(Vortrag zum VIII. Internationalen Leibniz-Kongress in Hannover 2006)

Die Dresdner Nachbauten der Leibnizschen Staffelwalzenmaschine unter Einbeziehung von Lehmanns Korrekturen

Von

MANFRED LUDWIG (DRESDEN)

Einführung

N.J. Lehmann (1921-1998) war von 1953 bis zu seiner Emeritierung 1986 Professor an der Fachrichtung Mathematik der TH/TU Dresden. Er war vor allem auf den Gebieten Angewandte Mathematik, Maschinelle Rechentechnik und Informatik wissenschaftlich tätig. Daneben zeigte er sich stets fasziniert von historischen Rechenmaschinen. So trug er 1978 mit dem Aufbau einer Sammlung *100 Jahre Rechenmaschinen in Glashütte/Sachsen* wesentlich zum Entstehen der heutigen Sammlung *Historische Rechenmaschinen* an der Fachrichtung Mathematik der TU Dresden bei. In den letzten Jahren vor seiner Emeritierung befasste er sich intensiv mit Studien zur Leibniz-Rechenmaschine, deren Resultat die *Dresdner* Nachbauten sind. Der Autor des vorliegenden Artikels war einer seiner Schüler, der nicht unmittelbar an den Arbeiten zur Leibniz-Maschine beteiligt war, sie aber mit großem Interesse verfolgte, und heute für die Bewahrung der in Dresden verbliebenen Maschine und die Aufbereitung der technischen Unterlagen tätig ist. Im folgenden Artikel werden die von Lehmann durchgeführten Forschungen zur Leibniz-Rechenmaschine, die zu den drei Dresdner Nachbauten führten, zusammengefasst. Grundlage dafür sind Veröffentlichungen[1,2] von Lehmann, unmittelbare persönliche Kontakte mit ihm und Erfahrungsberichte seiner am Nachbau beteiligten Mitarbeiter.

Die letzte der von Leibniz erfundenen Rechenmaschinen wurde unter seiner Anleitung etwa in den Jahren 1700-1716 gebaut. Für das Einstellwerk wurden im Unterschied zu früheren von ihm entworfenen Rechenmaschinen Staffelwalzen genutzt. Entsprechend gefundener Unterlagen war sie 1775 aus dem Leibniz-Nachlass in Hannover zur *Reparatur* nach Göttingen geschickt und dort vergessen worden. Sie wurde 1876 in der Modellkammer der Göttinger Universität wiederaufgefunden und 1880 nach Hannover zurückgeführt. 1894-1896 wurde die Rechenmaschine von Herrn Civil-Ingenieur Arthur Burkhardt[3], dem Begründer der ersten Rechenmaschinenfabrik in Deutschland (Glashütte/Sachsen), restauriert und ihre Bewegungsfähigkeit wieder hergestellt.

Seit 1896 befindet sich diese Maschine in der Niedersächsischen Landesbibliothek in Hannover als welterste mechanische Rechenmaschine zur getriebemäßigen Ausführung aller vier arithmetischen Grundrechenarten und gilt als herausragende museale Kostbarkeit.

Zur Funktionsfähigkeit der Rechenmaschine werden in der Literatur sehr unterschiedliche Aussagen, meist ohne ausreichende Begründung getroffen. So wird im offiziellen Bericht von A. Burkhardt festgestellt, „dass die hier vorliegende Leibniz'sche Maschine auf ein Element sehr

---

1 N.J. Lehmann: „Neue Erfahrungen zur Funktionsfähigkeit von Leibniz' Rechenmaschinen", in: Studia Leibnitiana XXV/2 (1993), S. 174-188.

2 N.J. Lehmann: „Leibniz als Erfinder und Konstrukteur von Rechenmaschinen", in: Wissenschaft und Weltanschauung, Internationales Symposium zum 350. Geburtstag von Gottfried Wilhelm Leibniz vom 9. bis 11. April 1996 in Leipzig, S.255-267.

3 A. Burkhardt: Die Leibniz'sche Rechenmaschine, in Zeitschrift für Vermessungswesen 26(1897), S. 392-398.

genial construiert und ausgeführt worden ist“, anderseits infolge eines Dimensionierungsfehlers jedoch „die hier vorliegende Maschine niemals gegangen sein kann“[3]. L. v. Mackensen[4] bestätigt die Aussage von Burkhardt und als Ursache wird der schrittweise Ausbau einer zuerst nur addierenden Maschine auch für die Ausführung der Subtraktion vermutet. (Die Subtraktion sollte mittels Komplement-Zahlen auf die Addition zurückgeführt werden.) E. Wilberg[5] erörtert die Möglichkeit, dass der Erfinder zur Vereinfachung der Mechanik auf die vollautomatische Übertragsausführung verzichtet hat. Dabei wird bereits der realisierten Lösung, bei der seltenere (sekundäre) Überträge angezeigt und sehr einfach manuell abgearbeitet werden, eine „für die damalige Zeit geradezu geniale ‚Erfindungshöhe'“ zugesprochen. Anderseits merkt Wilberg dazu an „Dass L. den Ehrgeiz hatte, die mechanische Zehnerschaltung zu verwirklichen, zeigen seine häufigen, schriftlichen Erörterungen möglicher Bauweisen dafür und viele Zahlenbeispiele von Rechengängen, die sich in seinen Aufzeichnungen finden“. So bezeichnete Leibniz gegenüber dem Helmstedter Dr. R. C. Wagner, der beim Aufbau der Rechenmaschine mitwirkte und das „mit der Hand ausmachen“ (von Überträgen) vertrat, als „unrecht“[5].

Es ist jedoch erwiesen, dass bei der originalen Leibniz-Rechenmaschine bereits die Addition und Subtraktion und damit alle darauf aufbauenden Operationen *nicht* vollautomatisch (getriebemäßig) einwandfrei ablaufen können. So ist bei Auftreten von Überträgen über mehrere Stellen manuelle Nachhilfe nötig.

Maßstabstreue Nachbauten der Leibniz-Rechenmaschine in Dresden unter Anleitung von Lehmann

Die Original-Leibniz-Rechenmaschine wurde etwa 1924 unter Leitung des Rechenmaschinenkonstrukteurs und Direktors der Brunsviga-Werke in Braunschweig, Dr. F. Trinks, in 4 Exemplaren nachgebaut. Auch bei diesen Maschinen gab es Probleme beim Auftreten von Überträgen über mehrere Stellen.

Auf Anregung der Akademie der Wissenschaften der (ehemaligen) DDR wurden zur Ehrung ihres Gründers, Gottfried Wilhelm Leibniz, ab 1985 von Lehmann Vorbereitungen zum Nachbau der *letzten* Leibniz'schen Rechenmaschine getroffen. Als *Vorbild* diente der Leibniz-Nachbau von Trinks im Landesmuseum Braunschweig.

1986 wurden Messungen an der Maschine durchgeführt und Fotos angefertigt. Auch wurden maßstabsgerechte Zeichnungen vom eigentlichen Rechenmechanismus zur Verfügung gestellt, die P. Paland, der in Braunschweig die Rechenmaschinenabteilung betreute, angefertigt hatte. 1987 konnten die Unterlagen im Deutschen Museum für Naturwissenschaften und Informatik in München am dortigen Rechnermodell ergänzt werden. In dieser Phase wurde auch festgestellt, dass zwischen den Modellen der Leibniz-Rechenmaschine in Braunschweig und München trotz gleicher Grundabmessungen im Detail Abweichungen bestehen, die sich jedoch funktionell alle als unerheblich erwiesen.

Im Verlauf des Aufbaus der Dresdner Rechenmaschine wurde deren Funktionsweise genauer untersucht und dabei erkannt, dass die Grundabmessungen und die Anordnung der Teile eigentlich auch die von Leibniz gewünschte vollautomatische Übertragsausführung zulassen sollten.

---

[4] L. v. Mackensen: Zur Vorgeschichte und Entstehung der ersten digitalen 4-Spezies-Rechenmaschine von Gottfried Wilhelm Leibniz, in: Akten des Internationalen Leibniz-Kongresses, Hannover, 14.-19. November 1966 (= Studia Leibnitiana Supplementa II), Wiesbaden 1969, S.34-68.

[5] E.-E. Wilberg: Die Leibniz'sche Rechenmaschine und die Julius-Universität in Helmstedt (= Kuhlenkamp (Hrsg.): Beiträge zur Geschichte der Carolo-Wilhelmina. Schriften des Braunschweigischen Hochschulbundes e.V., Bd. V), Braunschweig 1977.

A. Burkhardt hatte bei seinen Restaurierungsarbeiten 1894/1896 eine Theorie verfolgt[3], die offensichtlich auf einer falschen Grundannahme basierte. Danach hatte er die Maschine schließlich *justiert*, die Bewegungsfähigkeit zwar wieder hergestellt, aber nicht die volle Funktionsfähigkeit bezüglich der Überträge.

Nach vergleichenden Studien an der Originalmaschine im Leibniz-Archiv in Hannover konnten die gezogenen Schlussfolgerungen und Erwartungen von Lehmann zur Funktion der Rechenmaschine bestätigt werden. Obwohl dieses Gerät auch keine vollautomatische Übertragungsarbeit ermöglichte, waren wesentliche Voraussetzungen dafür besser als bei den bisherigen Nachbauten erfüllt.

Unter Berücksichtigung all dieser Erkenntnisse und ihrer gründlichen Auswertung durch Lehmann entstanden die Dresdner Nachbauten der Leibnitz-Rechenmaschine.

1988/1990 erfolgte der aus heutiger Sicht erste Dresdner Nachbau der Leibniz'schen Rechenmaschine an der Technischen Universität Dresden unter der wissenschaftlichen Leitung von N.J. Lehmann. Die Herstellung der Einzelteile für den Nachbau erfolgte mit modernen Maschinen nach den aktuellen Fertigungstechnologien. Damit konnten die bei der handwerklichen Herstellung der Originalmaschine vor fast 300 Jahren auftretenden *Anpassungsmerkmale* für die Nachbauten vernachlässigt werden. Der Nachbau gleicht dem in Braunschweig. (Für den Dresdner Nachbau wurde diese Maschine teilweise zerlegt und vermessen.) Kleinere Abweichungen sind fertigungstechnisch bedingt lediglich an der äußeren Verkleidung vorgenommen worden. Die Rechenmaschine befindet sich heute in der Berlin-Brandenburgischen Akademie der Wissenschaften Berlin. Im Auftrag des damaligen Museums für Verkehr und Technik Berlin (heute: Deutsches Technikmuseum Berlin) wurde 1992 nach dem gleichen Prinzip ein zweiter Nachbau angefertigt. Schließlich wurde 2001 ein dritter Nachbau fertiggestellt, der Bestandteil der Sammlung *Historische Rechenmaschinen* der Fachrichtung Mathematik an der Technischen Universität Dresden ist. Um diese Rechenmaschine einer breiten Öffentlichkeit zugängig zu machen, befindet sie sich für größere Zeiträume in den Technischen Sammlungen der Stadt Dresden. Alle Dresdner Nachbauten der Leibniz-Rechenmaschine erfolgten unter der wissenschaftlichen Leitung von N.J. Lehmann und wurden in der Werkstatt der Fachrichtung Mathematik an der Technischen Universität Dresden von M. Göbel und K. Rühle ausgeführt. Jede der drei nachgebauten Maschinen ist *voll funktionsfähig*. Der Zehnerübertragsmechanismus wurde von Lehmann neu berechnet und dimensioniert.

Lehmans Untersuchungen zum Zehnerübertrag

Der Aufbau der letzten und jetzt in Hannover bewahrten Rechenmaschine wurde kurz vor 1700 begonnen und war bei Leibniz' Tod 1716 noch nicht gänzlich vollendet. Dabei wurde das Einstellwerk mit sogenannten Staffelwalzen aufgebaut. Das sind Walzen mit neun Zahnrippen gestaffelter Länge, so dass ein passend eingestelltes Abtriebszahnrad soviel Schritte mitgedreht wird, wie es der gewünschten Ziffer entspricht. (Bild 1)

Das (Zehner-)Übertragungsproblem, das Leibniz sehr lange beschäftigt hat, wurde schließlich durch Aufteilung des Addiervorganges in zwei Phasen bewältigt. In der ersten werden die Ziffernadditionen in allen Summandenstellen unabhängig voneinander gleichzeitig (parallel) ausgeführt und dabei auftretende Zehnerüberträge in einem jeder Ziffernstelle zugeordneten Speicherelement (bei Leibniz ein spezielles Zahnrad, sein sog. *Fünfhorn*) vermerkt. In der zweiten Phase werden die zuvor gespeicherten Überträge beim kleinsten Stellenwert beginnend nacheinander (seriell) zu den zuvor erhaltenen Zwischensummen hinzugefügt.

Das Vorgehen soll an der Addition 0448 + 0254 demonstriert werden. Der erste Summand stehe bereits im Summenwerk. Dabei läuft die erste Phase in den Schritten 0 ... 9 ab, in denen zu jeder

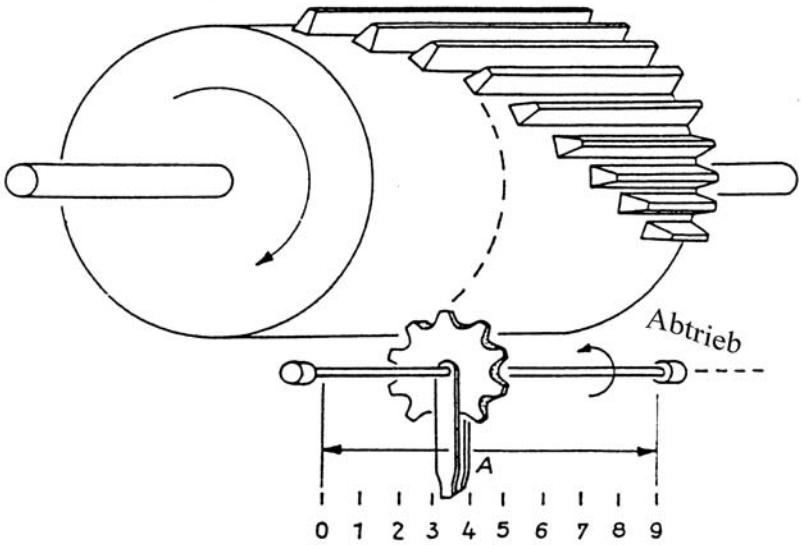

Bild 1

Summenziffer jeweils nur eine 1 hinzugefügt werden kann, solange das der zweite Summand erfordert. Die zweite Phase besteht im Beispiel entsprechend der Anzahl der Ziffern aus drei Schritten.

Phase 1: Der zweite Summand wird schrittweise zum Anfangswert dazugezählt.

Schrittnummer	(Teil)Summenstellen				
0	0	4	4	8	+0254(2. Summand)
1	0	4	4	8	
2	0	4	4	8	
3	0	4	4	8	
4	0	4	4	8	
5	0	4	5	8	
6	0	4	6	9	
7	0	4	7	10	
8	0	5	8	11	
9	0	6	9	12	Zwischensumme

Phase 2: Schrittweise Einarbeitung der Überträge

Schrittnummer	(Teil)Summenstellen				
1	0	6	9	12	
2	0	6	10	2	
3	0	7	0	2	Resultat

Für die Phase 2 wurden die Überträge unterstrichen, die im jeweils nächsten Schritt bei der Ziffer davor erfasst werden.

Die Zählvorgänge in den einzelnen Spalten der Phase 1 entsprechen bei der Leibniz-Rechenmaschine gerade der Wirkung von Staffelwalzen, die auf den Wert der jeweiligen Stelle des 2. Summanden eingestellt sind. Dabei greifen Ziffern des 2. Summanden mit der Ziffernstellung 9 im 1. Schritt in die Staffelwalze ein, die mit der Ziffernstellung 8 im 2. Schritt u.s.w. Sobald ein *Summenrad* dabei von 9 nach 0 weiterläuft, stößt eine Nase am *Summenrad* (der sog. *Einzahn*) das davor liegende Übertrags-Speicherelement (im Beispiel sind das die *Zehnerstellen* in jeder

Ziffernspalte) in die Stellung 1, die dann erst später in Phase 2 in die endgültige Summendarstellung eingebracht und dann *gelöscht* werden. Die mechanischen Vorgänge in der Phase 2 laufen sehr einfach ab: In jedem Schritt wird - beim kleinsten Stellenwert beginnend - ein vorhandener Übertragswert 1 benutzt, um das davor liegende *Summenrad* um eine Ziffer weiterzuschieben - wobei dort gegebenenfalls beim Übergang von 9 auf 0 ein weiterer Übertrag entstehen kann (vgl. im obigen Beispiel im 2. Schritt der Phase 2 in der 3. Zahlenspalte von vorn). Dabei kann ein solcher sogenannter *sekundärer* Übertrag aus arithmetischen Gründen nur auftreten, wenn in der betreffenden Spalte zuvor der Wert nur einstellig war. (In Phase 1 ist der Maximalwert in jeder Spalte durch $9+9=18$ gegeben, der auch bei Berücksichtigung eines Übertrags in der Phase 1 höchstens 19 ergibt und damit keinen neuen Übertrag auslöst.)

Diesem Schema entsprechend ist die Leibniz-Rechenmaschine aufgebaut. Hervorzuheben ist, dass die Zahnrippen der Staffelwalze bei Leibniz 9/16 eines Umfanges besetzen und dass sein Additionswerk für 8 Stellen (Überträge) ausgelegt ist, so dass dort die Übertrags-Phase 2 aus 8 Einzelschritten besteht.

Als Burkhardt 1894 mit der Restaurierung der Leibniz-Rechenmaschine begann, war er der Auffassung, dass jeder Einzelschritt der beiden Phasen den gleichen Bruchteil einer Antriebsumdrehung erfordere. Da die Staffelwalze (mit 9 Zahnrippen) $\frac{9}{16} \mathrel{\hat{=}} 202{,}5^\circ$ eines Walzenumfangs besetzt, verbleiben nur $\frac{7}{16} \mathrel{\hat{=}} 157{,}5^\circ$ für eine vollständige Umdrehung. Für die Ausführung eines jeden Übertrages forderte Burkhardt entsprechend der Zahnbreite der Staffelwalze $\frac{1}{16}\cdot 360^\circ \mathrel{\hat{=}} 22{,}5^\circ$ für 8 Übertragungsschritte demzufolge noch $\frac{8}{16}\cdot 360^\circ \mathrel{\hat{=}} 180^\circ$ der Umdrehung zusätzlich. Zusammen ergibt das $\frac{17}{16} > 360^\circ$ des Umfangs, und das ist bereits, unabhängig vom unvermeidlichen mechanischem Spiel im Räderwerk und von weiteren technischen Nebenbedingungen, nicht mit nur einer Drehung des Antriebes zu leisten. Nach dieser Theorie Burkhardts konnte die Leibniz-Rechenmaschine prinzipiell niemals einwandfrei arbeiten. Offen bleibt bei dieser von Burkhardt entwickelten *Theorie*, wieso beide Phasen der Addition im gleichen Winkeltakt ablaufen sollen. Wahrscheinlich übernahm er dabei kritiklos Erfahrungen aus der Produktion seiner eigenen Staffelwalzenmaschine. Dort ist die Übertragsverarbeitung an die Schrittweite der Staffelwalze gebunden. Burkhardt war sich seiner Sache offenbar selbst nicht ganz sicher. In seinem Protokoll heißt es dazu: „... habe die Maschine Teil für Teil zusammengesetzt und dann der Theorie (seiner falschen *Theorie*!) entsprechend eingestellt und justiert und liefere sie heute (1896), soweit es sich ermöglichen ließ, als gangbar ab, gern erbötig, mehr daran vorzunehmen, wenn ich eines anderen belehrt werden sollte“ [3].

Eine Nachprüfung aller Abmessungen und Hebelverhältnisse durch Lehmann bestätigte, dass eine Übertragsweiterleitung im Gerät keineswegs $22{,}5^\circ$ einer Umdrehung beanspruchte. Auf Grund der in Leibniz’ Manuskripten behandelten und in der Originalmaschine genutzten Wirkung von Rastfedern erwiesen sich schon Drehungen um etwa 10° zur Fortschaltung eines Übertrags als ausreichend. Da das Originalgerät in seinen entscheidenden Baugruppen ein handwerkliches Meisterwerk darstellt, sollte auch in dieser Hinsicht eine vollautomatische Funktionsfähigkeit nicht eingeschränkt sein.

Lehmann untersuchte eingehend die Hebelverhältnisse beim Weiterschalten eines Übertrages. Zur Verdeutlichung der „Änderungen“ am Dresdner Nachbau sollen an Hand einer Skizze[1] (Bild 2) diese kurz beschrieben werden. Die Darstellung erfolgt am obigen Beispiel einer Summenbildung $448+254=702$. Der Mechanismus wird durch die Kurbel K und die damit gekoppelten Zahnräder

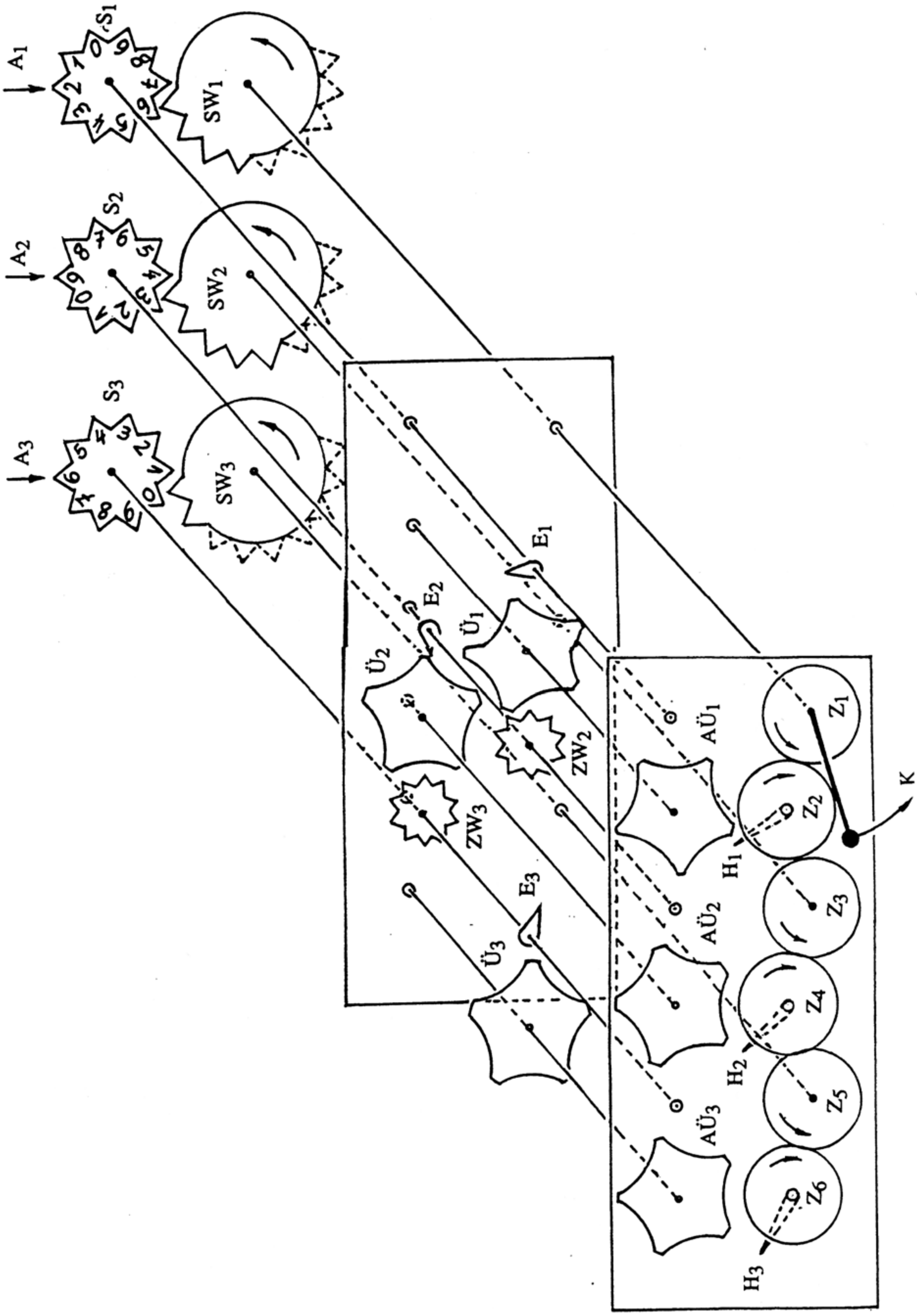
A_1
A_2
A_3
S_1
S_2
S_3
SW_1
SW_2
SW_3
E_1
E_2
E_3
$Ü_1$
$Ü_2$
$Ü_3$
ZW_2
ZW_3
$AÜ_1$
$AÜ_2$
$AÜ_3$
Z_1
Z_2
Z_3
Z_4
Z_5
Z_6
H_1
H_2
H_3
K

Bild 2

Z_1, Z_2, Z_3, ... bewegt. In der ersten Arbeitsphase der Addition haben die Staffelwalzen SW_3, SW_2, SW_1, ... (eingestellt ist 254) die Summenrädchen S_3, S_2, S_1, ... mit Ablesestelle A_i (im Bild $S_3 = 6$, $S_2 = 9$, $S_1 = 2$) auf die Zwischensumme 692 weitergedreht. Zur Speicherung der Überträge dienen jeweils sogenannte *Fünfhörner* $Ü_3$, $Ü_2$, $Ü_1$, ... Der Eintrag in $Ü_i$ wird beim Übergang der zugehörigen Summenziffer S_i von 9 auf 0 (eigentlich 10) durch den damit verbundenen Einzahn E_i bewirkt. Im Bild stehen $Ü_3 = 0$, $Ü_2 = 0$ in der Grundstellung, während $Ü_1 = 1$ durch E_1 zur Speicherung des Übertrags um 18° bewegt wurde. In der anschließenden zweiten Phase der Addition kommen die mit dem Antrieb K verbundenen Hebel H_1, H_2, H_3, ... zeitlich nacheinander zur Wirkung. Falls ein Übertrag $Ü_1 = 1$ auftritt, schaltet H_i mittels der Verbindungskette $H_i - AÜ_i = Ü_i - ZW_{i+1} = S_{i+1}$ (Erklärung s. Fußnote[6]) das folgende Summenrädchen wegen der gewählten Hebelverhältnisse um eine Einheit weiter. Dabei kann in der damit erreichten Stelle ein neuer *sekundärer* Übertrag auftreten, der bei richtiger Staffelung der Hebel H_i sofort anschließend analog im nächsten Schritt verarbeitet wird. Für das Beispiel wird $S_2 = 9$ durch $Ü_1 = 1$ auf 0 gestellt, so dass E_2 den Übertrag $Ü_2 = 1$ einschaltet, den H_2 entsprechend obiger Verbindungskette über $H_2 - AÜ_2 = Ü_2 - ZW_3 = S_3$ weiterleitet. Die Anzahl der so mit einer Kurbeldrehung zu verarbeitenden Überträge wird dabei durch die Staffelung der Hebel H_i und dem bei der Staffelwalze von Zahnrippen freiem Winkelbereich bestimmt.

Nach dem gleichen Prinzip kann nach Leibniz die Subtraktion ausgeführt werden. Dazu muss lediglich die Drehrichtung des Antriebs und zugleich die Staffelungsfolge der H_i umgekehrt werden. Die mehrfache sinngemäße Anwendung der Addition/Subtraktion ermöglicht schließlich die Ausführung der Multiplikation und Division.

Ausgehend davon, dass die beiden Phasen der Addition weitgehend unabhängig sind, wurde von Lehmann die Dimensionierung des Antriebswinkels für die Ausführung eines Übertrages genauer untersucht. Am Bild 2 ist zu erkennen, dass eine 18°-Drehung des Antriebselements $AÜ_1$, das hier zu einem gespeicherten Übertrag $Ü_1 = 1$ gehört, mittels ZW_2 das Summenrädchen S_2 um eine Einheit $\left(\triangleq 36^\circ\right)$ weiterrückt. Infolge der muldenförmigen Zahnflanken bei $AÜ_1$ ist das beim Eingriff von H_1 in $AÜ_1$ wirksame Hebelverhältnis nicht konstant. Mit fortschreitender Bewegung des letzteren greift H_1 tiefer in $AÜ_1$ ein und gleicht damit zumindest das immer vorhandene Spiel zwischen den mechanischen Teilen aus. Dies gilt bei jeder Übertragsverarbeitung. Weiterhin wird in dieser Maschine die Wirkung von Rastfedern systematisch ausgenutzt, die einmal in die Zwischenräder ZW_i und einmal in spezielle Sperrräder mit einer 18°-Teilung eingreifen, die auf der Achse der Speicherfünfhörner $Ü_i$ angebracht sind. Sperrräder und Rastfedern sind aus Gründen der Übersichtlichkeit in der Skizze nicht berücksichtigt. In der Originalmaschine sind die Federstärken so angepasst, dass ohne Belastung laufende Sperrräder nach Drehung um eine halbe Zahnbreite beim Einrasten in die nächste Zahnlücke durch die Federn bis zum Haltepunkt

---

[6] „-“ Eingriff von Zahnrädern oder Hebeln
„=“ gemeinsame Achse
$AÜ_i$ Antrieb zur Weiterschaltung der Überträge $Ü_i$ (gegen $Ü_i$ um 18° versetzt); $AÜ_3$, $AÜ_2$ sind wegen $Ü_3 = Ü_2 = 0$ in Grundstellung (Hebel H_3, H_2 können noch nicht wirken), $AÜ_1$ ist wegen $Ü_1 = 1$ in die Laufbahn von H_1 eingeschwenkt
ZW_i Zwischenräder zur Aufnahme von Überträgen aus $Ü_{i-1}$ in S_i

weitergedreht werden. Ein solcher Fall liegt immer vor, wenn ein Summenrad S_k beim Übergang von 9 auf 0 über den Einzahn E_k einen Übertrag in $Ü_k$ einträgt. Deshalb genügt bereits eine Drehung von wenig über 18° (entspricht einer halben Zahnbreite) bei S_k um die Übertragsspeicherung in $Ü_k$ zu realisieren. Außerdem wird dieser Vorgang zufolge der Zahnform der $Ü_k$ so unterstützt, wie das zuvor für $AÜ_1$ erläutert wurde.

Zusammengefasst hat das zur Folge, dass ein Übertrag $Ü_i = 1$ den bei $S_{i+1} = 9$ nötigen sekundären Übertrag $Ü_{i+1}$ in der 2. Additionsphase bereits bei einer Bewegung des Transporthebels H_i um etwa 9° durch Federkraft einrasten lässt. Wird in der Verbindungskette $H_i - AÜ_i = Ü_i - ZW_{i+1} = S_{i+1} = E_{i+1} - U_{i+1}$ H_i um 9° gedreht, so wird nach der Übersetzung $Ü_i - ZW_{i+1}$ S_{i+1} um 18° gedreht. Das reicht nach der vorangegangenen Betrachtung schon zur Auslösung des sekundären Übertrags. Kurz danach könnte der neue Übertrag $Ü_{i+1}$ bereits vom Antrieb $AÜ_{i+1}$ *bearbeitet* werden usw. Dabei stört es nicht, dass $H_i - AÜ_i = Ü_i$ noch weiter und in die Nullstellung treibt.

Hierzu wurde an der Originalmaschine für die Ausführung eines Übertrags ein Antriebswinkel von etwa 10° festgestellt, also deutlich weniger als die von Burkhardt geforderten $22{,}5^\circ$, so dass die automatische Verarbeitung von acht Überträgen im zahnfreien Winkelbereich der Staffelwalzen prinzipiell möglich sein musste.

Es bedurfte beim Dresdner Nachbau der Rechenmaschine, der den Originalabmessungen entspricht, nur der Änderung der Staffelung von Antriebshebeln, die entsprechend den Schritten der zweiten Additionsphase nacheinander die Überträge zum jeweiligen höheren Stellenwert weiterleiten. Zum Ausgleich von Spiel und Fertigungsungenauigkeiten hat jetzt jeder Übertrag $16{,}5^\circ$ der Antriebsdrehung für die Verarbeitung zur Verfügung - und das reicht für die sichere Funktion des gesamten Rechenwerks. Um die Verschiebung des Einstellwerkes in die Ruhestellung des Additions-/ Subtraktionswerkes zu gewährleisten, musste zwischen den Antriebshebeln H_4 und H_5 eine Lücke von 36° freigelassen werden. Jedoch dürfen H_4 und H_5 nicht identisch sein, da sonst Verklemmungen auftreten können, wenn bei H_4, aber nicht bei H_5 Überträge zu verarbeiten sind. Es genügte, den Spreizwinkel des Antriebshebels von H_5 gegenüber dem von H_4 um 3° zu vergrößern. Praktisch wurden demnach bei den Dresdner Nachbauten die Spreizwinkel der Antriebshebel, der sogenannten *Zweihörner* (bei Burkhardt konstant etwa 80°), wie im Bild 3 angegeben, gegenüber der *restaurierten* Originalmaschine geändert. Dabei kommt das durchgezogene Teil des Zweihorns bei der Addition und das gestrichelte bei der Subtraktion zur Wirkung. Danach führt der Dresdner Nachbau der Leibniz-Rechenmaschine alle vier Grundoperationen auch mit vorzeichenbehafteten Zahlen mit 8 Dezimalstellen völlig einwandfrei und ohne manuelle Eingriffe aus.

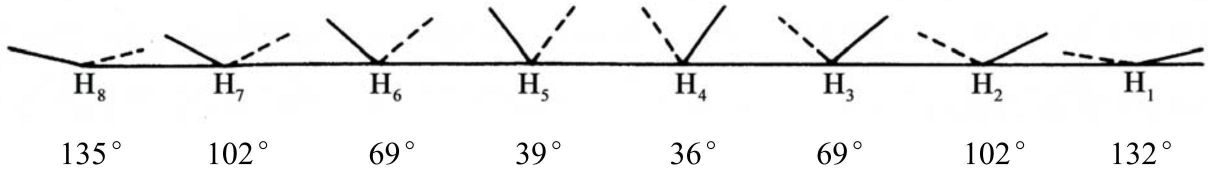

Bild 3

Die Tragfähigkeit des Leibniz'schen Rechenmaschinenkonzepts ist damit eindrucksvoll auch im Detail erwiesen.