

Wie war das Additionswerk der Schickard'schen Rechenuhr aufgebaut?

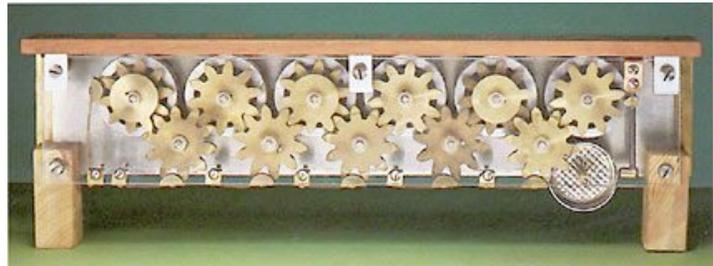
von Detlev Bölter

Über das Additionswerk, das Wilhelm Schickard seinem Mechaniker und Uhrmacher Johann Pfister in Auftrag gab, gibt es nur wenige Skizzen. Schickard fertigte sie weniger als technische Zeichnungen, sondern um seinem Freund Kepler das Grundprinzip darzustellen. Doch auch die grundlegende Erfindung, die sich auf die Lösung des Zehnerübertrags reduzieren lässt, wirft Fragen auf. Die "Rechenuhr", die um das Additionswerk herum gebaut ist, soll hier nicht betrachtet werden. Sein Aufbau ist klar: Es handelt sich um eine bestimmte Anordnung von Napier'schen Stäben, eine Art Multiplikationstabelle, die auf drehbaren Stäben angeordnet ist.

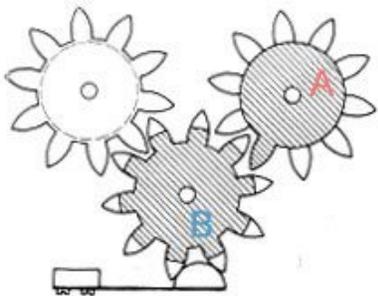
Die meisten Rekonstruktionen des Addierwerkes - von Replicas kann man im strengerem Sinne nicht sprechen - sind Nachbauten des ersten Modells, das heute im Tübinger Museum steht. Hierüber gibt es ausführliche Dokumentationen, vor allem die bekannte Schrift "Wilhelm Schickards Tübinger Rechenmaschine", ISBN 3-910090-48-6, mit vielen weiterführenden Literaturangaben.



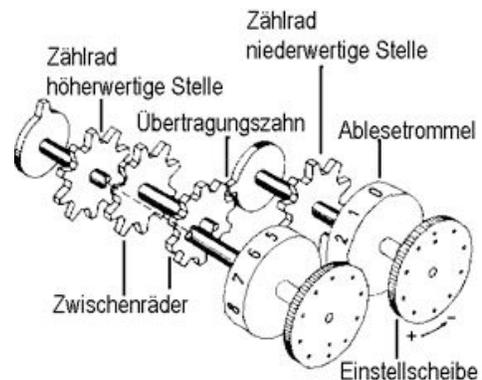
Die Tübinger Rekonstruktion in der Gesamtsicht. Der zentrale Bestandteil und die eigentliche Rechenmaschine ist das Addierwerk, der Rest sind ergonomisch-praktische Hilfsmittel (Multiplikationstabelle in Form drehbarer Napier'scher Rechenstäbe und manueller Speicher für eine sechsstellige Zahl)



Das Addierwerk, von hinten gesehen. In der Original-Publikation ist das Foto seitenverkehrt abgebildet.



Schematischer Aufbau des Übertragungsweges im Tübinger Modell. Der auf dem Einstellrad A aufgesetzte Einzahn (schraffiert) greift in ein Zahnrad mit verkürzten Zähnen, das (schraffiert) auf dem Zwischenrad B sitzt. Zahnrad B transportiert das nächste Einstellrad um eine Stelle weiter.



Hier eine auseinander gezogene Darstellung, zu finden auf der Homepage von Jan Meyer

(<http://www.rechenhilfsmittel.de/napier.htm>)

Nachdem ich viel Zeit mit eigenen Nachbauten verbracht habe, bin ich zu dem Schluss gekommen, dass das Original anders aufgebaut war. Die "Tübinger Lösung" erfordert eine Genauigkeit, die im 17. Jahrhundert nicht erreichbar war, und selbst die Vergrößerung der Maschine (das Tübinger Modell besitzt etwa die Höhe und Breite eines Backofens), welche die Fehleranfälligkeit verringert, kann nicht der damaligen Lösung entsprochen haben. In Tübingen entschied man sich aufgrund des Hinweises auf "verstümmelte" Zahnräder, einen Einzahn zu verwenden, der den gleichen Arbeits("Kopfkreis-")durchmesser hat wie eines der anderen Zahnräder - verstümmelt wurde das Rad, in das der Einzahn zum Zehnerübertrag greift. Die Länge des Einzahns ist jedoch entscheidend für die Fehleranfälligkeit des gesamten Addierwerkes, je kürzer er ist, desto näher ist er seinem Nachbarzahnrad. Das Tübinger Modell ist meines Erachtens deshalb so groß gebaut worden, weil die Maßstabsvergrößerung mehr Spiel zwischen Einzahn und Nachbarrad erlaubt.

Wir können Schickards spärliche Hinweise bei genauer Betrachtung jedoch so auslegen, dass ein Übertragungsweg mit anderen Maßen und damit anderer Konstruktion möglich ist. Ich möchte detailliert ausführen, weshalb mir diese Lösung sinnvoller erscheint und vor allem, dass sie den damaligen Fertigungstechniken weitaus besser entspricht als das Tübinger "High-Tech" - Addierwerk.

Weshalb der Aufwand?

Der Zehnerübertrag in Scheibenrechnern (und auch in Sprossenrad- oder Staffelwalzenmaschinen) war seit Pascal das zentrale Problem. Das Dilemma war: Man fertigte Zahnräder von Hand, deshalb war die Präzision für angemessen kleine Addierwerke nicht ausreichend, schon gar nicht für Addition *und* direkte Subtraktion. Eine Maßstabsvergrößerung wiederum hätte für mehr als sechs Stellen sehr große Maschinen erbracht - man denke nur an die Maschine von Poleni. Außerdem muss bei Scheibenaddierern der Übertrag stets simultan über alle Stellen erfolgen, was einen Kompromiss zwischen der Kraftereinwirkung der Einstellrasterung und dem Drehimpuls bei der Einstellung erfordert. Eine gegen Überschleudern sichere Einstellrasterung erschwert den Simultanübertrag über alle Stellen oder verhindert ihn sogar - selbst bei den Addometern, die 1928 auf den Markt kamen, war das noch der Fall. (Man erkennt dieses Dilemma am Tübinger Modell auch an einem anderen Detail: Man fertigte dort die Einstellscheiben als Griffräder, obwohl aus Schickards Zeichnungen und Notizen ziemlich eindeutig hervorgeht, dass die Einstellscheiben bündig in die Vorderseite eingelassen waren und die Einstellung per Stift erfolgte. Nun ist die Drehkraft eines Stifts im Gegensatz zur Hand wesentlich geringer, und ich behaupte, ohne die Tübinger Rekonstruktion je benutzt zu haben, dass ein Übertrag über mehr als drei Stellen per Stift nicht möglich ist. Den Fotos nach besitzen die Tübinger Einstellräder ohnehin nur ein Loch (die übrigen Stellen sind nur angebohrt), damit ist ein Stift obsolet.

Erst die Fertigung mittels genauester Spritzguss- oder Stanzteile brachte den gewünschten Erfolg, und das dauerte bis zur Mitte des letzten Jahrhunderts. Eine Ausnahme war der 1901 entwickelte Calcumeter, der dem Übertrag einen äußerst geringen Widerstand entgegengesetzte und für mich aus technischer Sicht der beste je gebaute Scheibenaddierer ist. Allerdings schaffte auch er die direkte Subtraktion nicht. (Ausführlich über den Zehnerübertrag bei Scheibenaddierern:

http://www.rema-doc.de/Zehneruebertrag/ten_carry_mechanism.html.)

Es interessierte mich, welchen Kompromiss Schickard fand. Er hatte kein Vorbild, also näherte sich seine Konstruktion von Beginn an und auf geniale Art jener Balance zwischen Größe, Kraftaufwand und Präzision, um die noch Jahrhunderte gerungen wurde und die erst in den - von der Sammlerszene zu unrecht verschmähten - US-Plastikrechnern der fünfziger Jahre wieder auferstand. Tatsächlich ist in manchen dieser kleinen Scheibenaddierern Schickards Lösung fast 1:1 nachvollzogen, ohne dass man je von Schickard gehört hätte.

Allerdings gibt es Einschränkungen. Es bleibt fraglich, ob Schickards "Rechenuhr" auch präzise rechnen konnte, damit ist eine mögliche Fehleranfälligkeit der Konstruktion gemeint, auf die ich noch eingehen werde.

Ich habe zwei Rekonstruktionen gebaut, bei denen ich mich - ohne mich auf die Tübinger Lösung zu beziehen - nur an die Skizzen und Anmerkungen Schickards gehalten habe. Ich habe also von vorn angefangen; der Grund war, dass ich von Beginn an die Tübinger Lösung anzweifelte. Sie erschien mir zu hohe Ansprüche an die Präzision der Zahnräder zu stellen, und die Maßstabsvergrößerung empfand ich eher als geschicktes Mittel, um die dennoch auftretenden Übertragungsprobleme zu verringern. Stattdessen habe ich dort begonnen, wo auch Johann Pfister begann, und ich habe, statt industriell gefertigte Zahnräder zu benutzen, in meiner bescheidenen Hobbywerkstatt mit Säge, Bohrer und Feile gearbeitet. Viel mehr stand damals auch nicht zur Verfügung. Freilich, elektrischen Strom habe ich genutzt, und auch die Achsen habe ich nicht gedreht, sondern vom Baumarkt bezogen.

Der entscheidende Unterschied zur Tübinger Lösung besteht darin, den übertragenden Einzahn als verlängerten Stift anzusehen. Eine der Skizzen Schickards veranlasste mich dazu. Damit war es möglich, die wesentlichen Präzisionsprobleme zu vermeiden. Dieser verlängerte Einzahn erlaubt es, die übrigen Bauteile in vernünftigem Maßstab zu halten - das Addierwerk lässt sich dann etwa 30 bis 35 cm breit bauen, je nach Größe der übrigen Zahnräder.

(Übrigens: Genau genommen verwendet auch die Tübinger Lösung einen leicht verlängerten Einzahn. Die Verlängerung entsteht durch eine Verschiebung des Maßstabs, denn durch die Zahnverkürzung sind die "verstümmelten" Zahnräder im Verhältnis zum Einzahn kleiner. Doch erfordert diese minimale "Verlängerung" noch zu viel Präzision.

Nehmen wir uns die Originalquellen vor und beschäftigen uns mit Anmerkungen Schickards (Verbesserungswünsche für seinen Mechaniker, Johann Pfister), ohne die keine Rekonstruktion möglich ist:

"Rechen Uhr betreffs.

1. Die zän seind gar vngleich und vnfleißig. Drumb treibts bißweil mehr als den zehenden theil, bißweilen minder. (were besser 20 zän) .

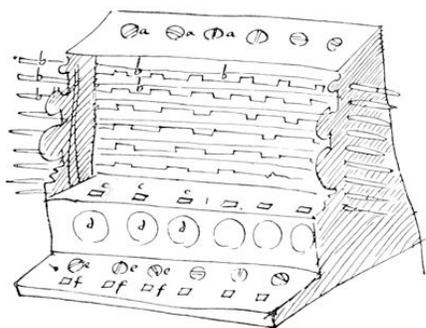
[Dies ist ein wesentlicher Hinweis. Eine mangelhafte Fertigungsgenauigkeit der Zahnräder bzw. ungenaue Positionierung des Einzahns können derartige Fehlresultate nur dann erbringen, wenn Schickard keine Einstellrasterung verwendete. Meine Versuche haben ergeben, dass ein genügend langer Einzahn durchaus einen vollständigen Zehnerübertrag schaffen kann, doch setzt dies ein sehr langsames Drehen voraus, um ohne Einstellrasterung nicht zu überschleudern. Schickard schlägt stattdessen eine Erhöhung der Zahnzahl vor, um die Fehler des Flankenspiels der Zahnräder zu verringern. Wir finden auch tatsächlich weder in den Notizen noch in den Skizzen, einen Hinweis auf eine Einstellrasterung. Ich vermute jedoch, dass sie im Laufe der Verbesserungsversuche eingeführt wurde, und zwar als "verstümmelte" Zahnräder. Dazu später mehr.]

2. die vordere glatte scheinlin excentrisch, tregt auch etwas aus, sollten dran geträht worden sein

[Liegen die Einstellscheiben vor dem Gehäuse und dreht man per Hand, fällt eine leichte Exzentrik der Scheiben nicht auf. Dies ist ein weiterer Hinweis darauf, dass die Scheiben bündig mit der Gehäusefront waren, denn eine unrunde Drehung innerhalb der Aussparungen fällt durchaus auf.]

3. Die einzehte zän sollen nit in die mitt zwischen zween andere: sonder just auff ain ordinarij zahn kommen, denn sonst treibt es zweymal an einer ziffer. (...)"

[Daraus lässt sich interpretieren, dass der Einzahn als Einzelteil gebaut wurde. Wichtiger ist jedoch, dass ein fehlerhafter Übertrag, also von mehr als einer Stelle, nur mit einem langen Einzahn möglich ist, auch das habe ich getestet.]



An anderer Stelle schreibt Schickard an Kepler (aus dem Lateinischen übersetzt):

"Das Rechenggerät werde ich ein andermal genauer zeichnen, jetzt nimm in Eile mit folgendem vorlieb: aaa sind die Köpfcchen senkrechter Zylinder, denen die Multiplikationen der Stellen einbeschrieben sind, die, soweit sie benötigt

werden, durch die beweglichen Fenster *bbb* heraus schauen. *ddd* haben innen befestigte zehnzählige Rädchen, die so zusammengefügt sind, daß wenn irgendein rechtes sich zehnmal bewegt, das nächste linke einmal, oder wenn jenes 100 Umdrehungen macht, das dritte einmal usw. bewegt wird. Und zwar in derselben Richtung; damit ich das erreichte, bedurfte es eines ganz ähnlichen Zwischenrades *h*. [Randnote zur Zeichnung:] Jedes Zwischenrad bewegt alle linken im geforderten Verhältnis, aber kein rechtes, was besondere Vorsichtsmaßregeln nötig machte. [Ende] Die jeweilige Zahl schaut durch die Öffnungen *ccc* in der mittleren Bank heraus. Auf der unteren Ebene schließlich bedeutet *e* Wirbel und *f* in ähnlicher Weise Öffnungen zur Darstellung von Zahlen, die während der Rechnung gebraucht werden. Aber das lässt sich so Hals über Kopf nicht schreiben; leichter wirst du es mit eignen Augen erkennen. Ich hatte auch für dich schon ein Exemplar bei unserem Johann Pfister machen lassen, aber das ist halbfertig zusammen mit einigen anderen Sachen von mir, besonders einigen Kupfertafeln, bei einer plötzlich in der Nacht dort ausgebrochenen Feuersbrunst vorgestern verbrannt."



Beigefügt war neben der obigen, bekannten Zeichnung diese Randskizze. Wir sehen drei Zahnräder, wobei die beiden oberen auf jeweils einer Einstellachse zu denken sind. Das untere ist das Zwischenrad, das die Drehrichtung der oberen Achsen gleichsinnig erhält sowie jenen, über den Zahnkranz hinausragenden, Einzahn trägt, den ich oben bereits erwähnte und der das entscheidende Konstruktionsmerkmal darstellt.

Außerdem schrieb Schickard an Kepler:

"Ferner habe ich dasselbe, was du rechnerisch machst, kürzlich mechanisch versucht und eine Maschine konstruiert, die aus 11 vollständigen und 6 verstümmelten Rädchen besteht und mit gegebenen Zahlen sofort selbsttätig rechnet, sie addiert, subtrahiert, multipliziert und dividiert. Du würdest hell auflachen, wenn du hier wärest und sehen könntest, wie sie die linken Stellen bei Überschreitung des Zehners oder Hunderters von selbst erhöht oder bei der Subtraktion ihnen etwas fortnimmt."

Dieser Abschnitt bereitet einiges Kopfzerbrechen. Die sechs Stellen der Maschine bedeuten sechs Zahnräder auf den Einstellachsen, dazu fünf Zwischenräder, macht elf. Wo jedoch die sechs "verstümmelten Rädchen" unterbringen? Sie wurden in Tübingen als fünf Zahnräder mit verkürzten Zähnen gedeutet, die den Übertragsimpuls des rechts benachbarten Einzahns aufnahmen. Um auf die Zahl sechs zu kommen, schlussfolgerte man, dass mit dem sechsten ein zusätzlicher Einzahn gemeint sein müsse, der eine Überlaufglocke anschlägt.

Das mag zwar sinnvoll erscheinen, andererseits besteht die Möglichkeit, dass hier etwas hineininterpretiert wurde, um Schickards Zahlenangaben mit der eigenen Rekonstruktionsidee in Übereinstimmung zu bringen. Genau so gut ist es möglich, dass kleine Zahnräder gemeint sind, die als Einstellraster dienten. Wie sie genau aussahen, bleibt fraglich, möglicherweise waren die Zähne stark verkürzt. Auch das ist freilich eine Annahme, doch wird die Zahl sechs damit etwas plausibler erklärbar.

Seit der ersten Rekonstruktion der "Rechenuhr" setzte man wie selbstverständlich voraus, dass Schickard eine Einstellrasterung verwendete, man nahm weichen Federstahl mit aufgesetzten, halbrunden Endstücken, die - je nach Rekonstruktionsversuch -, in die Zahnräder der Einstellachsen oder die Zwischenräder griffen. Es ist wichtig, anzumerken, dass Rekonstruktionen nach dem Tübinger Modell Einstellrasterungen *notwendig brauchen*, um ein Hakeln oder Blockieren zu vermeiden. Dies hat Schickard jedoch an seiner ersten Maschine nie bemängelt, doch einerlei: Sei es um die Genauigkeit der Anzeige zu erhöhen oder um das Hakeln zu vermeiden, eine Rasterung wäre Schickard sicher früher oder später eingefallen. Doch weicher Federstahl (nicht

geschmiedet)? Wurde der damals schon hergestellt und für solche Präzisionszwecke verwendet?

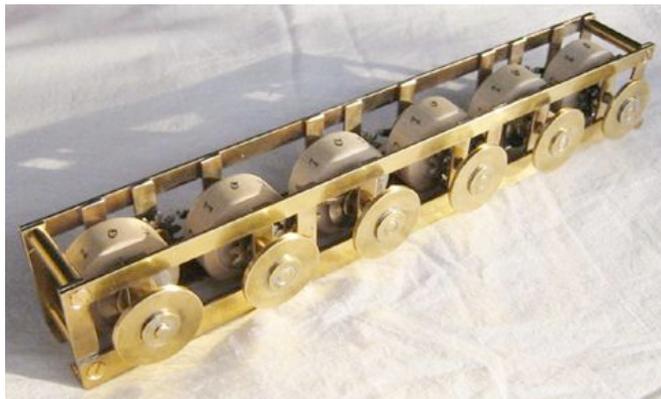
Meine Überlegungen und Versuche führten nun zu einer Konstruktion, die einige Unterschiede gegenüber der Tübinger Lösung aufweist.

1. Es werden Zahnräder verwendet, die auch am einfachen Werk Tisch - wie im 17. Jahrh. - mit Säge und Feile herzustellen sind. Die notwendigerweise auftretenden Ungenauigkeiten im Bereich bis zu 1 mm werden in Kauf genommen und müssen durch den Übertragungsweg ausgeglichen werden.
2. Die Verwendung eines langen Einzahns als separatem Bauteil reduziert die Zahl der notwendigen Zahnräder auf die erforderliche Zahl von elf. Er wird auf die Zwischenachse positioniert.
3. Die weiteren sechs, von Schickard erwähnten" Zahnräder, dienen nunmehr einer Einstellrasterung mit Gewichtsklinken, wie man sie von der Pascaline her kennt.
4. Da eine Einstellrasterung zum Hauptzweck hat, die Position des Einzahns vor und nach dem Übertrag zu fixieren, kann sie auf die Zwischenradachse verlegt werden.
5. Die Einstellscheibe wird bündig mit der Gehäusevorderseite gefertigt. Nur so sind die Zahlen stets sichtbar, damit bei der Einstellung der Stift bei der gewünschten Zahl stoppen kann. Wir können nicht davon ausgehen, dass Schickard nach Gehör, also mit Hilfe einer hörbaren Einstellrasterung einstellte.

Mit all diesen Überlegungen gewappnet habe ich ein Funktionsmodell gebaut, zwar nicht über 6 Stellen hinweg, sondern nur für zwei Stellen - die erste und die letzte. Die Planung und Anfertigung aller Teile per Hand, selbst unter Verwendung einer elektrischen Bandsäge, dauerte mehr als 150 Stunden. Viele Teile wurden mehrfach gefertigt, und auch die fertigen immer wieder leicht verändert und neu angepasst. Allerdings bin ich nur ein Hobbymechaniker ohne besondere Vorkenntnisse oder Werkzeuge. Für einen heutigen Feinmechaniker ist der Bau eines solchen Funktionsmodells sicher eine leichte Aufgabe, doch ich sehe es als Vorteil an und auch als kleine Würdigung von Johann Pfister, dass ich vor derselben Aufgabe saß wie er: einer neuen Idee Gestalt zu verleihen - und ohne High-Tech-Möglichkeiten.

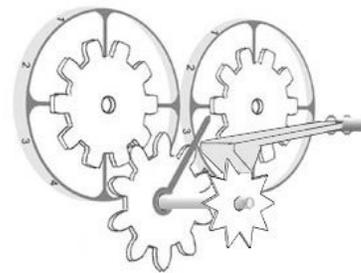
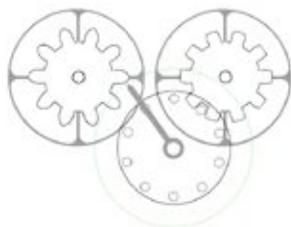
Es war spannend und auch mühsam, denn es gab keinerlei Maßvorgaben. Wie groß war das Original? Da die Zahnräder wegen der unweigerlichen Intoleranzen nicht zu klein sein durften, entschloss ich mich zu einem Zahnraddurchmesser von mindestens 35 mm. Als Ausgangsmaß richtete ich mich nach dem vorhandenen Material: Ich wählte einfach den 5 mm-Bohrer aus meiner Werkzeugkiste, um die "Zahnlöcher auszubohren. Alle anderen Maße folgen zwangsläufig aus dieser einen Größe!

Zuvor noch ein Hinweis auf einen Vorläufer. Die Grundidee des verlängerten Einzahn entwickelte ich schon früher, doch hatte ich keine großen Zahnräder zur Verfügung. Damals dachte ich noch, die Einstellung erfolge per Drehung mit der Hand, was einigen Zwischenraum zwischen den Einstellscheiben erfordert. Bei diesen Vorgaben war nur eine lineare Anordnung der Achsen möglich, wie es in vielen Rekonstruktionsmodellen zu finden ist. Wegen des Resultatrades war eine durchgehende Zwischenradachse nicht möglich, hängte ich es kurzerhand einseitig auf. Hier zwei Fotos:



Auf meiner Homepage (www.rema-doc.de) sind die Überlegungen, die von dem Tübinger Modell über meinen ersten, "linearen" Versuch zur nächsten Skizze führten, eingehend beschrieben. Man erkennt rechts die drei Zahnräder in der von Schickard skizzierten Anordnung, den Einzahn auf dem Zwischenrad sowie eine Gewichtsklinke, die in ein "verstümmeltes" Zahnrad einrastet.

Das zweite Modell, das ich jetzt vorstellen möchte, entspricht der rechten Skizze weitgehend, bis auf das Zwischenrad. Dessen Zähne habe ich umgebogen (Schickard: "ganz ähnliches Zwischenrad"), denn das Rad ist nur passiv, und umgebogene Zähne erlauben mehr seitliches Spiel im Übertragungsweg als zwei Stirnräder. Man könnte man an Stelle der gebogenen Zähne auch kleine Bolzen aufsetzen, wie es einem Triebstockrad entspräche (Skizze links). Solch ein Rad hatte ich zuerst angefertigt, doch dann erschienen mir die umgebogenen Zähne einfacher und ergaben einen Gewichtsvorteil.



Bevor ich zu dem Modell im Einzelnen komme, nochmals zum Thema Gewicht: Je höher die Masse der zu bewegenden Teile, desto mehr Kraft muss die Einstellsperre aufbringen, um ein Überschleudern zu vermeiden (das einfache Prinzip der Massenträgheit). Je stärker jedoch die Einstellsperre ist, desto schwerer ist der Simultanübertrag über mehrere Stellen zu bewerkstelligen, da sich die Kräfte der zu überwindenden Einstellrasterung addieren. Eines der wichtigsten Gebote war es also, Masse einzusparen, um den Simultanübertrag zu erleichtern. Das erklärt auch den filigranen Stil der Resultaträder. Zum Gewicht zählt bei der üblichen Rekonstruktion auch die Federkraft der Einstellrasterung; bei meinem Modell sind es die Gewichtsklinken. Hatte eine Feder meines ersten Modells eine Kraft von etwa 50 g. (zusammen also 300 g.), so genügen bei dem hier vorgestellten Modell Gewichtsklinken von 15 g Druck (insgesamt 90 g.). Da Gewichtsklinken gerne "springen" und so ein Überschleudern verursachen, muss man die "Sprunghöhe" durch eine einfache Sicherung begrenzen.

Dennoch ist ein Überschleudern nie vollständig auszuschließen, da die Masse der sich bewegenden Metallteile bei großer Geschwindigkeit einen doppelten Rastersprung verursachen kann. Erinnern wir uns, dass auch manche Sprossenradmaschinen vom Beginn des letzten Jahrhunderts mit einer eigenen Überschleuderkorrektur ausgerüstet waren (z.B. Triumphator), also fürchtete man auch hier diese Fehlerquelle. Ich habe jedoch die Einstellräder meines Modells *sehr* schnell gedreht und fand ein Überschleudern erst bei etwa 4 Umdrehungen/sek, was in der Rechenpraxis nicht erreicht wird. Bei der Schickard'schen Maschine wird die Einstellscheibe ja nicht bis zum Anschlag herumgerissen, sondern muss mit Bedacht zur erwünschten Ziffer geführt werden.

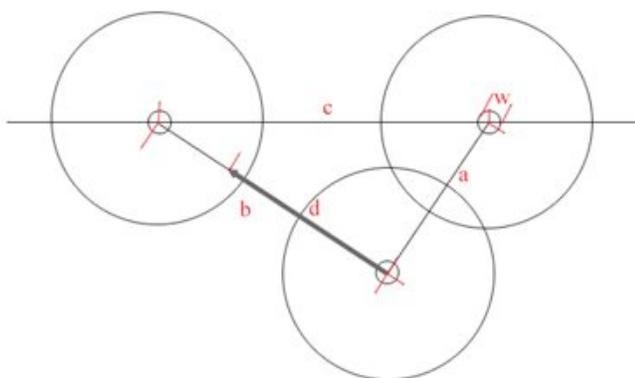
Natürlich ist nicht bekannt, ob Schickard oder Pfister derartiges berücksichtigten, doch früher oder später - mit Einführung einer Einstellrasterung - wäre man sicher auf das Gewichtsproblem gekommen.

Ich möchte kurz auf die technischen Maße der Bauteile eingehen. Es sind alle Größen und Abstände von nur einer Ausgangsgröße abhängig, dem Zahnraddurchmesser bzw. dem Zahnabstand (Bohrergröße) bei gegebener Zahl der Zähne. Alle Maße lassen sich ineinander umrechnen. Die Skizze zeigt die Anordnung der Zahnräder auf den Ecken eines rechtwinkligen Dreiecks - die Anordnung kann nur entweder linear oder rechtwinklig sein:

Beispiel für Zahnräder mit 5 mm Zahndurchmesser bzw. -bohrung und einem Achsendurchmesser (w) von 4 mm. Von vorne gesehen:

Kopfkreisdurchmesser 36,8 mm
Teilkreisdurchmesser 31,8 mm

a Achsabstand 34,3 mm
b Abstand Zwischenrad und
Nachbar-Einstellrad 44 mm
c Abstand Einstellräder 55,8 mm
d max. Einzellänge 29 mm



*Anmerkung: Ich habe diese Angaben im Juli 2012 etwas korrigiert, da sie Fehler enthielt.

Fertigt man von Hand, kann man, um ein wenig Flankenspiel der Zahnräder zu erhalten, den Abstand a und gleichzeitig den Einzellahn um etwa einen halben Millimeter vergrößern. Alternativ feilt man die Zähne um ein paar zehntel Millimeter schmäler.

Ferner kann man, um die Einzellänge um einen Millimeter zu erhöhen, die Einstellachse an dem (immer gleichen) Punkt um einen Millimeter ausfeilen, an dem der Einzellahn ihr vorbei gleitet.

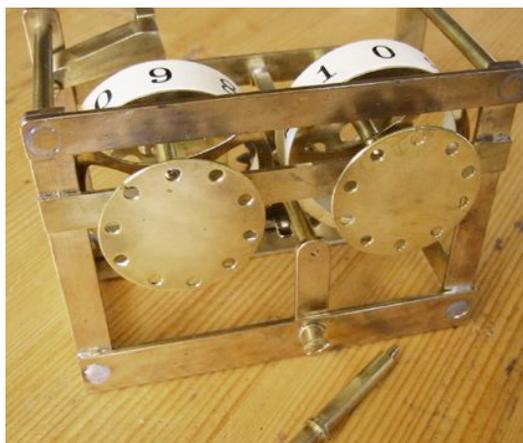
Solange man von Hand fertigt, sind die Maße also etwas "weich", das sogar notwendigerweise. Man tut gut daran, den Abstand c sowie die Rechtwinkligkeit bis auf 1 mm genau einzuhalten. Dazu kann man die Aufhängung des Zwischenrades leicht verschiebbar gestalten, die Fotos zeigen das. Das Gleiche gilt für die Gewichtsklinken, die ja die Position des Einzellahns exakt einstellen lassen. Diese beiden Regulationsmöglichkeiten sollte man sich beim Bau vorbehalten!

Hier das Funktionsmodell (bitte beachten: Bei allen Abbildungen gibt es fototechnisch bedingt leichte perspektivische Verzerrungen):



*Auf zwei Stellen reduziert und in ein Sperrholzgehäuse gesteckt. Hinten rechts der Stift, der gleichzeitig die Mechanik gegen das Herausrutschen schützt: **Erinnert etwas an ein Vintage-Radio, nicht wahr? Dabei ist es nur der einzige zweistellige Scheibenaddierer der Welt für Addition und direkte Subtraktion :-)**
Die Außenmaße (BxHxT): 12,5 x 10 x 7,5 cm.*

Aus dem Gehäuse genommen. Ein stabiler, jedoch ohne Werkzeug zerlegbarer Messingrahmen trägt die Mechanik.



*Bei abgenommenem Rückteil des Steckrahmens.
Die beiden Einstellachsen tragen jeweils ein "normales" Zahnrad, darunter ist das Zwischenrad mit umgebogenen Zähnen und dem Einzahn, der nach rechts das benachbarte Zahnrad transportiert.
Im Vordergrund die Raster-Zahnräder. Links auf der Zwischenradachse, rechts - bei der letzten Einstellachse. Die*

Rasterklinken sind auf dem abgenommenen Rahmenteil montiert - siehe nächstes Foto. Die Perspektive verzerrt, die Zahnräder greifen dichter ineinander.

Eine der Klinken rastert die Position des Zwischenrads. Die zweite (rechts oben) rastert die letzte Einstellachse - hier die zweite Achse, bei einem vollständigen Modell wäre es die Achse Nr. 6. Man erkennt die Sicherungen, die das "Springen" der Klinken verhindern.

Die massive Klinke der letzten (hier zweiten) Einstellachse ist schwerer gefertigt und damit sicherer gegen Überschleudern. Die andere Klinke (erste Einstellachse) ist leichter gebaut, dafür länger. Ob sie ebenso gut gegen das Überschleudern sichert

wie die massive Ausführung, muss an einem vollständigen, mehr als zweistelligen Modell getestet werden. In einem vorläufigen Versuch habe ich auf die erste, leichte Klinke (links) das sechsfache Gewicht der massiven Variante gelegt (also 90 g), um einen gleichzeitigen Übertrag über alle Stellen zu simulieren. Der Übertrag konnte ohne Probleme per Stift ausgeführt werden.



Der Blick von oben zeigt die gegeneinander versetzten Ebenen der Zahnräder. Eine Fortsetzung der Achsenreihe nach links (auf dem Foto nach unten) ergäbe als nächstes eine Zwischenachse mit Zwischenrad, dessen Zähne in die entgegengesetzte Richtung (auf dem Foto nach unten) zeigen, der Einzahn wäre entsprechend oben montiert. Auf diese Weise würde man alternierend fortfahren.





Von unten gesehen. Man erkennt hier, dass auf der Zwischenradachse die Zähne beider Zahnräder um 18° versetzt sind.

Das Modell ist gesteckt und - bis auf die Rahmenteile - vollständig zerlegbar:



Der Abstand vom Einzahn zum nächsten Zahnrad beträgt unmittelbar vor und nach dem Übertrag etwa einen Millimeter - mehr ist bei diesen Größenverhältnissen nicht möglich, es ist jedoch völlig ausreichend.

Die kleinen Zahnräder der Einstellrasterung habe ich zugegebenermaßen nicht, wie die anderen Teile, selbst ausgesägt. Sie stammen aus dem Resultatwerk einer Sprossenradmaschine (Orga), wo sie denselben Dienst versahen. Im Schickard'schen Original waren sie möglicherweise mit geraden Zahnflanken gearbeitet. (Gerade Zahnflanken erhöhen zwar die Reibung, bieten jedoch dadurch auch besseren Schutz gegen Überschleudern - das gleiche Wechselspiel wie beim Gewicht der Teile).

Zum Schluss noch einmal die Frage: Wozu der Aufwand?

Dass man heutzutage ein per Einzahn-Übertrag funktionierendes Addierwerk für Addition *und* Subtraktion bauen kann, muss nicht erneut bewiesen werden. Das haben verschiedene USA-Scheibenaddierer längst gezeigt. Hierzu wurden jedoch präzise, industriell gefertigte Zahnräder verwendet, und damit ist das Ganze kein besonderes Problem. Auch die Tübinger Rekonstruktion verwendete solche praktisch toleranzfreien Werkstücke, ebenso wie alle anderen "Replicas", die ich kenne. Man nahm einfach Zahnräder aus Sprossenradmaschinen, bei meiner ersten Rekonstruktion habe ich das nicht anders gemacht.

Die Fragen, die ich mir stellte, war, 1. ob die Handarbeit des 17. Jahrhunderts das ebenfalls leisten konnte, und 2., wie man sich den Schickard'schen Skizzen und Anmerkungen besser annähern kann als bei dem Modell aus Tübingen.

Die Zahnräder, die ich aus Blech aussägte, weisen Intoleranzen im Bereich von ca. einem halben bis einem Millimeter auf, das habe ich nachträglich vermessen und bewusst in Kauf genommen - Johann Pfister hat wahrscheinlich nicht genauer gebaut. *Dennoch war es möglich, das Schickard'sche Addierwerk funktionstüchtig und nur aus Schickards Notizen zu rekonstruieren, wobei ich mir außerdem sicher bin, dass meine Lösung dem Original näher kommt als jene aus Tübingen und den entsprechenden Nachbauten.*

Offen bleibt die Frage, ob und wie Schickard eine Einstellrasterung verwendete. Eine fehlerfreie Bedienung des Werkes erfordert diese Absicherung gegen das Überschleudern und Verhakeln von Einzahn und Zahnrad. Schickard baute später kein zweites Werk, was dafür spricht, dass er letztlich mit dessen Arbeitsweise nicht zufrieden war. Bedenkt man, wie wertvoll eine mechanische Rechenhilfe bereits damals war (man vergleiche mit den Jahre langen Bemühungen von Pascal und Leibniz), hätte ein erfolgreiches Modell sicher zu weiteren Nachbauten geführt.

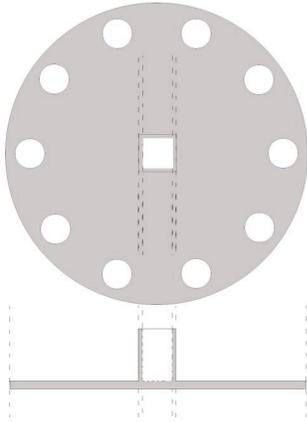
Meine Rekonstruktion zeigt jedenfalls, dass es bereits damals möglich gewesen ist. Doch wären "echte" Rechenmaschinen mit 10 bis 16 Stellen riesig geworden, denn jede Stelle verbreitert das Werk um mindestens 6 bis 7 cm, wenn man einmal die Maße meiner Rekonstruktion voraussetzt - bei dem Tübinger Modell wäre es noch einiges mehr. Hätte man hingegen kleiner gebaut, hätten die Fertigungsungenauigkeiten sicher zu Dysfunktionen geführt. Die Maschine wäre nicht nur unhandlich, sondern auch schwer ablesbar geworden. Außerdem wäre schnell die Grenze dessen erreicht, was per Stift an Kraft für den Simultanübertrag aufzubringen wäre. Ich vermute, dass diese beiden Variablen - zu groß und zu schwerer Simultanübertrag - dazu führten, dass die alltagstaugliche Verwirklichung von Schickard's Idee noch mehr als 300 Jahre warten musste. Die Idee war seiner Zeit zu weit voraus.

Es wäre gut, ein vollständiges Werk mit sechs Stellen zu bauen, doch ist mit dem zweistelligen Modell die Grenze meiner Hobbybastlerenergie erreicht. Es wären einige Verbesserungen zu überlegen, zum Beispiel Vierkantachsen als Verdrehungssperre (Passfedernuten gab es damals sicher nicht), die Zahnradspeichen sollte man filigraner arbeiten und nicht nur Löcher bohren, die Einstellscheiben dünner fertigen (vielleicht waren sie im Original sogar aus Holz) und ein paar Kleinigkeiten mehr. Vielleicht findet sich eine Werkstatt mit besseren Möglichkeiten als sie mein bescheidener Werk Tisch bietet.

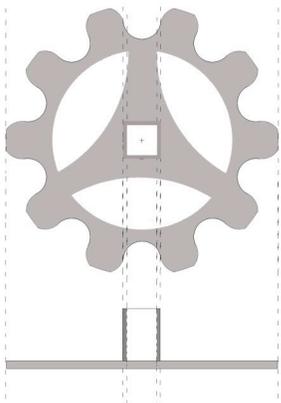
© Detlev Bölter, Heilbronn, Juli 2007

ANHANG:

Um zum Nachbau anzuregen, hier noch einige Skizzen. Es sind bereits Vierkant-Achsen vorge-sehen.

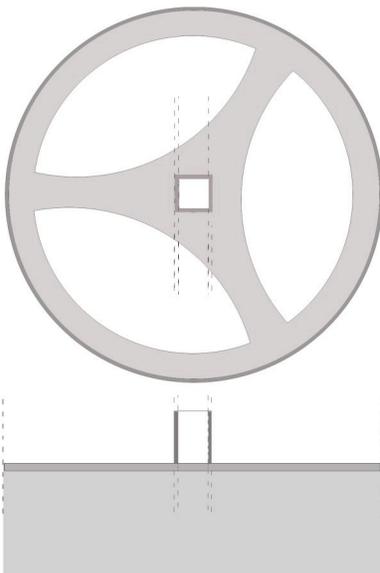
*Einstellrad*

Material : 1 mm (besser 0,6 mm) Messingblech oder Hartholz
 Außen $\varnothing = 39$ mm
 Modul: 3,07
 Loch $\varnothing = 3$ oder 4 mm
 Vierkantachse: 4 mm
 Länge der Vierkanthülse = 7 mm

*Zahnrad (Einstellachse und Zwischenrad)*

Material : 1 mm Messingblech
 Kopfkreis $\varnothing = 36,8$ mm, Zähne auf 35,5 mm abgefeilt
 Teilkreis $\varnothing = 31,8$
 Vierkantachse: 4 mm
 Länge der Vierkanthülse = 7 mm
 Die Zahnflanken können etwas begradigt werden.

Für das Zwischenrad werden die Zähne in Höhe des Teilkreises um 90° umgebogen. Das auf der Zwischenradachse aufsitzende kleine Zahnrad für die Rasterung wird in der Zahnform der Gewichtsklinke angepasst. Die Achsaussparung für das Rasterrad muss um 18° gedreht werden! (Zahn auf Zahnücke).

*Resultatrad*

Material des Speichenrades: 0,6 mm Messingblech
 Material der umlaufenden Hülse: 0,5 mm Aluminium
 oder 0,3 mm Weißblech
 Außen $\varnothing = 50$ mm
 Breite der umlaufenden Hülse: 15 - 20 mm

Vierkantachse: 4 mm
 Länge der Vierkanthülse = 7 mm