

# Es funktioniert doch – mit zwei Korrekturen: Zehnerüberträge der Leibniz-Maschine

ZUR KONSTRUKTION DES HANNOVERSCHEN NACHBAUS DER  
VIER-SPEZIES-RECHENMASCHINE VON LEIBNIZ

Die Leibniz Universität Hannover besitzt seit dem Jahre 2005 einen Nachbau der dezimalen Rechenmaschine von Leibniz für alle vier Grundrechenarten, der im Rahmen eines DFG-Forschungsprojektes von Prof. Karl Poppt und

Prof. Erwin Stein gebaut wurde.

Nach den Konzepten der

Antragsteller wurde

diese neue Maschine von

Dr. Franz Otto Kopp konstruiert.

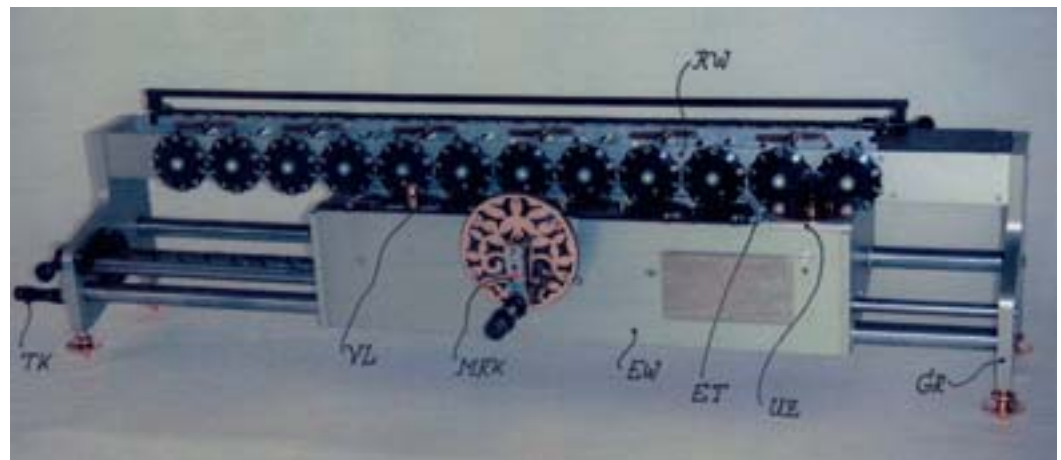
Sie wurde erstmals in der

Leibniz-Ausstellung

vom 19. Mai bis 11. Juni 2006

in der Orangerie Herrenhausen

der Öffentlichkeit gezeigt.



## Zweckbestimmung und Forschungsgegenstand

Der Hannoversche Nachbau, kurz HN, ist eine vergrößerte Neukonstruktion der Maschine von Leibniz unter weitestgehender Wahrung der Authentizität, die sich für Demonstrationen besonders gut eignet, weil sie gegenüber dem Original zweifach vergrößerten Stellenabstand besitzt und ihre offene Bauweise gute Sicht auf ihr »Innenleben« gewährt. Die Maschine besitzt sechs Stellen im Einstellwerk, zwölf Stellen im Resultatwerk und eine Stelle im Umdrehungszählwerk.

Neben der Erstellung von Zeichnungssätzen zur Rechenmaschine und zu den Detailmodellen (Staffelwalze und Zehnerübertrag im Maßstab 8:1) dienten die Konstruktionsarbeiten und Berechnungen auch der Erforschung der

Mitnahmevorgänge zwischen den Sonderzahnradern im Rechenwerk. Das Ziel war, Eingriffe zu gestalten, welche die erforderlichen Drehwinkel weitestgehend formschlüssig erzeugen, und dass die Rasten die Wellen im Rechenwerk nach Erreichen von Soll Drehwinkeln lediglich festhalten. Auch war zu klären, bis zu welcher höchsten Stellenzahl des Einstellwerks Zehnerüberträge, die aus vorhergehenden folgen, bei der jeweils letzten, durch einen Anschlag beendeten Drehung der Magna-Rota-Kurbel vollständig »durchge- reicht« werden.

In [1] wird ein originalgetreuer Nachbau beschrieben, der diese Eigenschaft zwar nicht besitzt, für den Klaus Badur aber fand, dass nach Rechenschluss gegebenenfalls schief stehende Leibnizsche Pentagone durch Nullsetzen der Eingabezahl und Weiterdrehen der Magna-

Rota-Kurbel alle wieder in die Grundstellung gelangen, und diese Maschine damit richtig rechnet.

Der Ablauf der Zehnerüberträge im HN folgt neuen Erkenntnissen von Nikolaus J. Lehmann [2], die er für seine Dresdener Nachbauten benutzte.

## Konstruktionsmerkmale

Der HN besitzt ein Gestell in Form von zwei Platinen, die kostengünstig durch zwei Führungsstangen aus gezogenem rostfreien Rundstahl und durch zwei Platten zur Aufnahme der Wellen des Rechenwerks verbunden sind, Bild 1. Auf den Führungsstangen gleitet das Einstellwerk bei Drehung einer zweigängigen Transportspindel mit Antriebskurbel links am Maschinenrahmen. Im Gestell befindet

sich noch eine Rastenstange mit sechs Kerben, in welche die Keilkante einer Indexscheibe des Einstellwerks einrastet, wenn eine nächste Stelle erreicht wird.

Die sechs Staffelwalzen bestehen hier aus Naben mit jeweils neun darauf geschichteten Einzelblechen mit Zähnezahlen 1;2;...;9. Der Zahnteilungswinkel beträgt  $21^\circ$  (gegenüber  $22,5^\circ$  im Original und im Lehmannschen Nachbau). Dadurch werden sämtliche Zehnerübertragungen ermöglicht, ohne dass die Staffelwalzen erneut in die Aufnahmezahnräder eingreifen. Schmale Antriebszahnräder auf den verschiebbaren Staffelwalzenwellen kämten jeweils beidseitig mit langen Zahnwalzen, welche wie die Antriebszahnräder  $z = 38$  Zähne mit Modul  $m = 2$  besitzen. Alle diese Zahnräder sind durch eine quer verlaufende Verdrehwellenwelle untereinander auf Zahnspiel Null verspannt.

Auf den hinteren Enden der Zahnwalzenwellen sind die Zweihörner befestigt. Sie greifen in die im Rechenwerk darüber liegenden Fünfhörner auf den Muldenradwellen und vollenden dort etwa fällige Zehnerüberträge. Die Zweihörner sind als Scheiben mit Kragbolzen konstruiert, an denen man ohne großen Aufwand Stellungsmessungen vornehmen kann. Die äußerste rechte Zahnwalze treibt über ein Malteser-Schaltwerk den Umdrehungszähler an, der einen Mitnahmezeiger besitzt, mit dem nacheinander die Ziffern des Multiplikanden eingestellt werden. Hierdurch wird die jeweilige Anzahl der Umdrehungen der Magna-Rota-Kurbel durch Anschlag auf die eingestellte Ziffer begrenzt. Kurz vor Erreichen dieser Anzahl meldet eine Klingel im Zählwerk die letzte Umdrehung.

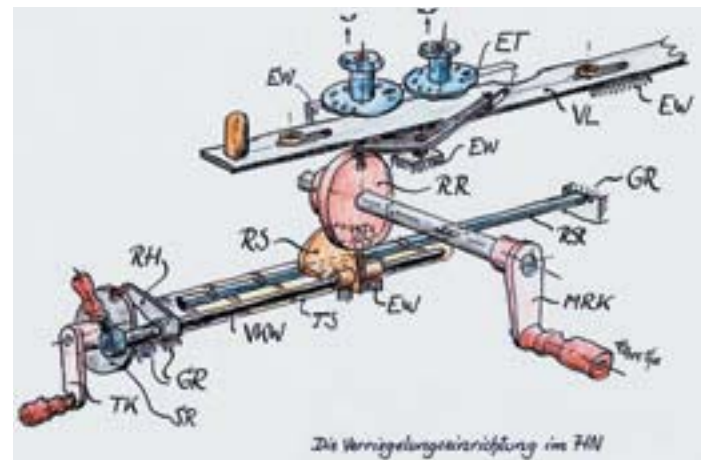
Die Magna-Rota-Kurbel dreht sich vor einer Schmuckscheibe

nach historischem Vorbild. Dahinter befinden sich verdeckt zwei Anschläge, die die Schmuckscheibe federnd in Mittelstellung halten und deren Drehwinkel auf  $\pm 87^\circ$  beschränken. Ein Indexbolzen der Magna-Rota-Kurbel schnappt in eine Raste auf der Schmuckscheibe ein, wenn man die auszuübende Zugkraft am Griff der Kurbel nach dem Klingeln unterbricht. Dadurch kann die Magna-Rota-Kurbel nun zusammen mit der Schmuckscheibe nur noch um  $\pm 87^\circ$  weitergedreht werden, gerade genug, für alle noch abzuarbeitenden Zehnerüberträge.

Der HN besitzt neben einer Einrichtung zum bequemen Nullsetzen des Rechenwerks vor Rechenbeginn auch Verriegelungen gegen Fehlbedienungen, die wie folgt wirken, Bild 2: Die im Grundrahmen gelagerte Transportkurbel ist vom Riegelhebel nur bei Grundstellung der Magna-Rota-Kurbel entsperbar, also dann, wenn das durch die Vierkantwelle verdrehte Indexsegment in eine rückseitige Nut des Riegelrads der Magna-Rota-Kurbel einfahren kann. Dabei verlässt das Indexsegment eine Kerbe der eingangs genannten Rastenstange, und gleichzeitig hebt sich der Riegelhebel aus der Nut am Sperrrad der Transportspindel, so dass deren Drehung zum Verschieben des Einstellwerks freigegeben wird. Nur in Grundstellung der Magna-Rota-Kurbel ist die Verschiebeleiste nach rechts verrückbar, wo ihre Aussparungen die Einstellblätter freigeben, und nur wenn die Einstellblätter alle erneut auf Indexbolzen im Einstellwerk eingerastet sind, kann man die Verschiebeleiste zur Entsperrung des Riegelrads und damit der Magna-Rota-Kurbel wieder nach links verschieben.

Mit Ausnahme der Muldenräder und der Normzahnräder zur Kopplung und Weiterleitung von Drehbewegungen

wurden die Zahnschneidspitzen sämtlicher Räder für günstigere Verschleißigenschaften verrundet. Der Verrundungsradius  $r_{EZ}$  des Einzahnes allerdings ist relativ klein, Bild 3, weil vom Einzahn verlangt wird, dass er einerseits den in Grundstellung waagrecht nach rechts weisenden Zahn des Muldenrads übertragungsgünstig erfassen soll, andererseits aber das Muldenrad am Einzahn vorbeilaufen muss, wenn der Einzahn in Stellung 0 oder 9 steht. Das Auslenken



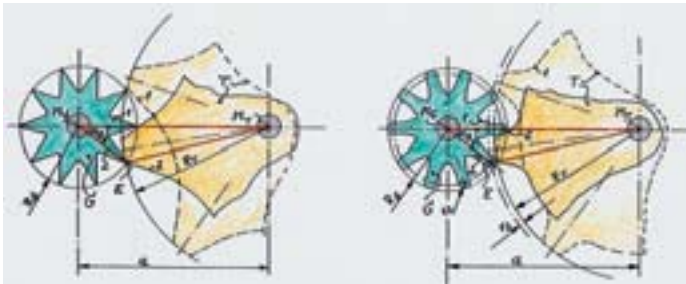
des Muldenrads durch den Einzahn führt wegen des kleinen Verhältnisses  $R_{EZ}/R_{MR}$  der Radien von Einzahn und Muldenrad nur zu kleinen Drehbeschleunigungen des Muldenrads und zu kleinen Umfangskräften am Einzahn. Größere Drehbeschleunigungen treten hingegen am Zählrad der Resultatwelle der nächsten höheren Stelle dann auf, wenn das Zweihorn das Fünfhorn erfasst und daraufhin das auf derselben Welle sitzende Muldenrad das Zählrad verdreht. Der Sollschrittwinkel des Zählrads,  $\alpha^*_{GZR} = 36^\circ$ , muss dabei mit (möglichst kleiner) Hilfe der Raste erreicht werden. Im HN wird davon ein günstig großer Anteil von  $31,5^\circ$  formschlüssig (also durch Eingriff des Muldenrads in das Zählrad) erreicht. Dadurch lenkt der mit diesem Zählrad gekoppelte Einzahn, sobald er das  $36^\circ$ -Segment zwischen 0 und 9

Bild 1 (linke Seite)  
Der Hannoversche Nachbau der Vier-Spezies-Rechenmaschine von G. W. Leibniz: GR Grundrahmen, MRK Magna-Rota-Kurbel, EW Einstellwerk, ET Einstellblätter, TK Transportkurbel, VL Verschiebeleiste, RW Resultatwelle, UZ Umdrehungszähler  
Fotografie: Jürgen Anton

Bild 2  
Die Verriegelungseinrichtung im Hannoverschen Nachbau: ET Einstellblätter, EW Einstellwerk, GR Grundrahmen, MRK Magna-Rota-Kurbel, RH Riegelhebel, RS Riegelrad, RS Indexsegment, RR Rastenstange, SR Sperrrad, TK Transportkurbel, TS Transportspindel, VKW Vierkantwelle, VL Verschiebeleiste  
Zeichnung: Franz Otto Kopp

durchläuft, das nächste Muldenrad zwangsläufig mit aus.

Bild 3  
Der Zehnerübertragungsmechanismus nach Leibniz im Hannoverschen Nachbau: EZ Einzahn, FH Fünfhorn, MR Muldenrad, RKR Rastkerbenrad, Rr Rastenrollen, ZH Zweihorn (Scheibe mit 2 Bolzen D), ZR Zählrad



Die entsprechend höheren Beschleunigungen der Zählräder beim Zehnerübertrag folgen aus der notwendigen Bedingung  $R_T/R_G > 1$  für die Radien der treibenden Glieder (Zweihorn, Muldenrad) im Verhältnis zu denen der getriebenen

Glieder (Fünfhorn bzw. Zählrad). Infolge des Vergrößerungsmaßstabs  $M = 2$  bereitete der Entwurf des HN hierdurch Schwierigkeiten, galt es doch, die (bei gleich bleibend vorausgesetzter Antriebsdrehzahl) in der vierten Potenz des Maßstabs wachsenden Umfangkräfte mit den nur kraftschlüssig wirkenden Rasten zu beherrschen, das heißt bei mä-

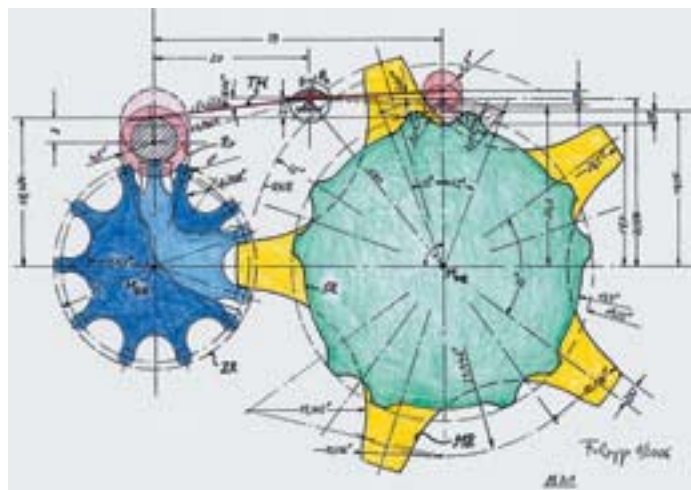


Bild 4  
Einrichtung zur Sperrung des Zählrades gegen Überschleudern (Schema): A0 Drehpunkt von TH im Resultatwerk, MR Muldenrad, Rr Rastenrolle, SR Sperrscheibe, TH Sperrtasthebel, ZR Zählrad

ßiger Antriebsdrehzahl ein »Überschleudern« der Zählräder zu verhindern. Hierzu sind im Rahmen hinter den Resultatanzeigescheiben aus Aluminium Neodyn-Magnete zur Wirbelstrom-Bremmung angebracht. F. O. Kopp fertigte

jedoch auch einen Zusatzentwurf nebst maßstäblichem Modell für einen Mechanismus an, der formschlüssig und drehzahlunabhängig das Überschleudern der Zählräder überhaupt unterbindet, Bild 4.

### Zur Gestaltung der Zehnerübertragung

Bei festgelegten Wellenabständen sind die Radien  $R_{EZ}$  des Einzahns,  $R_{MR}$  des Muldenrads,  $R_{FH}$  des Fünfhorns und  $R_{ZH}$  des Zweihorns stark voneinander abhängig und auch davon, wie groß der formschlüssig zu erzeugende Drehwinkel  $\alpha_{GZR}$  des Zählrads sein soll und wie groß das Vorbeilaufspiel  $x_{EZ}$  des Muldenrades am Einzahn in seiner Stellung 0 oder 9 sein darf, Bild 3. Das Vorbeilaufspiel  $x_{ZR}$  des Zählrads am Muldenrad (in Wartestellung) sollte größer als  $x_{EZ}$  sein, damit kleine Prallschwingungen beim Einfahren in die Rast des Muldenrads möglich und nicht störend sind. Im HN wurden  $x_{EZ} = 0,12$  mm sowie  $\alpha_{GMR}^* = 14^\circ$  gewählt. Hieraus folgt  $x_{ZR} = 0,74$  mm.  $\alpha_{GMR}^*$  wurde etwas größer als der formschlüssig erzeugte Anteil  $\alpha_{GMR} = 11,75^\circ$  des Muldenradverdrehwinkels festgelegt. Der Verdrehwinkel  $\alpha_{GMR}^*$  gilt auch für das Fünfhorn und ist so groß, dass das Zweihorn das Fünfhorn sicher erfasst.

Im Original von Leibniz und im Dresdener Nachbau ist  $\alpha_{GMR}^* = 18^\circ$  bei formschlüssig erzeugbarem und günstig großem Anteil von  $\alpha_{GMR} = 15,4^\circ$ . Jedoch führte  $\alpha_{GMR}^* = 18^\circ$  auf einen formschlüssig erzeugbaren Zählradverdrehwinkel von nur  $21,6^\circ$ . Dieser Wert wurde im Hinblick auf den Sollschrittswinkel  $36^\circ$  als zu klein erachtet. Auf der Seite des Zählrads müsste man z.B. für  $\alpha_{GZR} > 30^\circ$  den Muldenradradius  $R_{MR}$  vergrößern. Auf der Seite des Einzahns aber sollte  $R_{MR}$  kleiner sein, damit dieser einen ausreichend großen Anteil  $\alpha_{GMR}$  von  $\alpha_{GMR}^*$  form-

schlüssig erzeugt. Diese beiden gegenläufigen Tendenzen für die Bemessung von  $R_{MR}$  werden gemäß Bild 5 dadurch ausgeglichen, dass die Zahnschneiden des getriebenen Zählrads mit dem Radius  $r_G = r_{ZR}$  verrundet sind. So hat man auf der Zählradseite den effektiven, vergrößerten Radius  $R_T = R_{MR} + r_{ZR}$  des treibenden Muldenrads, während auf der Einzahnseite nur der Radius  $R_G = R_{MR}$  des getriebenen Muldenrads selbst wirksam ist. Dieser »Trick« und die Vorgabe eines Muldenradverdrehwinkels  $\alpha_{GMR}^* = 14^\circ < 18^\circ$  erlauben es, das Ziel  $\alpha_{GZR} = 31,5^\circ > 30^\circ$  zu erreichen.

Die zugehörigen, vorwiegend trigonometrischen Gleichungen findet man in [3, 4]; dabei wird  $\alpha_{GZR}$  als Hauptvariable gewählt. Weiterhin sind der Muldenradradius  $R_{MR}$  (bei Vorgabe des Vorbeilaufspiels  $x_{EZ}$ ) und die Verrundungsradien  $r_{ZR}$  und  $r_{EZ}$  am Zählwerk bzw. Einzahn zu variieren.

Eine weitere Verwendung der Gleichungen zur Mehrziel-Optimierung ist in [5] zu finden.

Die Ergebnisse in [3] und spätere, darauf aufbauende analytische und numerische Untersuchungen in [5] zeigen, dass die Leibniz-Maschine in Form des Hannoverschen Nachbaus mit acht Stellen im Einstellwerk gebaut werden kann.

### Schlussbemerkung

Der Hannoversche Nachbau ist mit seinem gegenüber dem Original verdoppelten Stellenabstand, seiner offenen Bauweise und der waagerechten Sicht auf die Resultatanzeigen für Demonstrationszwecke vorgesehen und hierfür gut geeignet. Fehlbedienungen werden durch Verriegelungen vermieden. Unter Verwendung gängiger Halbzeuge und Fertigungsverfahren ist die Maschine nach dem erstellten Zeichnungssatz kostengünstig herstellbar.

Der neue Nachbau der Leibnizschen Vier-Spezies-Rechenmaschine wurde in der Werkstatt des Instituts für Mechanik der Leibniz Universität Hannover unter der Leitung des leider im Jahr 2005 verstorbenen Direktors und Mittragstellers Professor Karl Popp gebaut. Die Autoren sind ihm für sein großes Inte-

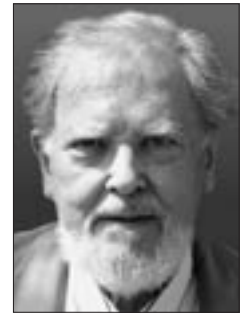
### Literatur

- 1 Badur, K. und Rottstedt, W.: »Und sie rechnet doch richtig (Erfahrungen beim Nachbau einer Leibniz-Rechenmaschine)«, in: *Studia Leibnitiana*, Bd. 30, XXXVI/2 (2004)
- 2 Lehmann, N. J.: »Leibniz als Erfinder und Konstrukteur von Rechenmaschinen«, in: *Wissenschaft und Weltgestaltung, Internationales Symposium zum 350.*



### Dr.-Ing. Franz Otto Kopp

Jahrgang 1937, war bis 2002 Oberingenieur am Institut für Getriebetechnik und ist seit 1976 Dozent am Fachbereich Design und Medien, FH Hannover.



### Univ.-Prof. em. Dr.-Ing. habil. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. mult. Erwin Stein

Jahrgang 1931, war von 1978 bis 1998 Leiter des Instituts für Baumechanik und Numerische Mechanik. Zwischen 1990 und 2006 konzipierte und organisierte er acht Leibniz-Ausstellungen.

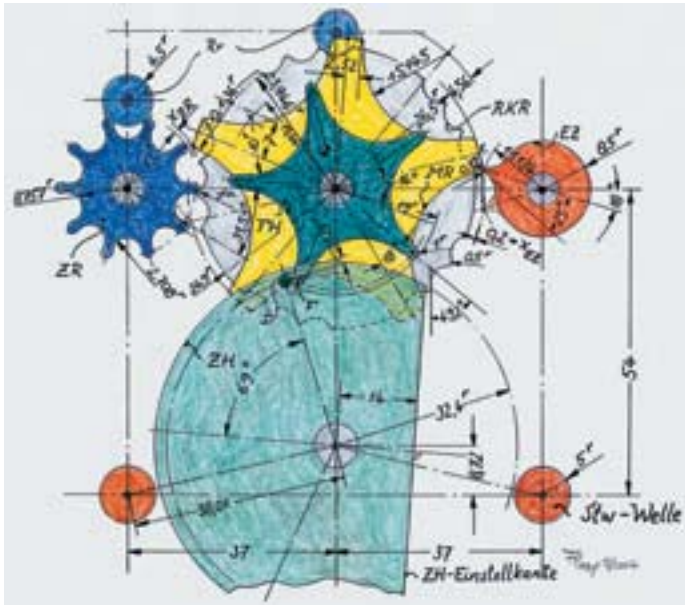


Bild 5

*Formschlüssige Arbeitsweise zwischen einem treibenden Glied T und einem getriebenen Glied G., a) für spitze Kontur von G (z.B. Zählrad ZR), b) für verrundete Kontur von G (z.B. ZR); T sei dabei z.B. Muldenrad MR*

resse sehr dankbar. Dem Werkstattleiter Jürgen Anton sowie seinen Mitarbeiter(inne)n Thomas Bannasch, Tanja Diesterheft, Paul Kaszubowski und Kurt Rieming gebührt große Anerkennung und unser Dank für ihre Sorgfalt bei der Herstellung der Maschine.

Der Hannoversche Nachbau besitzt Gestaltungselemente, deren Anmutung in würdiger Weise an die Urform der Maschine und an Leibniz' Großtat erinnern. Mit den theoretisch begründeten Änderungen der Konstruktion erlaubt diese Maschine erstmals vollständige Zehnerüberträge ohne das Nullsetzen von Eingabezahlen.

Geburtstag von G. W. Leibniz, Leipzig 1996, G. Olms Verlag Hildesheim Zürich New York

- 3 Kopp, F. O.: »Der Hannoversche Nachbau der Vier-Spezies-Rechenmaschine nach G. W. Leibniz«, in: 6. Kolloquium Getriebetechnik, Aachen 2005, Verlagshaus Mainz GmbH Aachen
- 4 Kopp, F. O. und Stein, E.: »Konstruktive Verbesserungen im Hannoverschen Nachbau der Leibnizschen Vier-Spezies-Rechenmaschine«, in: VIII. Internationaler Leibniz-Kongress, Vorträge 1. Teil, S. 390–397, Hannover 2006
- 5 E. Stein, F. O. Kopp, K. Wiechmann und G. Weber: »Neue Forschungsergebnisse und Nachbauten zur Vier-Spezies-Rechenmaschine und zur Dyadischen Rechenmaschine nach Leibniz«, in: VIII. Internationaler Leibniz-Kongress, Vorträge 2. Teil, S. 1018–1025, Hannover, 2006