

Antike Feinmechanik trifft auf KISSsoft

David Teubel, MFM Rosswein, Deutschland
Dr. Stefan Beermann, KISSsoft AG, Schweiz

Als vor 111 Jahren Schwammtaucher vor der Insel Antikythera das Wrack eines römischen Handelsschiffes entdeckten und einen korrodierten Bronzeklumpen mit den Abmassen eines Schuhkartons bargen, ahnte niemand, welche Sensation sich unter dessen verkrusteter Oberfläche befand.

Der „Mechanismus von Antikythera“ stellt ein filigranes Räderwerk dar, welches nach wissenschaftlichen Interpretationen bis rund 80 Zahnräder enthielt, wovon 30 Zahnräder nachweisbar sind [1, 2, 3, 4, 5]. Seine Entstehungszeit ist auf 150-100 v.Chr. datierbar [6]. Die Apparatur diente zur Darstellung der Himmelsmechanik, verfügte über diverse Kalenderfunktionen, einen Sternenalmanach und konnte sowohl Sonnen- als auch Mondfinsternisse vorausberechnen. Zudem wurden die Bewegungsanomalien von Sonne [7] und Mond [8, 9, 10, 11] äquivalent zu Hipparchos' Solar- und Lunartheorie mit einem brillanten Getriebedesign umgesetzt. Keine bekannte Zahnradkonstruktion in den nachfolgenden 1500 Jahren verfügte über eine ähnliche Komplexität [12, 13].



Bild 1 Fragment des Antikythera-Mechanismus [14]

Das Relikt wird gegenwärtig unter Berücksichtigung aktueller Forschungsergebnisse in Kooperation mit der KISSsoft AG nachgebaut. Zur Verarbeitung werden die Materialien Zedernholz und Bronze verwendet.

Der Versuch einer Rekonstruktion

Der deutsche Präzisionsmechaniker David Teubel hat es sich zur Aufgabe gemacht, eine voll funktionsfähige Replik nach dem aktuellen Stand der Forschung zu fertigen. Zu diesem Zweck kommt neben neuen Fertigungstechnologien die Getriebeberechnungssoftware KISSsoft mit dem

aktuellen Release 03/2011 [15] zum Einsatz. Trotz des speziellen Anwendungsfalls werden damit eine Modellierung und Dimensionierung des kompletten Getriebes gewährleistet.

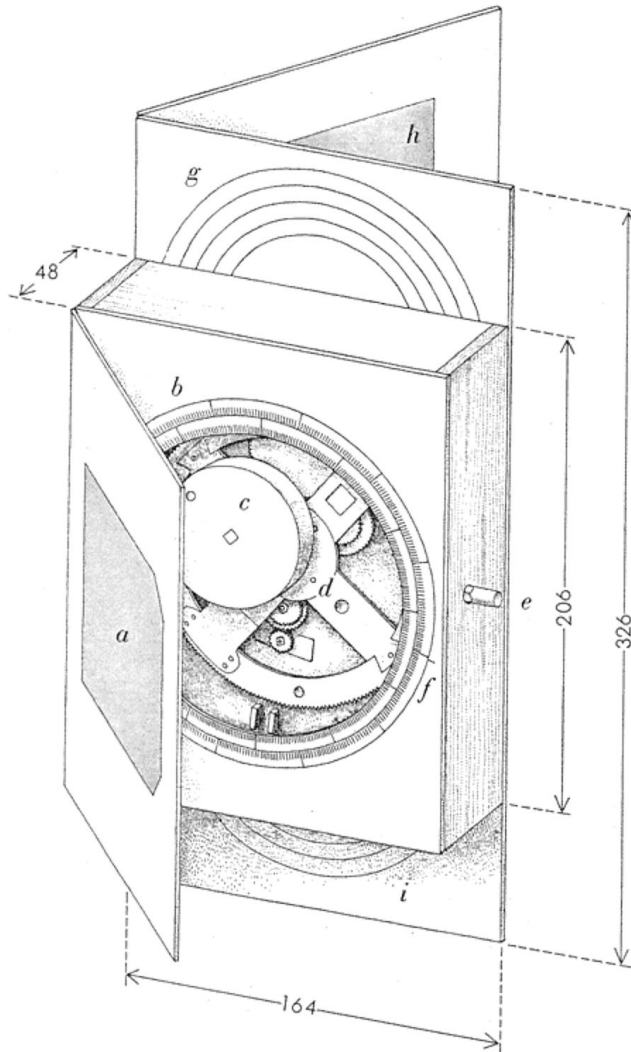


Bild 2 Frühe Rekonstruktion der Apparatur nach Derek de Solla Price [16], mit grösstenteils neuer Interpretation der Funktionsweise (Dimensionen in Millimetern angegeben)

- a) Frontseitenabdeckung
- b) Frontplatte
- c) Mondphasen-Anzeigesystem
- d) Haupttriebribrad/„Sonnenrad“
- e) Antriebswelle mit Kronenrad
- f) Kreisringe mit Monatsnamen und Tierkreiszeichen
- g) Spiralsystem mit Meton-Zyklus
- h) Rückseitenabdeckung
- i) Spiralsystem mit Saros-Zyklus

Die Neuberechnung dieser komplexen Getriebeverzahnung gestaltet sich in vielerlei Hinsicht als anspruchsvoll. Zum einen sind notwendige Getriebeparameter in der veröffentlichten Fachliteratur äusserst spärlich dargelegt und teilweise widersprüchlich. Zum anderen weicht der Modul der ineinandergreifenden Zahnräder aufgrund der manuellen Fertigung stets etwas voneinander ab. Des Weiteren führen Berechnungen mit genormtem Modul und neuer Zahngeometrie zu ungeahnten Designproblemen, die sich nur mit einem erheblichen Aufwand beheben lassen.

Ein entscheidendes Designkriterium stellt die Wahl der Zahngeometrie dar: Die bisherige Spitzverzahnung durch verschleissfestere Evolventenverzahnung zu ersetzen, ist sowohl technisch

sinnvoll als auch notwendig, um bessere Laufeigenschaften und eine optimale Kraftübertragung zu erreichen.

Getriebegestaltung mit KISSsoft

Die im Vorfeld ermittelten Getriebeparameter verarbeitet die Software problemlos. Änderungen in der Zahngeometrie – wie durch Profilverschiebung – lassen sich grafisch zwecks einer visuellen Prüfung darstellen. Beim Über- und Unterschreiten von Grenzwerten erhält der Anwender Warnmeldungen vom Programm. Umfangreiche Dokumentationen zu Sicherheitsfaktoren und Lebensdauerwerten sind in Protokollform ebenfalls verfügbar.

Die technische Besonderheit des Antikythera-Getriebes besteht darin, dass ein Kronenrad in ein weitaus grösseres Stirnrad eingreift. Da das Kronenrad eine kleinere Zähnezahl als das Stirnrad aufweist, ergibt sich ein starker Unterschnitt, der selbst mit einer Profilverschiebung nicht in den Griff zu bekommen ist.

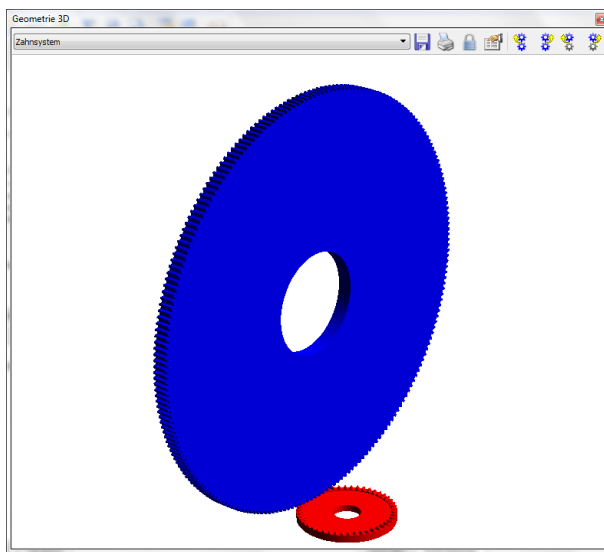


Bild 3 Modellierung des Kronenradgetriebes mit dem KISSsoft-Release 03/2011

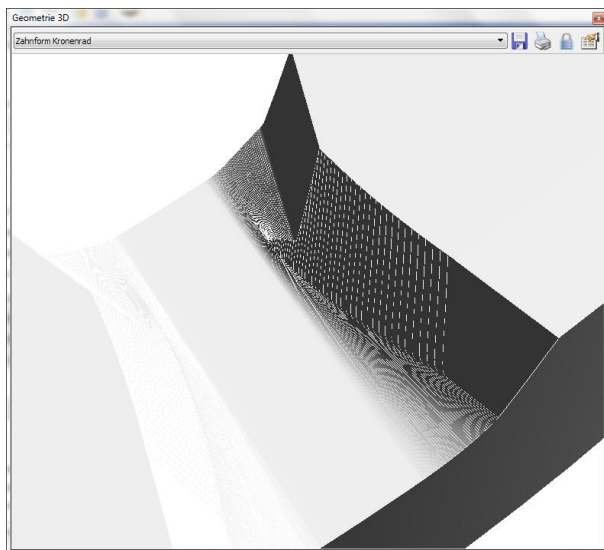


Bild 4 Form der Zahnflanke beim Kronenrad mit Schnittmarkern

Deutlich erkennbar ist im Schnittmodell (Bild 4) der kritische Bereich am Innendurchmesser, wo viel Material durch das Werkzeug abgetragen wird.

Beim Kronenradgetriebe greift ein Stirnrad in ein Kronenrad im Winkel von typischerweise 90 Grad ein. Im Gegensatz zum Kegelrad sind beide Zahnräder zylindrisch. Der Kontakt auf den Flanken erfolgt jedoch auch hier entlang eines Kegels, der einer analogen Kegelradverzahnung entspricht.

Eine Einschränkung im Einsatz von Kronenrädern stellt die geometrische Limitierung der Zahnbreite dar. Während es beim Kegelrad im Prinzip immer möglich ist, über zusätzliche Breite ein höheres Drehmoment zu übertragen, stellen beim Kronenrad die sich über die Zahnbreite stark ändernden Eingriffswinkel eine unüberwindbare Grenze dar. Damit gibt es bei Kronenradverzahnungen natürliche Drehmomentbereiche für einen sinnvollen Einsatz. Oberhalb dieses Bereichs sollte eine andere Lösung gesucht werden.

Von Vorteil bei der Kronenradverzahnung sind der hohe Wirkungsgrad im Vergleich zu Schneckengetrieben und die Unempfindlichkeit gegenüber Lageabweichungen bei den Zahnrädern [17, 18]. Dies ist bei Kegelrädern oft ein Thema, da diese sehr empfindlich auf Verschiebungen und Verkippungen reagieren. Bei den Kronenrädern besteht hingegen kein Einfluss auf das Tragbild bei Verschiebung des Ritzels in Axialrichtung, und nur ein kleiner bei Verschiebung des Ritzels in Axialrichtung des Kronenrades. Bei Achsversatz oder Schrägungswinkelabweichungen (was das selbe ist bei Kronenrädern) ist die Auswirkung noch am höchsten, daher wird auch eine leichte Balligkeit der Kronenräder angestrebt. Bei geschickter Auslegung erhält man so eine sehr robuste und relativ reibungsarme Zahnradstufe.

Kronenradberechnung in KISSsoft

KISSsoft bietet ein Berechnungsmodul zur Gestaltung von Kronenrädern an. Mit dem aktuellen Release 03/2011 lassen sich nun auch Kronenräder dimensionieren, deren Zähnezahl kleiner als beim Stirnrad ist – wie bei der vorliegenden Kronenradberechnung, bei welcher die Übersetzung 224:48 (Ritzel:Kronenrad) beträgt.

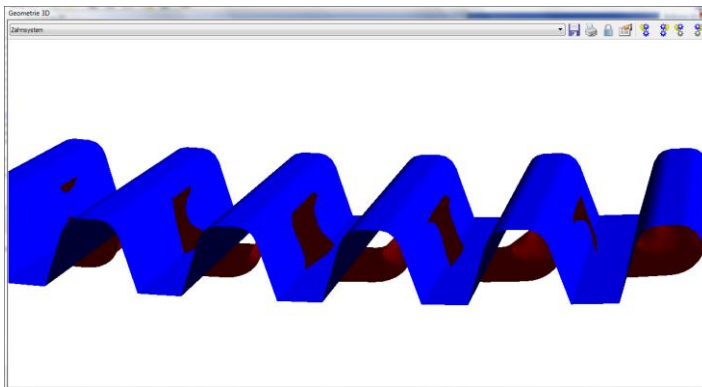


Bild 4 Darstellung des Eingriffs mit Dünnwandmodellen zur Beurteilung der Kontaktsituation

Mit den neuen 3D-Modellen von KISSsoft wird eine maschinelle Fertigung dieser Elemente auf 5-Achs-Fräsmaschinen realisierbar. Notlösungen, wie nicht originalgetreue Kegelradgetriebe, erübrigen sich somit bei der Anfertigung der Replik. Und auch die mühsame Anfertigung von Zahnrädern für den Mechanismus mit einer Dreiecksfeile gehört nun endgültig der Vergangenheit an.

Literaturverzeichnis

- [1] Evans, James et al. Solar Anomaly and Planetary Displays in the Antikythera Mechanism. *Journal for the History of Astronomy* 41, S. 19, 31 (2010).
- [2] Freeth, Tony et al. Calendars with Olympiad display and eclipse prediction on the Antikythera Mechanism - Supplementary Information. *Nature* 454, S. 24 (2008).
- [3] Freeth, Tony et al. Decoding the ancient Greek astronomical calculator known as the Antikythera Mechanism. *Nature* 444, S. 590 (2006).
- [4] Wright, Michael T. In the Steps of the Master Mechanic. *Ancient Greece and the Modern World*, S. 86-97 (2003).
- [5] Wright, Michael T. The Antikythera Mechanism: a New Gearing Scheme. *Bulletin of the Scientific Instrument Society* 85, S. 3 (2005).
- [6] Freeth, Tony et al. Decoding the ancient Greek astronomical calculator known as the Antikythera Mechanism. *Nature* 444, S. 587 (2006).
- [7] Evans, James et al. Solar Anomaly and Planetary Displays in the Antikythera Mechanism. *Journal for the History of Astronomy* 41, S. 1-22 (2010).
- [8] Freeth, Tony et al. Decoding the ancient Greek astronomical calculator known as the Antikythera Mechanism. *Nature* 444, S. 590 (2006).
- [9] Freeth, Tony et al. Decoding the ancient Greek astronomical calculator known as the Antikythera Mechanism - Supplementary Information. *Nature* 444, S. 23-27 (2006).
- [10] Wright, Michael T. The Scholar, the Mechanic and the Antikythera Mechanism: complementary approaches to the study of an instrument. *Bulletin of the Scientific Instrument Society* 80, S. 9 (2004).
- [11] Wright, Michael T. Epicyclic Gearing and the Antikythera Mechanism - Part II. *Antiquarian Horology* 29, S. 61-63 (2005).
- [12] Freeth, Tony. Decoding an Ancient Computer. *Scientific American* 301, S. 78 (2009).
- [13] Wright, Michael T. The Antikythera Mechanism reconsidered*. *Interdisciplinary Science Reviews* 32, S. 37 (2007).
- [14] Marsyas. Fragment principal de la machine d'Anticythère. (www.wikipedia.org) (2005)
- [15] KISSsoft AG. (<http://www.kisssoft.ch/deutsch/downloads/index.php>).
- [16] Derek J. de Solla Price. An Ancient Greek Computer, *Scientific American* 200, S. 60-67 (1959).
- [17] Kissling, Ulrich L. et al. Kronenräder: Geometrie und Festigkeit, S. 12 (www.kisssoft.ch/deutsch/downloads/Kronenrad.pdf) (2003).
- [18] Kissling, Ulrich L. *Technische Rundschau* 23. «Crown Gear-Evolvere», die fortschrittliche Alternative, S. 34-38 (2003).