

Der Entwurf einer Dampfmaschine mit Hilfe des Soho-Rechenschiebers*

Stephan Weiss

In der Industriellen Revolution des 18. und 19. Jahrhunderts in England spielt die Dampfmaschine eine wesentliche Rolle. Die Menschen waren nicht mehr nur auf ihre Muskelkraft und die der Tiere oder auf Wind- und Wasserkraft angewiesen. Die Dampfmaschine steht als zusätzliche neue Energiequelle ohne zeitliche Beschränkung zur Verfügung. Sie erhöht die Produktivität und ermöglicht neue Technologien.

Im gleichen Zeitraum sind das Einheitensystem, das Messwesen und die formelmässige Erfassung von physikalischen Gesetzmässigkeiten und Zusammenhängen zumindest soweit ausgebaut, dass Probleme physikalisch-technischer Natur, die sich bei Entwurf und Bau von Maschinen stellen, rechnerisch gelöst werden können.

Die neue Methode war notwendig, weil die Bestimmung der wirkenden Kräfte, die Dimensionierung von Bauteilen oder die Abschätzung der erwarteten Leistung der Maschine neue Aufgaben stellten. Als ein neues Ziel trat auch die Erfassung des Wirkungsgrades, d.h. des Verhältnisses von Verbrauch zu erzielter Leistung, sowie dessen Optimierung in den Vordergrund. Die Ökologie sowie soziale Erwägungen spielten keine Rolle.

Zwei Arten von Rechenhilfen wurden verwendet: ein logarithmischer Rechenschieber sowie Zahlentabellen mit einem oder zwei Eingängen und den daraus berechneten Ergebnissen. Der logarithmische Rechenschieber in einer Ausführung für Ingenieure war neu, Zahlentafeln hingegen bereits bekannt als Multipliziertafeln oder Umrechnungstabellen, jetzt wurden sie auf Lösungen aus Geometrie und Technik erweitert.

Der Soho Rechenschieber und die Dampfmaschine

Rechenschieber die bereits existierten zum Zwecke der Navigation, für Steuerbehörden oder für den Handel wurden als nicht brauchbar für den Maschinenbau angesehen. Zudem galten sie als ungenau. Deshalb führten ab dem Jahr 1775 der Unternehmer Matthew Boulton und der Ingenieur James Watt in ihrer Fabrik in

* Veröffentlicht unter dem Titel *The Design of a Steam Engine by Means of the Soho Slide Rule* in Journal of the Oughtred Society 28:2, Fall 2019.

Soho, nahe Birmingham, verbesserte Rechenschieber, den sogenannten Typ Soho, für die Entwürfe ihrer Dampfmaschinen ein.¹

Über die Entstehung des Soho-Rechenschiebers gibt John Farey Jr. in seiner umfangreichen Abhandlung über die Geschichte, den Entwurf und den Bau der Dampfmaschine aus dem Jahr 1827 Auskunft.² Farey war als beratender Maschinenbau-Ingenieur und Patentanwalt tätig.

Er schreibt dazu auf S. 536

„The lines upon sliding rules have been combined in various forms, to suit the purposes of particular calculations; but that which has been found most convenient for the use of engineers, was arranged by Mr. Southern, under the direction of Mr. Watt, expressly for the use of the engineers of Messrs. Boulton and Watt's manufactory at Soho, and is in consequence called the Soho rule.“

Der genannte John Southern war Angestellter bei der Fa. Boulton & Watt. Er galt als sehr guter Mathematiker und half auch bei der Berechnung von Bauteilen der Maschinen.

Von da an wurde der Rechenschieber ein unverzichtbares Werkzeug für Ingenieure. Zahlreiche Veröffentlichungen gaben Anleitungen zu seinem Gebrauch im Maschinenbau. Er gehört aus technischer Sicht mit zu den markanten Symbolen der Industriellen Revolution.

Der ursprüngliche Soho-Rechenschieber (Bild 1) trägt vier Skalen. Die identischen Skalen A, B und C erstrecken sich über den Bereich 1-10-100, die Skala D über 1-10. Multiplikation, Division, sowie Quadrat und Quadratwurzel sind mit einer Einstellung des Schiebers möglich. Die Skalen haben eine Länge von 10 inches. Die Rückseite ist entweder frei oder es sind dort gauge points notiert.

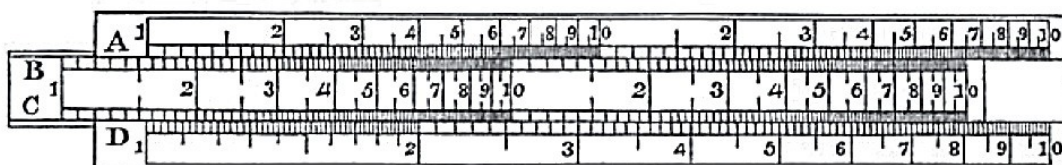


Bild 1: Rechenschieber Typ Soho

Farey befasst sich neben dem Entwurf von Dampfmaschinen auch ausführlich mit dem Rechenschieber und den Varianten seiner Ausgestaltung. Er gibt auf S. 566

-
- 1 Wess, Jane, *The Soho Rule*, Journal of the Oughtred Society, 6:2, Fall 1997.
Wyman, Thomas, *Soho Steam Engines The First Engineering Slide Rule and the Evolution of Excise Rules*, Journal of the Oughtred Society, 22:2, Fall 2013.
 - 2 Farey, John, *A treatise on the steam engine: historical, practical, and descriptive*, London 1827.
Woolrich, A. P., John Farey and His Treatise on the Steam Engine of 1827. In: Hollister-Short, Graham (Hrsg.), *History of Technology*, Vol. 22, 2000.

unter *Directions to Engineers for the choice of a Sliding Rule* Hinweise für dessen Auswahl und schlägt seine eigene Zusammenstellung der Skalen vor.

Nachdem der Soho-Rechenschieber bekannt geworden war existierte er noch einige Jahrzehnte weiter in seiner ursprünglichen Ausführung. Sie findet sich beispielsweise bei Routledge 1808³. Er übernahm auf seinem klappbaren zweischenkeligen *Engineer's Improved Sliding Rule* sowohl Skalenanordnung als auch -teilungen des Typs Soho.

Anleitungen zum Gebrauch des Rechenschiebers, die diesen in Österreich bekannt machen sollten, zeigen zunächst ebenfalls die ursprüngliche Skalenanordnung und nennen zudem die Quelle.⁴ In gleichen Zeitraum erschienen Varianten des Rechenschiebers vom Typ Soho, weil Techniker bestrebt waren, ihn durch Änderungen an den Skalen oder durch neue Skalen an die Anforderungen des Gebrauchs anzupassen.⁵

Der Entwurf einer Dampfmaschine

Bevor ich auf Beispiele zu den Berechnungen beim Entwurf einer Dampfmaschine eingehe soll zum besseren Verständnis kurzgefasst der Aufbau und die Wirkungsweise früher Dampfmaschinen erläutert werden (Bild 2).

Die erste brauchbare Dampfmaschine baute 1712 der englische Schmiedemeister Thomas Newcomen. Über dem Dampfkessel ist ein oben offener Zylinder montiert, in dem sich der Kolben auf- und ab bewegt. Diese Bewegung überträgt sich über einen Balken, Balancier genannt, auf das Pumpengestänge auf der anderen Seite. Während der Bewegung des Kolbens nach oben wird der Zylinder mit Dampf befüllt. In der Stellung des Kolbens oben wird die Dampfzufuhr unterbrochen und der Dampf durch Einspritzen von kaltem Wasser kondensiert. Der Druck unter dem Kolben sinkt und der atmosphärische Luftdruck bewegt ihn nach unten, wodurch sich das Pumpengestänge wieder hebt. Da der Luftdruck den Kolben beaufschlagt nennt man diesen Typ der Maschine eine atmosphärische Dampfmaschine. Mit der Bewegung des Gestänges wurden vertikale Wasserpumpen angetrieben, weil die Bergwerke beim Abbau von Kohle und Erz immer häufiger auf Grundwasser stießen.

3 Routledge, Joshua, *Instructions for the engineer's improved sliding rule...*, 1808, 7th ed., London, 1830.

4 Schulz von Strassnicki, Leopold Carl, *Anweisung zum Gebrauche des englischen Rechenschiebers...*, Wien, 1843.

Burg, Adam, *Über die Einrichtung und Anwendung des bei den englischen Mechanikern und Maschinenarbeitern gebräuchlichen Schieberlineals (Sliding rule), mit welchem sie sämmtliche auf ihre Arbeiten Bezug habenden Rechnungen sehr leicht und schnell ausführen*, Jahrbücher des Kaiserlichen Königlichen Polytechnischen Institutes in Wien, 16. Bd. 1830.

5 Rudowski, Werner H., *Variants of Soho Slide Rules*, *Journal of the Oughtred Society* 24:2, Fall 2015, S. 6.

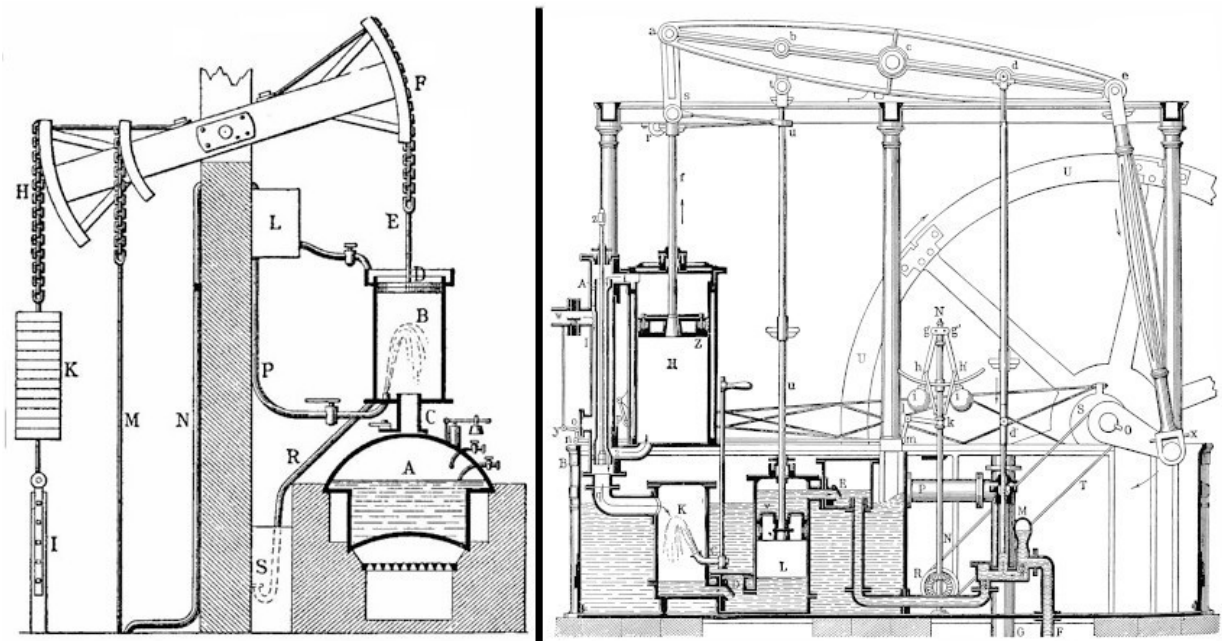


Bild 2: Dampfmaschine von Newcomen (links) und Watt (rechts)

Der Mechaniker James Watt brachte ab 1765 Verbesserungen an der Maschine an. Die Kondensation des Dampfes findet jetzt ausserhalb des Zylinders statt. So werden Wärmeverluste vermieden. Zudem ist der Kolben mit dem Druck des Dampfes selbst beaufschlagt, in frühen Ausführungen von einer Seite, später beidseitig. Dieser Druck ist höher als der Luftdruck, wodurch grössere Kräfte erzielt werden können. Anfangs behielt Watt den Balken zur Kraftübertragung bei, später wandelte er die Bewegung des Kolbens mit einem Pleuel in eine Drehbewegung des Schwungrades um. Mit einer Drehbewegung konnten nun auch Arbeitsmaschinen, Maschinen der Baumwollspinnereien, Mühlen und andere angetrieben werden. Gleichzeitig wurde die Dampfmaschine einschliesslich des Kessels stetig verbessert und den ökonomischen und technischen Bedürfnissen angepasst.

Aufbau und Wirkungsweise der Dampfmaschine bringen spezifische Aufgabenstellungen mit sich. Es sind dies geometrische und stereometrische Grundaufgaben, Gewichte von Bauteilen, abhängig von Material und Abmessungen, wirkende Kräfte, die Dimensionierung von Bauteilen in Abhängigkeit von der Belastung sowie die Bestimmung der Leistung einer geplanten Maschine.

Über die Methodik der Berechnungen geben die bereits erwähnte Abhandlung von John Farey sowie einige andere zeitgenössische Veröffentlichungen Auskunft. Ich habe aus den zahlreichen Rechenbeispielen für den Rechenschieber in der Literatur vier Aufgaben ausgewählt um das Vorgehen der Ingenieure und den Vorteil des Rechenschiebers selbst zu verdeutlichen.

Auslegung einer Dampfmaschine für Wasserpumpen

Wie bereits erwähnt bestand der Nutzen von Dampfmaschinen anfangs darin, Wasser aus Bergwerken zu pumpen. Mit der vertikalen Bewegung des Kolbens, übertragen auf die andere Seite eines Balkens wurde das Wasser in Rohren stufenweise an die Oberfläche gefördert. Wenn man die Reibung zunächst vernachlässigt muss dabei die Kraft, die der Dampf auf den Kolben ausübt, mindestens so gross sein wie das Gewicht der gehobenen Wassersäule.

Hierzu stellt Routledge 1830 in seiner Anleitung für den Rechenschieber des Ingenieurs auf S. 41 folgende Aufgabe: der Dampfdruck p beträgt konstant 10 lbs/in^2 , die Höhe der Wassersäule h ist 20 yards und deren Durchmesser d 16 inches. Wie gross muss der Durchmesser D des Kolbens gewählt werden?

Der Benutzer sucht in einer beigegefügte Tabelle für den Druck p die Grösse d und erhält hierfür den gauge point 327. Gauge points geben einen Zahlenwert, sie stellen im voraus berechnete Zwischenrechnungen dar.⁶ Dieser wird auf Skala A aufgesucht und dem Beginn der Skala B gegenüber gestellt. Für die Höhe h auf Skala C lässt sich der gesuchte Durchmesser D des Kolbens auf der Skala D ablesen, hier der Wert $25 \frac{1}{2}$ inches. Bild 3 zeigt diese Einstellung.

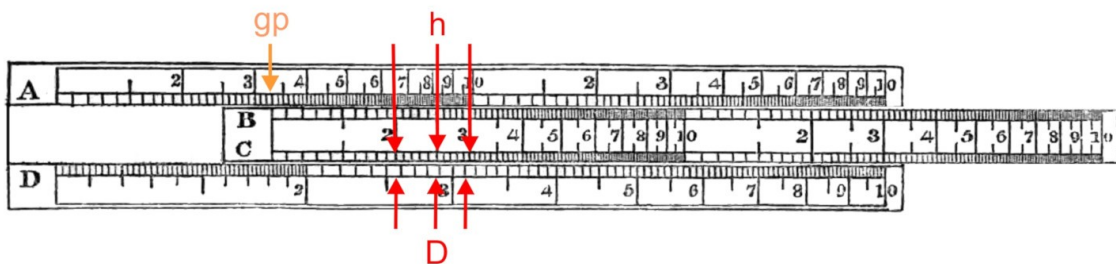


Bild 3: Einstellung des Rechenschiebers für die Auslegung einer Dampfmaschine für eine Wasserpumpe

Der gewählte gauge point beinhaltet den Dampfdruck p , den Durchmesser der Wassersäule d , das spezifische Gewicht von Wasser sowie die Umrechnung von yards in inches. Er macht ein mehrfaches Berechnen von Zwischengrößen entbehrlich. Der Zahlenwert des gauge points gibt wie üblich nur eine Ziffernfolge, nicht aber seinen tatsächlichen Wert.

Routledge weist darauf hin, dass auf den Skalen C und D nicht nur das gesuchte Ergebnis, sondern alle Verhältnisse zwischen der Höhe der Wassersäule und dem Kolbendurchmesser abgelesen werden können. Er verdeutlicht dies in einer Skizze in Bild 4.

⁶ Zu gauge points s. a. Weiss, Stephan, *Gauge Points and their Advantages*, Journal of the Oughtred Society, 27:2, Fall 2018.

$$\begin{array}{r}
 \text{against 15} \\
 \mathbf{20} \\
 \text{yards upon C, } \mathbf{25} \\
 \mathbf{30} \\
 \mathbf{35}
 \end{array}
 \left. \vphantom{\begin{array}{r} \text{against 15} \\ \mathbf{20} \\ \text{yards upon C, } \mathbf{25} \\ \mathbf{30} \\ \mathbf{35} \end{array}} \right\} \text{are }
 \left\{ \begin{array}{l}
 \mathbf{22,1 inches} \\
 \mathbf{25,5} \\
 \mathbf{28,5 diameter} \\
 \mathbf{31,3} \\
 \mathbf{33,8 upon D ;}
 \end{array} \right.$$

Bild 4: Variationen von Variablen am Rechenschieber Bild 3, originale Darstellung

In einer Stellung des Rechenschiebers kann der Ingenieur die Abhängigkeiten von Höhe zu Durchmesser ablesen und sich dann für eine Dimensionierung festlegen. Diese Möglichkeit ist nicht der einzige, aber ein wesentlicher Vorteil des Rechenschiebers. Das gleiche Prinzip finden wir im nächsten Beispiel.

Belastung des Balkens

Die Kraft des Kolbens wird über einen Balken, der als zweiseitiger Hebel wirkt, auf das Pumpengestänge oder auf ein Pleuel übertragen. Die Dimensionierung dieses Balkens, der zunächst aus Eichenholz, später aus Eisen gefertigt wurde, stützte sich anfangs auf Erfahrungswerte, abgelöst von vereinfachten Lösungen, die aus Versuchen gewonnen wurden.

Farey rechnet hierzu Beispiele vor. Für eines ist die Stellung des Rechenschiebers, hier mit umgekehrter (inverser) Zunge, in Bild 5 gezeigt. Farey verwendet gerne inverse Skalen. Seine Meinung hierzu ist „*The sliding rule may have its slide inverted, and, in many cases, this is the most convenient mode of performing calculations by it.*“ Die Darstellung der Aufgabe als Ausschnitt der Skalen und ihren hervorgehobenen Werten entspricht der zu dieser Zeit üblichen Art.⁷

Soho Rule, Slide inverted, all four lines.	}	A One-4th length of beam feet.	Exam.	A (25 ft. ÷ 4 =) 6.25	or	$\frac{21}{31}$
		C Weight on the middle pounds.		C Weight 32 368 lbs.		
		B Breadth of the beam inches.		B Breadth 24 inc.		
		D Depth of the beam inches.		D Depth 29 inc.		

Bild 5: Einstellung für die Berechnung der Belastbarkeit eines Balkens

Aus der notwendigen Länge des Balkens und seiner Belastung wird mit den beiden Skalen A und C invers eine Konstante C bestimmt. Weil für die Abmessungen eines Balkens mit der Breite b und der Dicke d gilt $b * d^2 \equiv C$ kann der Ingenieur in der gleichen Stellung des Rechenschiebers an den Skalen B invers und D alle Kombinationen zulässiger Abmessungen b und d ohne erneute Rechnungen unmittelbar ablesen.⁸

⁷ Weiss, Stephan, *The Methodology of Teaching a Logarithmic Slide Rule in Historical Sequence*, Journal of the Oughtred Society, 26:2, Fall 2017.

Mit weiteren Überlegungen, etwa zur Durchbiegung des Balkens, trifft er dann seine Wahl.

Die Bestimmung der Leistung

Mit der Dampfmaschine, gebaut in unterschiedlichen Grössen, muss auch eine verständliche Angabe ihrer Leistung erarbeitet werden. Aus physikalischer Sicht ist die Leistung definiert als *Arbeit / Zeit* oder *Kraft * Geschwindigkeit* mit der Kraft, die auf den Kolben wirkt, also *Dampfdruck * Kolbenfläche*. Unter Zahlenwerten mit der Einheit [*lbs * feet / min*] kann sich zunächst niemand etwas vorstellen, während der Vergleich mit der Leistung von Pferden nahe liegt, er ist unmittelbar und aussagekräftig.

Nach Versuchen mit Pferden lagen die Zahlenwerte ihrer Leistung bei 22916, 27500 und 32000 oder 33000 [pounds avoirdupoise 1 foot high in 1 minute].⁹ Sowohl die Ergebnisse als auch das Vergleichsmass selbst wurden diskutiert. Man argumentierte, dass Pferde ihre Leistung nicht dauerhaft beibehalten können und der Wert 33000 zu hoch gegriffen sei. Schliesslich einigte man sich darauf, doch die Pferdestärke (HP) als Masseinheit der Leistung von Dampfmaschinen beizubehalten.

Farey greift dieses Thema auf und gibt zunächst den Ablauf der Rechnung verbal an. Darauf folgt die in Bild 6 gezeigte grafische Darstellung der Einstellung des Rechenschiebers für die Berechnung der Leistung aus $33000 * HP = force * motion$. Hierbei steckt er die Zunge wieder entgegengesetzt in den Stabkörper und wandelt so zwei Multiplikationen in zwei Proportionen um. Dem praktischen Beispiel liegt eine doppelt wirkenden Maschine zugrunde mit einer Kraft auf den Kolben von 3070 lbs, einem Kolbenhub von 5 feet und 21 1/2 Doppelhuben pro Minute ($2 * 5 * 21 \frac{1}{2} = 215$). Diese Maschine hat eine theoretische Leistung von 20 HP.

$$\text{Sliding Rule. } \left\{ \begin{array}{l} \text{A Force in pounds.} \\ \text{slide inverted. } \end{array} \right. \left\{ \begin{array}{l} \text{33 000 lbs.} \\ \text{Motion ft. per min.} \end{array} \right. \quad \text{Example. } \left\{ \begin{array}{l} \text{A 3070 lbs.} \\ \text{C 215 ft.} \end{array} \right. \left\{ \begin{array}{l} \text{33 000.} \\ \text{20 HP.} \end{array} \right.$$

Bild 6: Einstellung des Rechenschiebers für die Berechnung der Leistung

Eingangsgrössen der Berechnung lassen sich am Rechenschieber leicht variieren, weitere Zwischenrechnungen sind nicht erforderlich. Die Verwendung eines gauge

-
- 8 Die Berechnung der Konstante C beinhaltet auch das Material des Balkens, hier Eiche, sowie Erfahrungswerte aus gebauten Maschinen und Versuchen. Fachkundige erkennen hier Ansätze zum Widerstandsmoment.
- 9 Roberts, Peter, *Roberts's Mechanic's Assistant; or Universal Measurer, containing a Collection of Tables of Measures, Weights and Powers, with a correct Method of Calculating the Horse Powers of a Steam Engine*, New ed. 1819, 6th ed., Leeds, 1833, S. 14.

points bei der Berechnung der Leistung kommt ebenfalls vor. Ich habe hierfür ein Beispiel in einem früheren Beitrag gegeben.¹⁰

Zu den Methoden der Berechnung der Maschinenleistung existierten anfangs unterschiedliche Angaben. In der zuvor erwähnten Schrift *Roberts's Mechanic's Assistant* weist der Autor im Titel darauf hin, dass er die richtige Methode zur Berechnung der Leistung aufführt. Der Rechengang ist bei ihm nur verbal beschrieben und berücksichtigt alle Einflussgrößen, als Druck des Dampfes, Fläche des Kolbens und die mittlere Kolbengeschwindigkeit aus Kolbenhub und Anzahl der Hübe. Er gibt zudem Hilfstabellen, die die Berechnungen oder die Abschätzung von Variablen für Maschinen und ihre Bauteile erleichtern. Hilfstabellen waren seit jeher eine beliebte Rechenhilfe. Bild 7 zeigt eine der Tabellen bei ihm. Sie nennt die mittlere Kolbengeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Kolbenhub für reale Maschinen. Für die Diskussion der Werte und ihrer Abhängigkeiten ist an dieser Stelle kein Platz.

Length of Stroke in Feet	2	3	4	5	6	7	8	9
No. of Double Strokes	43	32	25	21	19	17	15	14
Feet per Minute	172	192	200	210	228	238	240	252

Bild 7: Hilfstabelle für die mittlere Kolbengeschwindigkeit

Der Hinweis bei Roberts auf die richtige Berechnung der Leistung kommt sehr wahrscheinlich daher, dass in der Literatur vereinfachte Methoden mit Hilfe des Rechenschiebers gegeben werden, die auf nicht näher spezifizierten Annahmen beruhen. Sie können daher kaum allen Fällen gerecht werden.¹¹

Erwähnt werden muss, dass Roberts einen Rechenschieber beschreibt, der mit den Skalen A, B und C dem Typ Soho gleicht, während die Skala D sich bei ihm von 4 bis 40 erstreckt und girt-line genannt wird.

Die Skala Hyp.Logs. für die Expansions-Dampfmaschine

Eine wesentliche Neugestaltung ist die Expansions-Dampfmaschine. Bei ihr wird der Kolben nicht über den ganzen Kolbenhub hinweg mit dem konstanten Druck des Dampfes beaufschlagt, sondern nur am Anfang der Arbeitsbewegung. Dann schliesst das Einlassventil und der Dampf expandiert mit abnehmendem Druck. Der Druckverlauf in Abhängigkeit von der Kolbenstellung normiert auf $p=1$ anfangs ist in Bild 8 dargestellt.

¹⁰ Weiss, Stephan, *Journal of the Oughtred Society* 27:2, 2018, s. a. Farey 1827, S. 575.

¹¹ S. hierzu die Beispiele bei Coulson, S., *Coulson's Treatise on his newly invented Engineers' and Mechanics' Slide Rule*, Stokesley, 1842, S. 243f.

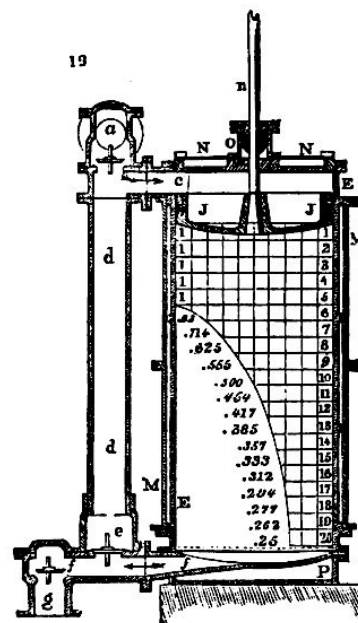


Bild 8: Druckverlauf im Zylinder einer Expansions-Dampfmaschine

Für die Berechnung der Leistung einer solchen Maschine ist ein mittlerer Dampfdruck gesucht, der während der Kolbenbewegung von einem Totpunkt zum anderen die gleiche Arbeit verrichtet wie mit realem Druckverlauf. Der Ingenieur Thomas Dixon stellt in seiner Abhandlung¹² ab S. 13 einen verbesserten Rechenschieber vor, der neben den üblichen Skalen A, B, C und D zusätzliche Skalen trägt. Eine von ihnen ist mit HYPLOG^S markiert. Sie gibt die natürlichen Logarithmen $\ln(x)$ zu Zahlen x auf einer Basisskala (Bild 9, zweite und dritte Skala von oben) und dient zur Bestimmung dieses mittleren Druckes im Zylinder während der Expansion. Ihr Gebrauch basiert auf zwei Voraussetzungen. Der reale Abfall des Druckes wird dem eines idealen Gases mit $p \cdot V = \text{const}$ gleichgesetzt und entspricht dann im Verlauf einer Hyperbel. Des weiteren gilt, dass während der Expansion die Arbeit pro Flächeneinheit bis zum x -fachen des Ausgangsvolumens mit $p = 1$ anfangs $\ln(x)$ entspricht.

Dixon führt in den Beispielrechnungen den Gebrauch dieser Skala bei Expansions-Maschinen vor. Im einfachsten Fall besteht eine solche Rechnung bei ihm aus vier Schritten und ist für eine Wiedergabe hier zu umfangreich. Er weist ausdrücklich darauf hin, dass Berechnungen dieser Art auf einem Soho-Rechenschieber, also ohne die genannte Skala, nicht möglich sind.

Bis jetzt ist dies die früheste mir bekannte Verwendung der Skala $\ln(x)$ auf einem Rechenschieber.

¹² Dixon, Thomas, *Treatise on the Arrangement, Application, and Use of Slide Rules*, Bradford 1875.

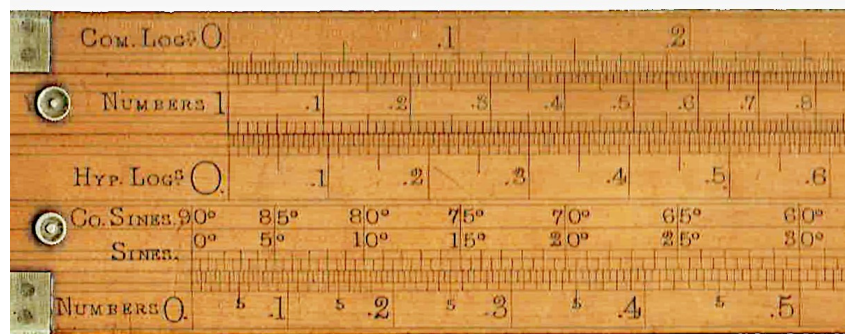


Bild 9: Rechenschieber Typ Dixon, Ausschnitt links einer Seite

Die anderen Skalen seines Rechenschiebers zeigen die Werte der Winkelfunktionen, der Logarithmen zur Basis 10 (bezeichnet mit COM. LOG^S , Bild 9, Skala oben) und der dritten Potenzen.¹³

Dieses Beispiel demonstriert ebenso wie schon die Einführung des Soho-Rechenschiebers selbst, dass die rechnerischen Aufgabenstellungen beim Entwurf von Dampfmaschinen ihrerseits die Ausgestaltung des Rechenschiebers für Ingenieure beeinflusst haben.

¹³ Wyman, Thomas, *The Thomas Dixon Engineer's Slide Rule*, Journal of the Oughtred Society, 5:2, Fall 1996, p. 68.

S. a. International Slide Rule Museum: Aston And Mander Makers - Dixon Style Slide Rule. URL <https://www.sliderulemuseum.com/Rarities.htm> (zuletzt aufgerufen 16.12.2018).

Bildnachweis

Bild 1: Farey 1827, S. 537

Bild 2: Meyers Konversationslexikon, Bibliographischen Institut, Leipzig und Wien, 4. Aufl., 1885-1892, 4. Bd., S.472 (Bild li.), S. 460 (Bild re.)

Bild 3: vom Verfasser erstellt

Bild 4: Routledge 1830, S. 42

Bild 5: Farey 1827, S. 611

Bild 6: Farey 1827, S. 440

Bild 7: Roberts 1833, S. 15

Bild 8: Bourne, John, *A Treatise on the steam-engine in its application to mines, mills, steam navigation, and railways*, London 1851, S. 12

Bild 9: Foto E Dean Butler, hier wiedergegeben mit seiner freundlichen Genehmigung