

Zeitschrift: Schweizer Pioniere der Wirtschaft und Technik
Herausgeber: Verein für wirtschaftshistorische Studien
Band: 58 (1993)

Artikel: Jakob Amsler-Laffon (1823-1912), Alfred Amsler (1857-1940) : Pioniere der Prüfung und Präzision
Autor: Amsler, Robert / Erismann, Theodor H.
Kapitel: Mathematisch-technischer Teil
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1091031>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 24.04.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Mathematisch-technischer Teil

«Nun läuft aber alle analysis finitorum et infinitorum im Grunde doch auf
Rechnerei zurück.»

Arthur Schopenhauer
Psychologische Bemerkungen

Genie und Nachwelt

Die Betrachtung eines Phänomens aus historischer Distanz gilt gemeinhin als gerechter im Vergleich mit dem Eindruck, den soeben Geschehenes hinterlässt. Das ist fast eine Binsenweisheit, deren Gültigkeit allerdings stark davon abhängt, ob zwischen Phänomen und Beurteilung Ereignisse eintreten, die einer fachlich und historisch vertieften Würdigung förderlich sind. Dass auch das Gegenteil keineswegs ausgeschlossen ist, zeigt das immer wieder zu beobachtende Auftreten verkannter Genies, die nicht selten endgültig in Vergessenheit geraten, wenn nicht Ereignisse der erwähnten Art der Nachwelt die erforderlichen Anreize zu geben vermögen.

Handelt es sich um bahnbrechende Leistungen in Wissenschaft oder Technik, so ist an sich eine gute Chance für eine angemessene Beachtung gegeben. Denn ein Bahnbrecher ist ja einer, der neue Dinge verwirklicht oder bisher verborgene Zusammenhänge erkennt, die in späterer Zeit in mehr oder weniger ähnlicher Form Allgemeingut werden. So ist es nicht unwahrscheinlich, dass bei zunehmender Aktualität einer bahnbrechenden Leistung nicht nur praktisches, sondern auch historisches Interesse erwacht. Das Schicksal – und sei es auch nur durch mangelnde Kenntnis

früherer Arbeiten wirksam – spielt aber immer wieder sein unvorhersehbares Spiel. Zwei Fälle aus dem in der vorliegenden Studie angesprochenen Gebiet der Materialfestigkeit mögen diesen Sachverhalt illustrieren:

Griffith (1920) schuf aufgrund von Untersuchungen an Glas die Basis der heutigen Bruchmechanik, eines Verfahrens zur Bestimmung der Festigkeit von Materialien beim Vorliegen geometrischer Unvollkommenheiten (idealisiert in der Form scharfer Risse). Diese der Zeit weit vorausseilende Leistung blieb so gut wie unbeachtet, bis Irwin (1957) die gleichen Gedankengänge auf die allgemeine Berechnung von Metallteilen ausdehnte und ihnen damit zu einem nachhaltigen Durchbruch verhalf. Er unterliess es dabei nicht, die ihm bewusst gewordene Bedeutung seines Vorgängers ins richtige Licht zu rücken. Seither werden in der Literatur regelmässig beide Namen erwähnt, wenn die Anfänge einer Methode beschrieben werden, ohne die das heute erreichte Mass verantwortbarer Materialausnutzung auf verschiedenen Gebieten, besonders im Maschinenbau, nicht denkbar wäre.

Weniger glücklich war Palmgren (1924), der, mit dem Verhalten von Kugellagern unter Beanspruchung mit schwingender Kraft (Ermüdung) beschäftigt, eine Methode entwickelte, um aus einigen Versuchen mit kon-

stanten Kraftamplituden die Lebensdauer bei beliebig schwankenden zu berechnen. Auch dieses wichtige Ergebnis fand lange Zeit nur in beschränktem Masse Beachtung. Erst Miner (1945) erdachte den gleichen Algorithmus neu, offenbar zur richtigen Zeit, um im aufstrebenden Flugzeugbau ein weites Anwendungsfeld zu erschliessen, und zwar unter dem bis heute fast ausnahmslos verwendeten Namen «Miner-Regel». Es mag als Ironie des Schicksals gewertet werden, dass die korrektere Bezeichnung «Palmgren-Miner-Regel» erst zu einem Zeitpunkt aufzutauchen begann, als die Schwächen des (heute nur noch mit Vorbehalten akzeptierten) Verfahrens der Fachwelt allmählich bewusst wurden.

Nicht selten ist das Vergessen auf den Stand von Wissenschaft und/oder Technik zurückzuführen, der eine sinnvolle Anwendung erst lange Zeit nach der das Grundprinzip erfassenden schöpferischen Leistung gestattet. Wer kennt heute beispielsweise den Namen Jost Bürgi (auch Byrgi, Byrgius, 1552-1632)? Dabei handelt es sich um den Entdecker der logarithmischen Zahlendarstellung und damit den Schöpfer der Grundlage für den Rechenschieber, das Gerät also, das bis zum Erscheinen des technisch-wissenschaftlichen Taschenrechners den Löwenanteil ingenieurmässigen Rechnens zu leisten hatte. Und Pascal wäre wohl kaum weltberühmt geworden, hätte er nicht neben der Erfindung einer (zu seiner Zeit weder kostengünstig herstellbaren noch dringend benötigten) mechanischen Rechenmaschine auch Grundlegendes auf anderen Gebieten geleistet.

Ein Glücksfall für das «Überleben» eines Erfinders im historischen Bewusstsein späterer Generationen ist es, wenn ihm über den Grundgedanken hinaus auch dessen brauchbare An-

wendung gelingt und wenn nach dem Erfindungsgegenstand zugleich ein praktischer Bedarf bei der Lösung aktueller Probleme besteht. Damit wird ein weiterer Glücksfall möglich, indem besagter Erfindungsgegenstand, den Namen des Erfinders tragend, während langer Zeit im allgemeinen Gebrauch stehen kann. Und besonders glücklich ist schliesslich eine Erfindung, an der in der Folgezeit Parallelen zu viel später erkannten Innovationsmöglichkeiten entdeckt werden, womit erst das volle Mass der vorausschauenden Schaffenskraft des betreffenden Erfinders ins Bewusstsein der Nachwelt gehoben wird.

Die in der Folge besprochenen Erfindungen dürfen in den soeben erwähnten Belangen als vom Schicksal bevorzugt betrachtet werden: Jakob und Alfred Amsler schufen grundlegend Neues auf verschiedenen Gebieten, auf denen ein Bedarf nach brauchbaren Lösungen bestand; Jakob gründete ein Unternehmen, das seinen Namen in alle Welt trug und dessen Erfolg während langer Zeit von den Erfindungen des Vaters wie des Sohnes geprägt war; und verschiedene Grundgedanken beider erweisen sich bei Betrachtung aus heutiger Sicht als bemerkenswert modern, nehmen Leistungen vorweg, die in vollem Umfang erst zu einem weit späteren Zeitpunkt allgemeinen Eingang in die Technik gefunden haben.

Gerade dem letztgenannten Aspekt gilt das besondere Augenmerk des Verfassers. Gewiss sind auch unter den in der Zwischenzeit veralteten Schöpfungen Jakobs wie Alfreds hervorragende Neuerungen zu finden, die gebührend dargestellt zu werden verdienen. Ihr Verständnis bedarf aber eines Eindringens in die bei ihrer Entstehung gegebene Situation. Konzeptionen aber, die bei Offenlegung der Grundideen ein gutes Jahrhundert

nach ihrem Entstehen noch als verwandt mit technisch Aktuellem empfunden werden können, darf man mit gutem Gewissen als genial einstufen. Zur Illustration dieses Sachverhaltes soll in der Folge einer Pionierkonstruktion gelegentlich deren Nachfolgerin aus neuerer Zeit gegenübergestellt werden, die in verschiedenen Fällen immer noch das gleiche Grundprinzip erkennen lässt.

Vater und Sohn

Mit Recht weist Dubois (1944) auf die Tatsache hin, dass es in manchen Fällen schwierig oder unmöglich ist, *Jakob oder Alfred Amsler als Urheber* einer Erfindung zu bezeichnen. In der Tat arbeiteten die beiden während langer Jahre (etwa von 1885 bis 1905) sehr eng zusammen und waren nicht geneigt, sich den Kopf darüber zu zerbrechen (oder gar schriftlich festzuhalten), wer von beiden für ein in kongenialer Arbeit vollbrachtes Werk den grundlegenden Gedanken zuerst gefasst hatte.

Aus technischer Sicht ist eine solche Unterscheidung zwar nicht von massgebender Bedeutung. Vom historischen Standpunkt ist es aber zu begrüssen, dass der Urheber beinahe jeder der hier vorgestellten Neuerungen eindeutig oder doch mit grosser Wahrscheinlichkeit namhaft gemacht werden kann. Dementsprechend wird er im Text auch genannt.

Es sind sogar Rückschlüsse auf den *persönlichen Stil* beider möglich, der bis zu einem gewissen Grad aus ihren Arbeiten erkennbar ist: Jakob, aus der Wissenschaft kommend und nur durch eine geniale Erfindung zur Gründung eines zunächst kleinen Unternehmens veranlasst, stand wohl dem feinme-

Auch durch die Form der Darbietung sollen die zukunftssträchtigen Ideen der beiden Industriepioniere ins richtige Licht gerückt werden. Dazu soll gelegentlich – beispielsweise in den Überschriften der Abschnitte – Altes in moderner Terminologie ausgedrückt werden, um so den gedanklichen Brückenschlag über viele Jahrzehnte anschaulich werden zu lassen.

chanischen Integriergerät näher als sein Sohn, der seiner Veranlagung nach mehr die Züge des Maschineningenieurs und Fabrikanten besass. Allerdings dürfen derartige Nuancen gewiss nicht hochgespielt werden, denn ohne Zweifel war Jakob zu maschinenbaulichem Denken und zu unternehmerischer Tatkraft gleichermaßen hervorragend befähigt wie Alfred zur naturwissenschaftlich und mathematisch korrekten Fassung technischer Probleme.

Es ist hier an sich nicht der Ort, die menschlichen Eigenschaften der beiden, sofern sie nicht unmittelbar mit ihrer Erfinder- und Ingenieur Tätigkeit zusammenhängen, eingehend zu schildern. Immerhin mögen einige kurze Erinnerungen an die *Persönlichkeit Alfreds* den aus seinem Tun sich ergebenden Eindruck abrunden.

Als der Verfasser ihn 1939, also wenige Monate vor seinem Tode, kennenlernte, war Alfred Amsler sehr schwerhörig und beinahe blind. Auch hatte sein Sohn Werner ihn schon Jahre zuvor in der Leitung des Unternehmens abgelöst. Trotz der starken Behinderung in der Kommunikation mit seiner Umwelt zeigte er sich an allem, was mit Wissenschaft und Tech-

nik zusammenhing, ja an allem, was den Geist zu scharfem Denken anzuregen vermochte, in hohem Masse interessiert. Dieses Interesse reichte – soweit der Verfasser aus mehreren mühseligen Gesprächen zu entnehmen vermochte – von der Denksportaufgabe bis zur Frage nach einer optimalen Sicherung des eigenen Hauses vor Luftangriffen. Aus seinen Bemerkungen spürte selbst der unerfahrene junge Mann, der ihm gegenüber sass, die Gewohnheit heraus, selbständig zu denken und sich nur auf das eigene Urteil zu verlassen, wobei sich gelegentlich eine originelle Idee einstellte, die man dem Einundachtzigjährigen kaum zugebraut hätte. Dass zugleich ein Zug zum Eigensinn, ja zur Halsstarrigkeit zu beobachten war, sei nicht verschwiegen: Das Alter und die jahrzehntelang erlebte Situation der Überlegenheit gegenüber der Umgebung waren auch an diesem Geist nicht ohne Spur vorübergegangen.

Wohl noch interessanter waren die Erinnerungen, die man von ehemaligen Mitarbeitern – gleichgültig, ob Handlanger oder Prokurist – zu hören bekam. Niemand, der persönlich mit ihm zusammengewirkt hatte, drückte etwas anderes als eine achtungsvolle Meinung aus. Offenbar hatte Alfred Amsler es verstanden, einem Arbeiter ein Trinkgeld (in jener Zeit grosser sozialer Unterschiede keineswegs eine Beleidigung) auf eine Art in die Hand zu drücken, die geeignet war, dem so Ausgezeichneten das Gefühl des Geehrtseins und patriarchalischer Solidarität mit der Firma und deren Inhaber zu vermitteln. Der Verfasser hält es für mehr als nur wahrscheinlich, dass diese Fähigkeit, bei aller autokratischen Machtvollkommenheit einen Zugang zum Mitarbeiter zu finden, einen wesentlichen Anteil am Erfolg des Unternehmens ausmachte. In der Tat war bei vielen älteren Arbeitern und

Mitgliedern des technischen Stabes eine *Verehrung* für «Doktor Alfred» zu spüren, die wesentlich über die übliche positive Einstellung zu einem guten Chef hinausging.

Es gab allerdings auch Fälle, in denen diese Verehrung für einen Dahingegangenen Dimensionen annahm, die dem Fortschritt abträglich werden konnten. Der Leiter einer technischen Abteilung beispielsweise, dem es an Mut zum unvermeidlichen Risiko einer Neuerung gebrach, pflegte diesbezügliche Vorschläge mit der stereotypen Wendung zu quittieren: «Doktor Alfred hat gesagt...» Es folgte eine der letzten Autorität in den Mund gelegte Erklärung für die Nichtdurchführbarkeit der zur Diskussion gestellten Idee. Ein junger Ingenieur gestand dem Verfasser einmal, eine derartige Taktik zum Blockieren von Neuerungen beginne bei ihm einen unterschweligen Hass gegen den Träger besagter Autorität zu wecken, obwohl dieser wohl in manchen Fällen gegen die Unterstellung angeblich von ihm geäusselter Lehrmeinungen energisch protestiert hätte... Selten wurde dem Verfasser die latente Gefahr drastischer vor Augen geführt, die das Einrosteten in den wirklichen oder vermeintlichen, in jedem Fall aber zeitgebundenen Erfolgsrezepten eines «grand old man» bei weniger klarsichtigen Nachfolgern bewirken kann.

Wie dem auch sei, es besteht kein Zweifel daran, dass Alfred Amsler es während langer Zeit verstanden hat, sein Unternehmen an der Spitze einer weltweiten Konkurrenz zu halten und dass die hohe Achtung, die er bei seinen Mitarbeitern genoss, nicht von ungefähr kam.

1854: Analogrechner im Reisszeugformat – das Polarplanimeter

Hilfsmittel für die Erleichterung und Beschleunigung von Rechenarbeiten hat es schon in sehr früher Zeit gegeben. Der *Abakus* zum Beispiel, der noch heute in Russland und in einigen fernöstlichen Ländern anzutreffen ist, war in Ägypten und China vor Jahrtausenden bekannt. Im Prinzip als digitales Addier- und Subtrahiergerät erfunden, konnte er bei vertretbarem Mehraufwand an Zeit auch für die beiden anderen Grundoperationen eingesetzt werden und beherrschte das Feld in verschiedenen Varianten (vorab als Zählrahmen) souverän, sofern man sich nicht mit Papier und Bleistift begnügte. Zwar blieben Versuche zu höherer Rationalisierung nicht aus. Vergleicht man aber etwa den Aufwand für den Bau einer Rechenmaschine nach Pascal mit demjenigen für einen Abakus und zieht die Rechengeschwindigkeiten beider sowie den Arbeitslohn für einen Rechenknecht zwischen 1700 und 1850 in Erwägung, so begreift man die Schwierigkeiten, die damals der technischen Innovation schon aus rein wirtschaftlichen Gründen im Wege standen. Wer je die verblüffende Behendigkeit einer russischen Kassiererin beim Hin-und-Herschneppen der Kügelchen auf den Stäben des Zählrahmens beobachten konnte, wird diese Feststellung bestätigen.

Ein akuter *Bedarf nach leistungsfähigen Rechengerten* entstand im Zuge der allgemeinen naturwissenschaftlich-technischen Entwicklung in der ersten Hälfte des neunzehnten Jahrhunderts. Man hatte immer bessere Vermessungsgeräte, die eine immer genauere Bestimmung des Umrisses eines Grundstücks erlaubten; wie

aber sollte man ohne erheblichen Arbeitsaufwand dessen Flächeninhalt als Basis für seinen Wert ermitteln? Man lernte, den Druckverlauf im Zylinder einer Dampfmaschine mit einiger Präzision zu bestimmen und in einem Druck-Volumen-Diagramm («Indikatordiagramm») darzustellen; wie aber sollte man die im Laufe einer Umdrehung abgegebene mechanische Arbeit rationell in Erfahrung bringen, die für die Leistung der Maschine massgebend war? Kurzum, es entstand ein Bedürfnis nach Geräten, die, ausgehend von der zeichnerischen Darstellung einer ebenen Figur, auf einfache Weise deren *Flächeninhalt* ermitteln sollten.

Die mathematischen Grundlagen für solche Integrationen lagen schon seit der bemerkenswerten Zwillingserfindung von Leibniz und Newton bereit, und in der Zwischenzeit waren zahlreiche Integrationsformeln für mehr oder weniger regelmässige Flächen verschiedener Form bekanntgeworden. Nur taten weder Grundstücke noch Indikatordiagramme noch andere technisch-wirtschaftlich interessante Flächengebilde einem allzu häufig den Gefallen, sich diesen Formeln anzupassen, sondern hatten in der Mehrzahl der Fälle unregelmässige Umrisse. So blieb nichts anderes übrig, als mühselig in kleinen Schritten – beispielsweise durch Rasterung – vorzugehen, was selbst bei den damaligen Lohnverhältnissen kostenmässig ins Gewicht fallen konnte und daher häufig unterlassen wurde.

Das Bestehen eines echten Bedarfes wird unter anderem belegt durch die verschiedenen *Versuche, geeignete Rechengerte zu entwickeln*. Es han-

delte sich dabei vorab um stufenlose Reibradgetriebe mit einem Übersetzungsverhältnis, das in einem Koordinatensystem xy dem Integranden y mit genügender Genauigkeit proportional zu sein hatte. Das Prinzip sei an der ältesten dem Verfasser bekannten Ausführung, dem 1925 entstandenen *Scheibenintegrator* nach Gonella (Galle, 1912) dargelegt (Fig. 1). Die Integration $J = \int y \cdot dx$ werde in infinitesimal kleine Schritte

$$dJ = y \cdot dx \quad (1)$$

zerlegt: Eine sehr schmale Rolle mit dem Radius r sei annähernd reibungsfrei drehbar um eine Achse gelagert, die die Achse einer ebenfalls drehbar gelagerten Scheibe unter einem rechten Winkel schneide. Die Rolle werde gegen die Scheibe gedrückt und berühre diese in einem Abstand R von deren Achse. Dieser Abstand sei proportional zum Integranden y . Nun führe die Scheibe eine infinitesimal kleine Drehung aus, deren Winkel $d\beta$ dem Differential dx des Argumentes x proportional sei. Dann wird sich die Rolle um einen Winkel $d\delta$ drehen, der offenbar durch

$$d\delta = (R/r) \cdot d\beta \quad (2)$$

gegeben ist. Angesichts der Proportionalitäten zwischen $d\beta$ und dx sowie zwischen R und y ist somit $d\delta$ proportional zu dJ . Mit anderen Worten: Der Drehwinkel δ der Rolle ist ein Mass für das Integral J .

Zwei Jahre nach Gonella wandelte Oppikofer (Galle, 1912) die Scheibe in einen Kegel ab, bei welchem die mathematischen Beziehungen natürlich analog sind (die Scheibe kann ja als Kegel mit 180° Öffnungswinkel angesehen werden).

Die beschriebenen Integratoren wurden in der Folge zwar gelegentlich

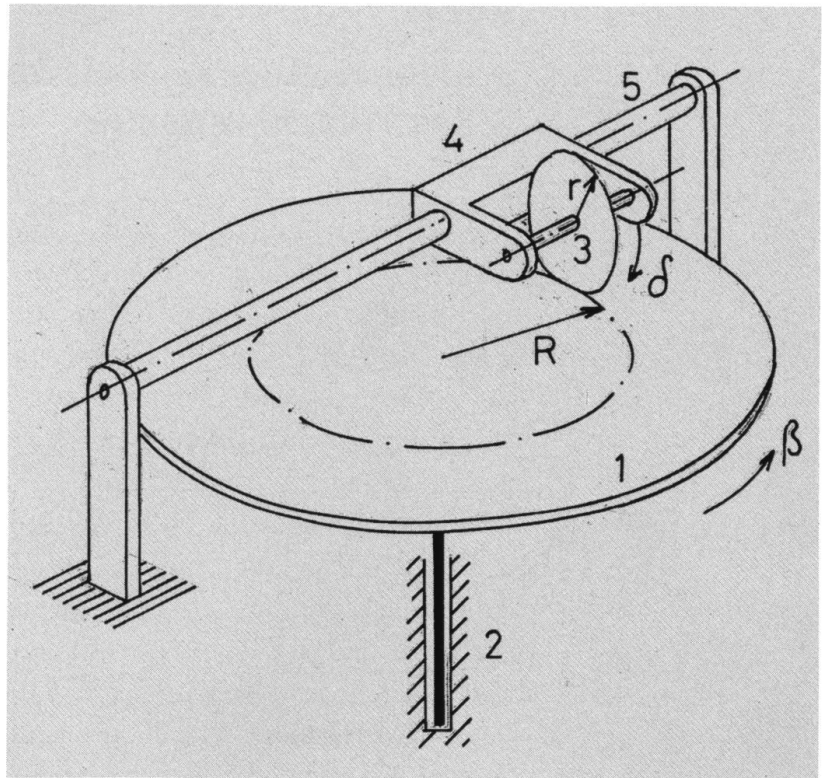


Fig. 1 Schema des Scheibenintegrators nach Gonella. 1 = proportional zu x angetriebene Scheibe; 2 = Lagerung der Scheibe; 3 = Integrierrolle; 4 = proportional zu y bewegter Schlitten mit Lagerung der Rolle; 5 = Führung des Schlittens. r = Radius der Rolle; R = durch die Stellung des Schlittens bestimmter Laufradius der Rolle auf der Scheibe; β = Drehwinkel der Scheibe; δ = Drehwinkel der Rolle.

für diesen oder jenen Zweck mit Erfolg eingesetzt, beispielsweise *Kegelintegratoren* um 1850 in der von K. Wetli (Stampfer, 1850) modifizierten Form als Flächenmesser (Planimeter). Dennoch blieb ein eigentlicher Durchbruch für die Planimetrierung aus. Sehr wahrscheinlich waren wirtschaftliche Gründe dafür verantwortlich: Um eine genügende Genauigkeit zu erhalten, mussten verschiedene Bedingungen erfüllt sein: Die Geometrie (spielfreie und exakte Übertragung der Eingangswerte x und y von der Zeichnung auf den Integriermechanismus) musste sehr präzise stimmen, und die Rolle durfte weder nennenswerte Lagerreibung noch nennenswertes Spiel noch nennenswerte Breite der

Berührungsfläche mit der Scheibe haben. All dies war mit den damaligen technischen Mitteln kaum oder doch nur mit hohem Aufwand zu verwirklichen, so dass – in Analogie zur Rechenmaschine nach Pascal – die Einsparung an Arbeit nur in seltenen Fällen die Herstellungskosten des Gerätes wettmachen konnte. Zudem musste es sich notwendigerweise um sperrige Apparate handeln, deren Einsatz nicht ohne einen gewissen Aufwand (etwa einen für das Gerät reservierten Tisch) rationell gestaltet werden konnte.

Es ist im übrigen kein Zufall, dass die vollkommensten Ausführungen des Scheibenintegrators erst zwischen 1930 und 1955 im Rahmen grosser Rechenanlagen entstanden, als fortgeschrittenere, nach dem Zweiten Weltkrieg zum Teil schon elektronische Technologien die weitgehende Ausschaltung von Fehlerquellen ermöglichten (Bush, 1931; Bush et al., 1945; Hoffmann, 1956), angesichts der unaufhaltsamen Entwicklung rein elektronischer Rechengерäte allerdings eine zeitlich beschränkte Blüte.

Um 1850 bestand also eine Nachfrage nach einem einfachen, relativ billigen und trotzdem genauen und zuverlässigen Integriergerät. Und dieses Gerät musste, da es gezeichnete Flächen zu messen hatte und natürlich noch keine Analog-Digital-Wandler existierten, ein Analogrechner sein. Mit seinem *Polarplanimeter* fand Jakob Amsler für dieses Problem eine Lösung, deren Eleganz mit rein mechanischen Mitteln seither nie mehr auch nur annähernd erreicht, geschweige denn übertroffen wurde.

Der beste Weg, diese Eleganz zu veranschaulichen, bestünde wohl in der Gegenüberstellung einer Abbildung des Gerätes (Fig. 2) und der Ableitung seines Funktionsprinzips in einer an die massgebende Publikation des Erfinders angelehnten Form (J. Amsler, 1856; Galle, 1912; Dubois, 1944, Willers, 1951). Man sähe aus dem Gegensatz zwischen recht aufwendigen mathematischen Darlegungen und der verblüffenden Einfachheit der technischen Verwirklichung die für Jakob Amsler charakteristische stupende Fähigkeit, aus einer komplex erscheinenden Situation das entscheidende Einfache herauszuspüren. In der Tat konnte sich die Funktionstüchtigkeit der Grundidee nur einem Geist offenbaren, der in der Lage war, in Polarkoordinaten mit ebensolcher Leicht-

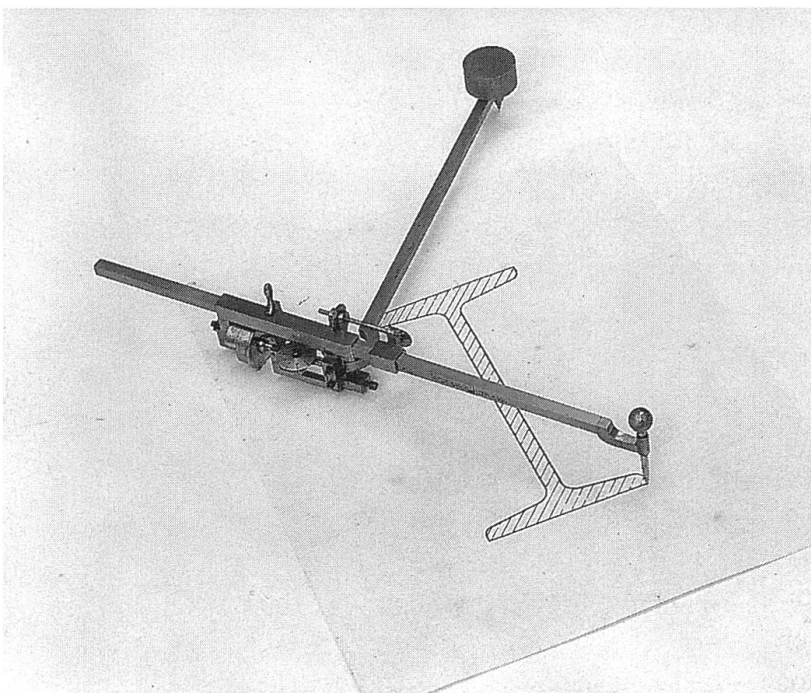
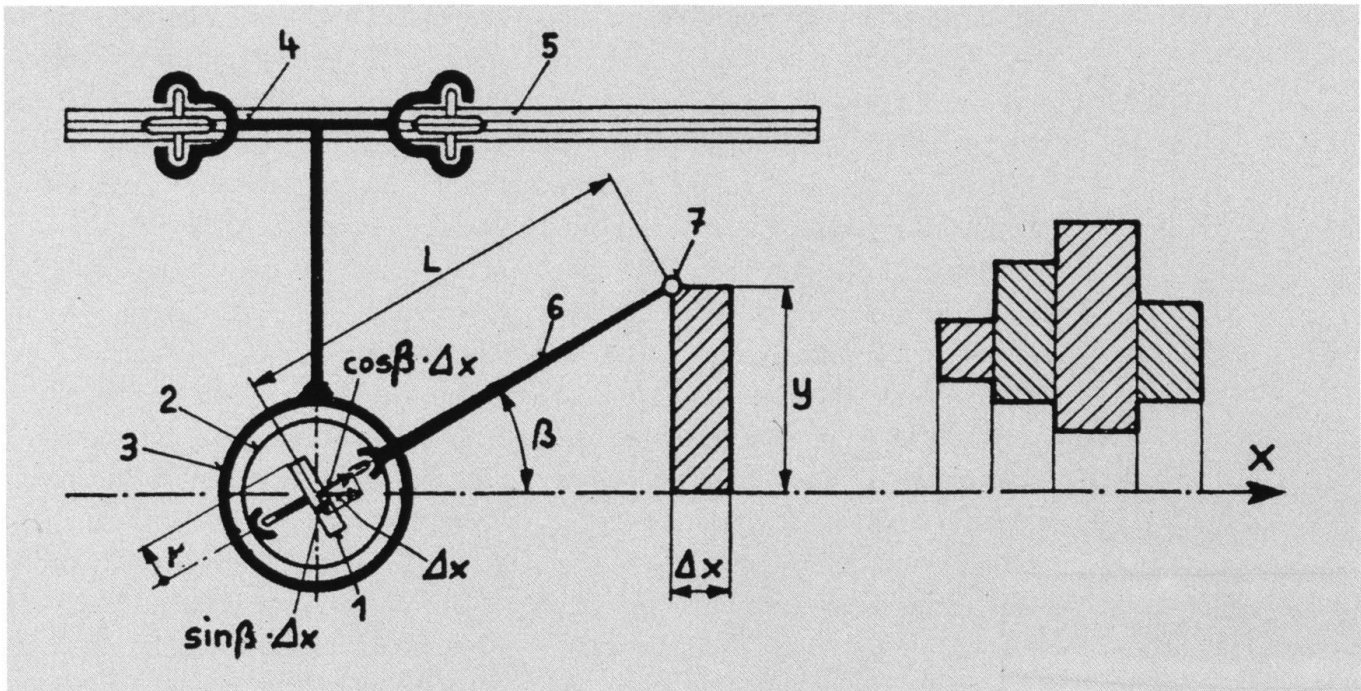


Fig. 2 Eines der ersten Amsler-Polarplanimeter in Arbeitsstellung. Hinten Pol mit Zirkelspitze zur Fixierung sowie angeschlossenen Polarm. Vorne rechts Fahrstift am (in der Länge verstellbaren) Fahrarm. Links Integrierwerk: Rolle mit Teilung und Nonius zur Feinablesung des Drehwinkels sowie Scheibe (mit verdecktem Schneckenantrieb) zur Anzeige der ganzen Rollendrehungen. Man beachte die Einfachheit im Vergleich mit dem in Fig. 1 schematisch dargestellten Scheibenintegrator.



tigkeit zu denken wie in den weit anschaulicheren kartesischen. Mag sein, dass Amsler als Mathematiker und Astronom besonders gute theoretische Voraussetzungen mitbrachte, aber schliesslich gab es damals schon viele Fachleute mit ebenso gutem Rüstzeug, und trotzdem fand nur einer das «Ei des Kolumbus».

Wenn in der Folge eine von der ursprünglichen abweichende Ableitung vorgelegt und damit auf die soeben angesprochene Demonstration der Eleganz verzichtet wird, so hat dies zwei Gründe: Zum einen soll dem Leser der einfachste mögliche Zugang zum Funktionsprinzip des Planimeters gezeigt werden; zum zweiten wird ein höherer Grad von Verallgemeinerung erreicht, der wahrscheinlich dem Erfinder nicht bekannt war. Im Kernpunkt dieser neuen *Planimetertheorie* steht eine Zerlegung des Gedankenganges in zwei leicht nachvollziehbare Teile, deren erster zwar einen Spezialfall betrifft, der aber im zweiten problemlos zur angestrebten extremen Verallgemeinerung ausgeweitet werden kann. Die nachstehenden Ausführungen folgen zum Teil wörtlich der ersten Publikation zu diesem Thema (Erismann, 1962):

Fig. 3 Schema des Linearplanimeters. 1 = Integrierrolle (Radius r); 2 = innerer Lagerring (fest am Fahrarm 6); 3 = äusserer Lagerring (fest am Wagen 4); 4 = Wagen; 5 = Führungslinie; 6 = Fahrarm (Länge L); 7 = Fahrmarke; x, y = Koordinaten. Rechts aus Rechtecken zusammengesetzte Figur.

Die Basis des Planimeters ist die sogenannte Integrierrolle, die auf ihrer ebenen Unterlage (meist der zu planimetrierenden Zeichnung) eine teils rollende, teils gleitende Bewegung ausführt, im Idealfall mit reibungsfreier Lagerung.

Der *erste Teil* betrifft den *Spezialfall des Linearplanimeters* (Fig. 3), bei dem der Berührungspunkt Rolle/Unterlage durch einen Wagen auf einer geraden Grundlinie geführt wird und die Rolle samt ihren Lagerungen um eine vertikale Achse durch den erwähnten Berührungspunkt schwenkbar angeordnet ist. In der Verlängerung der Rollenachse ist der sogenannte Fahrarm angebracht, an dessen Ende eine Fahrmarke (Stift oder Lupe mit Fadenkreuz oder Visierkreis) das Umfahren der zu messenden Figur ermöglicht. Folgt die Fahrmarke während einer kurzen Wegstrecke Δx

einer Parallelen zur Grundlinie im Abstand y , so schliesst der Fahrarm mit der Grundlinie einen Winkel

$$\beta = \arcsin(y/L) \quad (3)$$

ein, wenn L die wirksame Länge des Fahrarms ist. Die Verschiebung Δx der Rolle auf der Unterlage zerfällt dann in eine (keine Drehung bewirkende) Axialkomponente $\Delta x \cdot \cos\beta$ und eine (für die Drehung massgebende) Tangentialkomponente $\Delta x \cdot \sin\beta = \Delta x \cdot y/L$. Bei einem Rollenradius r ergibt sich damit der kleine Drehwinkel

$$\Delta\vartheta = \Delta x \cdot y / (L \cdot r) \quad (4)$$

für die Rolle. Da L und r Apparatekonstanten sind, ist also $\Delta\vartheta$ proportional der Rechtecksfläche mit der Breite Δx und der Höhe y . Umfährt man diese Rechtecksfläche vollständig, so erhält man den gleichen Rollwinkel $\Delta\vartheta$, da sich die beiden Rollwinkel beim Auf- und Abwärtsfahren entlang den vertikalen Kanten kompensieren und das Befahren der Grundlinie ($y = 0$ und $\beta = 0$) keinen Rollwinkel liefert. Reiht man mehrere verschieden hohe Rechtecke dieser Art aneinander, so braucht man nicht jedes einzelne davon vollständig zu umfahren, sondern kann der stufenförmigen Aussenkontur der entstehenden Gesamtfigur folgen, um deren Flächeninhalt zu ermitteln. In

der Tat werden sich in jedem Fall alle einmal auf- und einmal abwärts befahrenen vertikalen Teilstücke der Kontur kompensieren. Und da die Gleichung (4) natürlich auch für die Bewegung in negativer Richtung ($-\Delta x$) und für negative Werte von y richtig bleibt, muss die Figur keineswegs auf der Grundlinie aufgebaut sein.

Durch Grenzübergang kann man nun offenbar von endlichen Strecken Δx zu infinitesimal kleinen dx übergehen, womit der Beweis erbracht ist, dass das Linearplanimeter tatsächlich den Flächeninhalt jeder geschlossenen ebenen Figur geeigneter Grösse zu bestimmen vermag.

Der zweite Teil dient dem Beweis, dass die *Schwenkachse des Fahrarms nicht auf einer Geraden* geführt zu werden braucht. In Fig. 4 ist beispielsweise eine geknickte Führungskurve mit zwei geraden Ästen angenommen. Die dargestellte Figur wird zunächst in zwei Abschnitten planimetriert: Bei Umfahrung des ersten Abschnittes folgt die Schwenkachse ausschliesslich dem ersten, bei Umfahrung des zweiten Abschnittes ausschliesslich dem zweiten Ast der Führungskurve. Damit die beiden umfahrenen Abschnitte insgesamt die ganze zu planimetrierende Figur ergeben, muss die Fahrmarke offenbar bei beiden Umfahrungen dem gleichen Kreisbogen um die Knickstelle der Führungskurve zweimal folgen, und zwar bei der ersten Umfahrung in der einen, bei der zweiten in der anderen Richtung. Da die Rollwinkel aus diesen beiden Kreisbewegungen sich gegenseitig

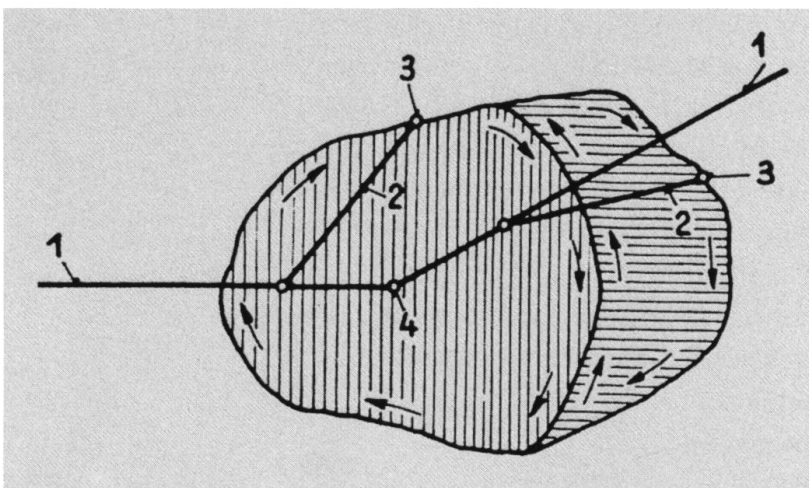


Fig. 4 Geknickte Führung der Fahrarm-Schwenkachse bei einem Linearplanimeter. 1 = Führungsgerade mit Knick; 2 = Fahrarm in zwei Stellungen; 3 = Fahrmarke; 4 = Knickpunkt. Die erste in Pfeilrichtung umfahrene Fläche ist durch senkrechte, die zweite durch waagrechte Schraffur markiert.

kompensieren, können sie offenbar weggelassen werden, ohne das Resultat zu verändern. So bleibt dieses auch richtig, wenn die Gesamtfigur trotz geknickter Führung der Schwenkachse in einem Zug umfahren wird.

Da für mehrere Knicke die gleichen Überlegungen gelten wie für einen einzigen, ist damit die theoretische Funktionsfähigkeit eines «Polygonplanimeters» nachgewiesen, bei dem die Schwenkachse des Fahrarms auf einem beliebigen Polygonzug geführt ist. Zu beachten ist lediglich die Bedingung, dass bei Hin- und Rückbewegung nicht etwa zwei Äste einer in x mehrdeutigen Kurve befahren werden. Nun bedarf es nur noch eines zweiten Grenzüberganges zu infinitesimal kurzen Polygongeraden, um die Funktionsfähigkeit jedes Planimeters nachzuweisen, dessen Fahrarm-Schwenkachse auf einer in Funktion von x eindeutig gegebenen Kurve geführt wird. Das Polarplanimeter mit Führung der Schwenkachse auf einer Kreisbahn erweist sich so als – allerdings praktisch besonders wichtiger – Spezialfall eines weitaus *allgemeineren Konzeptes*.

Die erwähnte praktische Bedeutung des Polarplanimeters ist bedingt durch die konkurrenzlos einfache Führung der Schwenkachse. Dazu genügt eine Art Zirkel, bestehend aus einem feststehenden Pol ausserhalb der planimetrierten Figur und einem um diesen schwenkbaren Polarm, der die Lagerung der Schwenkachse trägt (Fig. 2).

Nebenbei sei noch erwähnt, dass das Verbot einer Führung der Schwenkachse auf einer in x mehrdeutigen Kurve schon von Jakob Amsler mit Recht für die *Messung grosser Figuren* mit dem Polarplanimeter durchbrochen wurde: Es lässt sich nämlich zeigen, dass auch eine Flächenmessung mit innerhalb der Figur liegendem Pol, also nach Beschreiben eines vollen Kreises durch den Polarm, ein

richtiges Resultat ergibt, wenn man zu der als Rollwinkel angezeigten Fläche diejenige des «Nullkreises» addiert, bei dessen Umfahrung die Integrierrolle ständig stillsteht und somit auch keinen Rollwinkel liefert. Wie Fig. 5 zeigt, ist dies der Fall, wenn – ungeachtet der konstruktiv bedingten geometrischen Konfiguration – die vertikale Achse durch den Pol in der Ebene der Integrierrolle liegt. Der Abstand zwischen Pol und Fahrmarke ist dann der Radius des Nullkreises. In der Abbildung ist die Umfahrung einer Figur derart dargestellt, dass die Richtigkeit der obigen Behauptungen ohne weitere Erläuterungen einleuchtet. Dabei wird erneut von einer zweckmässigen Unterteilung der zu messenden Gesamtfigur ausgegangen.

Gewiss war die Erfindung des Polarplanimeters eine hervorragende Leistung. Sie war offensichtlich der unabdingbare *erste Schritt zur technischen Verwirklichung* des Gerätes, aber bei weitem nicht hinreichend für eine solche. Und weitere Schritte setzten beim Träger der Idee völlig andere Qualitäten voraus als der erste. Es erwies sich, dass Jakob Amsler auch diese besass.

Der *zweite Schritt* war geeignet, die Verwirklichung der Grundidee zu vereinfachen. Er lag noch auf der Ebene der mathematischen Voraussetzungen. Er sei hier nur am Rande erwähnt, da die erforderlichen Nachweise ziemlich trivialer Natur sind. Es handelte sich um die Feststellung, dass der *Auflagepunkt der Integrierrolle nicht in der Schwenkachse* zu liegen braucht. Die einzige zu erfüllende Bedingung besteht in der parallelen Anordnung der Rollenachse und des Fahrarmes. Damit war dem Konstrukteur eines Planimeters eine erheblich verbesserte Freizügigkeit bei der Gestaltung des Gerätes gegeben.

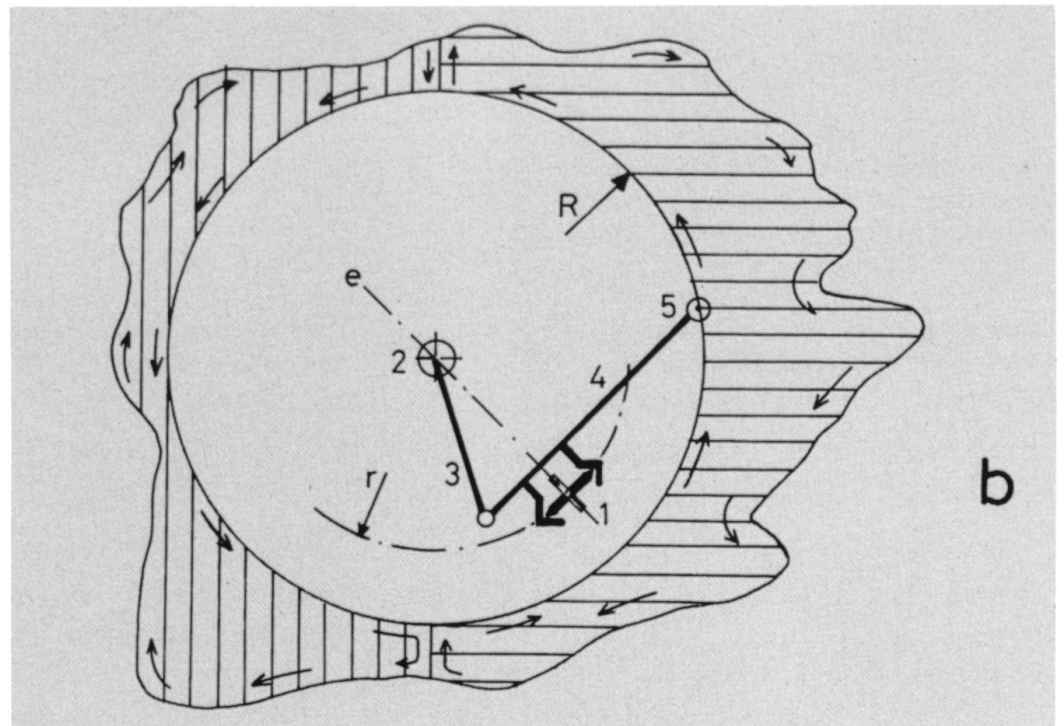
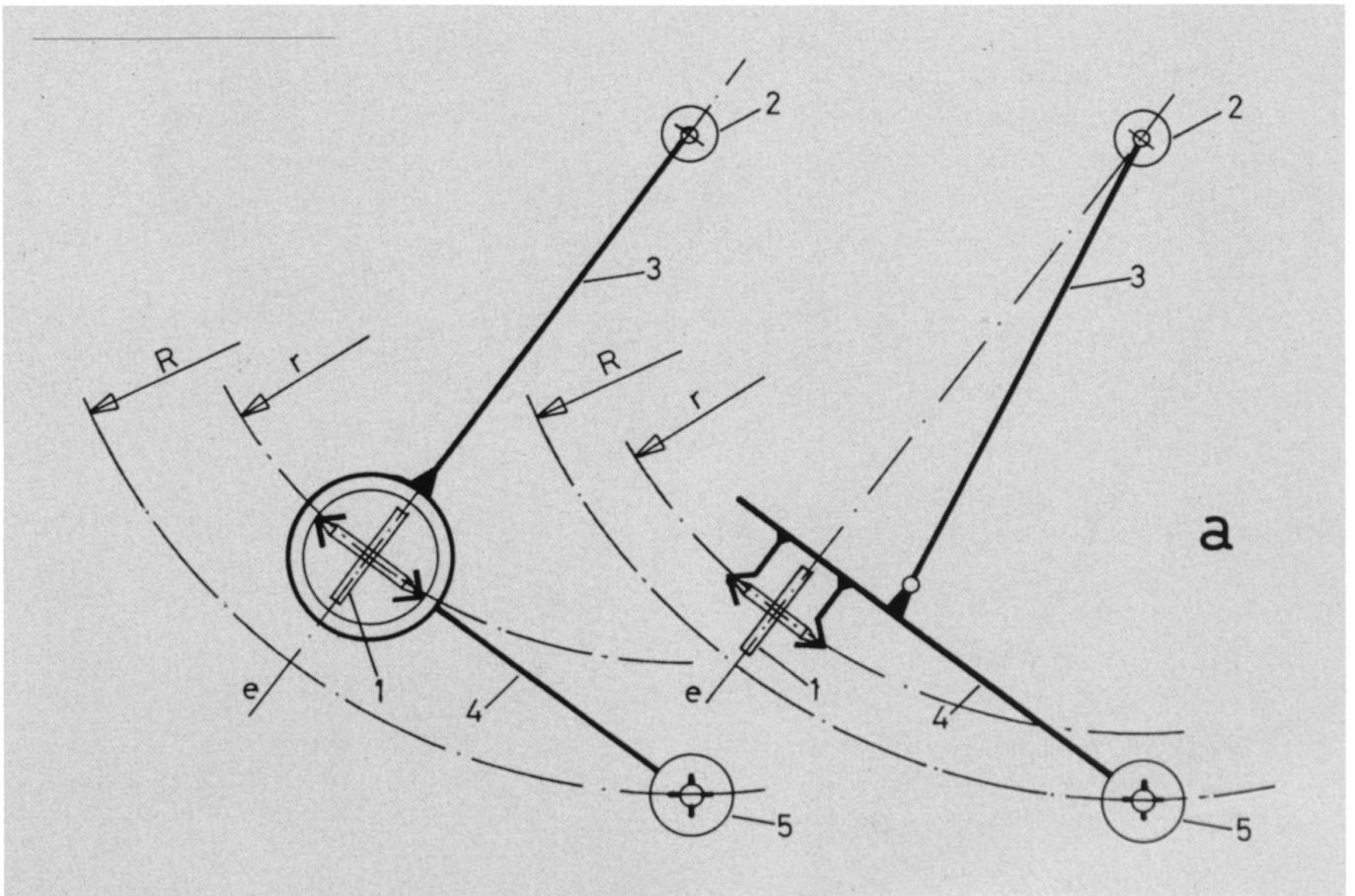


Fig. 5 Messung grosser Figuren. 1 = Integrierrolle; 2 = Pol; 3 = Polarm; 4 = Fahrarm; 5 = Fahrmarke. e = Ebene der Integrierrolle, durch den Pol gehend; r = Radius, auf dem die Integrierrolle ohne Drehung gleitet; R = Radius des Nullkreises. a: Zwei Polarplanimeter mit verschiedener Geometrie (links analog zu Fig. 2, rechts zu Fig. 9), aber gleichem Nullkreisradius. b: Aufteilung einer Figur: Umfahrung jeder der beiden schraffierten Teilfi-

guren ergibt deren Fläche; Umfahrung der Gesamtfigur liefert die gesamte schraffierte Fläche, da die bei geteilter Umfahrung hin und zurück befahrenen Trennungslinien weggelassen werden dürfen und das Befahren des Nullkreises keinen Drehwinkel der Rolle ergibt. Somit ist die Fläche der Gesamtfigur gleich der Summe aus der planimetrisch ermittelten Fläche und der Fläche des Nullkreises.

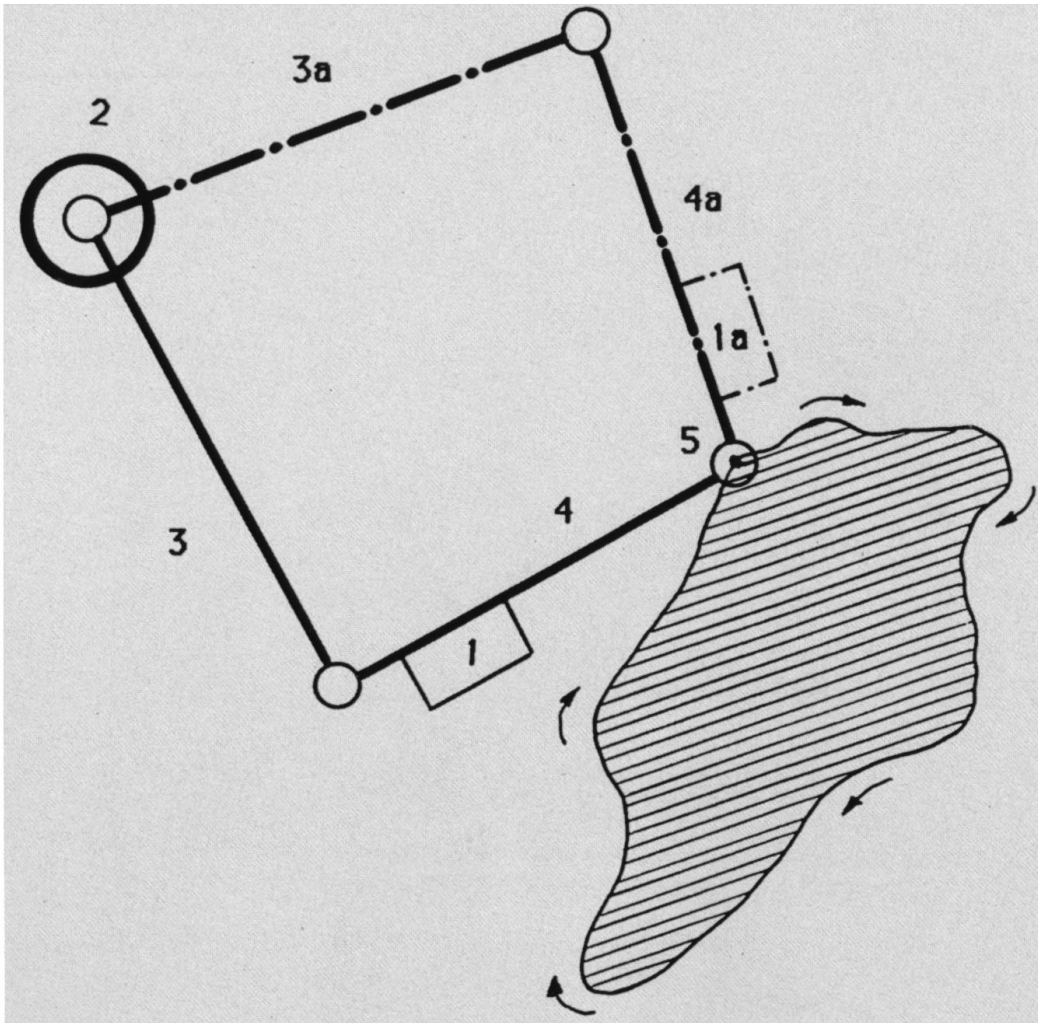


Fig. 6 Kompensationsplanimeter. Zweimalige Umfahrung einer Figur mit unveränderter Lage des Pols gestattet die Unterdrückung kleiner fabrikatorisch bedingter Fehler der Geometrie. 1 = Integrierwerk; 2 = Pol; 3 = Polarm; 4 = Fahrarm; 5 = Fahrmarke. Zweite Umfahrung durch Strichpunktlinien und Buchstaben «a» markiert.

Nebenbei sei noch vermerkt, dass selbst kleine Ungenauigkeiten der besagten Parallelität ausgeschaltet werden können, wenn man sich die Mühe nimmt, eine zweite Umfahrung der Figur ohne Verschiebung des Pols vorzunehmen und dabei den Winkel zwischen Pol- und Fahrarm gegenüber der ersten Umfahrung spiegelbildlich «umzuklappen» (Fig. 6). Es zeigt sich nämlich, dass dann der Mittelwert der beiden Messungen bis auf Fehler zweiter Ordnung das richtige Resultat ergibt. Angesichts dieser Fehlerkom-

pensation bezeichnet man Planimeter, die für eine solche Arbeitsweise den nötigen Schwenkwinkel besitzen, als *Kompensationsplanimeter*.

Mit dem *dritten Schritt* musste die Theorie verlassen und der *Bau eines brauchbaren Apparates* unternommen werden. Hier waren mehrere Bedingungen gleichzeitig zu erfüllen, die nur mit konstruktivem Talent und zum Teil auch nur mit Erfindungsgabe zu verwirklichen waren: Die Parallelität von Rollachse und Fahrarm musste auch bei verstellbarer Fahrarmlänge

(einem Mittel zur Anpassung an die Grösse der planimetrierten Figur durch Änderung der Länge L in Fig. 3) sichergestellt sein. Die Rollenlagerung musste spiel- und reibungsarm gestaltet werden, wofür damals (da es noch keine Miniatur-Wälzlager gab) Spitzenlagerungen mit gehärteten Kontaktflächen gewählt wurden. Die Rolle musste auf dem Papier der Unterlage in Achsrichtung optimal gleiten, in Tangentialrichtung aber ein möglichst grosses Drehmoment abgeben, was durch einen ziemlich groben, aber sehr gleichmässigen achsparallelen Spezialschliff der Rollenperipherie erreicht wurde, der – gewissermassen als Spitzverzahnung mit extrem feinem Modul – mikroskopisch fein in die Oberfläche der Unterlage eingedrückt wurde.

Damit war die Grundlage geschaffen für den entscheidenden *vierten Schritt*, den Übergang zu einer *rationalen Fabrikation*. Hierfür bedurfte es nicht nur eines ausgereiften Prototyps und des erforderlichen Anfangskapitals, sondern auch der Fähigkeit, Mitarbeiter zu führen und das Unternehmerrisiko zu tragen. Auch diese Eigenschaften besass Jakob Amsler, verbunden mit der unerlässlichen Umsicht, die ihn veranlasste, in kleinem Massstab anzufangen. Der Überlieferung gemäss eröffnete er seine Werkstatt an der Schaffhauser Vorstadt mit zwei Arbeitern, einem Lahmen und einem Buckligen...

Der *Erfolg* liess nicht lange auf sich warten. In wenigen Jahren entwickelte sich das Unternehmen beträchtlich, und die Bezeichnung «Amsler-Planimeter» wurde dank rasch einsetzenden Verkäufen in zahlreiche Länder weltweit zu einem festen Begriff. Sicher trugen Weiterentwicklungen der Grundidee einiges zu diesem Erfolg bei. Seine Basis blieb aber ohne Zweifel während geraumer Zeit das einfa-

che, preisgünstige Flächenmessgerät, für welches ein lange anhaltender, grosse Stückzahlen umfassender Bedarf bestand.

Auf die Endzeit des Planimeters, die in das ausgehende zwanzigste Jahrhundert fällt, sei vorerst nicht eingegangen. Es erweist sich nämlich als zweckmässig, dies erst im nachfolgenden Abschnitt zu tun, da das Schicksal der aus dem Planimeter entwickelten komplexeren Geräte ein ähnliches war, so dass mit einer gemeinsamen Behandlung ein breiterer und zugleich tieferer Einblick in die Zusammenhänge gegeben werden kann.

Nur eine Bemerkung sei noch gestattet: Das Planimeter war nach heutigen Begriffen ein *Einzweck-Analogrechengerät*. Sein mehr als hundertjähriger Erfolg in einer Zeit rascher Entwicklung hatte zwei Ursachen: Erstens löste es zwar nur eine, aber eine in zahllosen Zusammenhängen wiederkehrende Aufgabe, die mit den Mitteln der Vor-Computer-Zeit nicht rationeller behandelt werden konnte. Zweitens war die Genauigkeit für den praktischen Einsatz in der Regel genügend. Vergleiche mit den meisten elektronischen Analog-Integratoren brauchte dieses Gerät nicht zu fürchten.

Ab 1856:

Analogrechner zweiter Generation

– Momentenplanimeter und andere mathematische Instrumente

Es wird in der Rechner-Branche des ausgehenden zwanzigsten Jahrhunderts als selbstverständlich angesehen, dass ein Unternehmen, welches mit dem rapiden Innovationstempo nicht Schritt zu halten vermag, am Markt binnen kurzer Zeit in Schwierigkeiten gerät. Zwar waren die Zeitkonstanten von Neuentwicklungen vor hundertfünfzig bis hundert Jahren deutlich länger, es galt aber doch schon die Regel, dass eingerostete Erfolgsrezepte auf die Dauer keine Basis für das Gedeihen einer Firma boten. Neues musste auch damals zum Bewährten hinzukommen. Und in jenen Pionierzeiten der Technik hatte der kreative Ingenieur mindestens ebenso gute Möglichkeiten für echte Neuschöpfungen wie sein Nachfahre, der, vor einer ungeheuren Menge des Bekannten stehend, seine Innovationskräfte manchmal sogar auf Dinge richten muss, die, obwohl als neue Generation einer Produktfamilie angepriesen, eher der Mode als wirklichem Fortschritt dienen.

Das Polarplanimeter war ein Erfolg. Es war genau, zeitsparend, relativ billig und unproblematisch im Gebrauch, und es beanspruchte, wenn ausser Betrieb, so gut wie keinen Raum. Aber die Technik schritt beständig voran, und das Erscheinen eines brauchbaren Flächenmessers weckte selbst ein Interesse an ähnlichen Rationalisierungsmöglichkeiten für bis dahin nicht ins Auge gefasste Aufgaben.

Hier ist es nicht möglich, mehr als nur einige der in diesem Zuge entstandenen Geräte der zweiten Generation zu beschreiben, und es muss auf eine eingehendere Publikation verwiesen

werden (Dubois, 1944). Immerhin seien einige Beispiele summarisch erwähnt und – im Sinne der Überlegungen am Beginn dieser Studie – diejenigen im Detail dargelegt, in denen sich die erfinderische Potenz ihres Schöpfers am deutlichsten zu erkennen gibt (und die zugleich auch wohl die grösste praktische Bedeutung erlangt haben).

Das normale Polarplanimeter war zwar genau genug für viele Zwecke, für einige (insbesondere für die Bestimmung der Flächen genau vermessener Grundstücke) bestand aber ein Bedarf für erhöhte Präzision. Jakob Amsler fand bald heraus, dass der bereits erwähnte Scheibenantrieb der Rolle nach Gonella nicht an ein kartesisches Koordinatensystem gebunden war. So entstand das *Scheiben-Polarplanimeter* (Fig. 7). Und im Blick auf die hier vorgelegte Planimetertheorie ist es offensichtlich, dass anstelle der Führung des Fahrarmes durch einen Polarm ohne weiteres eine solche durch ein Lineal möglich ist, womit das *Linearplanimeter* entstand, das vor allem der Auswertung von Diagrammen auf langen Papierstreifen zu dienen hatte, bei hohen Genauigkeitsansprüchen wiederum mit Scheibenantrieb.

Besonders reizvoll waren aber die Geräte, bei denen Jakob Amsler seine mathematische Begabung zum Tragen bringen konnte. Namentlich interessierte er sich für Integrationen, deren Integranden in einem nichtlinearen Massstab dargestellt waren, so dass eine Integration der Form $J = \int f(y) \cdot dx$ erforderlich wurde, in welcher $f(y)$ eine eindeutige und stetige Funktion

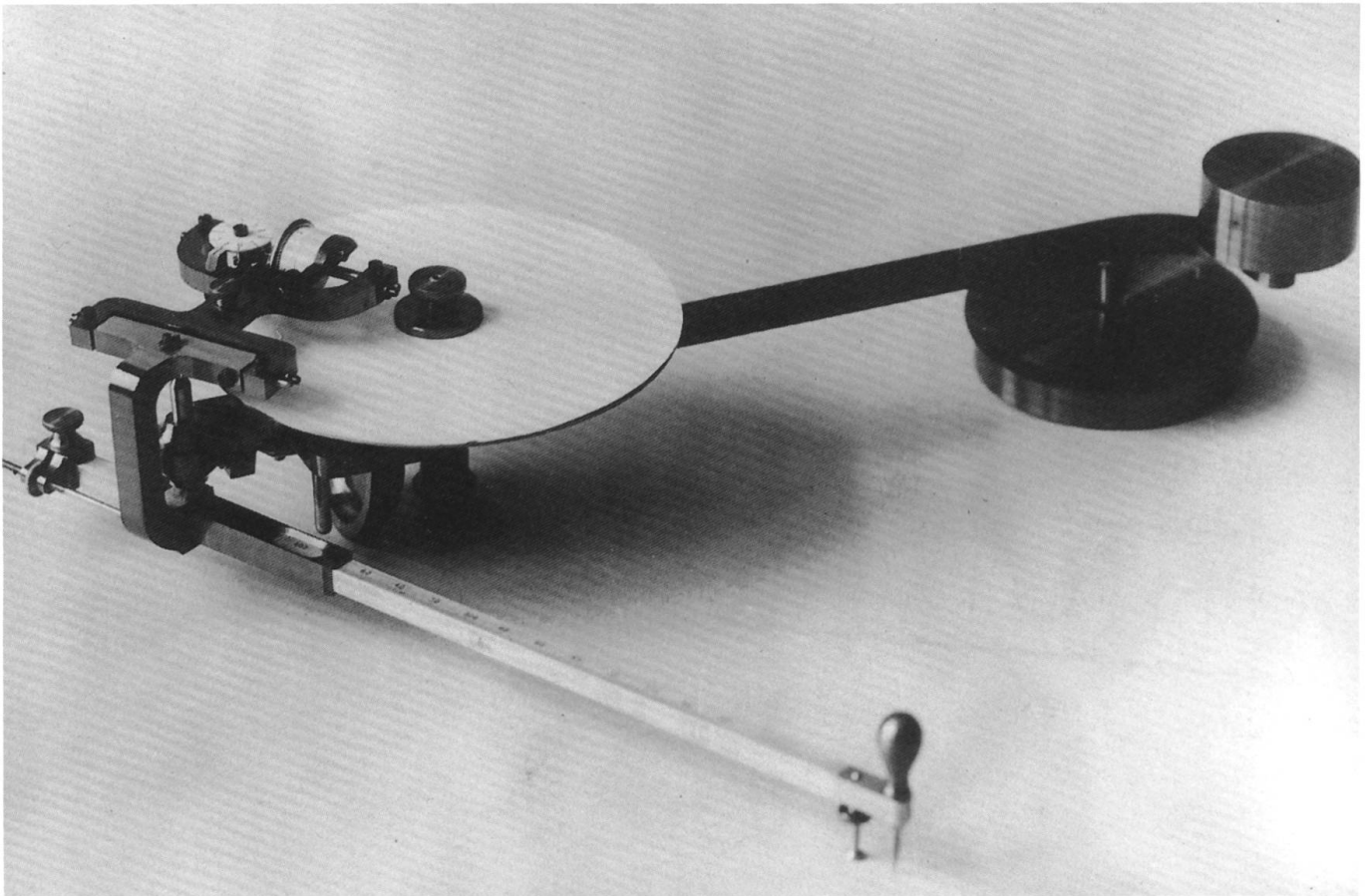


Fig. 7 Scheibenpolarplanimeter für hohe Genauigkeit. Antrieb der Scheibe durch das darunter angeordnete Reibrad und Zahnradübersetzung (andere Modelle wurden mit Hilfe einer Verzahnung an einer sehr grossen Polscheibe angetrieben). Das Gesamtkonzept kann als «auf Polarkoordinaten transformierter Scheibenintegrator» (Fig. 1) aufgefasst werden.

von y zu bedeuten hatte. Vor allem die Familie der Integrale

$$\int f(y) \cdot dx = \int y^n \cdot dx \quad (5)$$

war naturgemäss von hohem Interesse. Bei $n = 2$ ist das Integral proportional dem statischen Moment einer ebenen Figur, bei $n = 3$ deren Flächenträgheitsmoment und bei $n = 4$ dem Rotations-Trägheitsmoment des durch Drehung der Figur um die x -Achse entstehenden Raumkörpers. So können zahlreiche wissenschaftlich und technisch wichtige Daten bestimmt werden, beispielsweise die Lage des

Schwerpunktes einer ebenen Figur, die Festigkeit und Steifheit eines Biegeträgers sowie die kinetische Energie eines Schwungrades. Geräte zur Bestimmung der entsprechenden Integrale heissen *Momentenplanimeter*. In der damals von Amsler eingeführten Terminologie wurden sie allerdings etwas unpräzise als «Integratoren» bezeichnet.

Es ist charakteristisch für Jakob Amsler, dass er sich nicht auf die naheliegende Lösung einliess, die Funktion $f(y)$ durch eine Leitkurve einzuführen, deren Herstellung auch – speziell mit den damals verfügbaren

technischen Mitteln – recht aufwendig gewesen wäre. Vielmehr dachte er an die Zusammenhänge der Trigonometrie und stiess auf die Beziehungen zur Bestimmung der trigonometrischen Funktionen doppelter, drei- und vierfacher Winkel. Daraus lassen sich – da konstante Integranden bei geschlossener Integration belanglos sind – durch triviale Umformung die Gleichungen

$$2 \cdot \int \sin^2 \beta \cdot dx = \int [1 - \cos(2 \cdot \beta)] \cdot dx = -\int \cos(2 \cdot \beta) \cdot dx, \quad (6)$$

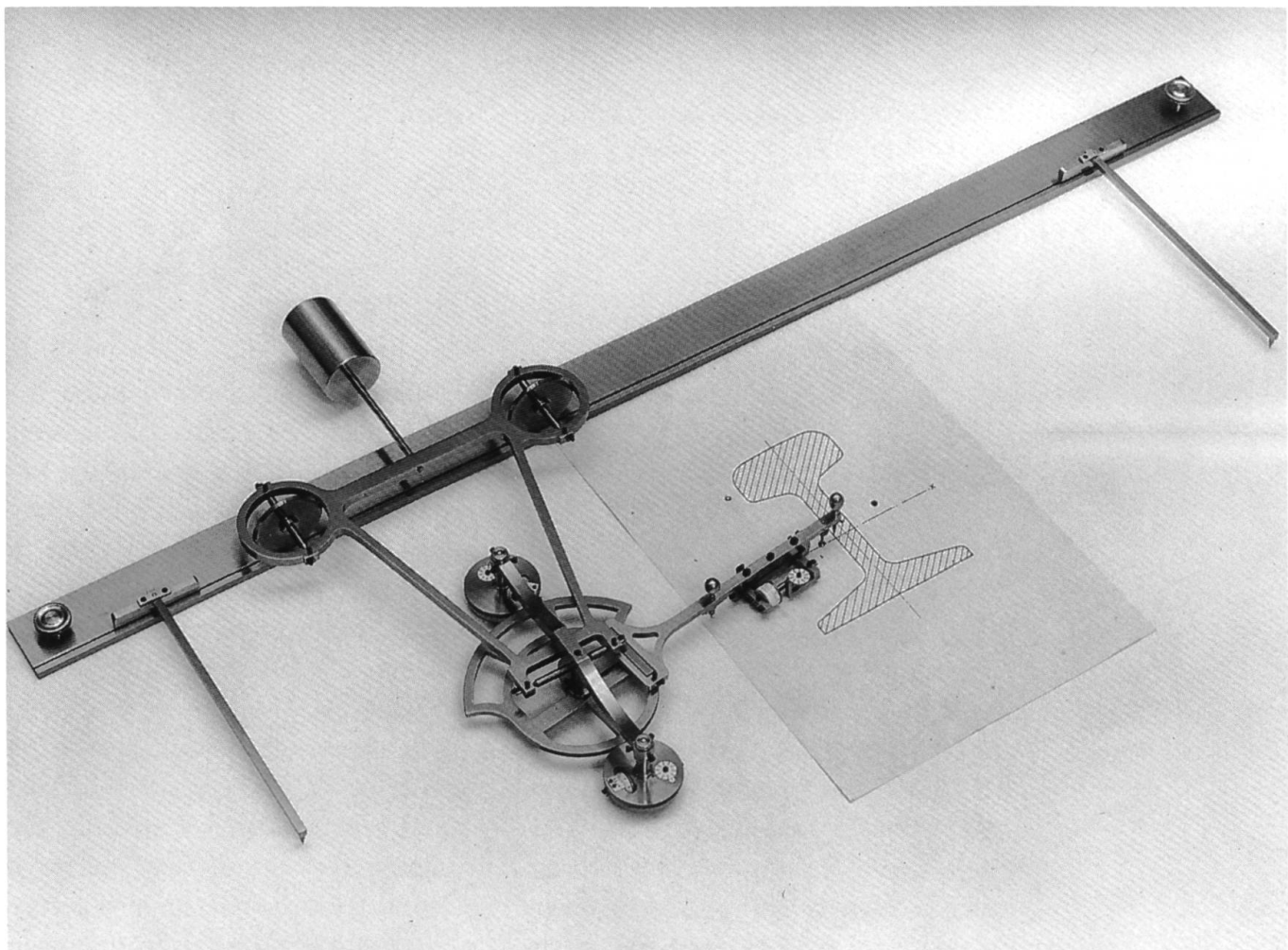
$$4 \cdot \int \sin^3 \beta \cdot dx = \int [3 \cdot \sin \beta - \sin(3 \cdot \beta)] \cdot dx = 3 \cdot \int \sin \beta \cdot dx - \int \sin(3 \cdot \beta) \cdot dx, \quad (7)$$

$$8 \cdot \int \sin^4 \beta \cdot dx = \int [3 \cdot 4 \cdot \cos(2 \cdot \beta) + \cos(4 \cdot \beta)] \cdot dx = -4 \cdot \int \cos(2 \cdot \beta) \cdot dx + \int \cos(4 \cdot \beta) \cdot dx \quad (8)$$

ableiten, die auf ihren letzten Zeilen ausschliesslich Integrale der Sinus-

und Cosinusfunktionen von β , $2 \cdot \beta$, $3 \cdot \beta$ und $4 \cdot \beta$ enthalten. Unter Berücksichtigung der Funktionsweise einer Planimeterrolle bedeutet dies im Klartext: Die Integration des Flächeninhaltes sowie von (6) bis (8) lässt sich mit insgesamt vier Planimeterrollen bewerkstelligen, deren Schwenkachsen auf zur x-Achse parallelen Geraden geführt werden. Eine dieser Rollen kann direkt am Fahrarm angeschlossen sein, die übrigen erhalten durch Zahnräder um die Faktoren 2, 3 und 4

Fig. 8 Momentenplanimeter mit drei Integrierwerken zur Bestimmung der Fläche, des statischen Momentes und des Trägheitsmomentes ebener Figuren. Geräte der dargestellten Art wurden während beinahe hundert Jahren fast unverändert gebaut.



vergrösserte Schwenkwinkel. Damit ergibt sich die wiederum erstaunlich einfache Anordnung gemäss Fig. 8. Dass – im Gegensatz zur oben ange-deuteten (und später von anderen Kon-strukturen verwirklichten) Aus-führung mit Leitkurven – für die Aus-wertung der Momente dritter und vier-ter Ordnung die Resultate von je zwei Rollen, nach Multiplikation mit den richtigen Koeffizienten, voneinander zu subtrahieren sind, bedeutet einen unwesentlichen Mehraufwand: Die Zeit für die sorgfältige Umfahrung einer Figur ist weit grösser als diejenige für die Rechnung, und die Zahl der abzulesenden Rollen ist nicht grösser als bei Verwendung von Leitkurven.

Gewiss war hier die erfinderische Leistung weniger einmalig als beim Planimeter. Schliesslich sind die Grundlagen der Beziehungen (6) bis (8) in jeder einschlägigen Formel-sammlung zu finden. Andererseits musste aber das Streben nach mög-lichst einfachen technischen Lösun-gen gleichzeitig mit einem souveränen Überblick über das eventuell in Frage kommende mathematische Rüstzeug verfügbar sein, um diese Geräte zu schaffen, die, sehr bald nach dem Polarplanimeter entstanden und 1856 mit diesem zusammen publiziert, ebenfalls während mehr als eines Jahr-hunderts erfolgreich im Einsatz stan-den.

Zwei Dinge an der späteren Ent-wicklung waren bemerkenswert. Zum einen zeigte sich eine offensichtliche Freude daran, schwierige Probleme immer wieder auf neue (und häufig virtuose) Art anzugehen. Diese Freude führte neben sehr valablen Resultaten manchmal zu Lösungen, die sich nicht in finanziellen Erfolgen niederschla-gen konnten. Drei Konstruktionen Al-fred Amslers, vor Übernahme der vollen Verantwortung für das Unter-nehmen entstanden, mögen den Sach-

verhalt illustrieren (Dubois, 1944): Ein *stereographisches Planimeter* zur «entzerrten» Flächenmessung an Kar-ten in stereographischer (also nicht flächentreuer) Projektion musste schon des geringen Bedarfes wegen als Markterfolg ausscheiden. Und die Versuche, *Momentenplanimeter mit indirektem Antrieb* über Scheiben (nach Art des Scheibenplanimeters) oder Kugelkalotten zu verwirklichen, waren wegen ihrer Kompliziertheit ge-genüber den bereits bestehenden Typen nicht konkurrenzfähig. Bei der Betrachtung dieser Geräte beschleicht den Kenner unwillkürlich die Vermu-tung, hier könnte die erwähnte Freude an der Problemlösung als solcher eher ausschlaggebend gewesen sein als handfestere Argumente (wie etwa die Hoffnung auf bessere Genauigkeit bei den Momentenplanimetern).

Zum anderen muss nach der Entste-hung der erwähnten zweiten Genera-tion von Geräten eine deutliche Sta-gnation in der Entwicklung festgestellt werden, die etwa die erste Hälfte des zwanzigsten Jahrhunderts umfasste. Die *dritte Generation* von mathemati-schen Instrumenten war also nicht mehr ein Werk der hier gewürdigten Pioniere. Das Verständnis für die Um-stände der erwähnten Stagnation wäre aber ohne summarische Darlegung dieser späten Entwicklung ein unvoll-ständiges.

Es handelte sich zunächst um die Schaffung eines einheitlichen Inte-grier- und Zählwerks mit bequemer Ablesung der ganzen wie der angebro-chenen Umdrehungen. Dieses wurde in grossen Stückzahlen hergestellt und zur Basis eines eigentlichen *Bauka-stens* gemacht, der – zum Teil mit ent-sprechenden Zusatzgeräten – neben den oben beschriebenen eine grosse Zahl weiterer Anwendungen umfasste. Hier zwei Beispiele: ein Zusatz zur Auswertung von Radialdiagrammen

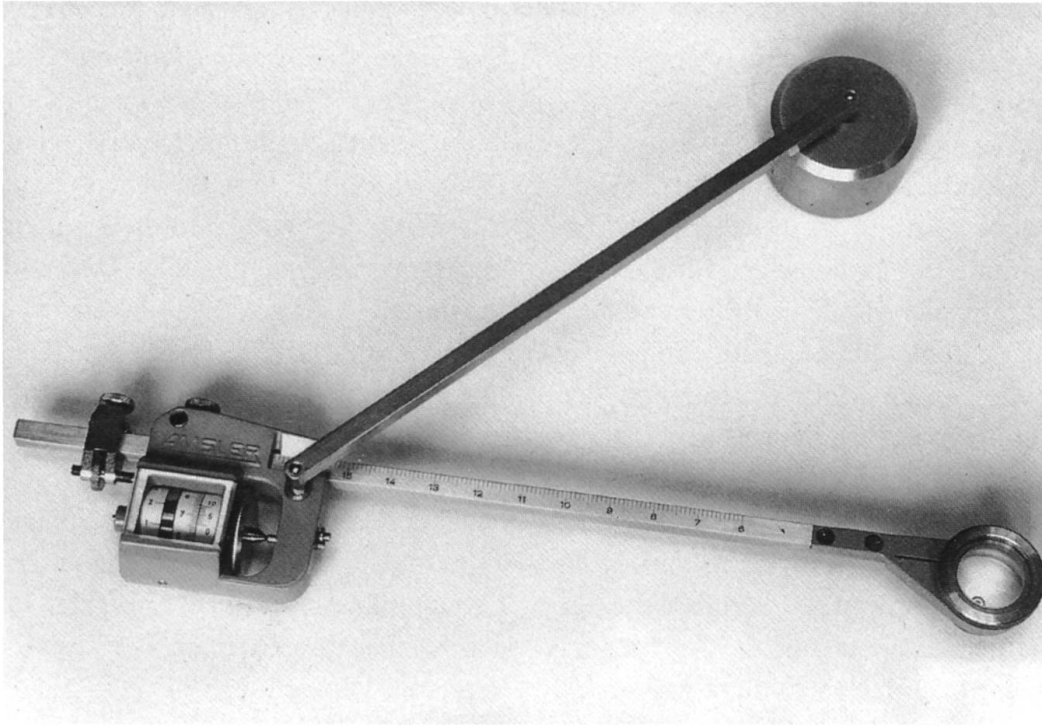


Fig. 9 Polarplanimeter aus den fünfziger Jahren des zwanzigsten Jahrhunderts. Die technischen Einzelheiten sind gegenüber der Ausführung von Fig. 2 stark verfeinert, das Funktionsprinzip ist unverändert.

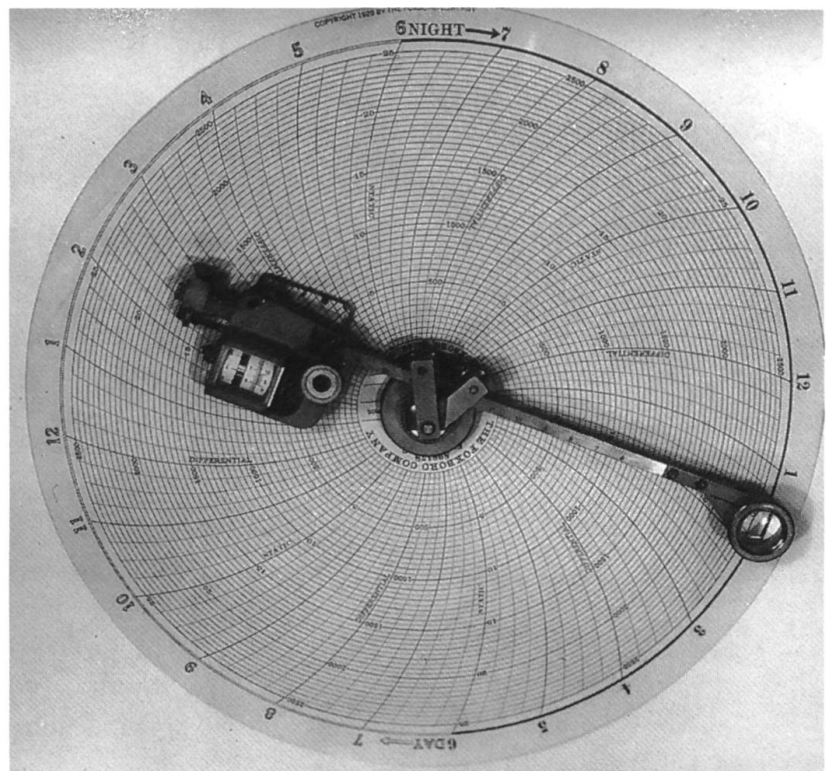
mit Teilen des Polarplanimeters (Fig. 10) sowie ein Spezialfahrarm (Fig. 11) für den Einsatz eines Momentenplanimeters zur Integration der strömungstechnisch wichtigen gebrochenen Potenzen $n = 1/2$ und $n = 3/2$ gemäss Gleichung (5). Für diese Zwecke (wie auch verschiedene andere) waren früher kostspielige spezielle Apparate erforderlich (Dubois, 1942/43). Ein besonderes mathematisches Kuriosum war die Integration nichtlinear dargestellter Funktionen, sofern $f(y)$ mit genügender Genauigkeit durch

$$f(y) = A + B \cdot y + C \cdot y^2 + D \cdot y^3 \quad (9)$$

angenähert werden konnte. Innerhalb angemessener Bereiche von y wurde dieses Rezept mit Erfolg für logarithmische Darstellungen und sogar für das Moment vierter Ordnung ($n = 4$) angewendet, was eine Ausführung mit vier Rollen überflüssig machte. Einzelheiten sind in der Literatur zu finden (Erismann, 1962; 1963).

Diese Innovationen führten um 1960 zu einer Blüte, die allerdings angesichts der rasanten Entwicklung digitaler Computer nicht von langer Dauer sein konnte: Daten werden

Fig. 10 Beispiel für das im Text erwähnte Baukastensystem: Integrierwerk und Fahrarm des Planimeters gemäss Fig. 9 im Einsatz als Radialplanimeter für Kreisdiagramme.



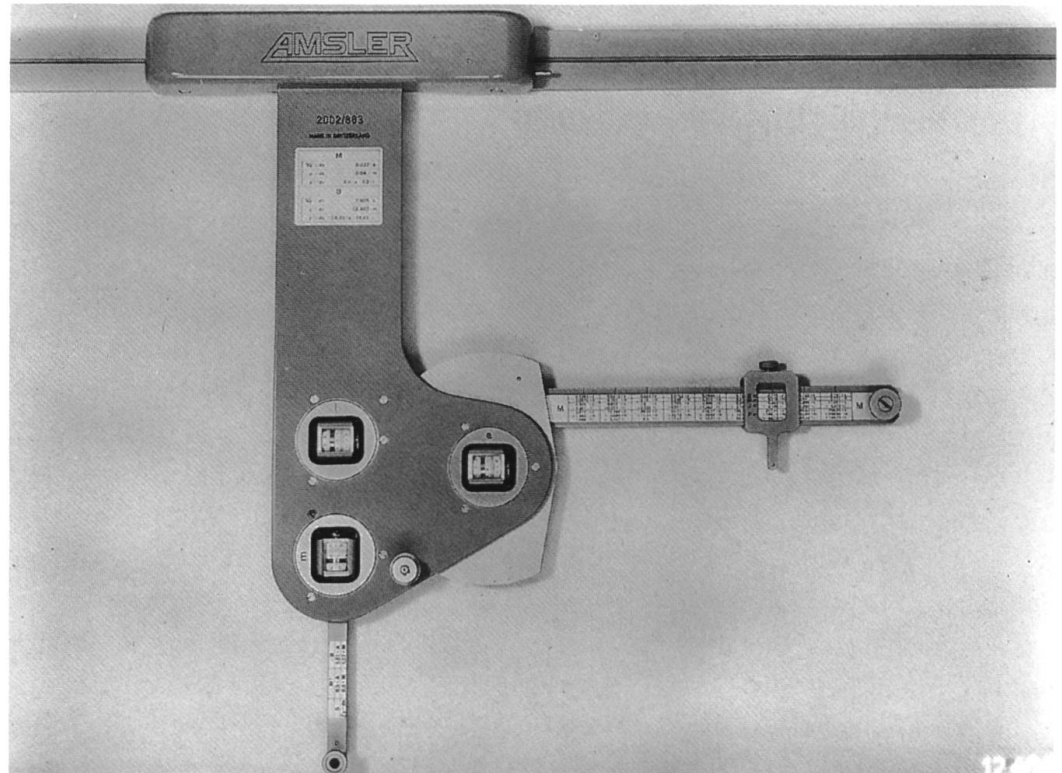


Fig. 11 Dreirollen-Momentenplanimeter aus den sechziger Jahren des zwanzigsten Jahrhunderts. Die Tafel auf dem Ausleger enthält Formeln für die Bestimmung des Momentes vierter Ordnung. Der als Baukasten-Zusatz konzipierte zweite Fahrarm ganz vorne gestattet die Integration gebrochener Potenzen. Man beachte die vom Planimeter (Fig. 9) abgeleitete einheitliche Ausführung der Integrierwerke.

heute nur noch im Interesse der Anschaulichkeit in Kurvenform registriert, sonst aber auf Datenträgern gespeichert, wo sie zur rechnerischen Auswertung jederzeit verfügbar sind. Und selbst dort, wo die manuelle Umfahrung zeichnerisch dargestellter Figuren unerlässlich geblieben ist, können Geräte eingesetzt werden, die eine rasche Übertragung auf einen digitalen Träger erlauben. Es erscheint als Ironie des Schicksals, dass das vom Erfinder des Planimeters gegründete Unternehmen zu den ersten zählte, die solche Apparate in planimeterartig handlicher Form entwickelte (unter dem Namen «Digimeter» durch die damalige Tochterfirma Coradi vertrieben) und so dazu beitrug, ihre angestammten Produkte durch zeitgerechte zu ersetzen (Elsinger, 1980).

Es drängt sich nach diesem Exkurs in spätere Zeiten die Frage auf, weshalb die dritte Generation mathematischer Instrumente nicht einige Jahrzehnte früher entstand. An der erforderlichen Kreativität fehlte es dem jüngeren Amsler gewiss nicht. Wahrscheinlich lag die Ursache in der damaligen Marktlage und in der charakteristischen Struktur einer Pionierfirma: Das gesamte – noch ohne spezielle Massnahmen gut überblickbare – Unternehmen war um eine alles beherrschende Persönlichkeit herum gewachsen, von der innovative Anstösse fast ausnahmslos ausgingen, deren Arbeitskapazität aber ihre natürlichen Grenzen hatte. Die mathematischen Instrumente hatten seit dem Hinzu kommen der Prüfmaschinen und Messwagen ihre bis dahin dominierende Stellung für die Firma verloren, verkauften sich aber trotz allmählichem Aufkommen von Konkurrenten (Coradi, Ott) ohne grosse Mühe gewissermassen von selbst. Kein Wunder also, wenn Alfred Amsler seine Kräfte auf die Produkte konzentrierte, die sein Unternehmen zur Hauptsache trugen.

1886: Handarbeit im Mikrometerbereich – der eingeschliffene Kolben

Neben der Tätigkeit in seinem Betrieb liess Jakob Amsler seine ehemaligen Kollegen vom Lehrkörper der Universität Zürich nicht aus den Augen. Gespräche mit ihnen – später auch mit Professoren der Eidgenössischen Technischen Hochschule – müssen ihm nicht selten Anregungen zu selbständigem Weiterdenken vermittelt haben. Ein Kontakt dieser Art erwies sich als entscheidend für sein eigenes Schicksal wie für das einer rasch wachsenden Branche. Hier sei mit unbedeutenden Anpassungen wörtlich wiedergegeben, was über dieses denkwürdige Ereignis im Buch des Verfassers über Prüfmaschinen und Prüfanlagen (Erismann, 1992) festgehalten ist, welchem auch einige Abbildungen der vorliegenden Studie entnommen sind.

«Man schrieb das Jahr 1886, der Beton stand eben im Begriff, seinen Siegeszug um die Welt anzutreten, und der *Bedarf an leistungsfähigen Prüfmaschinen* stieg rapid. Diese Situation schilderte Ludwig von Tetmajer (berühmt durch die nach ihm benannte 1887 veröffentlichte Knickformel und damals erster Direktor der «Prüfanstalt für Baumaterialien am Schweizerischen Polytechnikum», der späteren EMPA) einem Bekannten, welcher ausgerechnet tags zuvor gehört hatte, dem Franzosen Amagat sei es gelungen, einen Kolben so präzise in einen Zylinder einzuschleifen, dass dieser sich zwar mit minimalem Widerstand bewegen liess, zugleich aber bei Verwendung eines Öls angemessener Viskosität selbst unter hohem Druck fast vollständig dicht hielt. Dies war der Beginn eines zweiten Siegeszuges: Jener Gesprächspartner, der innerhalb so

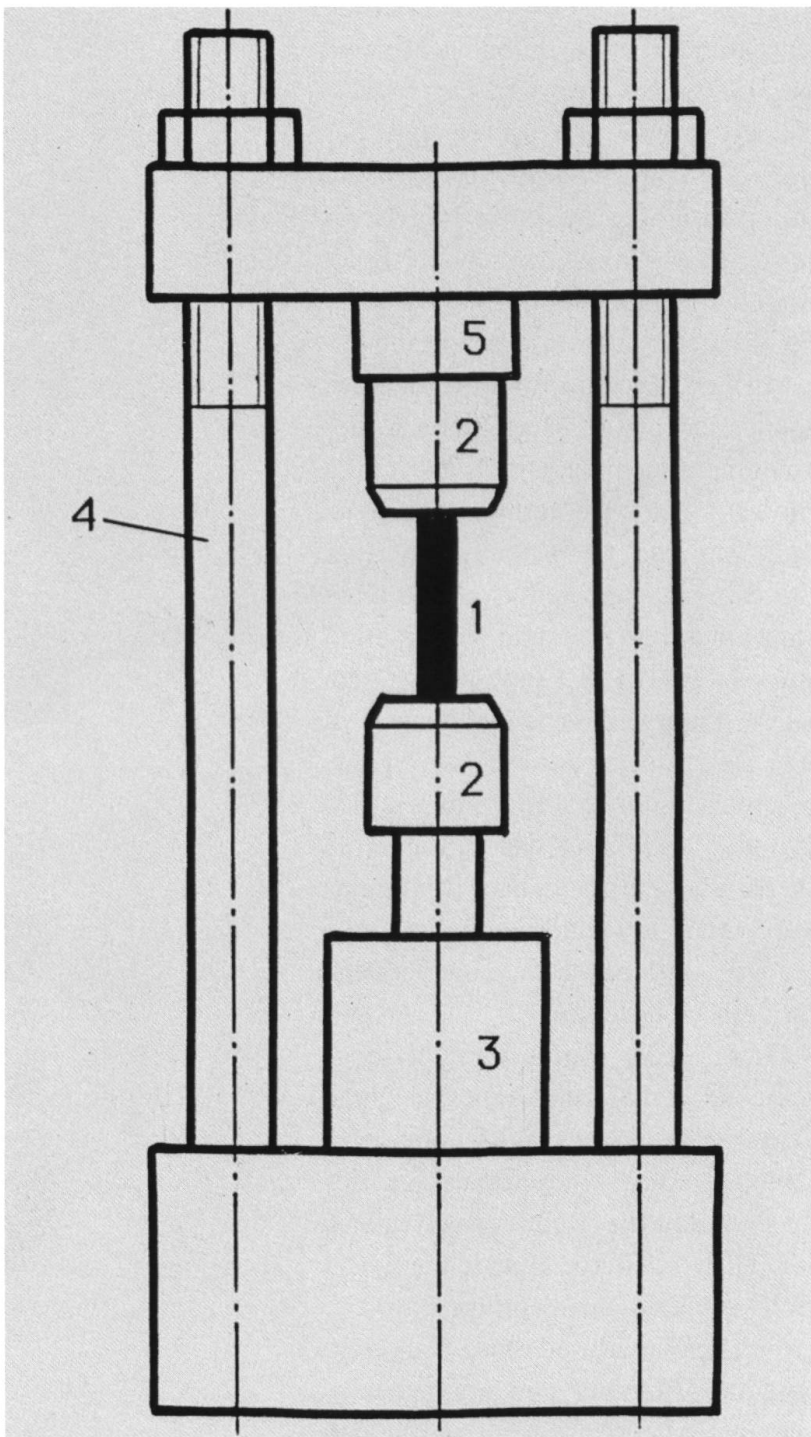
kurzer Zeit zwei wesentliche Informationen erhalten hatte, war J. Amsler, damals weltbekannt als Erfinder und Hersteller des Polarplanimeters. Er erkannte sofort die Bedeutung des eingeschliffenen Kolbens für den Einsatz im Prüfwesen und wandte unverweilt diese Erfindung zum Bau neuer Prüfmaschinen von bis dahin unbekannter Qualität und Vielseitigkeit an.»

Um die Bedeutung des ungemein glückhaften Zusammentreffens zu würdigen, muss man sich einerseits das Umfeld vergegenwärtigen, in dem es sich abspielte, andererseits den damals erreichten Stand der Prüftechnik.

Zum *Umfeld*: Die rasch wachsende Bedeutung des Betons ist im obigen Zitat bereits erwähnt. Es handelte sich aber keineswegs um den einzigen Baustoff, der damals die althergebrachten (Steine, Holz und Ziegel) erfolgreich zu konkurrenzieren begann. Der Stahl, bis dahin als Nagel, Schraube, Beschlag und Schloss in wichtiger Funktion, aber nur geringer Menge benötigt, begann als eigenständig tragendes Element wie auch als Armierung des auf Zug wenig widerstandsfähigen Betons immer mehr zum Massengut zu werden. Die beiden *neuen Baustoffe* brachten keinen praktischen Erfahrungsschatz von Jahrtausenden mit, ihre Eigenschaften mussten erst mit genügender Genauigkeit ermittelt werden. Das gab dem Prüfwesen in jener Zeit einen ungemein hohen Stellenwert. Beim Beton kam noch hinzu, dass seine Festigkeit beträchtlichen Streuungen unterworfen ist, eine aussagefähige Prüfung also die Untersuchung mehrerer Proben voraussetzt; beim Stahl ist dieses Problem weniger schwerwiegend, dafür entstanden

schon früh je nach Legierung, Kohlenstoffgehalt, Wärmebehandlung und Kaltverformung sehr verschiedenartige Qualitäten, ein Grund mehr für ausgiebige Prüftätigkeit.

Zur *Prüftechnik*: Eine Prüfmaschine hat die Aufgabe, Proben in kontrollierter Weise unter Überwindung ihrer Reaktionskräfte mechanisch zu verformen, allenfalls bis zur Zerstörung (Erismann, 1992). Sie muss daher in der Regel mindestens aus folgenden Teilen bestehen (Fig. 12):



– *Krafteinleitungen* (Druckplatten, Einspannvorrichtungen usw.) zur Übertragung der Verformungen und Kräfte von der Maschine auf die Probe;

– *Antrieb* samt *Steuerung* und *Energieversorgung* zur kontrollierten Bewegung mindestens einer Krafteinleitung als Voraussetzung für die Verformung der Probe und die daraus sich ergebende Entstehung der Prüfkräfte;

– *Reaktionsstruktur* (meist als Rahmen ausgebildet) zur Aufnahme der zwischen den Krafteinleitungen wirkenden Reaktionskräfte der Probe;

– *Messgeräte* zum programmgemässen Betrieb der Steuerung und zur Feststellung der Resultate;

– *Peripheriegeräte* zur Eingabe des Prüfprogramms (vom Blatt Papier mit einer Liste von Sollwerten bis zum Computer) und zur Ausgabe der Resultate (vom abgelesenen Zifferblatt über die Registrierung bis zur Speicherung auf einem Datenträger).

Die eigentliche Leistung Amslers lag im Erkennen des Fortschrittes, den der eingeschliffene Kolben für *Antrieb und Messung* versprach. Es gab damals schon Prüfmaschinen mit hydraulischem Antrieb, deren vollkommenste wohl von Werder stammten (Erismann, 1992). Die Kolben dieser Maschinen trugen Dichtungen (meist Lederstulpen, sogenannte «Liderungen»), deren Reibung der Bewegung einen erheblichen Widerstand entge-

Fig. 12 Im Kraftfluss liegende Teile einer Prüfmaschine. 1 = Probe (im Beispiel: Stab); 2 = Krafteinleitungen (Einspannköpfe); 3 = Antrieb (hydraulischer Zylinder); 4 = Reaktionsstruktur (Rahmen aus zwei Säulen und zwei Traversen); 5 = Kraftmessgerät (Kraftmessdose). Bei reibungsarmem hydraulischem Antrieb fällt das konstruktiv eigenständige Kraftmessgerät weg, da der Öldruck im Zylinder als Mass der Prüfkraft verwendbar ist.

gensetzte. Der hydraulische Druck konnte also nicht als Mass für die ausgeübte Kraft dienen. In Ermangelung besserer Messmittel verwendete man daher Gewichtssteine, die über sehr ungleiche Waagebalken auf den Kraftfluss des Systems wirkten. Die angestrebte Kraft wurde erzeugt, indem man die Waagschale mit den entsprechenden Steinen belastete und dann solange Öl in die Zylinderkammer pumpte (übrigens von Hand, der Antrieb war «biohydraulisch»...), bis eine Libelle am Waagebalken das Gleichgewicht der Kräfte anzeigte. Das Vorgehen wurde schrittweise wiederholt. Die Ansteuerung der Messpunkte war auch nach heutigen Begriffen sehr genau, doch konnte bei plötzlichem (sprödem) Bruch die Kraft nicht eindeutig erfasst werden, was im kritischen Bereich kleine Schritte erzwang. Zudem war das Verfahren an sich schwerfällig, so dass eine elegantere Methode als entscheidende Leistungssteigerung empfunden werden musste.

Der *Erfolg* zeigte, dass es sich hier um einen eigentlichen Durchbruch handelte: Noch heute, mehr als hundert Jahre nach ihrer Einführung, stehen nicht wenige Maschinen mit eingeschliffenen Kolben im Betrieb, und bis nach der Mitte des zwanzigsten Jahrhunderts (als neue Messmethoden sich auf dem Markt zu behaupten begannen) galten sie als Inbegriff unschlagbarer Präzision.

Um der historischen Korrektheit willen muss dieser Würdigung einer bahnbrechenden Leistung einschränkend beigelegt werden, dass Jakob Amsler – so weit dies bekannt ist – rein empirisch vorging und sich keine Gedanken über die *physikalischen Mechanismen* machte, die das Einschleifen zu einem derart erfolgsträchtigen Verfahren werden liessen. Dass das Glück dabei auf seiner Seite gestanden

hatte, bekamen nicht nur seine Konkurrenten zu spüren, die (wie einer von ihnen dem Verfasser freimütig bekannte) meist ein wesentlich grösseres Spiel zwischen Kolben und Zylinder tolerieren und damit weit grössere Pumpenleistung und regeltechnisch schwierigere Verhältnisse in Kauf nehmen mussten. Auch die Nachfolger im eigenen Betrieb erlebten einige unangenehme Überraschungen, als die aufwendige Handarbeit des Einschleifens durch genauere Bearbeitung ersetzt werden sollte. Es zeigte sich, dass einzelne der so hergestellten Maschinen nicht so reibungsarm waren, wie man es erwartete. Des Rätsels Lösung wurde erst zu Beginn der sechziger Jahre entdeckt, als die lokale Druckverteilung im etwa 10 Mikrometer (0.01 mm) messenden Spalt zwischen Kolben und Zylinderwand näher untersucht wurde. Man fand dabei heraus, dass ein Engerwerden des Spaltes um einige Mikrometer in der Richtung abnehmenden Druckes eine durchaus plausible zentrierende Wirkung auf den Kolben ausübte (Fig. 13). Nun mussten die Kolben der alten Maschinen, die vor dem Einschleifen mit sehr sattem Sitz gefertigt worden waren, naturgemäss am Ende um einige Mikrometer konisch geschmirgelt werden, um das Einführen in den Zylinder und damit das Einschleifen überhaupt zu ermöglichen. Der Konus wurde beim Einschleifen in die Länge gezogen und bewirkte eine Tendenz zur Selbstzentrierung.

Diese späte Entdeckung ermöglichte dann aufgrund einer genauen Vermessung der Zylinder- und Kolbentopographie eine Voraussage des zu erwartenden Reibungsverhaltens. Sie führte auch zur Entwicklung von «schwebenden» Kolbenringen, welche gedrängte Bauart, tadellose Dichtung, minimale Reibung und praktisch inexistente Abnutzung zu verwirklichen

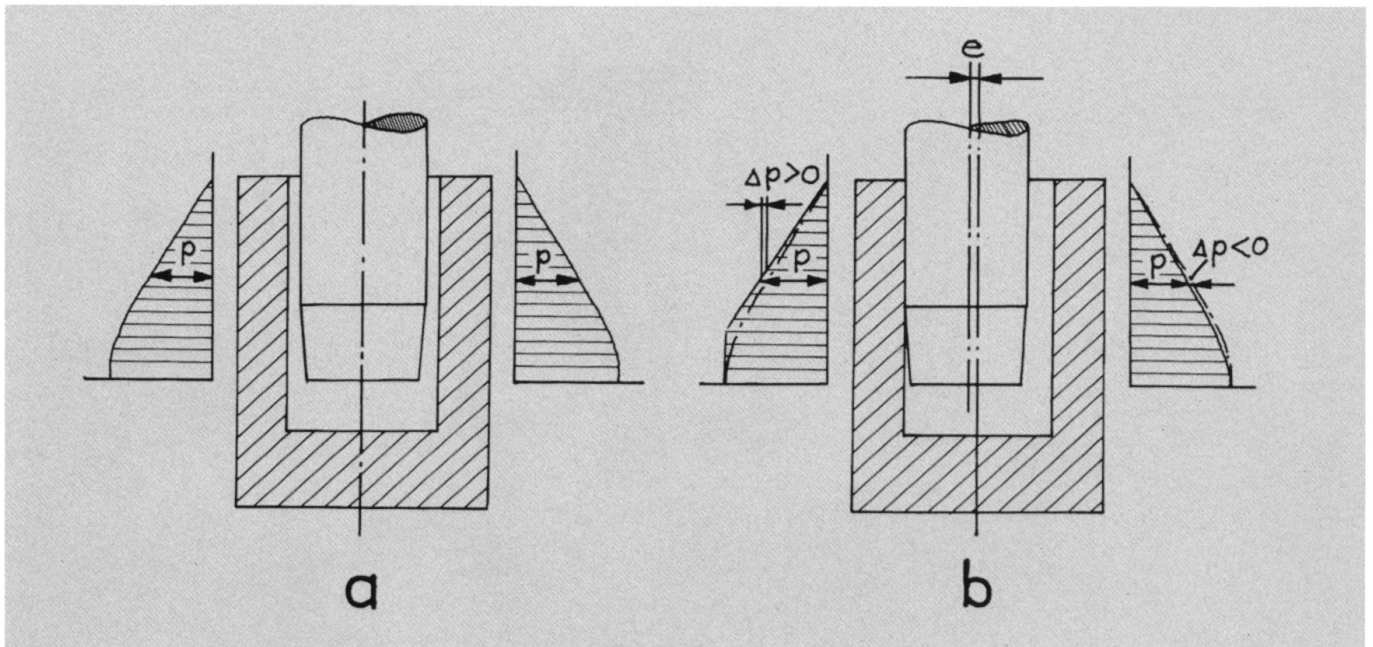


Fig. 13 Mechanismus der Selbstzentrierung beim eingeschliffenen Kolben. Die massgebenden Parameter sind um gut zwei Zehnerpotenzen übertrieben dargestellt: Das Kolbenspiel beträgt 0.01 bis 0.02 mm (so dass das Öl nur langsam durchsickern kann), der Konus des Kolbenendes wenige Mikrometer. a: symmetrische Verteilung des Druckes p im Spalt bei konzentrischer Lage des Kolbens (diese Verteilung ist im Teilbild b zum Vergleich strichpunktiert eingetragen); b: um

einen kleinen Betrag e exzentrische Lage des Kolbens fast bis zum Anliegen an der Zylinderwand: Links konzentriert sich der Druckabfall gänzlich auf den zylindrischen Teil des Kolbens, und es ergibt sich ein etwas höherer Druck (Differenz Δp); rechts nähert sich die Druckverteilung einer Geraden, weil der Spalt über seine Länge fast konstant wird, und es entsteht ein kleines Druckdefizit. Insgesamt ergibt sich eine Zentrierkraft.

gestatten. Die beiden letztgenannten Vorzüge sind heute bei Grossmaschinen von Interesse (stärkster ausgeführter Typ: 30 MN = 3000 Tonnen Maximalkraft; Erismann, 1989; 1992), deren Wartung mit Demontage der Kolben sehr aufwendig ist und deren Kraftmessung via Öldruck weit billiger zu stehen kommt und weniger Raum beansprucht als beim Einsatz anderer Mittel. Vor hundert Jahren gab es diese anderen Mittel kaum, und Wartungsfreundlichkeit war allezeit ein wichtiges Qualitätsmerkmal, vor allem für die häufigen Exporte nach Ländern mit bescheidener technischer Infrastruktur.

Jakob Amsler hatte mit den Informationen von Amagat und Tetmajer sowie mit der herstellungsbedingten Form der Kolben in dreifacher Hinsicht Glück gehabt. Sein kreativer Beitrag zum Entstehen einer neuen Generation von Prüfmaschinen erschöpfte sich aber nicht etwa im bereits erwähnten schnellen Erkennen einer besonders günstigen Konfiguration. Vielmehr beeinflusste er alle Teile der Prüfmaschinen massgebend, und sein Sohn tat es womöglich in noch höherem Mass. Es würde ein umfangreiches Buch füllen, wollte man alle diese Neuerungen auch nur einigermaßen vollständig beschreiben. Im-



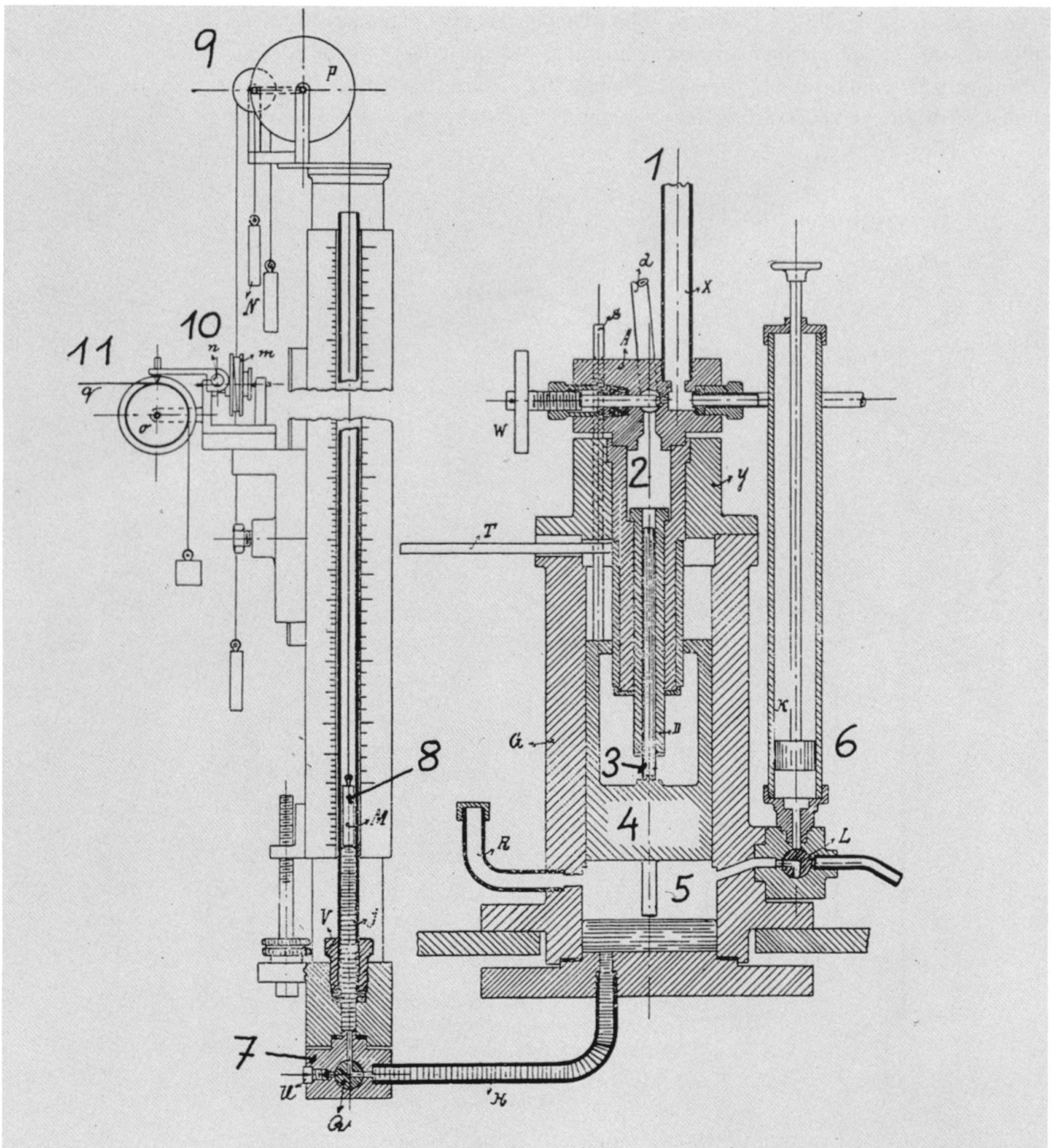
merhin sei der vorliegende Abschnitt durch eine kurze Darlegung der beiden Methoden vervollständigt, die zur *Messung*, also zur Umwandlung des dank geringer Reibung kraftproportionalen Öldrucks in eine mit ebensolcher Genauigkeit arbeitende Anzeige oder Registrierung dienen. Die erste dieser Methoden stammte mit Sicherheit von Jakob (1903), die zweite mit grosser Wahrscheinlichkeit von Alfred Amsler (1926). Erneut sei zu diesem Zweck eine geringfügig angepasste Anleihe im bereits erwähnten Buch des Verfassers (1992) vorgenommen: «Es gab schon lange vor dem Entstehen der ersten Prüfmaschinen ein Gerät auf gravitatorischer Basis, das eine fortlaufende und genaue Messung eines Druckes gestattete, nämlich das *Quecksilberbarometer*. Als daher die ersten Maschinen mit reibungsarmem hydraulischem Antrieb im Entstehen begriffen waren, lag der

Fig. 14 Prüfmaschinen aus dem 19. Jahrhundert im Amsler-Zimmer des Museums zu Allerheiligen in Schaffhausen. Die drei gezeigten hydraulischen Maschinen haben eingeschlifene Kolben. Rechts vorne kompakte Zug- und Druckprüfmaschine in der von Jakob Amsler geschaffenen klassischen Konfiguration mit obenliegendem Zylinder; dessen Kolben über einen kurzen Rahmen (Gehänge) auf die obere Einspannvorrichtung wirkt; darunter Stahlstab als Probe, untere Einspannvorrichtung und am festen Rahmen angeschlossene Spindel zur Anpassung an die Probenlänge; ganz rechts das Quecksilbermanometer; ganz vorne der Druckwandler, der die Pumpe verdeckt. In Bildmitte ähnliche Maschine mit zusätzlicher Biegevorrichtung (Schiene als Probe) und separatem Untersatz für Antrieb und Manometer. Links hinten Rückansicht der in Fig. 17 gezeigten Maschine.

Einsatz des quecksilbergefüllten U-Rohres für die Kraftmessung ziemlich nahe (Fig. 14). Die Idee hatte allerdings einen Haken: Um den Druck in

einer Prüfhydraulik zu messen, hätte das Rohr etwa die Höhe des Eiffelturmes haben müssen. Der Erfinder musste also gleich auch den Einsatz eines hydraulischen Druckwandler erfinden, um das Problem zu lösen (Fig. 15). Der Verfasser hält es zwar nicht für wahrscheinlich, dass bei dieser Gelegenheit auch der Druckwandler als solcher erfunden wurde, wohl aber möglicherweise die für eine reibungsarme Ausführung unerlässliche

Fig. 15 Quecksilbermanometer und Druckwandler (nach einem Katalog von 1903). 1 = hydraulische Verbindung zur Prüfmaschine; 2 = Hochdruckkammer des Druckwandler; 3 = Hochdruckkolben; 4 = Niederdruckkolben; 5 = Niederdruckkammer, oben mit Öl, unten mit Quecksilber gefüllt; 6 = manuelle Reguliervorrichtung für Ölmenge; 7 = manuelle Reguliervorrichtung für Quecksilbermenge; 8 = Eisenschwimmer in Glasrohr mit Quecksilberfüllung; 9, 10 = Schnurzug-Übersetzungsgetriebe; 11 = Registriertrommel (ein zweiter Schnurzug gibt die Verformung der Probe ein).



Abdichtung des Quecksilbers durch einen auf dessen Oberfläche schwimmenden «Pfropfen» aus Öl. Ein Rührwerk schwenkte den Kolben ständig um seine Achse, um dessen Reibung weiter zu verringern. Das so umrissene Messverfahren, das mittels eines Schwimmers sogar eine Registrierung zuließ, hatte einen schwerwiegenden Nachteil: Die Bedienung des Gerätes war wegen der genau einzuhaltenen Niveaus für Öl und Quecksilber umständlich und zeitraubend.

Mit der Lösung dieses Problems entstand im *Pendelmanometer* das gravitatorisch-hydraulische Messgerät, das während vieler Jahrzehnte

zum eisernen Bestand beinahe jedes Prüflabors gehörte und das auch heute noch an vielen Orten zufriedenstellende Dienste leistet (Fig. 16, 17). Die Grundidee, die erst dank der Verwendung präziser und sorgfältig ausgewählter Kugellager möglich geworden war, bestand in der Auslenkung eines Pendels durch einen hydraulisch angetriebenen Kolben kleinen Durchmessers, dessen Reibung auch hier mit einem Rührwerk weitgehend ausgeschaltet wurde. Da Länge und Masse des Pendels bequem verändert werden konnten, bestand eine einfache Möglichkeit zur Wahl des jeweils bestgeeigneten Messbereichs.

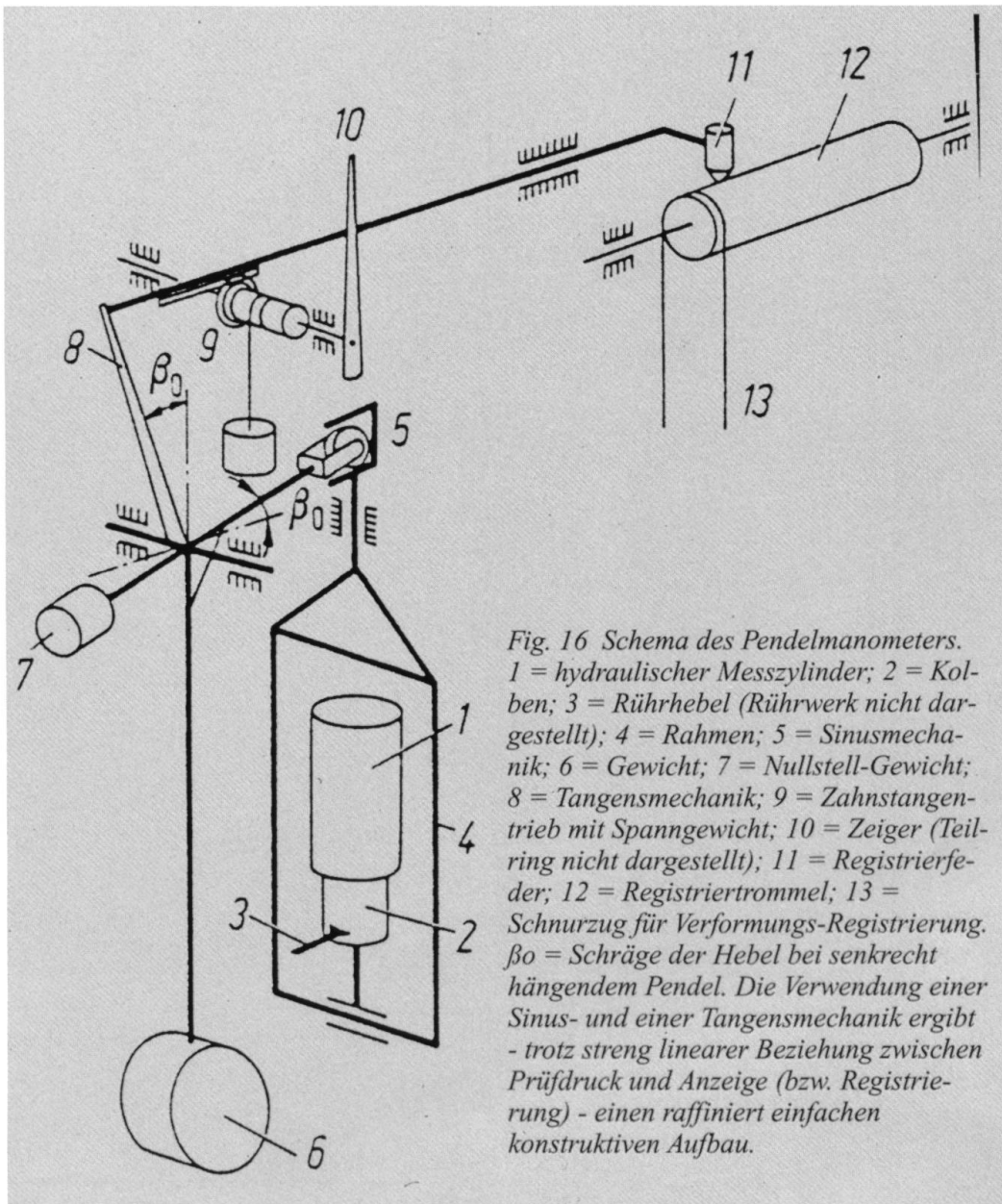


Fig. 16 Schema des Pendelmanometers. 1 = hydraulischer Messzylinder; 2 = Kolben; 3 = Rührhebel (Rührwerk nicht dargestellt); 4 = Rahmen; 5 = Sinusmechanik; 6 = Gewicht; 7 = Nullstell-Gewicht; 8 = Tangensmechanik; 9 = Zahnstangentrieb mit Spannungsgewicht; 10 = Zeiger (Teilring nicht dargestellt); 11 = Registrierfeder; 12 = Registriertrommel; 13 = Schnurzug für Verformungs-Registrierung. β_0 = Schräge der Hebel bei senkrecht hängendem Pendel. Die Verwendung einer Sinus- und einer Tangensmechanik ergibt - trotz streng linearer Beziehung zwischen Prüfdruck und Anzeige (bzw. Registrierung) - einen raffiniert einfachen konstruktiven Aufbau.

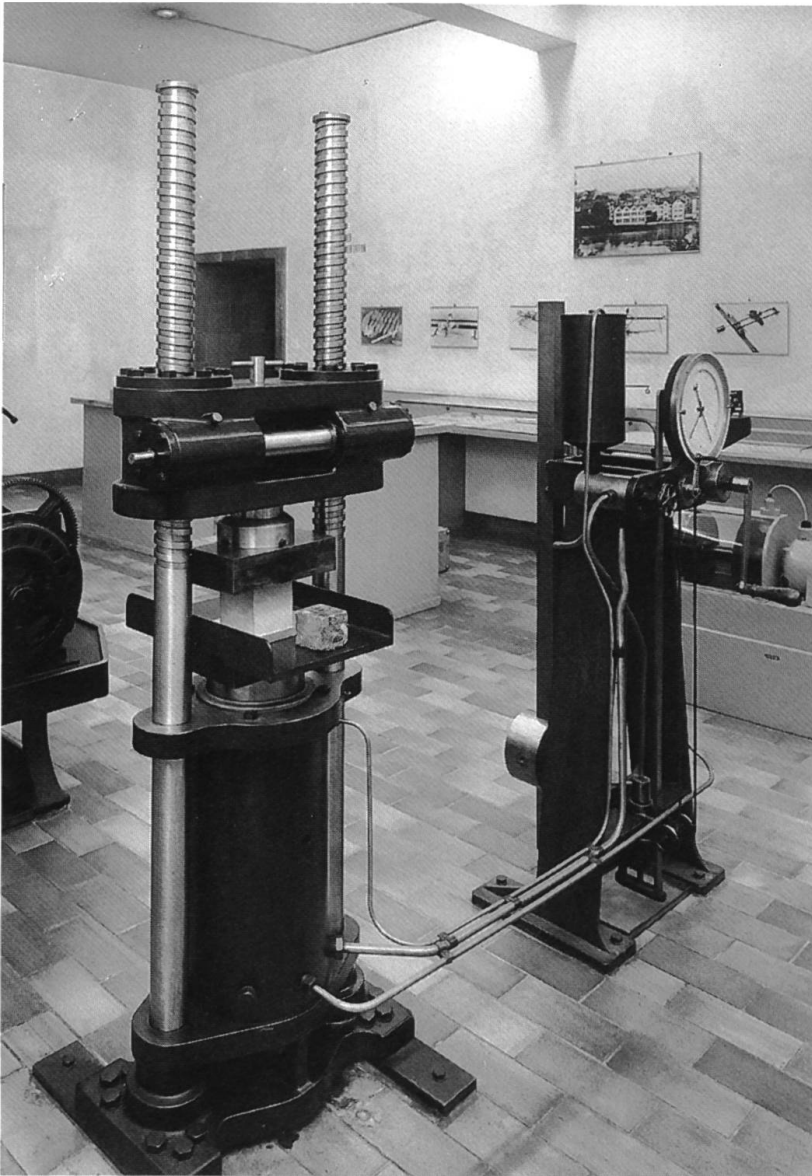


Fig. 17 Druckprüfmaschine mit untenliegendem Zylinder und (rechts) Pendelmannometer. Betonwürfel als Probe. Das Pendel ist zur Hälfte durch den Ständer verdeckt (in Fig. 14 besser zu sehen).

Das Pendelmannometer war nicht nur elegant konstruiert und robust, seine Genauigkeit beruhte auch auf wenigen Parametern, die ihrem Wesen nach entweder (wie die Pendelmassse und die Erdbeschleunigung) konstant oder (wie die Lagerreibung) leicht kontrollierbar waren. Charakteristisch

für die Situation in den sechziger Jahren des zwanzigsten Jahrhunderts, als modernere Messmethoden auf dem Markt eine Rolle zu spielen begannen, war ein Besuch des Verfassers in einem Labor in den USA. Dessen Chef führte ihm eine brandneue Maschine vor, neben der eine ältere mit Pendelmannometer stand. Des Lobes der Neuanschaffung und ihrer Vorzüge war kein Ende, bis die Frage kam, warum denn die offenbar ausgediente Grossmutter noch nicht abgetakelt sei. Die Antwort gab zu denken: «Ja, wissen Sie, wir brauchen schliesslich etwas, um die neue Maschine von Zeit zu Zeit zu kalibrieren...»

Eine höhere Anerkennung hätte dem Erfinder des Pendelmannometers mehr als ein halbes Jahrhundert nach dessen Konzeption nicht leicht gezollt werden können.

Wenn heute keine Pendelmannometer mehr fabriziert werden, so liegt dies an deren *regeltechnischem Verhalten*: Die ansehnliche und über ziemlich grosse Hübe bewegte Masse kann zu unerwünschten Trägheitseffekten führen (für den konkreten Fall einer 500-kN-Maschine wurde errechnet, dass die Pendelmassse sich ebenso auswirkt wie ein an der bewegten Krafteinleitung befestigtes Kanonenboot von 2600 Tonnen!). Da moderne Prüfsysteme fast ausschliesslich mit elektromechanischen oder hydraulischen Servoantrieben versehen sind, die sie leicht automatisierbar und fast unbegrenzt programmierbar machen, ist die Zeit des Pendelmannometers endgültig vorbei. Sein zähes Überleben in manchen Laboratorien hängt nicht nur mit der Langlebigkeit und Anspruchslosigkeit dieses Gerätes (und der dazugehörigen Maschinen) zusammen: Das erwähnte regeltechnische Verhalten ist bei zahlreichen langsam zu fahrenden Prüfungen kein oder doch kein wesentlicher Nachteil.

Um 1910: Computer: «Real time on line» – Dynamometerwagen

Vergegenwärtigt man sich die Entstehungsgeschichte der heutigen Computer, so findet man eine Vielzahl verschiedenartiger Vorläufer und damit auch manche Unsicherheit bezüglich der Erstlingsrechte. Der Verfasser kann nicht umhin, dieses bunte Bild um ein markantes Objekt zu vermehren. Um zumindest dem in ähnlichen Fällen naheliegenden Vorwurf der Ungenauigkeit zu entgehen, hält er eine eindeutige *Umschreibung der verwendeten Begriffe* für unerlässlich.

Unter einem *Computer* sei eine Maschine verstanden, die aus mehr als einer Operation bestehende Rechnungen ohne menschliches Zutun nach vorbestimmtem Schema durchzuführen vermag. Dabei seien die folgenden Kriterien als unerheblich eingestuft: Darstellung der Rechengrößen durch kontinuierlich oder diskret veränderliche physikalische Größen (Analog- oder Digital-Computer); physikalische Natur der Darstellung (mechanischer, elektromechanischer, elektronischer usw. Computer); ein für allemal festgelegtes oder veränderliches Rechenschema (Ein- oder Mehrzweck-Computer). Im weiteren sei ein Computer als «*real time*» (in Echtzeit) arbeitend bezeichnet, wenn er in der Lage ist, die Berechnung eines Phänomens in der gleichen Zeit durchzuführen, in der dieses Phänomen in der Realität abläuft. Und als «*on line*» arbeitend gelte ein Computer, der, an laufend verfügbare (Eingangs-) Größen eines ausserhalb seiner selbst liegenden Phänomens angeschlossen, daraus die erwünschten Resultate derart berechnet, dass sie praktisch gleichzeitig mit den Eingangsgrößen verfügbar sind.

Akzeptiert man diese Definitionen – die, wie andere auch, nicht ohne Anflug von Willkür sind –, so stellt man zunächst fest, dass keines der bis dahin besprochenen Geräte ein Computer war (auch die Planimeter für höhere Momente nicht, da bei ihnen die rechnerische Verknüpfung der abgelesenen Integrierrollen durch den Menschen, also ausserhalb des Gerätes erfolgte). Es ergibt sich aber die begründete Vermutung, dass ein Amslerscher Dynamometerwagen den ersten «*real time on line*» arbeitenden mechanischen *Einzweck-Analog-Computer* enthielt, zumindest den ersten in hartem praktischem Einsatz erprobten. In etwas weniger üppiger, aber ebenfalls moderner Formulierung könnte man auch von der ersten mechanischen *Einzweck-Integrieranlage* (englisch «*differential analyzer*») sprechen. Es handelte sich allerdings nicht um die Lösung von Differentialgleichungen durch Rückkoppelung im Sinne einer schon von W. Thomson (später als Lord Kelvin berühmt geworden) geäusserten Idee (1876). Wie dem auch sei, es lohnt sich auf alle Fälle, die hier als «Computer» bezeichnete Rechenanlage und die Problematik, aus der sie entstanden war, näher zu betrachten.

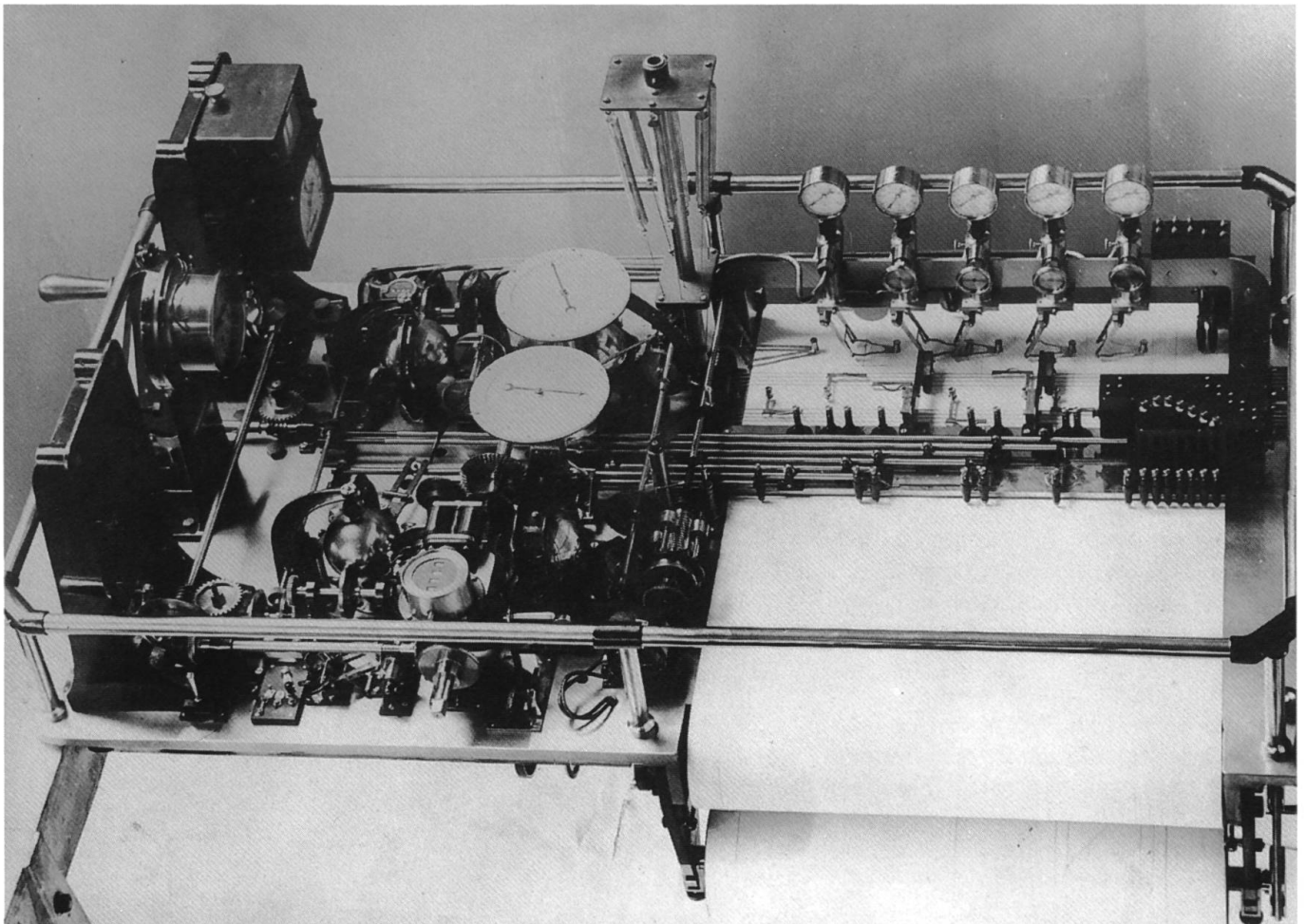
Um die Wende vom 19. zum 20. Jahrhundert waren die Eisenbahnen längst dem Stadium pionierhafter Empirie entwachsen. Man besass solide Grundlagen für die Berechnung von *Lokomotiven*, und es ergab sich ein zunehmender Bedarf nach zuverlässiger und rasch realisierbarer Überprüfung der in Aussicht gestellten Leistungen. Dies sollte unter wirklichkeitskonformen Bedingungen im Fahrbetrieb er-

folgen. Man war somit *auf Messwagen angewiesen* (Place, 1933), die in erster Linie laufend die Kraft F am Zughaken (daher die Bezeichnung «Dynamometerwagen») und die Geschwindigkeit v zu messen und zu registrieren hatten. Aus diesen beiden Grössen konnte man zwar durch Multiplikation die Leistung P ermitteln; und durch Planimetrieren einer in Funktion der zurückgelegten Strecke X aufgenommenen Kraftregistrierung erhielt man auch die aufgewendete Energie W . Die Auswertung war aber recht langwierig, da Messfahrten sich über mehrere Stunden zu erstrecken pflegten. Zudem waren alle Ergebnisse allein für die Werte am Zughaken gültig und nicht für die an sich noch wichtigeren Grössen am Umfang der Triebräder.

Dass das hier brachliegende *Rationalisierungspotential* einen kreativen Ingenieur herausfordern musste, ist kein Wunder. In der Tat hatte sich

schon Jakob Amsler – so vermutet es Dubois (1944) – mit der Frage befasst, wobei allerdings das Mass einer Mitwirkung des Sohnes offen ist. Sicher ist jedenfalls, dass der Versuch zu einer möglichst umfassenden Gesamtlösung der anstehenden Problematik 1912 von Alfred Amsler unternommen wurde (Fig. 18). Dies gab dem so entstandenen *Dynamometerwagen* den Charakter der Pionierleistung. In wel-

Fig. 18 Messtisch eines Dynamometerwagens aus dem frühen zwanzigsten Jahrhundert. Rechts der Registrier-, links der Rechenteil. Drei der vier Kugelgetriebe sind deutlich zu erkennen. Die beiden mit horizontalen Zifferblättern versehenen berechnen durch Differentiation die Leistung am Zughaken und die Geschwindigkeit, die beiden anderen durch Integration die Arbeit am Zughaken und die Beschleunigungsarbeit. Die Apparate an der hinteren Kante des Registrierteils dienen für Bremsmessungen.



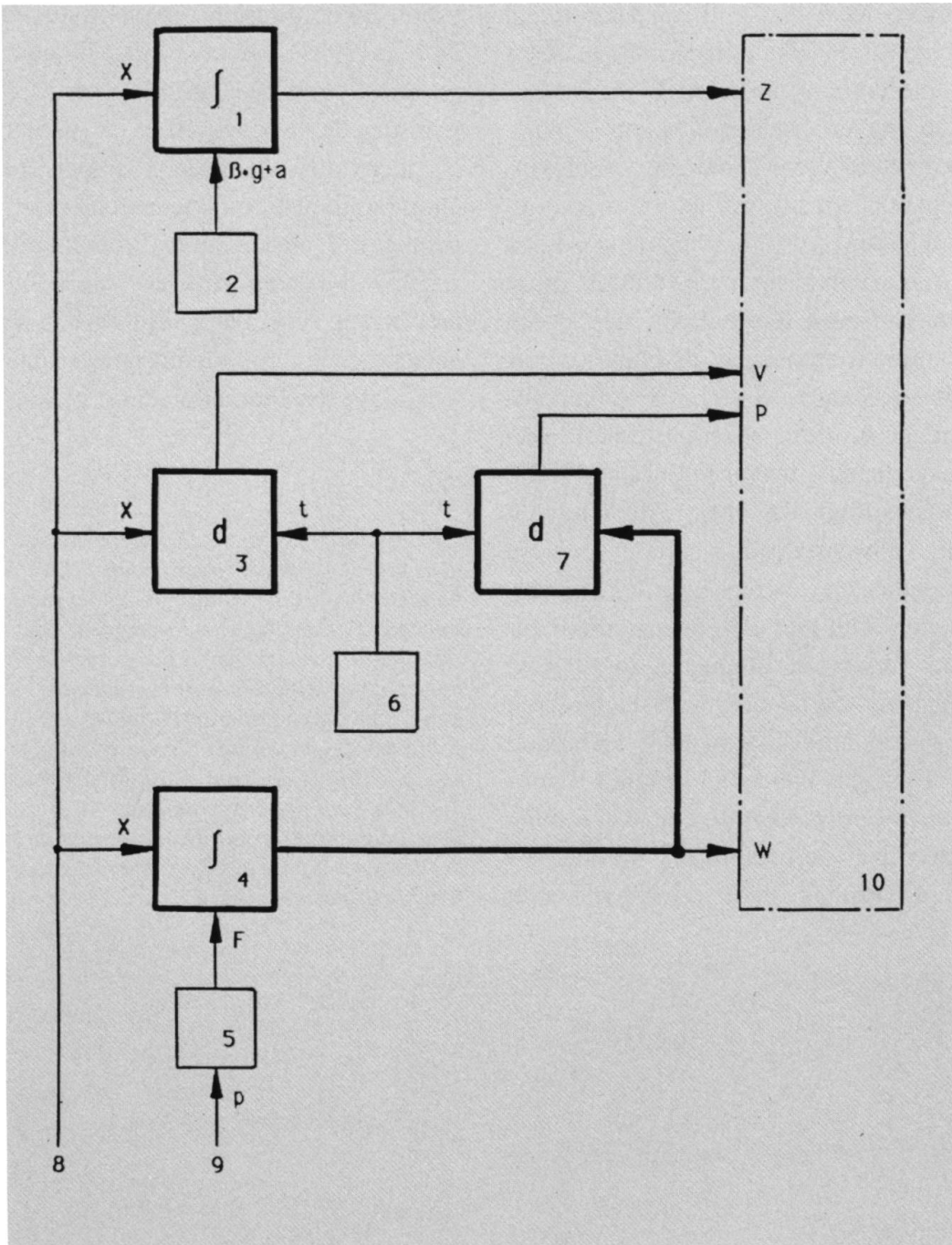


Fig. 19 Messtisch gemäss Fig. 18, Schema des Rechenteils. 1 = Beschleunigungs-Integrator gemäss Formeln (13) und (14); 2 = Beschleunigungspendel; 3 = Geschwindigkeits-Differentiator, Formel (12); 4 = Energie-Integrator, Formel (10); 5 = hydraulischer Druckmesser; 6 = Elektromotor mit Fliehkraftregler als Zeitgeber; 7 = Leistungs-Differentiator, Formel (11); 8 = mechanischer Antrieb von einer ungebremsten Radachse; 9 = Druckleitung von der am Zughaken angeschlossenen hydraulischen Kraftmessvorrichtung; 10 = Anzeige- und Registriergeräte. Für die übrigen Symbole siehe die angegebenen Formeln. Zur echten Integrieranlage wird das System durch die fett ausgezogene Verbindung zwischen zwei Infinitesimalrechnungen.

chem Mass weitblickende Bahningenieure dabei mitgewirkt haben, ist heute nicht mehr bekannt. Auf alle Fälle ging die Konzeption, wie das Schaltschema von Fig. 19 zeigt, weit über das nach dem damaligen Stand der Technik zu Erwartende hinaus.

Der trivialen Integration

$$W = \int F \cdot dX \quad (10)$$

wurde als Novum die Differentiation

$$dW/dt = d(\int F \cdot dX)/dt = F \cdot dX/dt = P \quad (11)$$

mit t als der Zeit nachgeschaltet. So

erhielt man auf unkonventionelle und elegante Weise die Leistung am Zughaken. Und da auch die Geschwindigkeit durch eine Differentiation

$$v = dX/dt \quad (12)$$

ermittelt wurde, entstand eine ausschliesslich mit Integrier- und Differenziergeräten bestückte, also sehr einheitlich aufgebaute Schaltung. Diese Einheitlichkeit wurde noch unterstrichen durch einen zweiten Integrator, der den Ausschlag eines in Fahrtrichtung schwingenden, angemessen gedämpften Pendels über der zurückgelegten Strecke integrierte. Der Integrand war offensichtlich der Summe zweier Werte proportional: einerseits des Produktes aus Erdbeschleunigung g und Rampenneigung β , andererseits der Fahrtbeschleunigung $a = dX/dt$. Mit geeigneter Wahl der Apparatekonstanten konnte man also das Integral

$$Z = \int \beta \cdot g \cdot dX + \int a \cdot dX \quad (13)$$

bestimmen, das sich durch elementare Operationen in die Form

$$Z = g \cdot z + v^2/2 \quad (14)$$

bringen lässt, wenn z die Höhe des jeweiligen Standortes über dem Ausgangspunkt der Fahrt ist. Das Produkt des Integrals Z mit der Masse m der Lokomotive ergibt also offensichtlich die Energie, die erforderlich ist, um die Lokomotive um den Betrag z zu heben und sie vom Stillstand auf die Geschwindigkeit v zu beschleunigen. Dass $W + Z \cdot m$ dann eine erste Annäherung für die am Umfang der Triebräder geleistete Arbeit darstellt, ist offensichtlich. Exakt ist dieses Ergebnis allerdings nicht, weil drei Einflussgrößen der Lokomotive unberücksichtigt bleiben: der Rollwider-

stand, der Luftwiderstand und die Trägheit der rotierenden Massen (vorab der Radsätze, bei elektrischen Lokomotiven auch der Motoren). Ohne auf Einzelheiten einzugehen, sei festgestellt, dass bei den damals üblichen Lokomotiven (vorwiegend Dampf) sowie deren Beschleunigung und Geschwindigkeiten die entstehenden Fehler durch ziemlich einfache Korrekturen in vertretbaren Grenzen gehalten werden konnten. Zudem fiel der Einfluss der rotierenden Massen immer dann aus der Rechnung, wenn das Integral Z zwischen zwei Punkten mit gleichen Geschwindigkeiten betrachtet wurde (vorzugsweise zwischen zwei Halten); und die Höhe z konnte unabhängig von den Messungen bestimmt werden, sofern ein genaues Längsprofil der Strecke verfügbar war.

Die Frage liegt nahe, weshalb die Differentiation nach der Beziehung (11) einer auf den ersten Blick einfacher scheinenden Multiplikation von F und v vorgezogen wurde. Die Antwort ist einfach: Ein guter Differentiator (in der Literatur häufig auch als Derivator bezeichnet) ist mit mechanischen Mitteln eleganter zu verwirklichen als ein Multipliziergerät. Daneben war im vorliegenden Fall die bereits erwähnte Einheitlichkeit der verwendeten Elemente ein Vorteil.

Natürlich mussten die in dieser Anlage eingesetzten Geräte einerseits den rauen *Bedingungen des Bahnbetriebes*, andererseits den Anforderungen der Rechenschaltung (die in moderner Terminologie auch als festes Hardware-Programm bezeichnet werden könnte) angepasst sein. Bei der *Kraftmessung* bestanden keine grundsätzlichen Probleme: Zylinder mit eingeschlifften Kolben, wie in den Prüfmaschinen damals schon seit geraumer Zeit bewährt, taten den Dienst in befriedigender Weise. Dass die nöti-

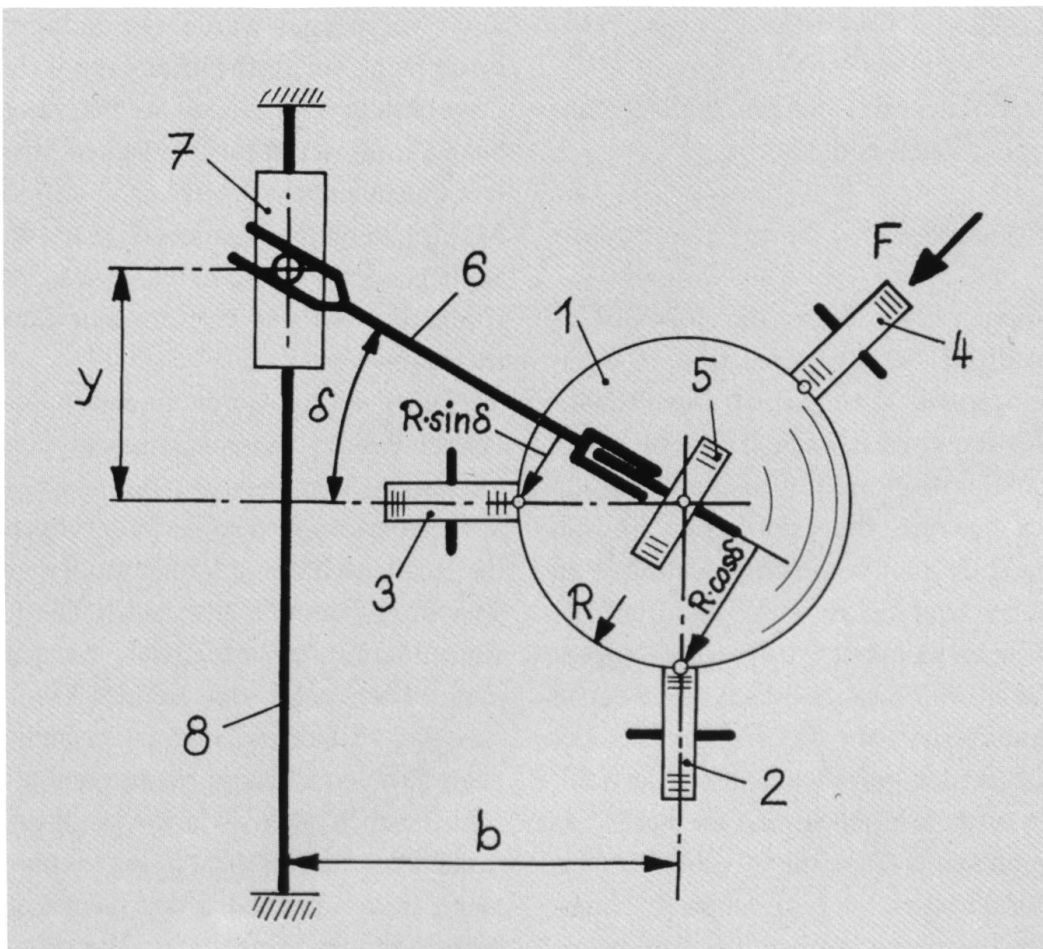
gen Vorkehrungen für den zweckentsprechenden Einbau in das Fahrzeug und für die sinngemässe Funktion im Fahrbetrieb vorgenommen werden mussten, versteht sich von selbst. Zudem musste für die Messung des hydraulischen Druckes anstelle des Pendelmanometers ein mit einer Feder ausgestattetes Gerät dienen (damals auch keine Neuheit mehr). Auf diese Einzelheiten sei hier aber nicht eingegangen, da es sich nicht um Aufgaben handelte, deren Lösung herausragender kreativer Leistungen bedurfte.

Ganz anders stand es mit den *Rechengernäten*. Diese mussten einerseits robust, andererseits in der Lage sein, Registrierfedern und zum Teil auch weitere Rechengernäte anzutreiben, im Falle des Integrators nach Gleichung (10) den gemäss (11) angeschlossenen Differentiator. Für solche Aufgaben waren die bis dahin üblichen Integriergeräte nicht geeignet, die ausnahmslos auf der Basis minimaler Drehmo-

mente konzipiert waren. Auch die «real time on line» (allerdings sehr langsam) arbeitenden Integratoren für Pegel und ähnliche Apparate machten in diesem Punkt keine Ausnahme (Dubois, 1944).

Der *Kugelintegrator*, eine bemerkenswerte Erfindung des Engländers Shaw (1885), half dieses Problem zu lösen. In seiner klassischen Form (Fig. 20) besteht dieses Getriebe aus einer Kugel, an die fünf zylindrische Rollen angelegt sind, zwei an den Polen und drei am Äquator. Zwei der letztge-

Fig. 20 Schema des Kugelintegrators, siehe Formeln (15) und (16). 1 = Kugel; 2 = Antriebsrolle = x-Eingang; 3 = Abtriebsrolle = J-Ausgang; 4 = Anpressrolle; 5 = eine der beiden Steuerrollen; 6 = Tangentenarm; 7 = Tangentenwagen = y-Eingang; 8 = Führung des Wagens. b = Tangentenabstand; F = Anpresskraft; R = Kugelradius; y = Integrand; ϑ = Tangentenwinkel. Beim entsprechenden Differentiator sind 2 und 3 Antriebe, die die Kugeldrehachse bestimmen, und 5 sind Schlepprollen.



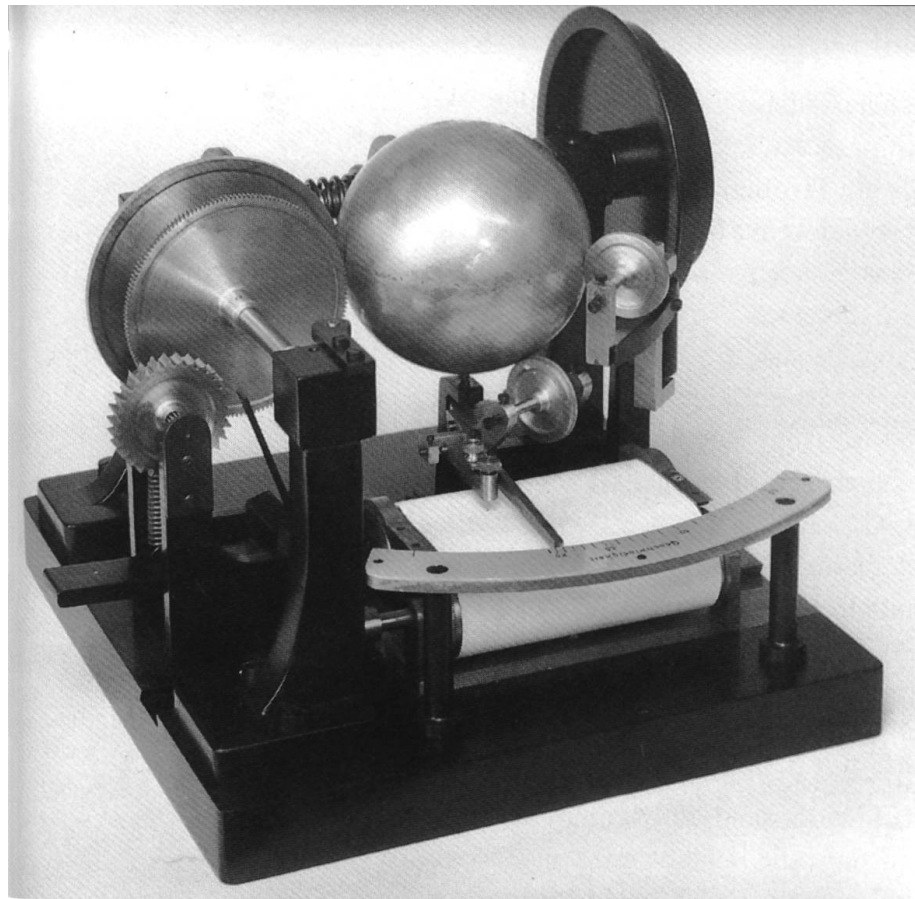


Fig. 21 Einer der ersten Kugeldifferentiatoren (möglicherweise der erste). Links neben der Kugel eine der beiden an deren Äquator angreifenden Antriebsrollen (die zweite von der Kugel verdeckt). Rechts neben der Kugel unter Federdruck stehende Anpressrolle. Bei der vorliegenden Ausführung ist nur eine Schlepprolle vorhanden, die man unter der Kugel erkennt (Anpressung durch das Eigengewicht der Kugel). Die vorne sichtbare Skala ist nichtlinear.

nannten, die Antriebs- und die Abtriebsrolle, berühren die Kugel in Punkten, die voneinander um einen rechten Winkel entfernt sind. Die dritte, unter Federdruck stehend, hat nur die Aufgabe, die Kugel mit einer angemessenen Kraft an die beiden anderen zu drücken. Die Achsen der beiden an den Polen anliegenden «Steuerrollen» sind um die durch die Pole gehende Achse schwenkbar gelagert und liegen dank einem verbindenden Bügel stets zueinander parallel. Eine von ihnen steht unter Federdruck, so dass beide an die Kugel angepresst werden. Die folgenden Überlegungen gelten für ideale Geometrie und Punktberührung sowie für schlupffreies Abrollen.

Wird die Antriebsrolle in Rotation versetzt, so zwingt sie die Kugel zu einer Drehbewegung. Die Drehachse der Kugel wird dabei von den am Äquator anliegenden Rollen in die Äquatorialebene, von den Steuerrollen in eine zu deren Achsen parallele Lage gezwungen. Der Winkel zwischen dem Abtriebs-Kontaktpunkt und der Kugeldrehachse heisse ∂ , der Kugelradius R . Bewegt sich der Antriebs-Kontaktpunkt um einen infinitesimalen Betrag dx , so ergibt sich aus den wirkenden Radien der beiden Kontaktpunkte

$$dJ = (R \cdot \sin\partial / R \cdot \cos\partial) \cdot dx = \tan\partial \cdot dx \quad (15)$$

für den Weg des Abtriebs-Kontaktpunktes. Schliesst man die Steuerrollen an eine Tangentenmechanik mit dem Tangentenabstand b und dem Ausschlag y an (Fig. 20), so erhält man nach Integration beider Seiten

$$J = \int \tan\partial \cdot dx = 1/b \cdot \int y \cdot dx. \quad (16)$$

Das ist offensichtlich die Gleichung eines Integrators. Nun braucht man nur X für x und F beziehungsweise $\beta \cdot g + a$ für y/b einzusetzen, um die Integrale W und Z gemäss (10) und (13) zu erhalten.

Der schon von Jakob Amsler erfundene entsprechende *Differentiator* bedarf angesichts seiner Ähnlichkeit mit dem Integrator keiner eingehenden Beschreibung. Erwähnt sei nur, dass bei ihm beide Eingänge am Äquator der Kugel erfolgen (einer für dx und einer für dt , also konstante Winkelgeschwindigkeit) und dass die Steuerrollen durch frei schwenkbare «Schlepprollen» ersetzt sind, die – ähnlich wie Servierboy-Räder – gegenüber ihrer Schwenkachse versetzt sind und sich daher in die durch die Drehbewegung der Kugel gegebene Richtung einstellen (Fig. 21). Der erforderliche

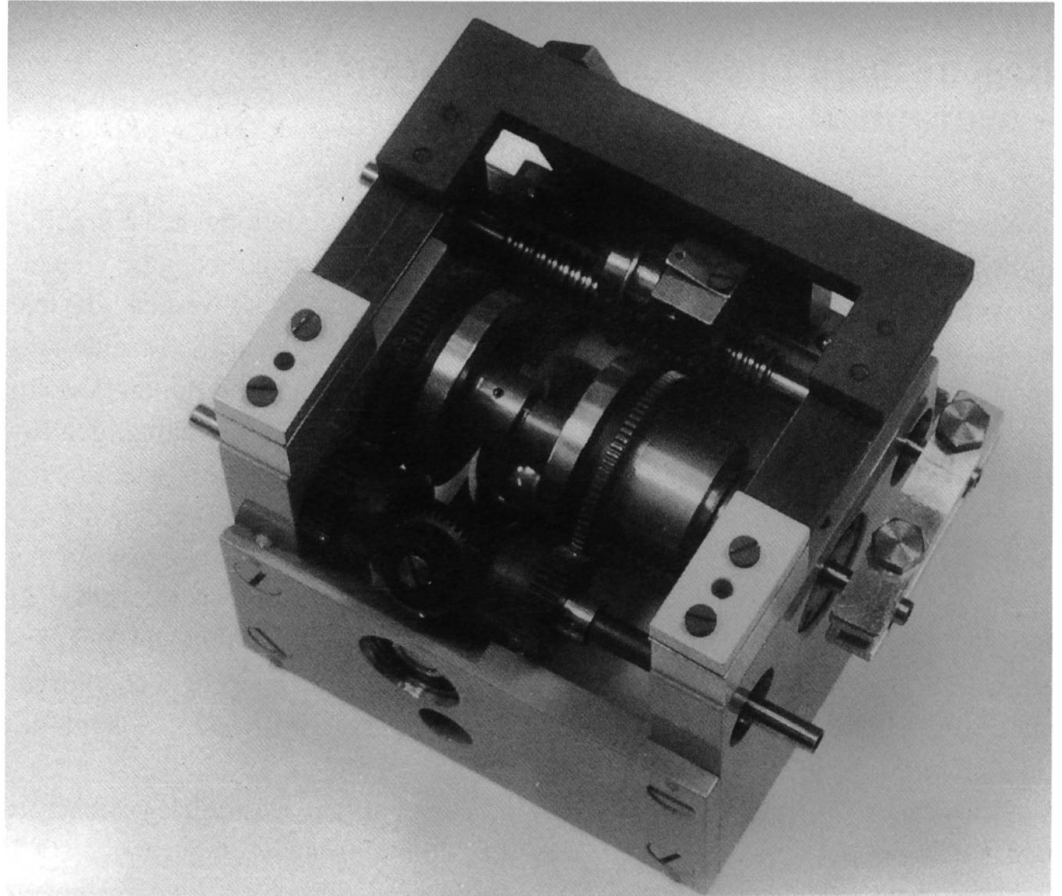
Antrieb mit konstanter Geschwindigkeit wurde von einem Elektromotor (ursprünglich vom X-Antrieb ab Radachse) über einen Fliehkraftregler mit angeschlossener Reibungskupplung geliefert.

Kugeldifferentiatoren wurden zunächst mit direkter Anzeige des Winkels ϑ , also nichtlinearer Skala gebaut, aber schon 1912 auf etwas ausgefallene Weise linearisiert: Eine gezahnte Leitkurve trieb eine Zahnwalze mit dem Zeiger an. Warum ein Erfinder mit dem Weitblick eines Alfred Amsler diese kostspielige und schwer zu justierende Lösung zuließ, ist nicht auszumachen. In späteren Jahren eingesetzte Tangentenmechaniken erwiesen sich auf Anhieb als in jeder Hinsicht überlegen: Sie hatten (wie natürlich auch die entsprechenden Integratoren) Justierschrauben für den Nullpunkt, den Tangentenabstand b und den Winkel zwischen Schlepprollen (bzw. Steuerrollen) und Tangentenarm, womit alle Fehler erster und zweiter Ordnung (also auch nichtlineare) systematisch korrigiert werden konnten, während das Herumbiegen an der Leitkurve der alten Differentiatoren ein Glücksspiel war. Auch ein genialer Kopf lässt sich gelegentlich zu Abwegen verleiten...

Dieser ziemlich lange Exkurs in die Problematik zweier Rechenelemente, von denen das grundlegendere – der Integrator – keine Amslersche Erfindung war, hat einen guten Grund: Alfred Amsler war es, der die besonderen Eigenschaften der Kugelgetriebe als erster konsequent ausnützte, nämlich die bereits erwähnte Fähigkeit zur Abgabe relativ *hoher Ausgangsmomente*, bedingt durch die Möglichkeit starker Anpressung der Rollen an die Kugel. Man stelle sich die Verhältnisse bei Stillstand (oder zumindest sehr langsamer Bewegung) des x-Antriebs und gleichzeitiger ra-

scher Änderung des Integranden vor: Beim Kugelintegrator erfolgt nichts als ein Pivotieren der Steuerrollen um ihre Schwenkachse, und die Kontaktpunkte dienen als Lager mit kleinstem Durchmesser. Trotz starker Anpressung bedarf die Schwenkung somit nur eines sehr kleinen Momentes, und die Messung des Integranden (Federmanometer, Beschleunigungspendel) wird kaum verfälscht. Gleichzeitig bleibt auch die Abnutzung von Kugel und Rolle vernachlässigbar, und die Genauigkeit der Integration leidet in keiner Weise. Man stelle sich die gleiche Situation bei einem Scheibenintegrator vor (Fig. 1), wo die Rolle gegen den Widerstand der Reibung über die stillstehende Scheibe gezwungen werden müsste. Es ist leicht einzusehen, dass alle drei erwähnten qualitätsbestimmenden Faktoren (Beeinflussung der Messung des Integranden, Abnutzung, Integrationsgenauigkeit) um vieles schlechter wären.

Auch hier sei ein kurzer Hinweis auf die nach Alfred Amsler *folgende Zeit* gegeben. Die Kugelgetriebe erlebten in den fünfziger Jahren eine ähnliche Blüte wie die Planimeter. Es ging damals neben der Perfektionierung der Dynamometerwagen um die Entwicklung hochpräziser Ein- und Mehrzweck-Integrieranlagen (Curti/Dubois, 1949; Erismann, 1956; 1959), die bis dahin fast ausschliesslich mit Scheibenintegratoren ausgerüstet worden waren (Bush, 1931; Bush/Caldwell, 1945; Hoffmann, 1956). Voraussetzung substanzieller Verbesserungen war eine systematische Untersuchung der Kugelbewegung und insbesondere der Vorgänge in den Kontaktpunkten (Erismann, 1954). Dabei ergaben sich Konstruktionen, die, wie ein Vergleich von Fig. 21 und 22 zeigt, stark von den ursprünglichen Ausführungen abwichen. Die Fehlergrenzen konnten dabei um mehr als eine Zehnerpotenz



gesenkt werden. In den sechziger Jahren wurden diese technisch wie mathematisch interessanten Entwicklungen angesichts der Fortschritte der digitalen Computer eingestellt.

Zum Abschluss sei noch vermerkt, dass der Dynamometerwagen nicht die einzige Eisenbahn-Messausrüstung war, zu deren Entwicklung Alfred Amsler Entscheidendes beigetragen hat. Um nur ein Beispiel zu nennen: Unter seiner Leitung entstanden um 1930 frühe *Oberbau- oder Gleismesswagen*, die zur Aufgabe hatten, die geometrischen Parameter von Schienensträngen (Spurweite, vertikale Unebenheiten, Krümmung, Überhöhung usw.) zu messen und damit quantitative Grundlagen für die Beurteilung von Eisenbahnstrecken sowie für Unterhaltsarbeiten zu schaffen. Hier wird auf diese Entwicklungen nicht im Detail eingegangen. Interessierte Leser seien auf die Literatur verwiesen (Dubois, 1941; 1965; Erisman, 1951; 1963; 1967).

Fig. 22 Kugelintegrator für einen militärischen Rechner aus den sechziger Jahren des zwanzigsten Jahrhunderts. Die Kugel ist unter den beiden koaxial angeordneten Äquatorialrollen kaum zu sehen. Die Seitenkante des etwa kubischen Gerätes ist kaum grösser als die Kugeldurchmesser in Fig. 18 und 21, die Fehlertoleranz um eine gute Zehnerpotenz enger.

Um 1920: Regeltechnik und Phasenmodulation – hydraulische Antriebselemente

Neben dem Streben nach ständiger Erweiterung der Einsatzmöglichkeiten, nach besserer Genauigkeit und nach – für heutige Begriffe recht anspruchsloser – Rationalisierung stiegen zu Beginn des zwanzigsten Jahrhunderts die *Anforderungen an Prüfgeräte* vor allem in zwei Belangen: Man wollte die Versuche besser reproduzierbar machen, und man war bemüht, die ursprünglich vor allem für einmalige Beanspruchung (statische, zügige Versuche) konzipierten Prüfmaschinen auch für deren periodische Wiederholung (Pulsier-, Ermüdungsversuche) brauchbar zu machen. Für beide Anliegen kam der Verbesserung von *Antrieb und Steuerung* eine entscheidende Bedeutung zu. Auf beiden Sektoren leistete Alfred Amsler Pionierarbeit.

Die *Reproduzierbarkeit* eines Versuchs hängt auf der apparativen Seite offensichtlich davon ab, wie gut die massgebenden Parameter beherrschbar sind. Einer der wichtigsten unter ihnen ist die *Geschwindigkeit*, mit der ein Versuch abläuft. Nachdem sich die Hydraulik (nicht zuletzt dank dem eingeschliffenen Kolben) weltweit als wichtigste Antriebsart durchgesetzt hatte, ging es darum, einen in Funktion der Zeit konstanten Ölstrom beliebiger Kapazität beliebig lange aufrechtzuerhalten. Damit war eine gute Annäherung an eine konstante Vorschubgeschwindigkeit des Kolbens im Zylinder gegeben. Gewiss muss man sich darüber im klaren sein, dass eine Steuerung dieser Art nur dann eine konstante Geschwindigkeit der Verformung (und zugleich der Kraftänderung) sicherstellt, wenn alle kraftführenden Teile des gesamten Systems

(Probe, Krafteinleitungen, Hydrauliköl, Reaktionsstruktur) als linear-elastisch betrachtet werden dürfen: Bei jeder Nichtlinearität ist eine Abweichung vom gewünschten Verlauf unvermeidlich. Für die damaligen Erfordernisse konnte eine solche Lösung trotzdem als sehr wesentlicher Fortschritt betrachtet werden, da die bis dahin üblichen Steuerventile selbst bei linear-elastischem Verhalten des Systems eine Veränderung der Prüfungsgeschwindigkeit bewirkten, sobald die Kraft sich änderte.

Bevor auf die Lösung des solcherart gestellten Problems eingegangen wird, muss eine *Sprachregelung* festgelegt werden, da sonst bei der Lektüre alter Schriften Missverständnisse unvermeidlich wären. Der interne Sprachgebrauch der Firma Amsler kannte nämlich Ausdrücke, die zum Teil von den heute durch Normung festgelegten stark abwichen. Das hier interessierende Gerät zur Aufrechterhaltung eines konstanten Ölstroms heisst heute *Stromregler*, in der Firma nannte man es zunächst «Druckregler», später «Mengenregler». Unter einem *Druckregler* versteht man nämlich heute ein einfacheres Gerät, das nur der Aufrechterhaltung eines konstanten Druckes dient und das im Firmen-Vokabular «Druckhalter» hiess.

Als die Verwirklichung eines rein hydraulischen *Stromreglers* aktuell war, kannte man schon Druckregler gemäss Fig. 23 a, bei denen ein mit dem Prüfzylinder hydraulisch verbundener kleiner Messkolben gegen eine auf das gewünschte Mass vorgespannte Feder drückte und ein vom Zylinder zum Reservoir führendes Ventil sinngemäss beeinflusste: War

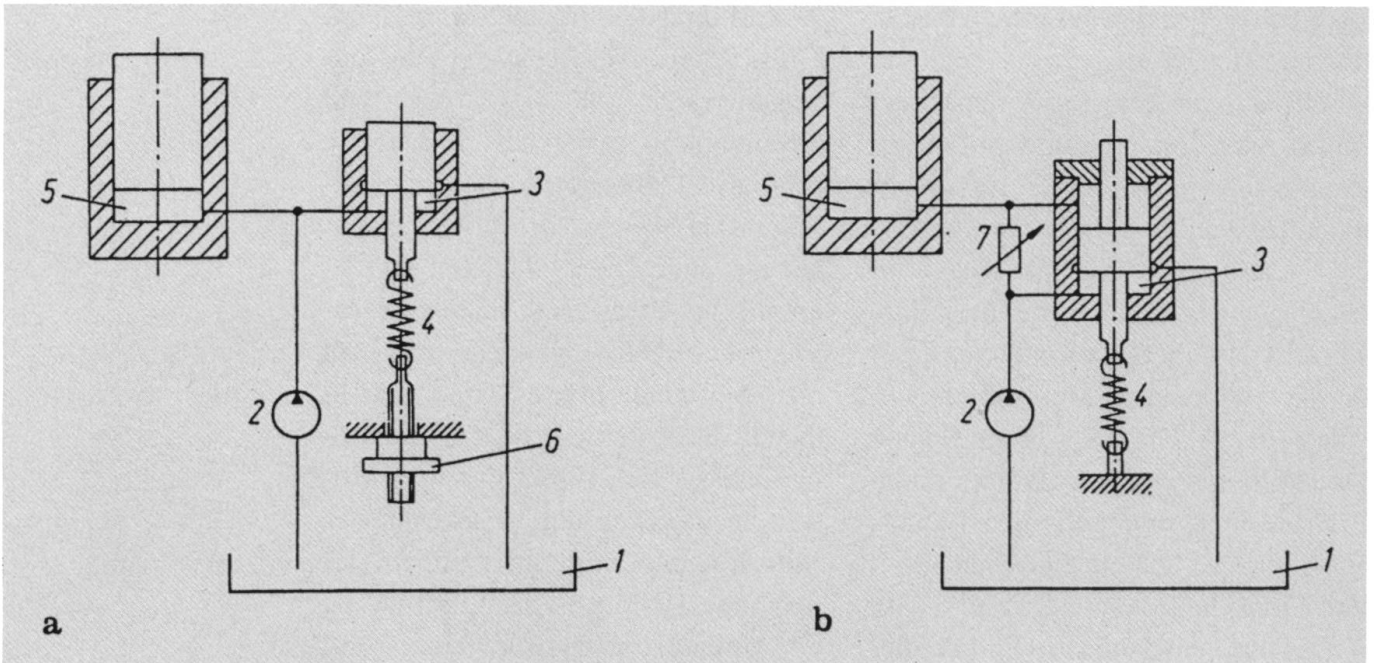


Fig. 23 Schema des Druckreglers (a) und des Stromreglers (b) zur Teilautomation manuell bedienter hydraulischer Antriebe. 1 = Reservoir; 2 = Pumpe; 3 = Zylinder der Ventilautomatik; 4 = Feder; 5 = Zylinder des Prüfsystems (Durchmesser in Wirklichkeit viel grösser als derjenige des Ventils); 6 = Spannvorrichtung für Feder; 7 = einstellbarer hydraulischer Widerstand. Beim Druckregler stellt sich der Rücklauf des Öls zum Reservoir so ein, daß der hydraulische Druck und die Feder gleiche Kräfte auf den Kolben des Zylinders 3 ausüben; beim Stromregler entsteht das Gleichgewicht zwischen der Feder und dem Druckabfall über den hydraulischen Widerstand.

der Druck zu gross, wurde durch Öffnen des Ventils mehr Öl abgelassen, als die Pumpe förderte, und der Druck senkte sich; war der Druck zu klein, stieg er dank Schliessen des Ventils bei dauerndem Ölzufluss von der Pumpe an. Auf diese Weise konnte eine hydraulische Prüfmaschine für Standversuche mit konstanter Kraft eingesetzt werden, eine Aufgabe, der vor allem in Kombination mit erhöhter Temperatur eine stetig wachsende Bedeutung zukam: Der Druckregler markierte einen wichtigen Schritt auf dem Weg zur universell verwendbaren Prüfmaschine.

Regeltechnische Methoden wurden damals noch nicht routinemässig auf

ölhydraulische Systeme angewendet. Es war also bis zu einem gewissen Grad ein Glücksfall, dass der soeben beschriebene Regelkreis sich als stabil erwies: Angesichts der kleinen im Spiel stehenden Trägheiten und der erheblichen hydraulischen Kräfte reagierte der Regler weit schneller als das von ihm beeinflusste Prüfsystem. Zudem öffnete und schloss sich das Ventil nicht in diskreten Schritten, sondern kontinuierlich, so dass der aus Pumpen- und Ventilfehler resultierende (positive oder negative) Ölfluss etwa proportional der Abweichung vom Sollwert des Prüfdruckes war. Man hatte es mit einem sogenannten Proportionalregler zu tun, einem Typ

also, der sich durch gute Regelstabilität auszeichnet.

Alfred Amslers Idee für einen Stromregler bestand nun darin, dieses Prinzip so zu modifizieren, dass nicht mehr der Solldruck im Prüfsystem mit der Kraft der Vorspannfeder im Gleichgewicht gehalten werden sollte, sondern – unter Verwendung eines doppelt wirkenden Messzylinders – eine dem Ölfluss proportionale Druckdifferenz. Diese wurde durch Einbau eines hydraulischen Widerstandes in die Leitung zwischen Ventil und Prüfzylinder erzeugt (Fig. 23 b).

Der so entstandene Stromregler wurde beim Prüfvorgang (im Gegensatz zum Druckregler) normalerweise nicht sich selbst überlassen. Vielmehr diente er dazu, dem Operateur die Versuchsführung ganz wesentlich zu erleichtern. Übrigens war das Gerät nicht frei von Mängeln. Der hydraulische Widerstand, zur Hauptsache laminar durchflossen, war abhängig von der Viskosität und damit auch von der Temperatur sowie – in geringerem Mass – vom Druck des Öls, so dass die Verwendung einer direkt nach Prüfgeschwindigkeiten geteilten Skala für die Einstellung ein Wunschtraum blieb; an ein Ausregeln rasch auftretender Störphänomene war bei den bescheidenen Pumpenleistungen und Strömungsquerschnitten nicht zu denken; überdies wurde ja lediglich die Relativgeschwindigkeit zwischen Zylinder und Kolben des Prüfsystems einigermaßen konstant gehalten, so dass jede Abweichung von linear-elastischem Verhalten zu Abweichungen von der gewünschten Geschwindigkeit führen musste. Trotzdem gab es über mehrere Jahrzehnte keine bessere Lösung der gestellten Aufgabe, und man hatte gelernt, mit den erwähnten Unvollkommenheiten zu leben.

Auch hier sei kurz auf die *späteren Entwicklungen* eingegangen, die geeignet waren, die auf Druck- und Stromreglern basierende Phase des Prüfmaschinenbaues zu einem Abschluss zu bringen. Einerseits gewannen die lange Zeit im Schatten der Hydraulik stehenden Maschinen mit *elektromechanischem Spindeltrieb* um die Jahrhundertmitte eine zunehmende Bedeutung. Und ein Elektromotor lässt sich direkt durch elektrische, namentlich durch elektronische Mittel regeln. Allerdings blieb der markante Erfolg – der Einführung von Umlaufspindeln zum Trotz – auf relativ kleine Kräfte unterhalb von 500 (meist sogar nur 200) kN beschränkt. So kam die wichtigste Erneuerung von der sogenannten *Servohydraulik* her, einem Antriebskonzept, das sich durch die beiden folgenden Stichworte charakterisieren lässt: Einsatz leistungsfähiger Pumpengruppen (je nach Systemgrösse und Verwendungszweck von einigen kW bis zum MW-Bereich) und Steuerung durch elektronisch betätigte Ventile mit verhältnismässig grossen Öffnungsquerschnitten. Auf diese Weise lassen sich fast beliebige Programme für den zeitlichen Ablauf eines fast beliebig wählbaren Prüfparameters (in erster Linie natürlich Kraft oder Verformung der Probe, letztgenannte entweder örtlich oder integral gemessen) verwirklichen. Insbesondere für weitgehend automatisierte Prüfung ist diese Freiheit der Versuchsführung schlechterdings unerlässlich, in der Bruchmechanik (Griffith, 1920; Heckel, 1970; Irwin, 1957; Rossmann, 1982) zumindest willkommen. Darüber hinaus ist auch Ermüdungsprüfung möglich, da – im Gegensatz zu elektromechanischem Antrieb – Pulsierfrequenzen im Dekahertz-Bereich (mit besonderen Massnahmen auch höhere) erreichbar sind.

Die mit der Entwicklung eines brauchbaren Stromreglers erbrachte Leistung wird durch diese beeindruckenden Möglichkeiten keineswegs geschmälert. Man darf im Gegenteil feststellen, dass es sich beim Stromregler um einen Vorläufer der heutigen Systeme handelte: Die stabile Regelung eines (manuell mitbeeinflussten) nichtstationären Prüfvorganges durch ein hydraulisches Ventil war bereits verwirklicht, und zu einer entscheidenden Erweiterung des Einsatzspektrums fehlte nur die Elektronik. Etwas überspitzt könnte man die Servohydraulik als blitzschnell verstellbaren Hochleistungs-Stromregler mit einem entsprechend rasch reagierenden Operateur bezeichnen. Zudem übertraf die Zuverlässigkeit des Stromreglers angesichts des Fehlens von Schnittstellen zwischen den Arbeitsmedien Öl und Elektrizität selbst das hohe Niveau moderner servohydraulischer Antriebe. Nicht umsonst werden auch heute noch – sofern die gestellten Prüfaufgaben nicht zu anderen Lösungen zwingen – zahlreiche Prüfsysteme mit Druck- und Stromreglern betrieben.

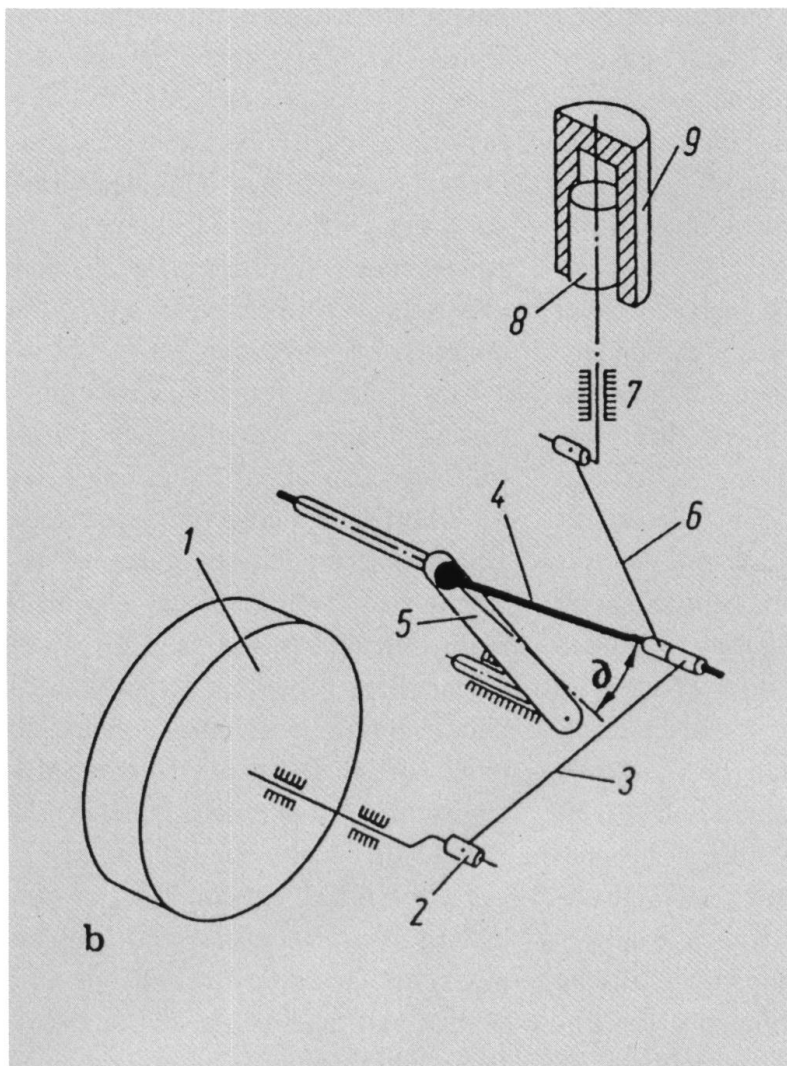
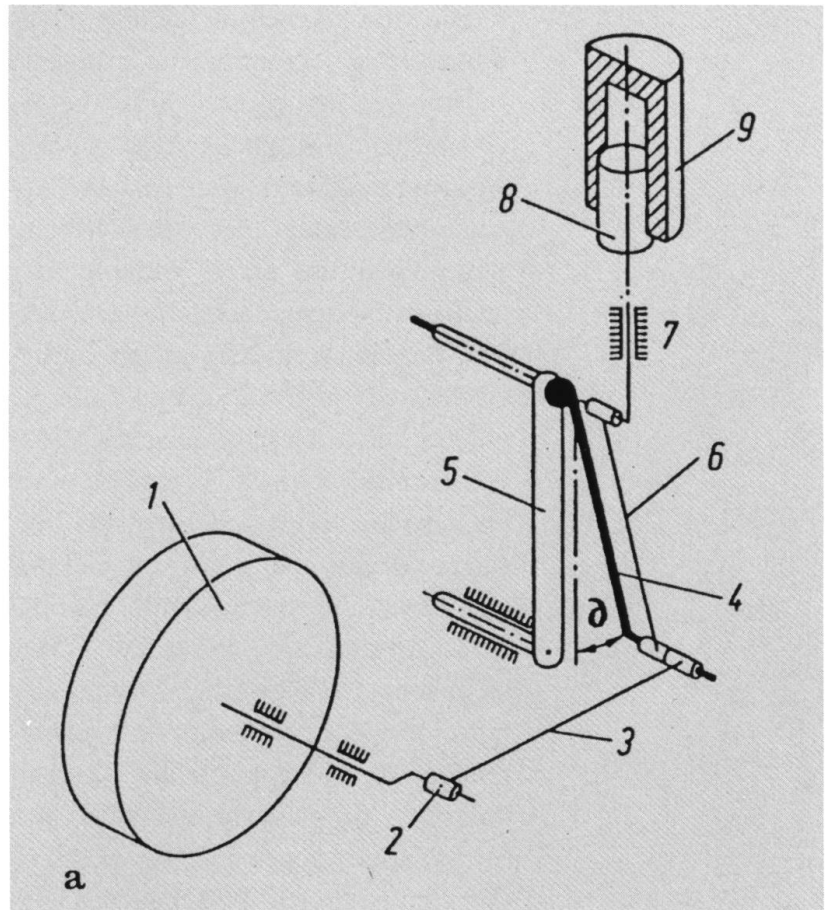
Ermüdungsprüfung gab es zwar schon im neunzehnten Jahrhundert, und einige dieser frühen Versuche haben die Bedeutung klassischer Fortschritte erlangt (Wöhler, 1870). Auf der apparativen Seite handelte es sich aber meist um ad hoc hergestellte Vorrichtungen, und ein ausgedehnter Markt für Pulsiermaschinen bestand noch nicht. Das hing wohl weniger mit den Schwierigkeiten bei deren Konstruktion als mit dem bescheidenen Bedarf der Vor-Automobil- und Vor-Aerospace-Zeit zusammen. Wie dem auch sei, ein Durchbruch auf weltweiter Basis trat erst im frühen zwanzigsten Jahrhundert ein, als hydraulische Prüfmaschinen mit brauchbaren Mitteln für die Erzeugung schwingender

Beanspruchungen (Pulsatoren) zu einem dringenden Bedürfnis wurden. Zwei der originellsten (und auf dem Markt erfolgreichsten) stammten von Alfred Amsler.

Ein *hydraulischer Pulsator* lässt sich im Prinzip nach dem folgenden einfachen Rezept bauen: Man nehme einen hydraulischen Zylinder, dessen Kolben durch einen von einem Elektromotor angetriebenen Kurbeltrieb in hin- und hergehende Bewegung versetzt wird, befestige an der Kurbelwelle ein Schwungrad angemessener Trägheit und schliesse das Ganze hydraulisch an ein passendes Prüfsystem an. Allerdings wäre man mit einem solch rudimentären Pulsator zwei wesentlichen Schwierigkeiten ausgesetzt: Zum einen könnte man bei gegebenen Maschinen- und Probedaten nur die durch das Hubvolumen festgelegte Schwingbreite fahren; zum zweiten müsste man den Antriebsmotor gewaltig überdimensionieren, um den Pulsator unter Überwindung des Widerstandes der Probe zu starten (einmal in Gang gesetzt, hätte der Motor dank dem Schwungrad nur noch die entstehenden Verluste, nicht aber die elastische Verformungsenergie zu decken).

Das zentrale Problem eines funktionstüchtigen hydraulischen Pulsators liegt also in der Schaffung eines im Betrieb beliebig veränderlichen Hubvolumens oder, mit anderen Worten, in der *Modulation des Hubvolumens*. Alfred Amsler fand zwei der elegantesten Lösungen für diese Aufgabe. Beide entstanden innerhalb einer kurzen Zeitspanne (die entsprechenden Typennummern lauteten 131 und 134), waren aber im Funktionsprinzip völlig verschieden, da im einen Fall mit einem einzigen Zylinder gearbeitet wurde, im anderen mit zweien (Alfred J. Amsler & Co., 1926). Die nachfolgenden Kurzbeschreibungen

Fig. 24 Schema des einzylindrigen hydraulischen Pulsators mit variablem Kolbenhub und Schwingengetriebe. a: Nullstellung; b: Pulsierstellung. 1 = Schwungrad; 2 = Kurbel; 3 = Kurbelpleuel; 4 = Schwinge; 5 = Schwingenlagerung; 6 = Kolbenpleuel (man beachte in a die koaxiale Lage des oberen Endes mit dem Schwingenlager); 7 = Kreuzkopflagerung; 8 = Kolben; 9 = Zylinder. ϑ = Pulsierwinkel der Schwinge (man beachte dessen Veränderung in Lage und Grösse).



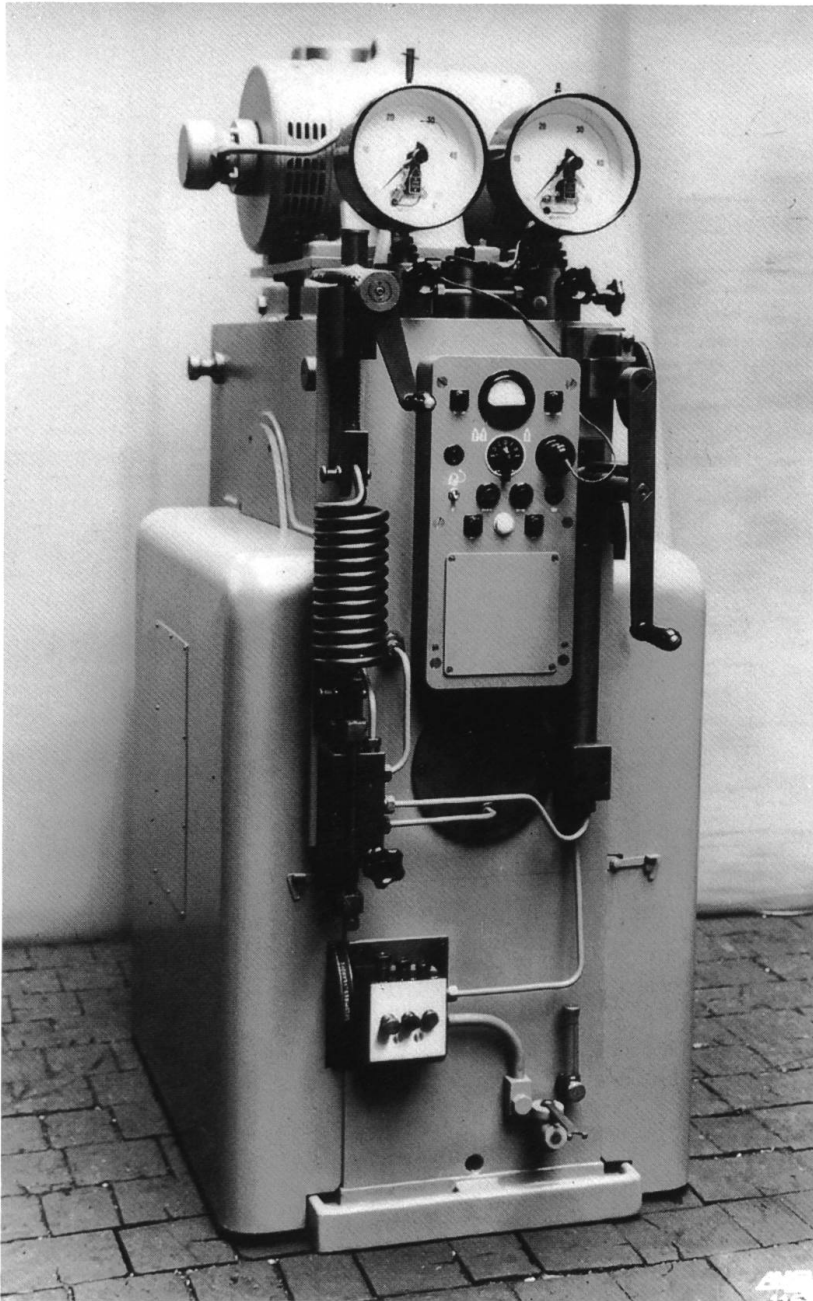


Fig. 25 Einzylindriger hydraulischer Pulsator gemäss Fig. 24. Im Unterteil ist die Mechanik samt zwei Schwungrädern untergebracht. Auf dem Gehäuse sichtbar der Antriebsmotor und die beiden Manometer, die mit Hilfe spezieller Ventile Minimal- und Maximaldruck angeben. Ganz vorne links Druckregler zur Konstanthaltung des Minimaldrucks, rechts Kurbel zur Wahl des Pulsivolumens (Verstellung der Schwinge über Schneckengetriebe).

gen sind einmal mehr mit entsprechenden Anpassungen dem hier verschiedentlich zitierten Buch des Verfassers (1992) entnommen.

«Bei einer *einzylindrigen Ausführung* (Fig. 24, 25) muß offensichtlich der Kolbenhub einstellbar sein. Zu diesem Zweck wirkt das liegende Kurbelpleuel nicht unmittelbar auf den Kolben, sondern setzt eine zweite Kurbel mit wesentlich größerem Kurbelradius in schwingende Bewegung. An dieser «Schwinge» ist das senkrecht stehende Kolbenpleuel angeschlossen. Die Achse der Schwinge ist auf einer Kreisbahn verstellbar, deren Achse parallel zur Kurbelwelle liegt. Der Radius dieser Kreisbahn stimmt sowohl mit demjenigen der Schwinge wie auch mit der Länge des Kolbenpleuels überein. In ihrer Nullstellung (Fig. 24a) fällt die Achse der Schwinge mit der oberen Lagerung des Kolbenpleuels zusammen. Schwinge und Pleuel schwingen «blind» um diese Achse, und es entsteht kein Kolbenhub. Bei Auslenkung der Schwingenachse (Fig. 24 b) fällt diese Übereinstimmung der Achsen dahin, die Schwinge steht während ihrer ganzen Hin-und-Herbewegung schräg, so daß die untere Lagerstelle des Kolbenpleuels (und mit ihr das ganze Pleuel samt dem Kolben) eine senkrechte Schwingbewegung ausführt.»

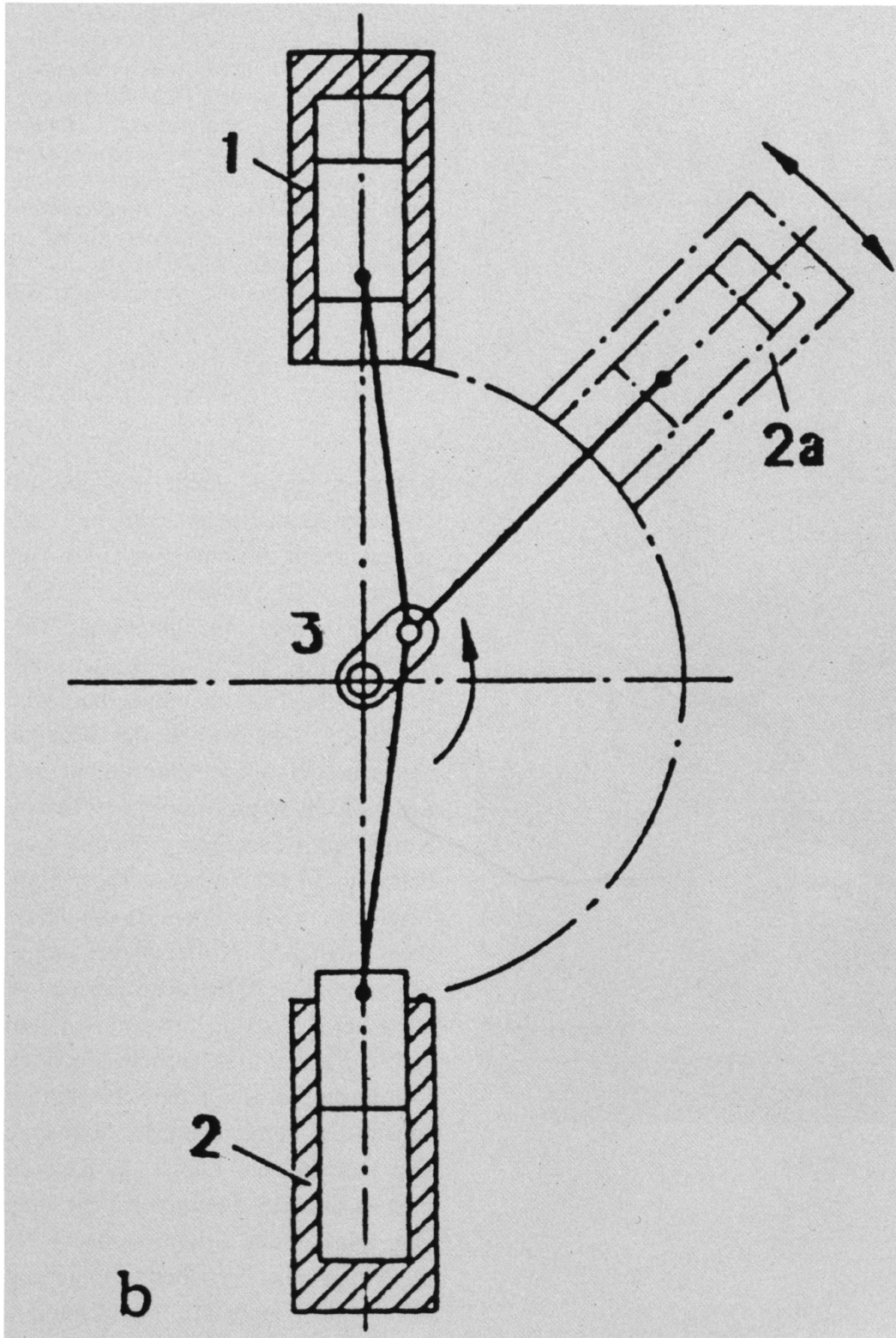


Fig. 26 Schema des zweizylindrigen Pulsators. 1 = ortsfester Zylinder; 2 = schwenkbarer Zylinder (mit 1 hydraulisch gekoppelt); 3 = Kurbel. Zylinder 2 ist in Nullstellung gezeichnet; 2a = derselbe Zylinder in Pulsierstellung (Verstellung durch Schneckengetriebe).

So originell diese Lösung für die stufenlose Modulation des Hubvolumens auch war, sie wurde in der Erfindungshöhe wohl noch übertroffen durch die zweizylindrige Ausführung (Fig. 26, 27). Ehe aber auf deren Aufbau eingegangen wird, sei daran erinnert, dass in der Elektrotechnik die Phasenlage periodischer (sinus- oder impulsförmiger) Phänomene in grosser Mannigfaltigkeit auftritt, sowohl

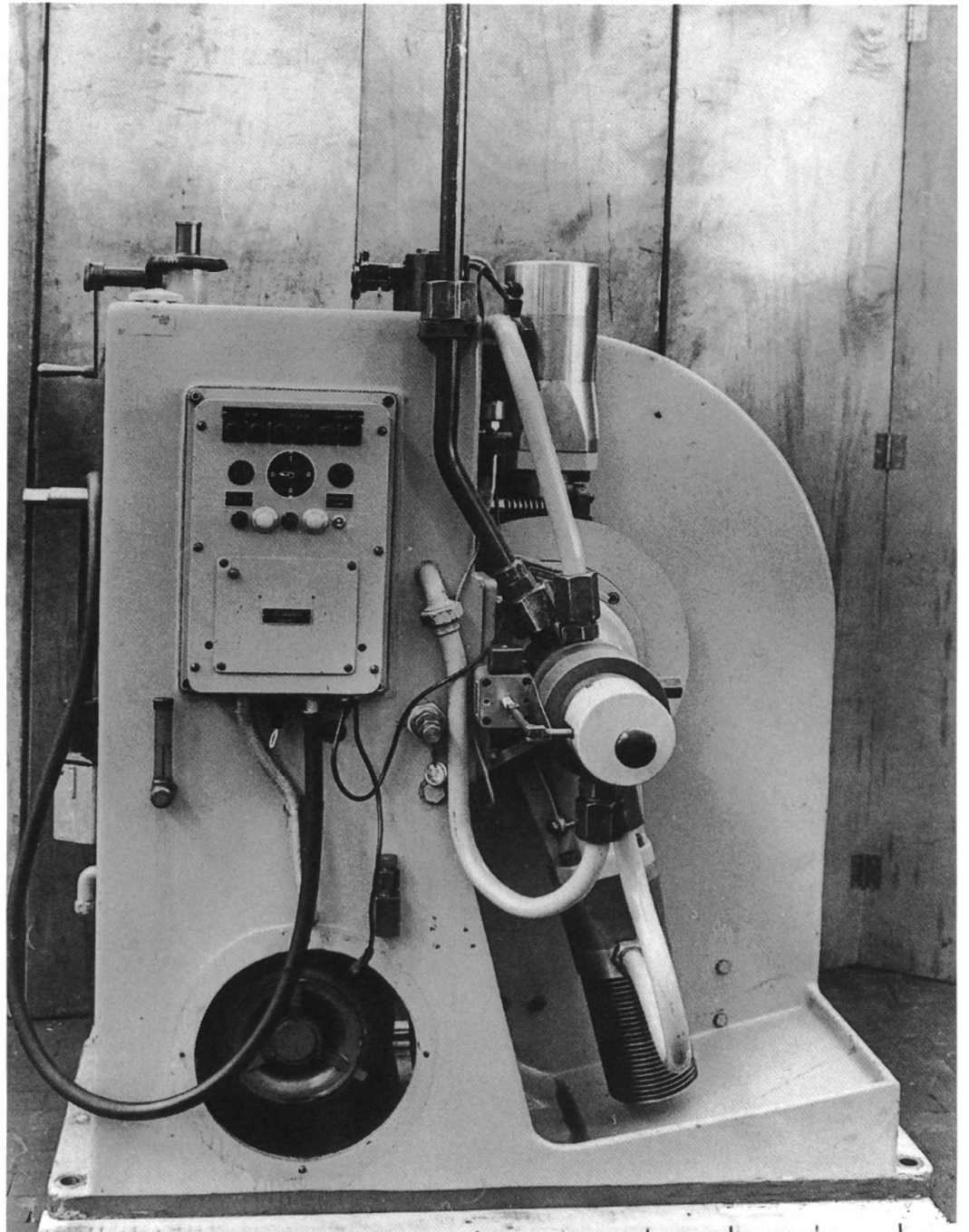


Fig. 27 Zweizylindriger hydraulischer Pulsator gemäss Fig. 26. Oben der feste, unten der schwenkbare Zylinder. Dahinter Verschalung des Schwungrades. Links unten Antriebsmotor.

störend (etwa bei der Energieübertragung) als auch nützlich (etwa bei der Signalmodulation). In die Hydraulik dürfte aber erst Alfred Amsler die Ausnützung einer Phasendifferenz eingeführt haben.

Das Grundprinzip ist, wie schon die Kürze des nun folgenden Zitates zeigt, verblüffend einfach (Fig. 26): «Zwei hydraulisch gekoppelte Zylinder gleichen Hubvolumens werden von einer Kurbelkröpfung angetrieben. Einer ist ortsfest, der andere um die Kurbelwellenachse schwenkbar. So ist zwischen den beiden Zylindern eine hydraulische Phasendifferenz von 0 bis π möglich.» Im Gegensatz zur typischen *Amplitudenmodulation* der einzylindrigen Ausführung liegt also eine *Phasenmodulation* vor, die ein Gesamthubvolumen zwischen 0 und der Summe der beiden beteiligten Volumina gestattet.

Die Frage liegt nahe, weshalb Alfred Amsler für ein und dasselbe Problem *zwei grundverschiedene Lösungen* kurz nacheinander in die Praxis umsetzte. Die für mathematische Instrumente einigermaßen plausible Annahme, der Grund liege in der Innovationsfreude als *l'art pour l'art*, scheint hier nicht sehr realistisch: Schliesslich handelte es sich um recht kostspielige Maschinen, die nicht zum spielerischen Abgehen von Bewährtem einluden. Zwei Mutmassungen seien hier zur Sprache gebracht: Zum einen mag die Idee wegleitend gewesen sein, auf einem noch wenig bekannten Sektor zunächst zwei Varianten zu erproben, um sich anschliessend auf die erfolgreichere festzulegen; zum anderen ist es denkbar, dass die Ausführung mit einem einzigen festen Zylinder als robuster und damit als besser geeignet für grössere Kaliber empfunden wurde (in der Tat wurden zweizylindrige Pulsatoren ausschliesslich für kleine Pulsierleistungen gebaut). Der Wahrheitsgehalt dieser – einander keineswegs ausschliessenden – Vermutungen lässt sich heute wohl kaum mehr nachprüfen. Richtig ist aber, dass beide Bauarten sich vorzüglich bewährten (dem Verfasser sind von beiden Exemplare mit Betriebsdauern von vier und mehr Jahrzehnten bekannt) und dass beide lange Zeit parallel zueinander gebaut wurden. Das schliessliche Abgehen vom zweizylindrigen Modell war wohl in erster Linie einer nach Alfred Amslers Tod erfolgten Veränderung der Marktlage zuzuschreiben: Einerseits entstanden in der Firma selber hochfrequente Resonanzprüfmaschinen mit elektronischer Steuerung, die einen erheblichen Teil des Marktes für kleinere Kaliber abdeckten (Russenberger, 1946), andererseits machte sich bei den mittleren Frequenzen ein zunehmender Trend zu grossen Pulsier-

leistungen bemerkbar. Der phasenmodulierte Pulsator ist also keineswegs grundsätzlichen technischen Mängeln, sondern äusseren Umständen zum Opfer gefallen. Und müsste der Verfasser heute einen neuen hydraulischen Pulsator mittlerer Frequenz konstruieren, er würde zuerst dieses Konzept ins Auge fassen.

Die letzte Bemerkung hat mehr als nur akademische Bedeutung. Zwar hat die oben bereits erwähnte Servohydraulik auf ihrem Siegeszug nicht nur primitivere Steuerungen, sondern auch den hydraulischen Pulsator vollständig vom Markt verdrängt. Man sollte aber zwei Tatsachen nicht aus den Augen lassen: Einerseits werden servohydraulische Prüfsysteme, sofern für Ermüdungsarbeit eingesetzt, in vielen Fällen fast oder ganz ausschliesslich für sogenannte *Einstufenversuche* mit konstanten Schwingbreiten verwendet, andererseits dauern Ermüdungsversuche lange (bei einer für grosse Proben charakteristischen Frequenz von 5 bis 10 Hz etwa eine halbe bis eine ganze Arbeitswoche für die klassische Prüfung über 2 Millionen Lastwechsel), und Servoantriebe zeichnen sich durch einen hohen *Energiebedarf* aus, was natürlich bei grossen Ausführungen besonders ins Gewicht fällt. Pulsatoren der beschriebenen Bauweisen benötigen, wie schon erwähnt, nur die zur Deckung der Verluste erforderliche Energie, während die weitaus grössere elastische Verformungsenergie der Probe bei jedem Belastungshub aus dem Schwungrad in die Probe gebracht und beim Entlastungshub wieder in das Schwungrad zurückbefördert wird. So ist es nicht ganz auszuschliessen, dass in einem Umfeld zunehmenden Energiebewusstseins (und steigender Energiekosten) der Pulsator eine sinnvolle Renaissance erleben könnte.

Schlusswort

Vergleicht man das tatsächlich geleistete Werk Jakob und Alfred Amslers mit den hier dargelegten Beispielen, so stellt man eine deutliche Diskrepanz fest. Zahllose konstruktive Ideen und schöpferische Konzepte wurden links liegengelassen, ganze Gruppen von Maschinen und Apparaten blieben ungenannt, und keine der erwähnten Schöpfungen (etwa eine Prüfmaschine) wurde bis in ihre Einzelheiten beschrieben.

Der Verfasser ist sich dieser Mängel seiner Studie voll und bewusst. Trotzdem glaubt er, den richtigen Weg für die Würdigung der beiden Schaffhaußer Industripioniere beschritten zu haben. Ein mehr oder weniger vollständiger Werkkatalog hätte vielleicht seinen historischen Wert. Im Rahmen einer im Umfang begrenzten Schrift enthielte er aber nur knappe Hinweise auf kreative Ideen, und der nicht spezialisierte Leser hätte Mühe, aus einer langen Aufzählung von Produkten mit sehr verschiedenem Erfindungsniveau diejenigen herauszufinden, die dem Stand der Technik ihrer Zeit in besonderem Masse voraus waren. Und gar das Herausgreifen einer noch so wichtigen Gruppe dieser Produkte zwecks genauer Beschreibung hätte der vorliegenden Arbeit zwar den Charakter eines Lehrbuches, nicht aber dessen umfassende Breite vermittelt.

So war ohne Zweifel der Versuch gerechtfertigt, aus dem Schaffen der beiden Amsler die Sternstunden herauszusuchen, in denen wirklich Neues und über lange Zeit Wirksames Form annahm. Und gerechtfertigt war dieser Versuch nicht nur wegen der Anziehungskraft solcher Höhepunkte auf den technisch Interessierten. Vielmehr waren es eben die damit verknüpften Ideen, die dem industriellen Erfolg

immer wieder Pate standen: Ohne die Erfindung des Planimeters hätte die Firmengründung nicht stattgefunden; ohne den klaren Blick für die Möglichkeiten des eingeschliffenen Kolbens wäre die nachfolgende Perfektionierung von Prüfgeräten nicht in Gang gekommen; ohne das Erkennen des Zusammenspiels unter den Elementen einer Integrieranlage sowie zwischen diesen und einer Messhydraulik wäre das Konzept eines leistungsfähigen Dynamometerwagens nicht geboren worden. Mit einem Wort: Minuziöse technische Kleinarbeit und kaufmännisches Geschick, für manche Unternehmen als Garanten industriellen Erfolges ausreichend, hätten im vorliegenden Fall nicht genügt, wäre nicht in entscheidenden Augenblicken der Funke einer schöpferischen Eingebung zur treibenden Kraft geworden.

Edison soll behauptet haben, zum Erfinden brauche es zwei Prozent Inspiration und achtundneunzig Prozent Transpiration. Jeder erfolgreiche Ingenieur wird ihm recht geben. Er wird sich zugleich aber in Erinnerung rufen, dass die achtundneunzig Prozent nutzlos bleiben können, wenn die zwei fehlen.