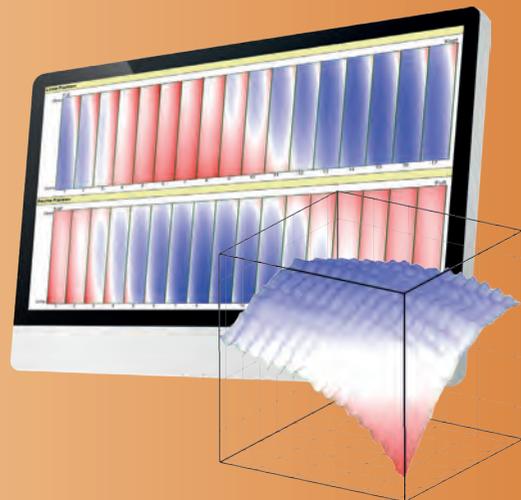
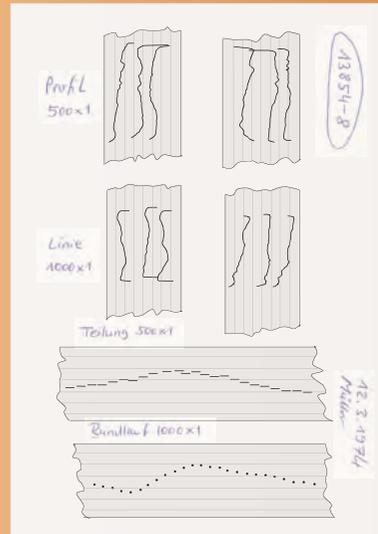
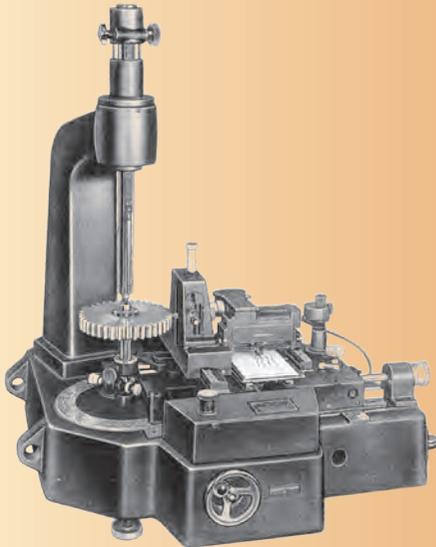


Jens Riesner

Rudolf Och

DIE VERZÄHNUNGSMESSTECHNIK IM WANDEL DER ZEIT



Über dieses Buch

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 Zahnradern 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.

Die Autoren

Rudolf Och

Geboren 1951 in Bamberg, studierte Maschinenbau in Nürnberg und gründete 1978 die FRESCO GmbH. Dieses Unternehmen beschäftigt sich seitdem mit der Thematik der Verzahnungsmesstechnik. In dieser Zeit wurden viele Ideen im Rahmen von Patenten und Produkten verwirklicht. Im Laufe seines Lebens hat Rudolf Och die Entwicklung der Messtechnik und der Normen gestaltet und vielerlei Themen dieses Fachgebietes sowohl niedergeschrieben als auch in Vorträgen dem Fachpublikum näher gebracht.

Jens Riesner

Geboren 1978 in Nürnberg, studierte an der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg Geschichte und Politikwissenschaft. Nach dem Abschluss 2007 gründete er die Firma Historica, die historische Recherchen und museale Konzepte für Firmen und Gemeinden anbietet. Für verschiedene Kunden aus Industrie und Kultur erstellt die Firma Chroniken, Stadtführer und wissenschaftliche Abhandlungen. Für die Erarbeitung dieses Buches übernahm er die Aufgabe der Recherche und der Zusammenfassung der historischen Fakten.

Inhalt

Vorwort	11
Einleitung	13
1 Vorgeschichte	15
1.1 Frühgeschichte - Am Anfang stand das Rad (2500 v. Chr. - 500 v. Chr.)	17
1.1.1 Das erste „Zahnrad“	17
1.1.2 Die Sakijes von Ägypten	18
1.2 Der Entwicklungsschub in der Antike (500 v. Chr. - 400 n. Chr.)	20
1.2.1 Die Technik der Griechen	20
1.2.1.1 Aristoteles	20
1.2.1.2 Archimedes	21
1.2.1.3 Die Blütezeit der Technik	23
1.2.2 Das alte Rom	26
1.2.2.1 Die „architectura“ des Vitruv	26
1.2.2.2 Die Maschinen des Heron	27
1.2.2.3 Antike Herstellung von Zahnrädern	28
1.3 Das verlorene Wissen des Mittelalters (400 n. Chr. - 1400 n. Chr.)	30
1.3.1 Neuanfang im frühen Mittelalter	31
1.3.1.1 Erste Mühlen	31
1.3.1.2 Die Technik des Ostens	34
1.3.2 Aufschwung in Europa	35
1.3.2.1 Mittelalterliche Mühlentechnik	35
1.3.2.2 Entstehung der ersten mechanischen Uhren	36
1.3.2.3 Fortschritt der Technik	39
1.4 Die Renaissance - Zeit der Denker und Künstler (1400 - 1700)	40
1.4.1 Erste genauere Beschreibungen von Zahnrädern	41
1.4.2 Da Vinci und das Zahnrad	41
1.4.3 Das Nürnberger Ei	44
1.4.4 Wissenschaft und Zahnrad	46
1.4.4.1 Wichtige Erkenntnisse über Zahnräder	46
1.4.4.2 Die Erforschungen der Zykloide	49
1.5 Die industrielle Revolution - Entwicklung unter Dampf (1700 - 1900)	51
1.5.1 Vormärz - Auftakt zu einer neuen Zeitrechnung	51
1.5.1.1 Französische Zahnradforschung	51
1.5.1.2 Deutscher Praxisbezug	52
1.5.1.3 Traditionelle Fertigung auf dem Festland	53
1.5.1.4 Die ersten Zahnrad-schneidemaschinen	54
1.5.1.5 Englands technischer Vorsprung	55
1.5.1.6 Die Evolvente von Euler	57
1.5.2 Mit oder ohne Zahnrad? Die Entwicklung der Dampfmaschine	59
1.5.2.1 Erste Dampfmaschinen	59
1.5.2.2 Kugellager und Schnellläufer	62
1.5.2.3 Dampfschiffe und Eisenbahnen	63

1.5.3	Blütezeit der industriellen Entwicklung	65
1.5.3.1	Vom Holz- zum Eisenrad	65
1.5.3.2	Erste Fertigungsmaschinen	66
1.5.3.3	Theoretische Grundlagen von Reuleaux	69
1.5.3.4	Einheitliche Zahnformen - Die Evolvente	71
1.5.3.5	Zahnradproduktion in Spezialfabriken	74
1.5.3.6	Fehlerprüfungen	79
1.5.3.7	Fortschritt zur Jahrhundertwende	79
1.5.4	Die Entstehung der Kugellager	83
2	Das Jahrhundert des Zahnrades	85
2.1	Exkurs: Was ist ein Zahnrad	86
2.2	Anfänge der Messtechnik (1900 - 1919)	87
2.2.1	Allgemeines über Zahnrad und Getriebe	87
2.2.1.1	Wie sieht das ideale Zahnrad aus?	87
2.2.1.2	Technische Entwicklung	88
2.2.1.3	Schneckenräder	89
2.2.2	Fertigungsverfahren	91
2.2.3	Verzahnungsmesstechnik	93
2.2.3.1	Schablonen und Lehren	93
2.2.3.2	Erste Messgeräte in den USA	94
2.2.3.3	Effizienzmessungen in Deutschland	95
2.2.3.4	Erste Teilungsprüfer	97
2.2.3.5	Erste Zweiflankenwälzprüfgeräte	98
2.3	Das Messen spezialisiert sich (1920 - 1949)	99
2.3.1	Allgemeines über Zahnrad und Getriebe	99
2.3.1.1	Geräuscentwicklungen	99
2.3.1.2	Härten von Zahnrädern	101
2.3.1.3	Neue Qualität - neue Richtlinien	102
2.3.2	Fertigungsverfahren	103
2.3.2.1	Werkzeugmaschinen	103
2.3.2.2	Vom Hobeln zum Fräsen	104
2.3.3	Verzahnungsmesstechnik	105
2.3.3.1	Entwicklungen nach dem Ersten Weltkrieg	105
2.3.3.2	Zahnweitenprüfgeräte	106
2.3.3.3	Teilungsprüfgeräte	107
2.3.3.4	Wälzprüfgeräte	109
2.3.3.5	Evolventenprüfgeräte	112
2.4	Beginn der Automatisierung (1950 - 1959)	114
2.4.1	Fertigungsverfahren	114
2.4.1.1	Automatisierung der Fertigung	114
2.4.1.2	Verbesserungen der Zähne	116
2.4.2	Verzahnungsmesstechnik	117
2.4.2.1	Wiederaufnahme der Forschung	117
2.4.2.2	Halbautomatische Messgeräte	118
2.4.2.3	Kombinierte Prüfgeräte	119
2.4.2.4	Erste elektronisch unterstützte Messgeräte	120

2.5	Vormarsch der Elektronik (1960 - 1969)	121
2.5.1	Exkurs: Erste Rechner	121
2.5.2	Fertigungsverfahren	122
2.5.3	Verzahnungsmesstechnik	123
2.5.3.1	Exotische Messgeräte	123
2.5.3.2	Messunsicherheiten	126
2.5.3.3	Elektronische Messtechnik	126
2.5.3.4	Die variable Grundkreisscheibe	128
2.6	Erste Computer (1970 - 1985)	129
2.6.1	Exkurs: Der Beginn des Computerzeitalters	129
2.6.2	Fertigungsverfahren	132
2.6.2.1	Die Fertigung wird schneller und effektiver	132
2.6.2.2	Dynamische Verformungen	132
2.6.3	Verzahnungsmesstechnik	133
2.6.3.1	Die ersten numerisch gesteuerten Messgeräte	133
2.6.3.2	Universelle Messanlagen und neue Auswertetechniken	134
2.6.3.3	Erste Koordinatenmessgeräte	134
2.6.3.4	CNC-Messgeräte	135
2.7	Die Entwicklung bis zur Jahrtausendwende (1986 - 2000)	138
2.7.1	Fertigungsverfahren	138
2.7.1.1	CNC-gesteuerte Wälzfräs- und Wälzstoßmaschinen	138
2.7.1.2	Hartmetall-Werkzeuge und CBN-Technologie	139
2.7.1.3	Zahnradfertigungen zur Jahrtausendwende	140
2.7.2	Verzahnungsmesstechnik	141
2.7.2.1	Vollautomatische Zahnradmesszentren	141
2.7.2.2	Die Messtechnik wird zum Softwareproblem	143
2.7.2.3	Prozessintegrierte Messung	145
3	Verzahnungsmesstechnik heute	147
3.1	Allgemeines über Zahnräder und Getriebe	148
3.1.1	Beispiel Automobilindustrie	149
3.1.2	Beispiel Druckmaschinenindustrie	151
3.1.3	Beispiel extreme Dimensionen	152
3.1.4	Normen und Regelwerke	153
3.2	Verzahnungsmesstechnik	154
3.2.1	Messeinrichtungen	155
3.2.1.1	Handmesszeuge	156
3.2.1.2	Mechanische Messeinrichtungen	158
3.2.1.3	Wälzprüfungen	159
3.2.1.4	Rotationsmessgeräte	162
3.2.1.5	Verzahnungsmessmaschinen	163
3.2.1.6	3D-Messmaschinen	165
3.2.1.7	Fasertaster	167
3.2.1.8	Wälzscannen	168
3.2.2	Messgenauigkeit	170
3.2.2.1	Messunsicherheit	171
3.2.2.2	Unsicherheit der Prüfmittel	172
3.2.2.3	Rückführung	172

3.2.3	Auswertung von Messergebnissen	176
3.2.3.1	Strichpunktschriebe	176
3.2.3.2	Statistische Kennwerte und Datenbanken	180
3.2.3.3	Flächenmodell	183
4	Ausblicke in die Zukunft	185
4.1	Herstellungsmethoden der Zukunft	186
4.1.1	Spanende Fertigungsverfahren	187
4.1.2	Additive Fertigungsverfahren	187
4.1.3	Werkstoffe	188
4.2	Neue Messverfahren	189
4.2.1	Die taktile Messtechnik: Ausgereizt und alternativlos?	189
4.2.1.1	Zusätzliche Messaufgaben	190
4.2.1.2	Verbesserung der Bedienbarkeit	191
4.2.2	Berührungslose Messtechnik	192
4.2.2.1	Computertomographie	192
4.2.2.2	Fasertaster	193
4.2.2.3	Fokus-Variationen	193
4.2.2.4	Faseroptik	194
4.2.2.5	Laser-Triangulation	195
4.2.3	Messverfahren im Closed-Loop	195
4.3	Die Zukunft der Auswertung	196
4.3.1	Analyse und Simulation von Messdaten	197
4.3.2	Welligkeitsanalyse	199
4.3.3	REANY-Auswertung	201
	Schlusswort	207
	Zu guter Letzt...	209
	Quellennachweise	217
	Bildnachweise	227

Vorwort

Die technische Weiterentwicklung der Verzahnungsmesstechnik ist derzeit zu einem merkwürdigen Stillstand gekommen. Es mag an einer Überregulierung durch Normen und Vorschriften liegen, an der Komplexität des Themas oder an den Anforderungen an Geist und Software. Es liegen viele Denkansätze für flächenhafte Betrachtung, Volumenmodelle (wie sie für Computertomographie nötig werden), Bestfit- und Hüllkonzepte, sowie neue Auswerteverfahren vor. Es mangelt derzeit jedoch am Willen oder es liegt an der Schwierigkeit, solche Denkansätze umzusetzen. Dieses Buch will die geschichtliche Entwicklung, die aktuelle Situation und eine mögliche Zukunft der Verzahnungsmesstechnik beschreiben und damit versuchen, wieder Bewegung in die Köpfe der zugegebenermaßen wenigen Spezialisten dieses Themas zu bringen.

Rudolf Och

Einleitung

Für einen Historiker mag es befremdlich wirken, sich in die Welt der Technik zu wagen, insbesondere, wenn es sich um ein sehr diffiziles Thema wie die Verzahnungsmesstechnik handelt. Das Zahnrad selbst gilt bereits als komplexe Geometrie, deren Idealform höheres Verständnis erfordert. Fügt man dieser Thematik noch den Fachbereich der Messtechnik hinzu, wird es für den Geisteswissenschaftler doch sehr problematisch. Umgeben von Formeln und Fachbegriffen muss er zunächst einen passenden Zugang finden. Diesen findet der Historiker aber glücklicherweise in der Geschichte und beginnt nun, die Entwicklung Schritt für Schritt nachzuvollziehen, bis er die Vorgänge verstanden hat.

Selbstverständlich muss vor der eingehenden Darstellung der Messtechnik zunächst die Geschichte des Zahnrades selbst stehen. Von den alten Ägyptern über Griechenland und Rom führt die Zeitreise schließlich ins Mittelalter und die Renaissance. Mit der industriellen Revolution beginnt dann auch die Messtechnik.

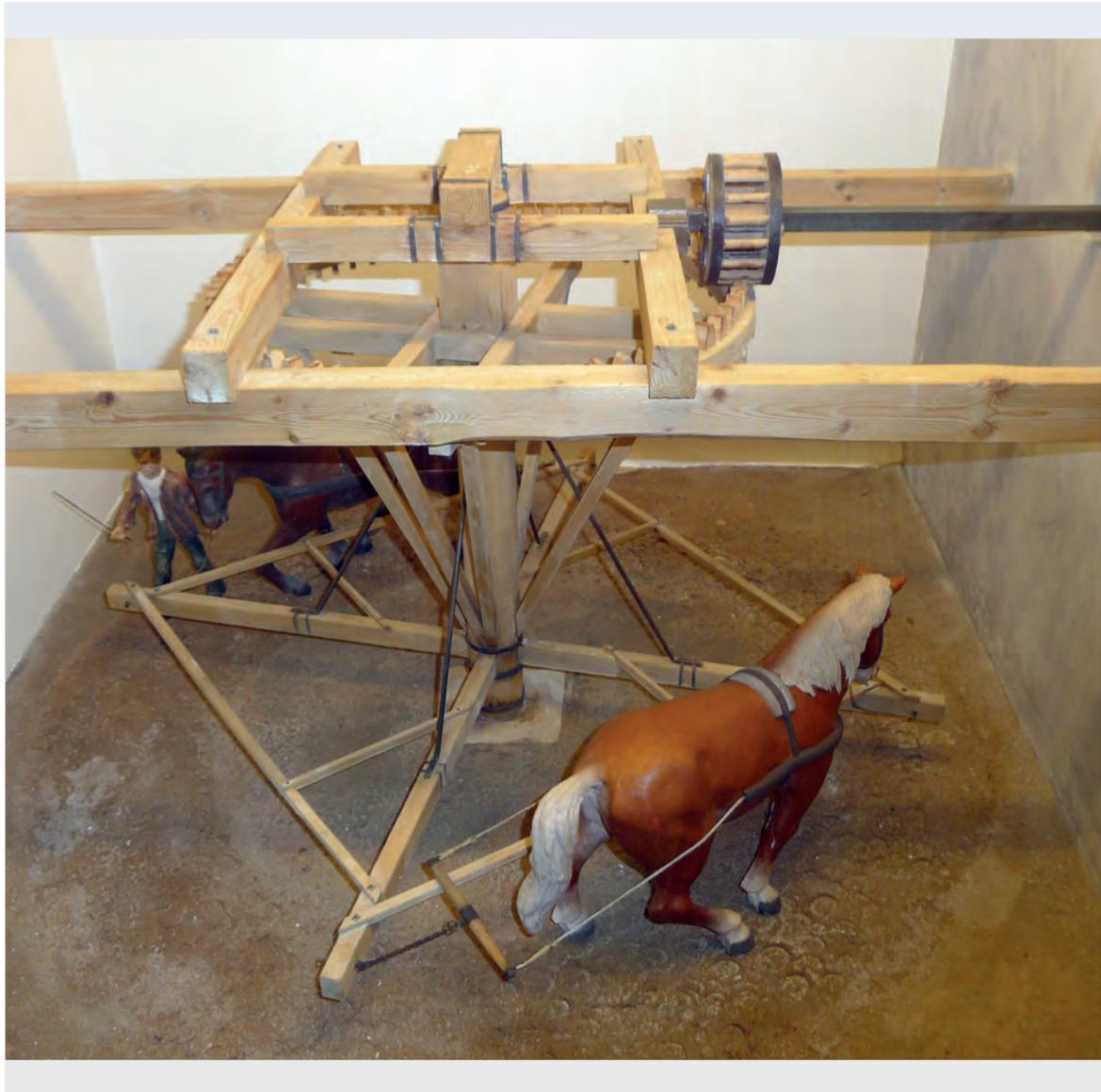
Obwohl diese erst seit etwas mehr als einem Jahrhundert existiert, gab es doch verschiedenste Entwicklungen, deren Gegenwart durch den Eintritt in die digitale Generation bestimmt wird. Neue Messgeräte und Auswertungsverfahren entstanden und erlaubten die Herstellung immer perfekterer Zahnräder.

Mit der sorgfältigen Betrachtung der einzelnen Entwicklungsschritte gelingt es auch ohne tiefgehendes Technikwissen, die einzelnen Etappen, die Erfolge und die weiterhin bestehenden Probleme zu erkennen und zu beschreiben.

Nach vielen Diskussionen, intensiven Recherchen und Auswertungen zeigt sich dann letztlich, dass der Historiker vielleicht doch näher an der Technik ist, als er anfangs gedacht hätte. Die Geheimnisse der Messtechnik haben sich bis zu einem gewissen Grad zu erkennen gegeben. Hoffentlich hilft dieses Buch, einen Eindruck von der Komplexität eines Zahnrades und der Verzahnungsmesstechnik zu vermitteln.

Jens Riesner

1 Vorgeschichte



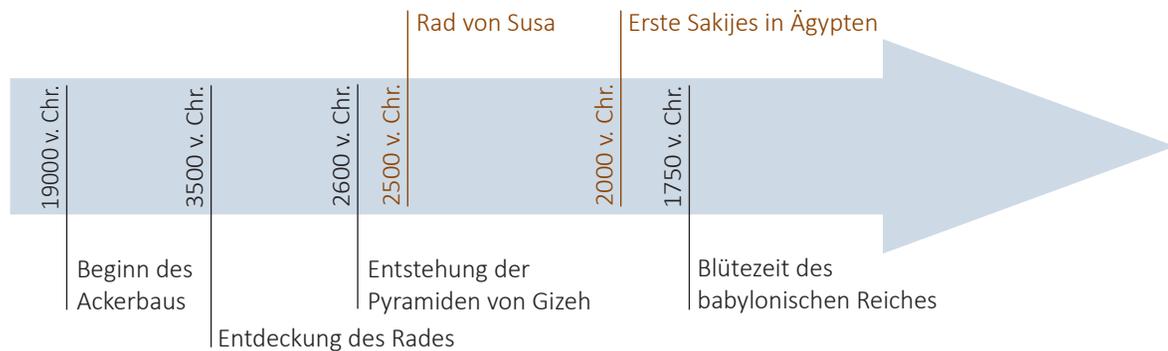
Die Erforschung der Verzahnungsmesstechnik erfordert ein fundiertes Wissen über die Entwicklungsgeschichte des Zahnrades selbst.

Bereits im alten Ägypten tauchten um 2500 v. Chr. die ersten primitiven Verzahnungen in Hebemechaniken an Brunnen auf. Ähnlich einfache Zahnräder existierten zu dieser Zeit auch im asiatischen Raum. Die Verfeinerung der Technik begann in der griechischen Antike um 400 v. Chr.: Wissenschaftler wie Archimedes oder Aristoteles nahmen sich der Verzahnung an und begannen diese zu untersuchen. Mit der Ausdehnung des Römischen Reiches ab 200 v. Chr. gelangte das griechische Wissen auch nach Rom. Dort verzichtete man weitgehend auf die weitere Erforschung der Technik. Nur wenige Denker wie Heron oder Vitruv zeigten Interesse an Verzahnungen. Dennoch waren Zahnräder in der Antike längst mehr als nur Hilfsmittel für Brunnen. Zwar wurden sie dort noch am häufigsten verwendet, doch bereits seit den antiken Griechen experimentierten Wissenschaftler mit wesentlich filigraneren Zahnrädern als jene, die in den primitiven Hebemaschinen verwendet wurden.

Als mit dem Einfall der Westgoten 410 n. Chr. das Römische Reich auseinanderbrach, verschwanden mit dem Imperium auch wichtige Errungenschaften der Technik. Auch das Wissen über Verzahnungen fiel nahezu auf vorantike Zeiten zurück, so dass Zahnräder zunächst fast ausschließlich in Mühlen auftauchten.

Die Betrachtung der frühen Technikentwicklung, insbesondere natürlich der des Zahnrades, findet somit ihren ersten Endpunkt mit dem Niedergang des Römischen Reiches. Die bislang geradlinig verlaufende Entwicklung erlebt eine erste Zäsur. Es sollte nahezu tausend Jahre dauern, bis der Verlust dieser Technik wieder aufgeholt werden konnte.

1.1 Frühgeschichte - Am Anfang stand das Rad (2500 v. Chr. - 500 v. Chr.)



1.1.1 Das erste „Zahnrad“

Die Entstehung der Zahnräder ist eng mit dem technischen Fortschritt des Rades verbunden. Durch die Weiterentwicklung und Verbesserung der Konstruktion entstanden schließlich auch die ersten Räder, die eine optische Ähnlichkeit mit Zahnrädern aufwiesen.

Sie stammten aus dem Jahr 2500 v. Chr. und wurden bei Susa, Persien (Abb.1) entdeckt. Um die Holzräder von Fuhrwerken zu schützen, wurden auf der Radlauffläche Kupfernägel angebracht. Mithilfe dieser Nägel sollte die Abnutzung der Räder minimiert werden.

Abb. 1: Das Rad von Susa

Das Rad weist Beschläge auf, die bereits an Zahnräder erinnern. Zwar dienen die Metallaufsätze nur zur besseren Griffbarkeit der Räder. Der Effekt des „Eingreifens“ dieser Beschläge ist eine für Zahnräder typische Eigenschaft. Daher wird das Rad von Susa durchaus als Vorläufer der ersten Zahnräder anerkannt.



Das Rad von Susa ist zwar nicht als erstes Zahnrad der Geschichte zu sehen, aber seine keilförmigen Ausbuchtungen waren bereits deutlich sichtbar. Es stellt somit einen der ersten Sondertypen des Rades dar, aus dem sich durchaus der Zweig der Zahnräder entwickeln hätte können. Ein Indiz hierfür könnte auch die Lage der Stadt Susa sein. Sie lag in Persien, dem heutigen Iran, und damit in direkter Nachbarschaft zu Ägypten, wo später erstmals primitive Verzahnungen auftauchten.¹

1.1.2 Die Sakijes von Ägypten

Die ersten praktisch genutzten Zahnräder entwickelten sich in Südostasien durch simple praktische Überlegungen. Tatsächlich bedingte die Landwirtschaft entlang des Nils, der seit jeher die Lebensader Ägyptens war, diese Entwicklung. Von ihm zweigen bis heute unzählige Kanäle ab, die das Ackerland bewässern. Allerdings verfügt der Nil über ein sehr geringes Gefälle von gerade einmal 90 Metern auf einer Strecke von 1100 Kilometern, weshalb die Kanäle oftmals einen höher gelegenen Wasserspiegel haben mussten als der Fluss selbst. Diese Höhe ist notwendig, um ein Gefälle zu den zu bewässernden Feldern zu erzeugen. Bereits im Altertum mussten die ägyptischen Bauern daher Hebegeräte entwickeln (Abb. 2).²

Ein Zugtier brachte das horizontale Rad in Bewegung, auf dem in gleichmäßigem Abstand Stäbe angebracht worden waren. Diese griffen in ein ähnliches Rad, das vertikal angebracht wurde und mit seiner Achse das Wasserrad antrieb. So konnte das Wasser in die höher gelegenen Bewässerungsgräben befördert werden. Damit ist bei den Sakijes erstmals die Änderung der Bewegungsrichtung durch die Nutzung von Zahnrädern nachweisbar.



Abb. 2: Nachbau eines Sakije in Pollenca (Mallorca)

Während im Vordergrund die Eimer das Wasser nach oben befördern, sorgt eine für Sakijes typische Triebstockverzahnung dafür, dass die horizontale Drehbewegung des angetriebenen großen Rades in eine vertikale Drehbewegung umgewandelt wird.

Wann die Sakijes erstmals auftauchten, ist nicht genau belegbar. Der Ingenieur Max Eyth behauptete, die ersten dieser Hubanlagen seien bereits auf Bildern in alten Pharaonengräbern abgebildet worden. Bei den Darstellungen aus dieser Zeit handelt es sich allerdings noch um gewöhnliche Ziehbrunnen. Die ersten sicheren Belege für Sakijes finden sich um den Beginn unserer Zeitrechnung. Vermutlich sind die ersten Anlagen wesentlich älter, da in Griechenland um 300 v. Chr. bereits deutlich komplexere Zahnradgetriebe angewendet wurden.³

Die Verzahnungen der Sakijes waren einfach und technisch bei Weitem nicht ausgereift. Aber sie genühten den Anforderungen der Bauern. Die Zähne waren grobe, runde Stöcke, die in vorgearbeitete Löcher eingeschlagen wurden. Auch ohne die genaue Nachweisbarkeit des Ursprungs gelten die ägyptischen Sakijes heute als Urtyp der späteren Verzahnungen (Abb. 3). Dass die Hochkulturen des östlichen Mittelmeerraums die Schöpfer des Zahnrades sind, belegt der älteste Nachweis einer Verzahnung. Im Königspalast von Byzanz stand um 600 v. Chr. eine Wasserhebemaschine, die Wasser mit Hilfe von Verzahnungen aus dem Brunnen nach oben befördern konnte.⁴

Da auch diese Anlage wesentlich umfassender war als die ägyptischen Hubanlagen, müssen die Sakijes wohl deutlich älter sein. Ihre Entstehungszeit muss daher zwischen 2000 und 1000 v. Chr. vermutet werden.⁵

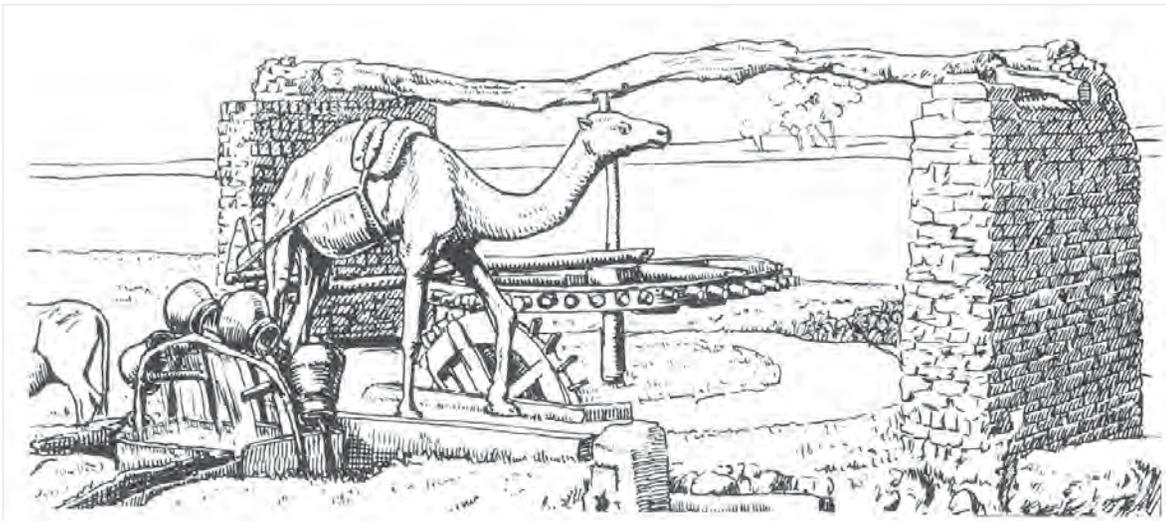


Abb. 3: Zeichnung einer altägyptischen Sakije

Die Funktionsweise ist deutlich zu erkennen. Das Lasttier dreht das größere Zahnrad. Dieses bewegt das zweite, kleine Zahnrad, das mit einem Schöpfrad verbunden ist, welches das Wasser nach oben befördert.