Nürnberger Saitendraht, die Besaitungspläne des Claas Douwes und die Besaitung von Virginalen der Ruckers

Klaus Scholl

Nürnberg war bereits seit dem 14. Jahrundert ein Zentrum des Drahtziehgewerbes, von dem aus Draht in alle europäischen Länder exportiert wurde, und dort waren bis in die Mitte des 18. Jahrhunderts 12 Saitendrahtnummern üblich, ergänzt durch die Nummern 0, 00 und 000 für Saiten, die dicker waren als die zunächst stärkste Nummer 1.[1]

Im Jahre 1699 veröffentlichte Claas Douwes sein Buch „Grondig ondersoek von de Toonen der Musijk“ [1] . Die darin enthaltenen Besaitungspläne[2] gehen ebenfalls von 12 Drahtnummern aus, so daß die Annahme naheliegt, daß der von ihm verwendete Saitendraht aus Nürnberg stammte.

Douwes' Besaitungspläne galten offensichtlich nur für Virginale, denn bei ihm ist nie die Rede von 4'-Registern, die ein Merkmal fast aller im 17. Jahrhundert in Flandern und den nördlichen Niederlanden gebauten Cembali sind.[3]

Wesentliche Fragen sind jedoch noch offen:

- Nach welchem Faktor waren die Durchmesser der 12 Saitendrahtnummern abgestuft und von welchem absoluten Drahtdurchmesser ging diese Abstufung aus?[4]
- Sind Douwes Besaitungspläne auf Virginale der Ruckers anwendbar?

In diesem Artikel wird versucht, auf diese Fragen Antworten zu geben. Daß Antworten zu einem großen Teil hypothetisch bleiben, liegt in der Natur der Sache. Hypothese bedeutet jedoch nicht Spekulation, denn jede Hypothese will untermauert sein.

Nürnberger Saitendraht bis zum 17. Jahrhundert

Schriftliche Quellen über die Grundmaße des in Nürnberg hergestellten Saitendrahts gibt es nicht. Zum Zwecke der Geheimhaltung gehörten nämlich die „Scheibenzieher“ – so nannte man die Zieher von Saitendraht im Unterschied zu den Gold- und Silberdrahtziehern und den Ziehern von grobem Draht – zu den „gesperrten Handwerken“, deren Mitglieder die Stadt nur mit ausdrücklicher Erlaubnis verlassen und deren Gesellen nicht wandern durften. „Kennzeichen gesperrter Handwerke ist die Schriftlosigkeit ihres technologischen Wissens.“ [4] Wir müssen daher mit weniger eindeutigen Quellen vorlieb nehmen, aus denen man jedoch plausible Hypothesen entwickeln kann.

Zieheisen und „Zängelmaß“

Erste Hinweise können [4] entnommen werden: dort sind ein Bronze-Epithaph von 1575 sowie ein Totenschild der Scheibenzieher aus dem 17. Jahrhundert abgebildet. Darauf ist das von den Nürnberger Scheibenziehern verwendete Zieheisen deutlich zu erkennen: es hatte vier vertikale Reihen von Löchern, die von unten nach oben im Durchmesser zunehmen; die vertikalen Reihen hatten jeweils 14 bzw. 16 Löcher.

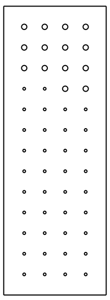

Abb. 1: Nürnberger Zieheisen - ungefähre Darstellung

(Darstellung von nur zwei Lochgrößen durch das Textsatzprogramm LaTeX bedingt)

Weitere Hinweis sind eine in [5] zitierte Quelle von 1781, die das *Zängelmaß* beschreibt, sowie zwei ebenfalls in [5] veröffentlichte Zeichnungen von *Zängelmaßen* aus den Jahren 1761 und 1769, die prinzipiell wie Abb. 2 aussahen.

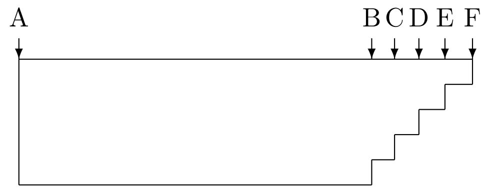

Abb. 2: Zängelmaß (Schemazeichnung)

Wenn wir *Zängelmaß* mit dem Zieheisen vergleichen, so wird deutlich daß die vier Stufen des *Zängelmaßes* offenbar den vier vertikalen Reihen des Zieheisens entsprachen.

Wir können annehmen, daß wuchsen die vier Stufen des *Zängelmaßes* geometrisch wuchsen:

$$\frac{\overline{AC}}{\overline{AB}} = \frac{\overline{AD}}{\overline{AC}} = \frac{\overline{AE}}{\overline{AD}} = \frac{\overline{AF}}{\overline{AE}} = \left(\frac{\overline{AF}}{\overline{AB}}\right)^{\frac{1}{4}}$$

Man maß mit dem *Zängelmaß* an dem zu ziehenden Draht ein Stück der Länge $\overline{AB}$ ab, zog dieses Drahtstück durch ein Loch des Zieheisens und maß anschließend am *Zängelmaß*, wie weit es sich durch den Ziehvorgang verlängert hatte. Wenn es nunmehr die Länge $\overline{AC}$ hatte, so hatte sich der Drahtdurchmesser d im Verhältnis

$$\sqrt{\frac{\overline{AB}}{\overline{AC}}} = \left(\frac{\overline{AB}}{\overline{AF}}\right)^{\frac{1}{8}}$$

verringert, denn die Verkleinerungsfaktoren für die Durchmesser sind die Wurzeln der Kehrwerte der Verlängerungsfaktoren.[5]

Eine Verlängerung um den Faktor $\overline{AF}/\overline{AB}$ wird hier eine *ganze Verlängerungsstufe* genannt. Das *Zängelmaß* ist somit in vier *Viertelstufen* unterteilt.

Mit Hilfe des *Zängelmaßes* wurden offenbar die Löcher des Zieheisens kontrolliert. Offenbar waren sie Idealfall so bemessen, daß beim Ziehen durch das horizontal nächstliegende Loch genau eine *Viertelstufe* am *Zängelmaß* gemessen wurde, beim Ziehen durch das vertikal nächstliegende Loch genau eine *ganze Verlängerungsstufe*.

Tatsächlich konnte man die Löcher mit der dafür erforderlichen Genauigkeit weder herstellen noch nacharbeiten. (Beim Ziehen erweiterte sich das Loch unweigerlich.) Toleranzen mußten in Kauf genommen werden, um zu einem angemessenen Verhältnis von Präzisionsaufwand zu finanziellem Ertrag zu kommen. Die Behauptung, die alten Nürnberger Drahtzieher hätten Saitendraht auf Tausendstelmillimeter genau hergestellt [5], ist abwegig.

Die Maßverhältnisse am *Zängelmaß*

Um das Nürnberer *Zängelmaß* zu rekonstruieren, muß man noch das Verhältnis zwischen seiner längsten und kürzesten Seite kennnen. In einer Zeichnung von 1761 (siehe [5]) beträgt dieses Verhältnis 9 : 7. Die besondere mathematische Eigenschaft dieses Verhältnisses kann man leicht erkennen, wenn man sich daran erinnert, daß 12 Saitendrahtnummern 11 Verlängerungen des Drahts der Nr. 1 bedeuten. Man braucht also nur nach der 11. Wurzel einer Zahl zu suchen.

Der Bruch $^9/_7$ beinhaltet tatsächlich eine solche 11. Wurzel:

$$\frac{9}{7} \simeq 2^{\frac{4}{11}} = \frac{9,0067}{7}$$

Eine *Viertelstufe* am *Zängelmaß* entsprach also einer Verlängerung des Drahtes um den Faktor $2^{\frac{1}{11}}$ und einer Verringerung seines Durchmessers um den Faktor $2^{-\frac{1}{22}}$.

Mit dem Längenverhältnis $\overline{AF} : \overline{AB} = 9 : 7$ konnten die übrigen Stufen des *Zängelmaßes* sehr einfach auf geometrischem Wege (Höhensatz der euklidischen Geometrie) ermittelt werden ($\overline{AD} = \sqrt{\overline{AF} \times \overline{AB}}$ etc.) oder mit der Approximation

$$2^{\frac{1}{11}} = \frac{15,976}{15} \approx \frac{16}{15}$$

berechnet werden.

Die Frage ist natürlich: Hatte man im 15. oder 16. Jahrhundert bereits die mathematischen Fähigkeiten, um zu entdecken, daß $\frac{9}{7} \simeq 2^{\frac{4}{11}}$? Sicherlich ja, denn man kannte auch bereits die Approximation 18/17 für die 12. Wurzel aus 2, nach der die Plazierung der Bünde auf dem Griffbrett der Laute berechnet wurde (siehe [7], S. 327 ff). Man hatte also bereits Erfahrungen mit der Berechnung von vielfachen Wurzeln aus der Zahl 2, und zwar ohne Logarithmenrechnung, die erst im Jahre 1614 entdeckt wurde und angesichts des neuerungsfeindlichen Zunftwesens wohl kaum vor der Mitte des 18. Jahrhunderts Eingang in das Drahtzuggewerbe fand.

Die durch die Approximation $^9/_7$ anstelle von $^{9{,}0067}/_7$ entstehenden Fehler sind unterhalb der Fertigungstoleranzen und auch in der Potenzierung vernachlässigbar: In der 11. Potenz – entsprechend der Spanne zwischen den Drahtnummern 1 und 12 – betrüge der Längenfehler nur 0,8 %, der Durchmesserfehler nur 0,4 %.

Die Hypothese , daß die erwähnte Zeichnung von 1761 maßstäblich ist, erscheint angesichts der besonders einfachen mathematischen Eigenschaften des $^9/_7$-*Zängelmaßes* erlaubt.

Das 12-stufige Drahtnummernsystem

Das auf der Maßzahl $^9/_7$ beruhende 12-stufige Drahtnummernsystem (die Grundstufe Nr. 1 und 11 Verlängerungsstufen 2 bis 12) hatte mehrere mathematisch einfache und praktische Eigenschaften:

- Der Draht Nr. 12, zu dem man vom Draht Nr. 1 ausgehend in 11 *ganzen Verlängerungsstufen* (= 44 *Viertelstufen*) des *Zängelmaßes* gelangte, war 16 mal so lang wie der Draht Nr. 1 und sein Durchmesser hatte sich auf ein Viertel reduziert.
- Nach jeweils elf *Viertelstufen* hatte man eine einfache Kontrollmöglichkeit: dann mußte sich die Drahtlänge verdoppelt haben.
- Das Verhältnis der Materialdichten von Rotmessing (rm) und Stahl (st) paßt in dieses System, wie im folgenden näher erläutert wird.

Wenn man annimmt, daß der für den Draht verwendete Stahl (mit geringem Kohlenstoffgehalt) eine Dichte von $7,8\,\mathrm{g/cm^3}$ hatte, so erhält man mit der Formel

$$\frac{d_{rm}}{d_{st}} = \sqrt{\frac{\varrho_{st}}{\varrho_{rm}}} = 2^{-\frac{1}{11}} \qquad \rightarrow \qquad \frac{\varrho_{rm}}{\varrho_{st}} = 2^{\frac{2}{11}}$$

(d = Drahtdurchmesser und ϱ = Materialdichte) für die Dichte von Rotmessing (Kupferlegierung mit geringem Zinkanteil) $8,85\,\mathrm{g/cm^3}$ ($7.8 \times 2^{\frac{2}{11}} = 8.85$), was realistisch ist.

Wir können annehmen, daß diese Tatsache von den Nürnberger Drahtziehern praktisch genutzt wurde:

- Für Stahl- und Rotmessingdraht wurde das gleiche *Zängelmaß* benutzt.
- Rollen von Stahl- und Rotmessingdraht gleichen Gewichts und gleicher Drahtlänge erhielten die gleiche Drahtnummer [5], die Drahtdurchmesser unterschieden sich jedoch entsprechend den unterschiedlichen Materialdichten um den Faktor $2^{-\frac{1}{11}}$, d. h. die Durchmesser von Messingdraht waren um eine - damals noch nicht gebräuchliche – *halbe Saitendrahtnummer* kleiner als diejenigen von Stahldraht.
- Die Enddurchmesser von Eisendraht wurden vermutlich mit der ersten vertikalen Lochreihe und diejenigen von Rotmessingdraht mit der dritten vertikalen Lochreihe des *gleichen* Zieheisens gezogen. Eigene Zieheisen für die verschiedenen Saitendrahtsorten erübrigten sich also.

Während das Verhältnis der Dichte von Stahl und Rotmessing perfekt auf das $^9/_7$-*Zängelmaß* paßt, ist die Dichte von Gelbmessing (ca. $8,5\,\mathrm{g/cm^3}$) nicht im Zahlensystem dieses *Zängelmaßes* unterzubringen.

Eine in [5] zitierte Quelle aus dem Jahre 1855 (so lange hielt sich offenbar eine Jahrhunderte alte Tradition) zeigt die Lösung dieses Problems auf: „...bei den messingenen ist das Pfund im Durchschnitt 4 Prozent länger“. Offenbar wurde Gelbmessingdraht mit den für Rotmessingdraht gültigen Drahtnummern und -durchmessern hergestellt, eine Rolle war jedoch vier Prozent länger war als eine Rolle von Rotmessing- oder Stahldraht gleichen Gewichts und gleicher Drahtnummer.

Wenn wir wiederum für Stahl eine Dichte von $7,8\,\mathrm{g/cm^3}$ annehmen, so betrüge die Dichte von Rotmessing – wie bereits berechnet – $8,85\,\mathrm{g/cm^3}$ und die von Gelbmessing $8,85/1,04 = 8,51\,\mathrm{g/cm^3}$, was ebenfalls ein realistischer Wert ist.

Berechnungsformeln

Da für alle Saitendrahtsorten (Stahl, Gelb- und Rotmessing) das gleiche Zieheisen verwendet wurde, lassen sich die Drahtdurchmessser d von Stahldraht (st) und von Messingdraht (ms) - gleich ob Rot- oder Gelbmessing - wie folgt berechnen:

$$d_{st} = a \times 2^{\frac{24-2n}{11}}$$

$$d_{ms} = a \times 2^{\frac{23-2n}{11}}$$

wobei mit a der Durchmesser des Stahldrahts der Nr. 12 und mit n die Drahtnummer ($n = 1, 2, \ldots, 12$) bezeichnet wird.

Oder in Worten:

- Saiten gleichen Materials unterschieden sich von einer Drahtnummer zur nächsthöheren im Durchmesser um den Faktor $2^{-\frac{2}{11}} \simeq \sqrt{7/9}$.
- Die Durchmesser von Messingsaiten waren um den Faktor $2^{-\frac{1}{11}}$ kleiner als die von Stahlsaiten der gleichen Drahtnummer.

Die Formeln geben nur über die *relative* Abstufung der Saitendurchmesser Auskunft, da wir den historischen Wert von a nicht kennen. Auch Drahtklinken aus dem 19. Jahrhundert (siehe z. B. [6] S. 33 ff.) können nicht als Belege für die Drahtstärken dienen, die bis zur Mitte des 18. Jahrhunderts für Cembali, Virginale und Spinette gefertigt wurden; denn mit der völligen Verdrängung dieser Instrumente durch das Hammerklavier Ende des 18. Jahrhunderts mußten die Drahtzieher ihre Systeme dem Bedarf an immer stärkeren Klaviersaiten anpassen.

Eine fiktive Saitenstärkentabelle

Um dem Leser eine etwas konkretere Vorstellung von dem 9/7-Maßsystem zu vermitteln, nehmen wir – im Rahmen der Plausibilität – *willkürlich* an, der Durchmesser von Stahldraht der Nr. 12 betrage 0.163 mm. Damit ergeben sich die Drahtdurchmesser gem. Tabelle 1. Für den Stahldraht der Nr. 10 erhält man damit den Durchmesser von 0.21 mm, wie er für die 8'-Diskantsaiten französischer Cembali üblich ist.

Obwohl wir diese Saitenstärkentabelle korrekt als fiktiv bezeichnen, heißt dies nicht, daß sie realitätsfern sei, denn sowohl nach unten als nach oben gibt es Grenzen:

- Die untere Grenze wird durch das Verhältnis von dem handwerklichen Aufwand, der zum Ziehen sehr dünne Drähte erforderlich war (je dünner der Draht, um so schwieriger zu ziehen war er [4]), und dem Ertrag, d. h. dem Preis, den Kunden für Stahl- oder Messingdraht zu bezahlen bereit waren, bestimmt. Diese Grenze war sicherlich bei einem Durchmesser von etwa 0.16 mm erreicht.
- Die obere Grenze können wir aus den Besaitungsplänen des Claas Douwes (Tab. 2) herleiten: Er verwendet Rotmessingdraht der Nr. 1 für die C-Saiten seiner 6-Fuß- und 5-Fuß-Instrumente, und ein Durchmesser von über 0.61 mm ist hier – das weiß jeder Cembalobauer – schon beträchtlich.

	Drahtdurchmesser in mm	
Drahtnummer	Stahl	Messing
12	0.163	0.153
11	0.185	0.174
10	0.210	0.197
9	0.238	0.223
8	0.270	0.253
7	0.306	0.287
6	0.347	0.326
5	0.394	0.370
4	0.447	0.419
3	0.507	0.476
2	0.575	0.540
1	0.652	0.612

Tab. 1: Fiktive Saitenstärkentabelle

Die fiktive Saitenstärkentabelle ist damit realistisch genug, um als Anhalt für die weiteren Untersuchungen zu dienen.

Wir nehmen nun an, daß die von Claas Douwes erwähnten 12 Saitendrahtnummern nach dem 9/7-Maßsystem abgestuft waren, und bedienen uns der fiktiven Saitenstärkentabelle für konkrete Überlegungen.

Claas Douwes (1699)

Claas Douwes [1] hat Besaitungspläne für Instrumente unterschiedlicher Größen aufgestellt.

Tabelle 2 gibt Douwes' Besaitungspläne für Instrumente von 6 und 5 Fuß Länge wieder. Die Buchstaben w (wit), g (geel) und r (rood) stehen für die Farben von Eisen, Gelb- und Rotmessing. (Den dünnsten Draht (Nr. 12) verwendet Douwes nur im Diskant sehr kleiner Instrumente, die entsprechend höher gestimmt waren; sie werden hier nicht weiter behandelt.)

Die – mit Ausnahme der Baßnote C – durchgängig um eine Drahtnummer schwächere Besaitung des 5-Fuß-Instruments fällt auf. Daß diese Praxis sinnvoll ist, kann leicht physikalisch begründet werden; dies geht jedoch über den Rahmen dieses Artikels hinaus.

<table>
<tr><th></th><th colspan="2">6-Fuß-Instr.</th><th colspan="2">5-Fuß-Instr.</th></tr>
<tr><td></td><td colspan="2">Draht-Nr.</td><td colspan="2">Draht-Nr.</td></tr>
<tr><td>f'' bis c'''</td><td>10</td><td>w</td><td>11</td><td>w</td></tr>
<tr><td>b' bis e''</td><td>9</td><td>w</td><td>10</td><td>w</td></tr>
<tr><td>es' bis a'</td><td>8</td><td>w</td><td>9</td><td>w</td></tr>
<tr><td>gis bis d'</td><td>7</td><td>w</td><td>8</td><td>w</td></tr>
<tr><td>d bis g</td><td>6</td><td>w</td><td>7</td><td>w</td></tr>
<tr><td>H bis cis</td><td>5</td><td>g</td><td>6</td><td>g</td></tr>
<tr><td>A, B</td><td>4</td><td>g</td><td>5</td><td>g</td></tr>
<tr><td>F, G</td><td>3</td><td>g</td><td>4</td><td>g</td></tr>
<tr><td>E</td><td rowspan="2">2</td><td rowspan="2">r</td><td>3</td><td>r</td></tr>
<tr><td>D</td><td>2</td><td>r</td></tr>
<tr><td>C</td><td>1</td><td>r</td><td>1</td><td>r</td></tr>
</table>

Tab. 2: Zwei Besaitungspläne von Claas Douwes (1699)

In Flandern und den nördlichen Niederlanden gab es allerdings zwei grundverschiedene Typen von Virginalen: das *Spinett*-Virginal (Tastatur links) und das *Muselaar*-Virginal (Tastatur rechts). Die beiden Typen unterscheiden sich vornehmlich durch die Lage der Register und damit der Zupfpunkte: Die Zupfpunkte liegen beim *Spinett*-Virginal ähnlich wie bei Cembali, beim *Muselaar*-Virginal higegen liegen sie durchgehend etwa in der Mitte der schwingenden Saitenlänge.

Der daraus resultierende Klangunterschied ist gravierend. Während das *Spinett*-Virginal klanglich den Eindruck eines schlechten Cembalos vermittelt, hat das *Muselaar*-Virginal einen eigenständigen, dunklen Klang, der für manche Musik besser geeignet ist als der Klang eines Cembalos. Der Grund ist, daß die geradzahligen Harmonischen schwach ausgeprägt sind, wenn die Zupfpunkte nahe oder in der Saitenmitte liegen.[6]

Aufgrund seines attraktiven Klangs war in den Instrumentgrößen 6-Fuss und 5-Fuß der *Muselaar*-Typ auch weitaus populärer war als der *Spinett*-Typ. Wir können daher vermuten, daß Douwes bei seinen Besaitungsplänen für Instrumente dieser Größen in erster Linie an *Muselaar*-Virginale gedacht hatte.

Für diese Vermutung spricht ein weiteres Argument: Die Auslenkung der Saiten ist – bei gleicher Zupfkraft – um so größer, je näher der Zupfpunkt zur Saitenmitte hin liegt; bei gleichen Randbedingungen ist die Auslenkung der Saite bei *Muselaar*-Virginalen im Baß mehr als doppelt so groß wie bei Cembali und *Spinett*-Virginalen.[7] Daher hat man bei *Muselaar*-Virginalen das berüchtigte Problem, daß die tiefe Mittellage und insbesondere der Baß wegen der hohen Auslenkung unsauber klingen. Dieses Problem kann man mildern, wenn man das *Muselaar*-Virginal von der Mittellage an abwärts stärker besaitet. In der Tat ergeben Douwes' Besaitungspläne gem. Tab. 2 – insbesondere der für das 6-Fuß-Instrument – in Verbindung mit der fiktiven Saitenstärkentabelle eine relativ starke Besaitung in diesem Bereich.

Besaitung von *Muselaar*-Virginalen der Ruckers

Anhand von zwei erhaltenen *Muselaar*-Virginalen von Hans Ruckers – dem 6-Fuß-Virginal aus dem Jahre 1600 und dem 5-Fuß-Virginal aus dem Jahre 1604 – wollen wir nun prüfen, ob Douwes' entsprechende Besaitungspläne (Tab. 2) auf diese Instrumente anwendbar sind. Wir legen dabei wieder die fiktiven Saitenstärkentabelle (Tab. 1) zugrunde.

Die Tabellen 3 und 4 enthalten die notwendigen Daten:

- die Saitenlängen L in mm (entnommen aus [3]),
- die Intervalle I in cent, ausgehend vom heutigen Stimmton a', wobei der Einfachheit halber mit der gleichmäßig temperierten Stimmung gerechnet wird, obwohl die Instrumente ursprünglich mitteltönig (Viertel-Komma-Temperatur mit reinen großen Terzen oder Varianten mit leicht vergrößerten Terzen) gestimmt waren (die Grundfrequenzen der einzelnen Töne berechnet man mit der Formel

$f = f_{a'} \times 2^{\frac{I}{1200}}$, wobei $f_{a'}$ die Frequenz des Stimmtons a' ist),

- die Dichte ϱ des Saitendrahts in g/cm^3, wobei die Werte aus dem obigen Abschnitt „Das 12-stufige Drahtnummernsystem“ übernommen wurden,
- die Saitenspannung S (englisch *tensile stress*) in Newton per mm^2, errechnet mit einer angenommenen Stimmtonhöhe von $a' = 392$ Hz für das 6-Fuß-Virginal und $a' = 440$ Hz für das 5-Fuß-Virginal (die Berechnungsformel lautet $S = 4\varrho\,(fL)^2$),
- die Saitendurchmesser d, entommmen aus der fiktiven Saitenstärkentabelle (Tab. 1),
- die Zugkraft T (englisch *tension*[8]) in Newton (9.81 N = 1 kp) mit der Formel: $T = \frac{\pi d^2 S}{4}$.

Die Dichte ϱ des Saitendrahts bei Stahl, Gelb- und Rotmessing kann in der Realität (je nach aktueller Legierung) nur geringfügig variieren, so daß die Werte für die Saitenspannung S – bezogen auf die jeweilige Stimmtonhöhe – sehr verläßlich sind. Die Spannungswerte sind für alle Saitenmaterialien – Stahl, Gelb- und Rotmessing – realistisch. Sie zeigen überdies, daß die beiden Instrumente kaum höher als hier angenommen gestimmt waren. Auch daß das 5-Fuß-Virginal einen Ganzton höher gestimmt wurde als das 6-Fuß-Virginal, ist aus den Spannungswerten klar ersichtlich.

Hypothetisch sind natürlich die Werte für den Saitendurchmesser d, die Plausibilität unserer Hypothesen, die zur fiktiven Saitenstärkenstabelle (Tab. 1) geführt haben, glauben wir indes ausreichend nachgewiesen zu haben.

Die Zugkraftwerte (Spalte T) sind beim 6-Fuß-Virginal erwartungsgemäß schon ab der Mittellage abwärts relativ – im Vergleich zu einer vernünftigen Besaitung eines 6-Fuß-Cembalos – hoch. Damit wird jedoch – wie bereits erwähnt – die für *Muselaar*-Virginale typische große Auslenkung der Saiten verringert, was der Sauberkeit des Klangs zugute kommt. Beim 5-Fuß-Virginal sind die Zugkraftwerte den Vorgaben von Douwes' Besaitungsplan entsprechend niedriger und der (aus der geringeren Größe resultierenden) höheren Stimmung angemessen.

	L mm	***I*** cent	ϱ g/cm^3	***S*** N/mm^2	***d*** mm	***T*** N
c'''	183	1500	7.80	908	0.210	31
f''	269	800	7.80	874	0.210	30
c''	367	300	7.80	913	0.238	41
f'	527	-400	7.80	839	0.270	48
c'	708	-900	7.80	850	0.306	62
f	936	-1600	7.80	662	0.347	63
c	1131	-2100	8.51	591	0.370	64
F	1366	-2800	8.51	384	0.476	68
C	1397	-3300	8.85	235	0.612	69

Tab. 3: 6'-Fuß-*Muselaar*-Virginal H. Ruckers 1600, 392 Hz

	L mm	***I*** cent	ϱ g/cm^3	***S*** N/mm^2	***d*** mm	***T*** N
c'''	163	1500	7.80	908	0.185	24
f''	243	800	7.80	899	0.185	24
c''	330	300	7.80	930	0.210	32
f'	464	-400	7.80	819	0.238	36
c'	621	-900	7.80	824	0.270	47
f	803	-1600	7.80	613	0.306	45
c	1969	-2100	8.51	547	0.326	46
F	1156	-2800	8.51	347	0.419	48
C	1204	-3300	8.85	220	0.612	65

Tab. 4: 5'-Fuß-*muselaar*-Virginal H. Ruckers 1604, 440 Hz

Die Schlußfolgerung ist eindeutig: Douwes' Besaitungspläne für 6-Fuß- und 5-Fuß-Instrumente passen – unter den genannten hypothetischen Voraussetzungen – auf entsprechende *Muselaar*-Virginale der Ruckers.

Fazit

Obwohl die vorliegende Untersuchung frühere Behauptungen widerlegt (siehe Anmerkung 4), liefert sie dennoch keine endgültigen Beweise zur historischen Besaitung, da sie in weiten Teilen auf Hypothesen beruht, die zwar plausibel, aber eben keine Beweise sind.

Sie sollte daher als Denkanstoß und Anregung für weitere Untersuchungen verstanden werden.

Anmerkungen

1. Erst mit dem Siegeszug des Pianofortes, das nach stets dickeren Saiten verlangte, wurde das traditionelle Drahtnummernsystem grundlegend verändert.

2. Auszüge in englischer Übersetzung erstmals in [2], später auch in [3]

3. Einzige bekannte Ausnahme das Couchet-Cembalo von 1652, das original drei 8'-Register hatte.

4. Einen Versuch, historischen Drahtnummern konkrete Durchmesser zuzuordnen, hat Rémy Gug unternommen. Leider basieren seine Ergebnisse auf einem trivialen Rechenfehler; ein Zitat aus seinem Artikel [5] zeigt dies:

   > „Bei Thomee sehen wir, daß 1 Pfund Messingdraht Nr. 1 eine Länge von genau 1000 Schuh (Werkschuh 3) erreicht. Die Länge dieses Drahts muß bei 11000 Schuh liegen, wenn Nr. 11 hergestellt werden soll. Es läßt sich also die Herstellung eines Drahtes Nr. 11 als die elfmalige Verlängerung eines Drahts Nr. 1 definieren, bei gleichbleibendem Gewicht natürlich. Um dies zu erzielen, mußte man in Nürnberg mittels des kleinsten Verlängerungskoeffizienten (1,056) eine Gesamtverlängerung erreichen, die in folgender Weise ausgedrckt wird:
   >
   > (Länge Nr. 1)$(1,056)^{44}$=(Länge Nr. 11)
   >
   > Es waren also 44 der kleinsten Stufen erforderlich, um von Nr. 1 zu Nr. 11 zu gelangen. Und jetzt kommt die eigenliche Frage: Wie können 11 ganze Zahlen (oder 21 Nummern, wenn eine halbe Numerierung gebraucht wird) auf eine aus 45 Sprossen bestehende „Leiter" (Durchmesserwerte) verteilt werden? Man muß unzweifelhaft die eine oder andere Sprosse auslassen."

   Um beim Drahtziehen vom Draht Nr. 1 zum Draht Nr. 11 zu gelangen, benötigt man nicht 11, sondern 10 Verlängerungsstufen mit einem konstanten Verlängerungsfaktor – die Grundstufe (Drahtnummer 1) darf nicht mitgerechnet werden. Rémy Gugs „Leiter" besteht somit nicht aus 45 Sprossen (44 Sprossen + 1 Grundsprosse), sondern aus 41 (40+1) Sprossen. Wenn Gugs sonstige Annahmen zuträfen, so wäre sein kleinster Verlängerungsfaktor nicht $11^{\frac{1}{44}} = 1,056$, sondern $11^{\frac{1}{40}} = 1,062$.

   Rémy Gugs auf diesem Rechenfehler beruhende Tabelle des – wie er es nennt – „Nürnberger Gauge-Systems" ist somit wertlos.

   Falsch – weil auf dem gleichen Fehler beruhend – ist auch seine Aussage, daß man einzelne „Sprossen" auslassen msse; 10+1 Saitennummern lassen sich selbstverstädlich gleichmäßig auf eine 40+1–stufige Skala verteilen.

   Fragwürdig ist auch die Kompliziertheit von Rémy Gugs Berechnung: Die 44. oder auch die 40. Wurzel aus einer Zahl zu ziehen, war unmöglich, bevor das Rechnen mit Logarithmen verbreitet war. (Der Logarithmus wurde erstmals im Jahre 1614 vom Schotten John Napier beschrieben. Bis dahin behalf man sich mit einer geometrischen Methode (*Mesolabium* genannt), die umständlich war und deren Genauigkeit mit der Ordnungszahl der Wurzel abnahm; eine ausführliche Darstellung findet sich in [7], S. 157/158. Aufgrund des neuerungsfeindlichen Zunftwesens bedienten sich die Drahtziher wohl kaum vor der Mitte des 18. Jahrhunderts der logarithmischen Rechenmethoden.)

   Auch ist die Annahme, daß ein Draht der Nummer 11 auch 11 mal so lang sein soll wie ein Draht der Nummer 1, nicht nachvollziehbar. Mit dem $^9/_7$-*Zängelmaß* z. B. ergibt sich eine Verlängerung auf das 16-fache, wenn man Draht der Nr. 1 auf Draht der Nr. 12 zieht. Die Drahtnummern sagen also grundsätzlich nichts über das Ausmaß der Verlängerung aus.

   Die Information, daß mit der Nr. 11 der dünnste Saitendraht bezeichnet wurde, entnimmt Rémy Gug einer Quelle von 1855. Zu diesem Zeitpunkt waren seit einem halben Jahrhundert keine Cembalosaiten mehr hergestellt worden. Bis in die zweite Hälfte des 18. Jahrhunderts gingen die Nürnberger Drahtnummern jedoch bis zur Nr. 12 [4]. Rémy Gugs auf den Quellen aus der Mitte des 19. Jahrhunderts beruhende Berechnungen sind also, selbst man ihre mathematischen Fehler korrigiert, nicht auf Cembalosaiten anwendbar.

5. Grundlage für die proportionalen Beziehungen ist die Formel zur Berechnung der Masse M eines Drahts:
   $$M = \frac{\pi d^2 L\,\varrho}{4}$$
   wobei mit d der Drahtdurchmesser, mit L die Drahtlänge und mit ϱ die Dichte des Drahtmaterials bezeichnet wird.

6. Die oft geäußerte Auffassung, daß die geradzahligen Harmonischen *gänzlich* fehlen, wenn der Zupfpunkt in Saitenmitte liegt, ist falsch. Diese Harmonischen entstehen in diesem Fall aufgrund nichtlinearer Effekte [8].

7. Die Saitenauslenkung hängt – bei unveränderten Randbedingungen – vom Faktor φ ab, der vom Zupfpunkt bestimmt wird : $\varphi = p\,(1-p)$, wobei $p = \frac{P}{L}$ und L=schwingende Saitenlänge und P=Abstand vom Steg zum Zupfpunkt.
8. In der deutschsparchigen Literatur über das Cembalo werden die Begriffe Spannung und Zugkraft zuweilen verwechselt, wobei der englische Begriff *tension* unzutreffend mit Spannung übersetzt wird.

Literatur

[1] Claas Douwes *Grondig Ondersoek van de Toonen der Musijk*, Franeker, 1699 (facs. Amsterdam 1970). (Auszugsweise Übersetzung ins Englische in [2] und [3]).

[2] Frank Hubbard, *Three Centuries of Harpsichord Making*, Cambridge, Massachusetts 1965

[3] Grant O'Brien, *Ruckers – A harpsichord and virginal building tradition*, Cambridge 1990

[4] Sabine Katharina Klaus „Ein Beitrag zur Geschichte des Saitendraht herstellenden Handwerks in Nürnberg bis zum Beginn des 19. Jahrhunderts" in: Dieter Krickeberg (Hrsg.), *Der „schöne" Klang*, Verlag des Germanischen Nationalmuseums Nürnberg, 1996.

[5] Rémy Gug, „Die Nürnberger historischen Saitendrahtnumerierungsarten" in *Das Musikinstrument* Nr. 7/1986, S. 19-24. (Der Artikel ist die gekürzte deutsche Fassung des Artikels „En remontant la filière de Thoiry a Nuremberg" in *Musique Ancienne* Nr. 18, September 1984, S. 4-76.)

[6] Hubert Henkel, *Beiträge zum historischen Cembalobau*, Leipzig 1979

[7] Franz Josef Ratte, *Die Temperatur der Clavierinstrumente*, Kassel 1991

[8] K. A. Legge and N. H. Fletcher, "Nonlinear generation of missing modes on a vibrating string" in *Journal of the Acoustical Society of America* 76 (1), July 1984, p. 5