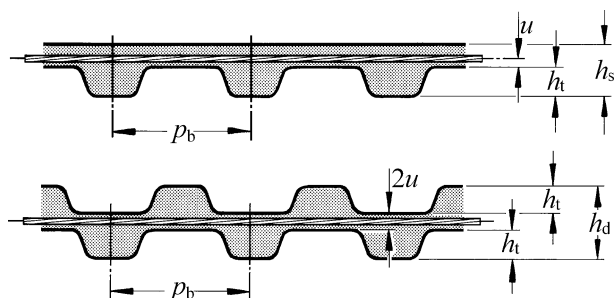
| Teilungskurzzeichen*) | $p_b$<br>Zoll | $p_b$<br>mm | $h_s$<br>mm | $h_t$<br>mm | $h_d$<br>mm | $u$<br>mm | Bemerkung<br>**) |
|-----------------------|---------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-----------|------------------|
| <b>MXL</b>            | 0,08          | 2,023       | 1,140       | 0,510       | 1,530       | 0,225     | DIN ISO 5296     |
| <b>XL</b>             | 1/5           | 5,080       | 2,300       | 1,270       | 3,050       | 0,225     | DIN ISO 5296     |
| <b>L</b>              | 3/8           | 9,525       | 3,600       | 1,910       | 4,580       | 0,380     | DIN ISO 5296     |
| <b>H</b>              | 1/2           | 12,700      | 4,300       | 2,290       | 5,950       | 0,685     | DIN ISO 5296     |
| <b>XH</b>             | 7/8           | 22,225      | 11,200      | 6,350       | 15,490      | 1,395     | DIN ISO 5296     |
| <b>XXH</b>            | 1 1/4         | 31,750      | 15,700      | 9,530       | 22,100      | 1,520     | DIN ISO 5296     |

\*) Mit dem Teilungskurzzeichen wird die Profilgeometrie und Teilung identifiziert.

\*\* ) DIN ISO 5296 [15]

Die mit Trapezprofil in Zollteilung ausgeführten Zahnriemen sind vorzugsweise aus Chloroprenkautschuk, mit dem Zugstrang Glascord und einer zahnseitigen Gewebedeckschicht aus Polyamid erhältlich. Sie wurden um 1940 von US-Rubber, heute bekannt unter Gates Mectrol, entwickelt. Diese Riemen werden weltweit von fast allen namhaften Zahnriemenherstellern produziert. Dem Anwender steht ein reichhaltiges Längensortiment zur Verfügung. Sie sind auch in Polyurethan mit Stahlcord- oder wahlweise Aramidzugstrang in Endloslängen sowie auch als Meterware und verschweißte Meterware erhältlich. Die doppelt verzahnten Riemen sind sowohl in den Ausführungen Zahn gegenüber Zahn wie auch Zahn gegenüber Lücke gebräuchlich.

### 2.3.2 Standardprofil mit metrischer T-Teilung

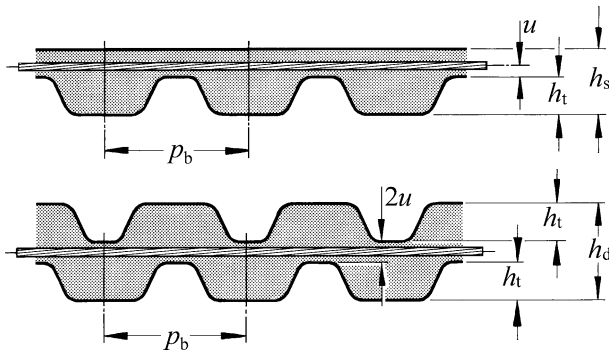


| Teilungs-<br>kurzzeichen | $p_b$<br>mm | $h_s$<br>mm | $h_t$<br>mm | $h_d$<br>mm | $u$<br>mm | Bemerkung<br>*) |
|--------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-----------|-----------------|
| <b>T 2</b>               | 2,0         | 1,1         | 0,5         | –           | 0,3       | –               |
| <b>T 2,5</b>             | 2,5         | 1,3         | 0,7         | 2,0         | 0,3       | DIN 7721        |
| <b>T 5</b>               | 5,0         | 2,2         | 1,2         | 3,4         | 0,5       | DIN 7721        |
| <b>T 10</b>              | 10,0        | 4,5         | 2,5         | 7,0         | 1,0       | DIN 7721        |
| <b>T 20</b>              | 20,0        | 8,0         | 5,0         | 13,0        | 1,5       | DIN 7721        |

\*) DIN 7721 [12]

Die mit Trapezprofil und metrischer Teilung ausgeführten Zahnriemen werden vorzugsweise aus Polyurethan mit Stahlcord-, aber auch mit Aramidzugstrang, angeboten. Das Kurzzeichen T steht für Trapezprofil. Diese Zahnriemen entwickelte etwa 1955 die Firma Wilhelm Herm. Müller in Kooperation mit der Firma Continental, beide Hannover. Die MULCO-Gruppe übernahm unter dem Markennamen Synchronflex<sup>®</sup>-Zahnriemen den Vertrieb deutschlandweit, später europa-weit. 1977 erfolgte die Normung in DIN 7721 [12]. Diese Zahnriemen sind weltweit verbreitet, und dem Anwender stehen Endlosriemen, Meterware und endlos verschweißte Meterware zur Verfügung.

### 2.3.3 Hochleistungsprofil AT



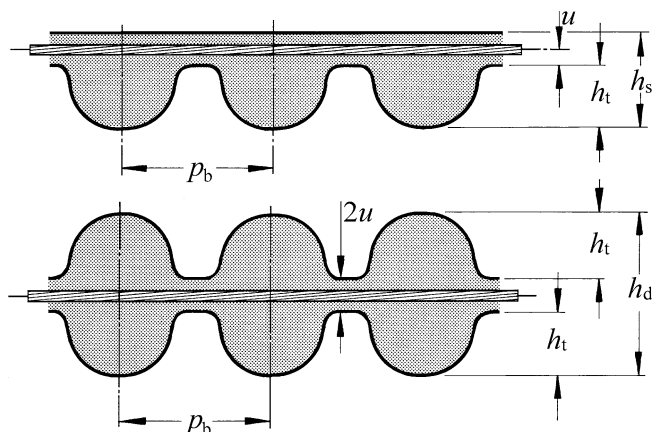
| Teilungs-<br>kurzzeichen | $p_b$<br>mm | $h_s$<br>mm | $h_t$<br>mm | $h_d$<br>mm | $u$<br>mm | Bemerkung |
|--------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-----------|-----------|
| AT 3                     | 3,0         | 1,9         | 1,1         | –           | 0,18      | –         |
| AT 5                     | 5,0         | 2,7         | 1,2         | 3,6         | 0,60      | –         |
| AT 10                    | 10,0        | 5,0         | 2,5         | 6,7         | 0,85      | –         |
| AT 15                    | 15,0        | 6,5         | 3,8         | 9,8         | 1,1       | *)        |
| AT 20                    | 20,0        | 9,0         | 5,0         | 12,4        | 1,20      | –         |

\*) Gebrauchsbezeichnung der MULCO-Gruppe ATS 15. Neues Profil 2008 eingeführt.

Die mit Trapezprofil und metrischer Teilung ausgeführten AT-Riemen stellen eine Weiterentwicklung des metrischen T-Zahnriemens dar. Sie sind vorzugsweise aus Polyurethan mit Stahlcord-, oder auch mit Aramidzugstrang ausgeführt. Sie sind gekennzeichnet durch ein vergrößertes Zahnvolumen und deutlich stärkere Zugstränge im Vergleich zum Standardprofil in metrischer Teilung (siehe Abschn. 2.3.2). Die Besonderheit dieses Profils ist die zahnfußabstützende Funktion im Lückenrund der Scheibe. Die MULCO-Gruppe, Hannover, entwickelte diese Riemen und führte sie unter dem Markennamen Synchroflex<sup>®</sup>-Zahnriemen AT etwa 1980 ein. Sie sind weltweit verbreitet, und erhältlich als Endlosriemen, Meterware und endlos verschweißte Meterware.



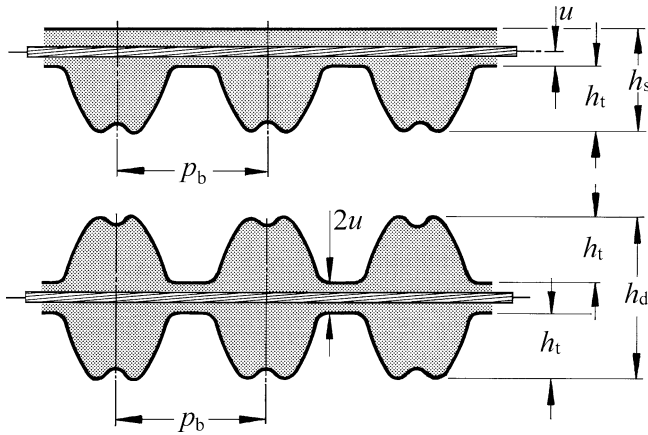
### 2.3.4 Hochleistungsprofil H



| Teilungskurzzeichen | $p_b$<br>mm | $h_s$<br>mm | $h_t$<br>mm | $h_d$<br>mm | $u$<br>mm | Bemerkung |
|---------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-----------|-----------|
| <b>H2M</b>          | 2,0         | 1,5         | 0,70        | –           | 0,250     | –         |
| <b>H3M</b>          | 3,0         | 2,4         | 1,20        | 3,2         | 0,380     | –         |
| <b>H5M</b>          | 5,0         | 3,6         | 2,10        | 5,4         | 0,570     | –         |
| <b>H8M</b>          | 8,0         | 6,0         | 3,38        | 8,1         | 0,686     | ISO 13050 |
| <b>H14M</b>         | 14,0        | 10,0        | 6,02        | 14,8        | 1,397     | ISO 13050 |
| <b>H20M</b>         | 20,0        | 13,2        | 9,00        | –           | 2,200     | –         |

Die nach ISO13050 [34] genormten Profile mit dem Kurzzeichen H sind auch als HTD-Zahnriemen bekannt. HTD steht für **H**igh **T**orque **D**rive. Diese Zahnriemen, welche vorzugsweise aus Chloroprenkautschuk mit Glascordzugstrang und einer zahnseitigen Polyamidgewebeschiicht ausgeführt sind, entwickelte Gates Mectrol (vormals Uniroyal) und führte sie 1973 am US-Markt ein. Die gekrümmten Flanken in kreisförmiger Geometrie sowie die größere Zahnhöhe verbesserten die Zahntragfähigkeit und das Überspringverhalten deutlich. Ab 1976 begann der Vertrieb in der Bundesrepublik Deutschland durch Walther Flender, Düsseldorf [21]. Zahnriemen mit diesem Profil sind weltweit verbreitet, und weitere Hersteller befassen sich mit deren Produktion. Sie werden auch aus Polyurethan, wahlweise mit Stahlcord- oder mit Aramidzugstrang gefertigt. Dem Anwender steht ein umfangreiches Längensortiment von Endlosriemen sowie Meterware und endlos verschweißte Meterware zur Verfügung.

### 2.3.5 Hochleistungsprofil R



| Type       | $p_b$<br>mm | $h_s$<br>mm | $h_t$<br>mm | $h_d$<br>mm | $u$<br>mm | Bemerkungen |
|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-----------|-------------|
| <b>R2</b>  | 2,0         | 1,5         | 0,73        | –           | 0,270     | –           |
| <b>R3</b>  | 3,0         | 2,4         | 1,15        | –           | 0,380     | –           |
| <b>R5</b>  | 5,0         | 3,8         | 2,00        | 5,14        | 0,570     | –           |
| <b>R8</b>  | 8,0         | 5,4         | 3,20        | 7,80        | 0,686     | ISO 13050   |
| <b>R14</b> | 14,0        | 9,7         | 6,00        | 14,5        | 1,397     | ISO 13050   |

Die nach ISO 13050 [34] genormten Profile mit dem Kurzzeichen R sind auch als RPP-Zahnriemen bekannt. RPP steht für **R**ubber **P**arabolic **P**rofil. Diese Zahnriemenart mit parabolisch ausgeführter Zahnflanke entwickelte 1985 Pirelli, Italien (das heutige Nachfolgeunternehmen heißt Megadyne) und führte sie aus Chloroprenkautschuk mit Glascordzugstrang und zahnseitiger Polyamidgewebeschicht ein. Zahnriemen dieser Ausführung sind hauptsächlich in Südeuropa verbreitet und weitere Hersteller befassen sich mit deren Produktion. Sie werden auch aus Polyurethan, wahlweise mit Stahlcord- oder mit Aramidzugstrang gefertigt. Dem Anwender steht ein umfangreiches Längensortiment von Endlosriemen sowie Meterware und endlos verschweißter Meterware zur Verfügung.