Zeitschrift: Ferrum : Nachrichten aus der Eisenbibliothek, Stiftung der Georg Fischer AG

Herausgeber: Eisenbibliothek

Band: 81 (2009)

Artikel: Teilefertigung und Montage in der metallverarbeitenden Industrie : Entwicklungstendenzen von 1800 bis 1970

Autor: Benad-Wagenhoff, Volker

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-378453

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

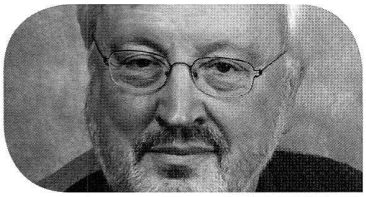
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées 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: 12.07.2025

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



Teilefertigung und Montage in der metallverarbeitenden Industrie – Entwicklungstendenzen von 1800 bis 1970[1]

Dr. phil. Dipl.-Ing. Volker Benad-Wagenhoff

Geboren 1948, 1967–1973 Maschinenbaustudium an der TH Darmstadt, danach Konstruktionstätigkeit in der Anlagenplanung, 1983–1988 wissenschaftlicher Mitarbeiter bei Akos Paulinyi am Lehrstuhl für Technikgeschichte in Darmstadt, 1989 Promotion, seit 1990 Konservator am Landesmuseum für Technik und Arbeit. Veröffentlichungen zur Geschichte der industriellen Fertigungstechnik, zuletzt auch zur frühneuzeitlichen Münzprägetechnik.

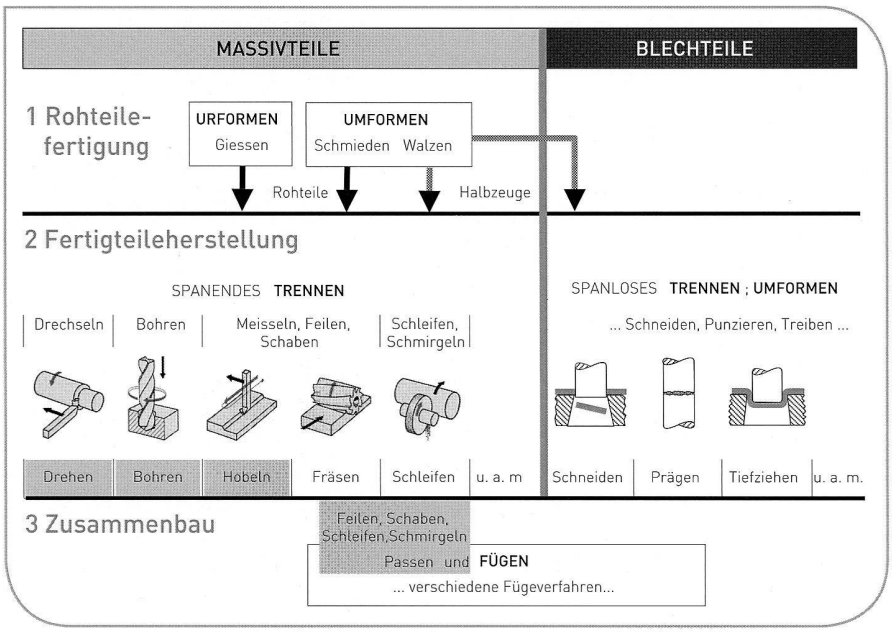


Bild 1: Bearbeitungsverfahren und Gliederung der maschinenbaulichen Fertigung (grau unterlegt die Hauptverfahren für mittlere und feine Bearbeitung im klassischen Maschinenbau).

Der Bau von Maschinen war nach Beginn der Industrialisierung noch lange von Handarbeit und subjektivem Feingefühl geprägt, weil die neuen Werkzeugmaschinen und die überkommenen Messmittel zu ungenau waren, um Passgenauigkeit zu erreichen. Im Kontext der «amerikanischen» Massenfertigung entstanden exaktere objektive Messmittel und die Präzisionsschleifmaschine. Mit ihrer Hilfe kam es seit 1900 zu einer Synthese von klassischem Maschinenbau und amerikanischem System, der Austauschbau wurde zum Standard. Die rasante Leistungssteigerung der Maschinen, vor allem der Verbrennungsmotoren, erzwang nach 1930 die Entwicklung von Feinstbearbeitung und Oberflächenmessung. Für die zügige Erneuerung formspeichernder Werkzeuge in der Massenfertigung entstand um 1910 ein numerisiertes Werkzeugmaschinenkonzept, das ab 1950 mit elektronischen Steuerungen kombiniert wurde und 1970 bis an die Schwelle einer umfassenden numerischen Vernetzung gediehen war.

Handwork and a subjective manual dexterity characterised the building of machines long after the beginning of industrialisation, because the new machine tools and the inherited measurement equipment were too imprecise to achieve accuracy of fit. In the context of «American» mass production, more exact and objective measurement equipment and precision grinding machines were developed. Thus, as of 1900, began the synthesis of traditional machine construction and the American system; interchangeable component manufacture became the standard. The rapid power enhancement of machinery, especially of combustion engines, after 1930 forced the development of superfinish machining and surface measurement. For efficient replacement of template tools in mass production, a numerical machine tool concept was created in 1910 and combined with electronic control in 1950, flourishing until 1970 when a comprehensive numerical network was introduced.

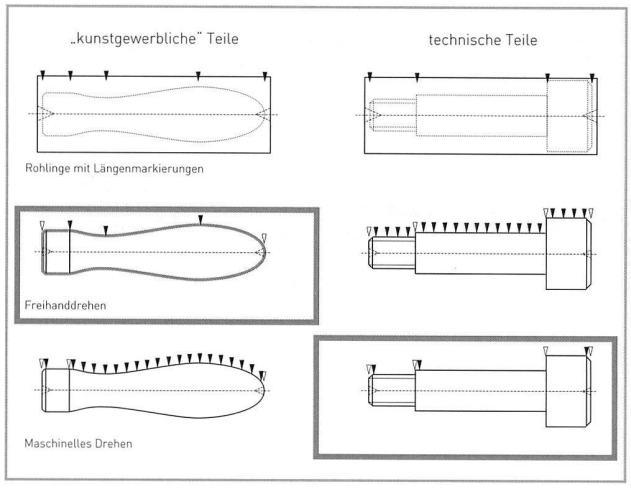


Bild 2: Frei geschwungene und geradlinige Konturen an Drehteilen bei handarbeitlicher und bei maschineller Bearbeitung. Pfeile bezeichnen Bearbeitungs- und Messpunkte, die den Massvorgaben entsprechend zu setzen und zu überprüfen sind. Beim Freihanddrehen lässt sich die geschwungene Kontur leichter fertigen als die gerade, beim Drehen mit dem Kreuzsupport verhält sich das umgekehrt. (Skizze d. Verf.)

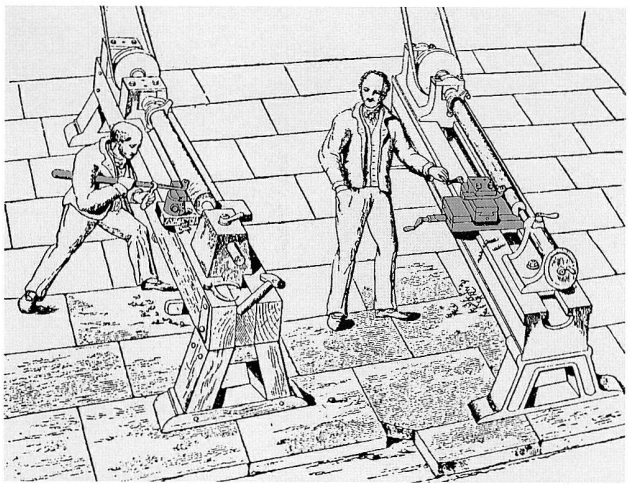


Bild 3: Drechseln mit handgeführtem Meissel an der Handdrehbank und Drehen mit Kreuzsupport an der Drehmaschine. (Quelle: Nasmyth, wie Anmerkung 4, S. 396, Fig. 1 u. 2)

Technischer Kern des fortdauernden Industrialisierungsprozesses, der um 1770 mit der Industriellen Revolution in Grossbritannien einsetzte, ist die Maschinisierung, die Ablösung menschlicher Arbeit durch Maschinenarbeit. Nach den Anfängen in der Textilindustrie erfasste dieser Umbruch um 1800 auch die Herstellung von Maschinen. Als strategische Branche, die alle industrialisierenden Gewerbe mit Maschinerie versorgte, entstand der industrielle Maschinenbau. Zu seinen wichtigsten Werkstoffen wurden die technischen Eisenlegierungen Gusseisen, Schmiedeeisen und Stahl[2], die ihre ohnehin schon zentrale Rolle für die gesamte Produktion noch einmal dramatisch ausbauen konnten.

Im Folgenden wird versucht, das Voranschreiten der produktiven Möglichkeiten im Maschinenbau und in Nachbarbereichen zu skizzieren, die u. U. wirtschaftsstatistisch als eigene Branchen zählen, aber ebenso komplexe Produkte aus Metall herstellen. Dabei sollte bewusst bleiben, dass Spitzentechnologien nie flächendeckend gebraucht werden und ältere Verfahren häufig ihre Anwendungsnischen behalten.

Grundsätzliches zur Fertigung von Metallteilen

Gegenstand der maschinenbaulichen Fertigung sind «geometrisch bestimmte feste Körper»[3]: metallische Einzelteile und aus ihnen zusammengesetzte Mechanismen. Die Teile sind häufig von komplexer Gestalt und müssen im mechanischen Funktionszusammenhang genau ineinanderpassen. Ihre Formgebung ist wegen der zu überwindenden Festigkeit des Metalls meist ein vielstufiger Vorgang, der von grober über mittlere zu feiner oder gar feinster Bearbeitung fortschreitet und dabei auch Werkstoffeigenschaften verändert. Man teilt den gesamten Fertigungsprozess gern in die Hauptabschnitte Rohteilefertigung, Fertigteileherstellung und Zusammenbau (Bild 1). Hier geht es um den zweiten und dritten Abschnitt, und wir werden sehen, dass die Dreiteilung fürs 19. Jahrhundert zu ungenau ist. Zwei Fragen werden unsere Betrachtung leiten:

- Wie werden Teile gemacht, mit welchen Verfahren, Maschinen, Messmitteln und in welcher Werkstattorganisation, und
- was für Teile werden gefertigt im Hinblick auf eingesetzte Werkstoffe und Halbzeuge, auf Geometrie und Präzision und auf gefertigte Stückzahlen.

Dazu vorab einige grundsätzliche Feststellungen: Erstens bilden Fertigungsprozesse, ob mit einfachen Handwerkzeugen oder mit hoch automatisierten Maschinen ausgeführt, immer eine Einheit aus stofflichen, energetischen und informationellen Veränderungen. Informationen zur Teilegestalt werden, nachdem sie konstruktiv festgelegt sind, am Werkstoff realisiert. Dabei wird Energie verausgabt, und durch Messen und Prüfen werden laufend Informationen über den Bearbeitungsstand gewonnen. Deswegen betrachten wir im Folgenden neben den Bearbeitungsverfahren immer auch die Messmethoden.

Zweitens: Für die mittlere und feine Bearbeitung massiver Teile gab es traditionelle Handarbeitsverfahren: Drechseln, Bohren, Meisseln, Feilen, Schaben, Schleifen und Schmirgeln. Nach 1800 wurden sie schrittweise durch maschinelle zurückgedrängt, deren wichtigste Drehen, Bohren,

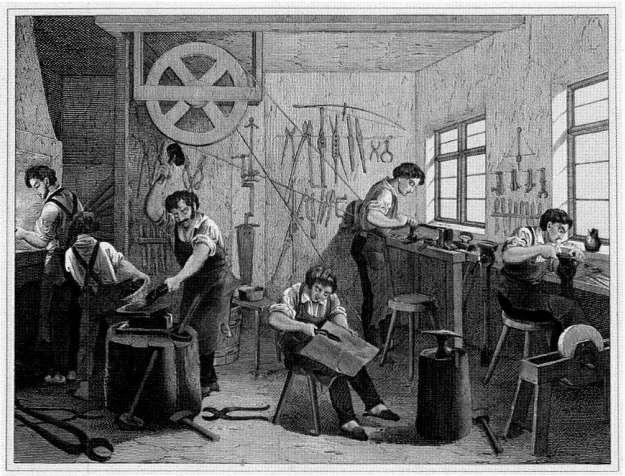


Bild 4: Zirkelschmiede als Beispiel einer vorindustriellen Schlosserwerkstatt. (Quelle: Handwerkerbilder, Bild 10, Bilderbogen von F. J. Schreiber, Esslingen 1834, Württembergisches Landesmuseum Stuttgart)

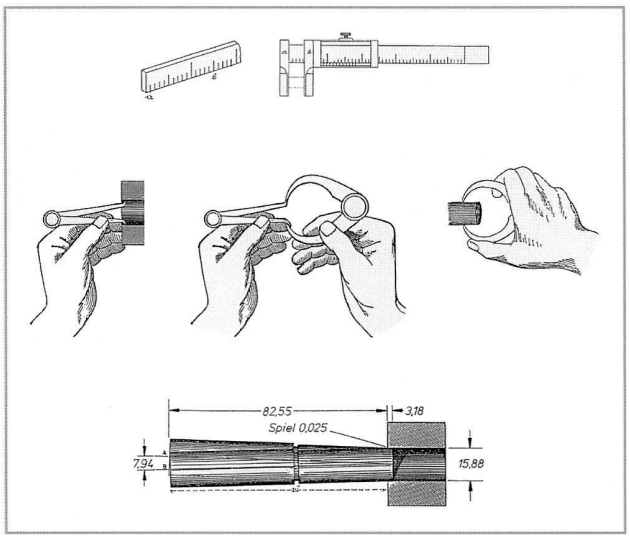


Bild 5: Messmittel der vorindustriellen Fertigung und des klassischen Maschinenbaus. Oben links das Ende eines Massstabs, daneben der Messschieber, wie er sich seit etwa 1850 einbürgert. (Quelle: Hermann Fischer: Allgemeine Grundsätze und Mittel des mechanischen Aufbereitens (Allgemeine mechanische Technologie). Leipzig 1888, S.12 u. S. 23) Darunter Innen- und Aussentaster im Gebrauch an Bohrung und Welle: links das Abgreifen oder Prüfen eines Innenmasses, in der Mitte Massübertragung, rechts Abgreifen oder Prüfen eines Aussenmasses. (Quelle: Joshua Rose: Machine Shop Practice. London o. J. (1888), S. 362, die Darstellung links Montage d. Verf.) Unten das Prüfen des Passungsspiels mit dem Tastsinn: Das geringe Spiel des knapp in die Bohrung eingeführten Bolzens ergibt an dessen hinterem Ende eine gut wahrnehmbare Bewegungsspanne, die eine ausreichende qualitative Beurteilung der Passung erlaubt. (Quelle: Ebd. S. 361f., Fig. 1419, Masseintragungen d. Verf. nach Text)

Hobeln, Fräsen und Schleifen sind. Später, als sich auf der Grundlage des industriellen Walzens die maschinelle Blechverarbeitung ausbreitete, gewannen vor allem das Ausschneiden oder Lochen und das Tiefziehen an Bedeutung (Bild 1). Andere bleiben hier unberücksichtigt. Wichtiger ist, dass sich alle Verfahren danach einordnen lassen, wie sie die Teilegestalt hervorbringen. Entweder wird diese durch die Relativbewegungen eines annähernd punktförmigen Werkzeugs am Werkstück generiert. Oder man kopiert eine vorhandene Form, indem man sie mit einem Taster nachfährt oder einen «Abdruck» von ihr erzeugt. Dazu kommt, dass die Bewegungen frei von Hand erfolgen können oder mechanisch zwangläufig in Maschinen. Auch die maschinellen Bewegungen beruhen auf einer schon vorhandenen Gestalt, die durch Abfahren oder Abtasten im Werkstück nachgeformt wird – z. B. als geradlinige Kontur. Es gibt also im Prinzip drei Möglichkeiten: freies Generieren, Abdruckkopieren und Nachformkopieren.

Drittens geht es in der maschinenbaulichen Fertigung um «technische» Teile, nicht um «kunstgewerbliche» (Bild 2):

- «Kunstgewerbliche» Teile besitzen ästhetisch oder ergonomisch definierte Oberflächen mit frei geschwungenen Konturen, die Abweichungen dürfen im Millimeterbereich liegen. In vorindustrieller Zeit stellten sie die grosse Mehrzahl der Teile. Sie lassen sich wegen der geringen Genauigkeit gut von Hand herstellen. Man braucht etwa beim Freiformdrehen eines hölzernen Feilengriffes nur wenige Messpunkte, zwischen denen die Kontur mehr oder weniger zügig in freien Bewegungen ausgearbeitet wird. Allerdings ist die Stückzahlproduktivität gering.
- Technische Teile haben überwiegend geradlinige Konturen. Sie müssen zum mechanischen Gegenstück passen, bei zulässigen Abweichungen unter 0,1 mm. Komplexe Teilegestalten entstehen durch Kombination von nur vier bzw. fünf grundlegenden Flächenelementen:
  - Rotationsflächen (Zylinder, Kegel – innen und aussen)
  - Planflächen
  - Gewindeflächen (innen und aussen)
  - Profilflächen (Zahnflanken, «freie» Konturen usw. – innen und aussen)
  - Teilungen als regelmässige Reihung dieser vier Elemente (Vierkante, Sechskante, Zahnräder)

Die geradlinigen Konturen und die hohe Genauigkeit waren von Hand nur mühsam zu erreichen (Bild 2), man musste immer wieder neu ansetzen, um kurze gerade Konturabschnitte sehr exakt aneinanderzureihen, hatte also sehr viele Bearbeitungs- und Messpunkte. Hier lag ein Produktivitätsengpass, der dann in der Industriellen Revolution zur Maschinisierung trieb (Bild 3).

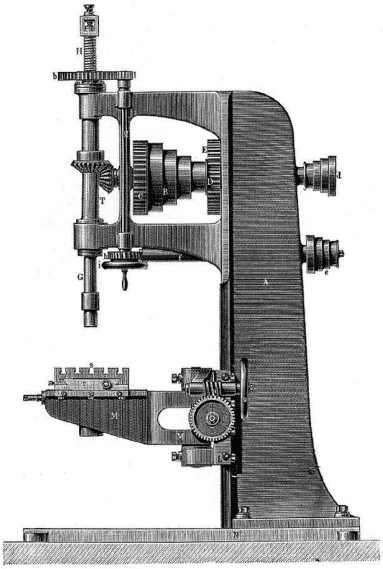


Bild 6a: Senkrechtbohrmaschine in der um 1840 in England entwickelten, vorbildgebenden Form. (Quelle: A. Ledebur: Lehrbuch der mechanisch-metallurgischen Technologie, Braunschweig 1905, S. 514, Abb. 552)

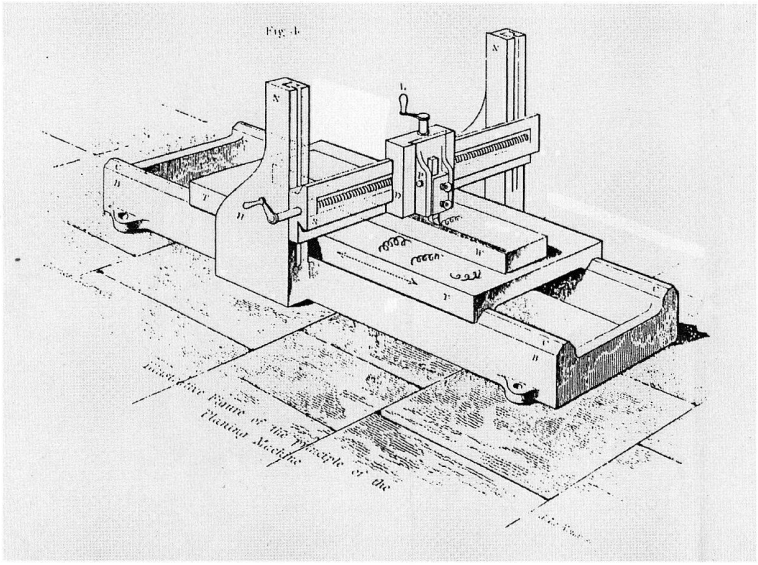


Bild 6b: Prinzip der Tischhobelmaschine zur Herstellung planer Flächen. (Quelle: Nasmyth, wie Anmerkung 4, S. 405, Fig. 4)

Vorindustrielle Fertigung: Handarbeit und Feingefühl

Gebrauchsgegenstände, Geräte und die noch recht seltenen Maschinen baute man in vorindustrieller Zeit überwiegend aus Holz. Zur Verstärkung diente Schmiedeeisen; Gusseisen und Buntmetalle wurden wenig verwendet, gehärteter Stahl nur dort, wo er für Werkzeuge unverzichtbar war, etwa an Schneidkanten oder Hammerköpfen.

Werkstätten, die damals komplexere Mechanismen bauten, hat man sich als mittelgrosse Schlossereien vorzustellen (Bild 4). Zur Ausstattung gehörten eine Schmiedeesse mit Amboss, Werkbänke mit Schraubstöcken zum Meisseln und Feilen, eine Drechselbank für runde Teile, eine ortsfeste Bohrkurbel sowie ein Schleifbock für grobe Bearbeitung und zum Schärfen der Werkzeuge. Für die Anfertigung hölzerner Gussmodelle und Maschinengestelle gab es eine Hobelbank und Schreinerwerkzeug. Gusseisenteile, grosse Schmiedestücke und Stabeisen mussten von Eisenhütten und Hammerwerken bezogen werden. Die Werkzeuge aus unlegiertem Kohlenstoffstahl waren einfach, abgesehen von den vielen Feilen hatten sie nur eine oder wenige Schneiden und wurden in der Werkstatt selbst angefertigt und nachgeschärft (siehe z. B. den Spitzbohrer Bild 14). Schleifmineralien, wie Sandstein oder loser Schmirgel, stammten aus Naturvorkommen.

Masse, die man am Werkstück realisieren wollte, griff man mit dem Tasterzirkel am Zollstock oder an einer 1:1-Skizze, manchmal auch an einem nachzufertigenden Vorbild ab (Bild 5). Zollstöcke waren aber ungenau geteilt, und eine strenge Anbindung an ein übergreifendes gesellschaftliches Masssystem gab es noch nicht. Bei der Massübertragung kamen weitere Fehler hinzu, sodass sich bis zu 0,25 mm Differenz zum Sollmass ergaben. Zusammengehörige Teile hätten also bei getrennter Herstellung bis zu 0,5 mm voneinander abweichen können. Das erforderliche Passungsspiel von nur 0,01–0,1 mm erreichte man erst während des Zusammenbaus durch gemeinsame Fertigung der Passteile: Man nutzte z. B. die fertige Bohrung als Massverkörperung und näherte den Durchmesser der Welle schrittweise mit Schlichtfeile und Schmirgel an, wobei man immer wieder mit dem Tastsinn prüfte. Die beiden Teilemasse waren numerisch nicht exakt erfasst und lagen folglich bei jeder Teilepaarung anders. Dank der Geschicklichkeit der Monteure wurde das Spiel zwar subjektiv, aber richtig bestimmt. Die fertigen Mechanismen blieben technologisch gesehen Einzelstücke, selbst wenn man sie als kleine Serien konstruktiv gleich baute: Ihre Teile waren nicht austauschbar. Das sollte auch im industriellen Maschinenbau so bleiben.

Industrieller Maschinenbau: Maschinen, Handarbeit und Feingefühl

In der Industriellen Revolution schwoll die Menge der technischen Metallteile aus zwei Gründen so stark an, dass die Bearbeitung von Hand zum Engpass wurde. Zum einen wuchs die Maschinennachfrage, weil immer mehr Gewerbezweige die maschinelle Produktion einführten. Zum anderen ging man zur Ganzmetallbauweise von Maschinen über, um die

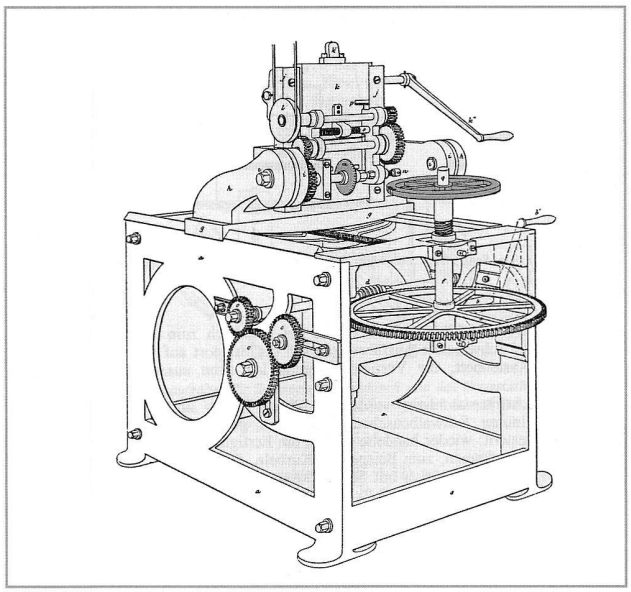


Bild 7: Zahnradfräsmaschine mit Kreisteilapparat und feingezahntem Fräser. (Quelle: Robertson Buchanan: Practical Essay on Mill Work and other Machinery. London 1841, Tf. 40a)

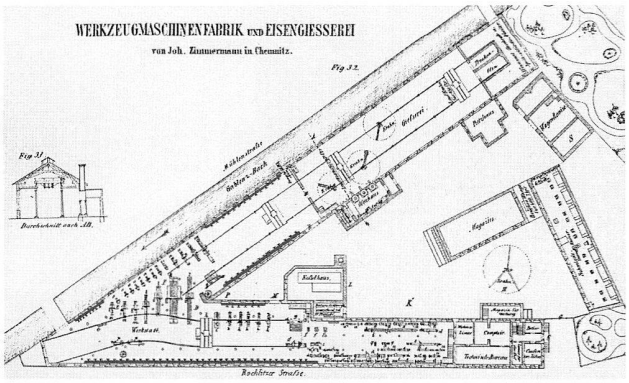


Bild 8: Grundriss einer Maschinenfabrik – neben einer Vielzahl von spanenden Werkzeugmaschinen zeigt er an den Fensterfronten lange Werkbänke (grau angelegt) mit vielen Schraubstöcken für die Handbearbeitung. (Quelle: Robert Schmidt: Die Werkzeugmaschinenfabrik und Eisengiesserei von Joh. Zimmermann in Chemnitz. In: Dinglers Polytechnisches Journal 173 (1864), S. 9–12, Tf. 1)

Funktionssicherheit zu erhöhen. Gusseisen ersetzte das Holz als Hauptbaustoff, Schmiedeeisen behielt seine Bedeutung für stärker beanspruchte Teile. Stahl blieb bis nach 1870 im Wesentlichen auf Werkzeuge beschränkt.

Am Beginn der Industriellen Revolution hatte man Maschinen gesucht, die «ohne Finger spinnen konnten», um den Garnhunger im Textilgewerbe zu stillen. Nun ging es darum, ohne Finger drechseln, bohren, meisseln, sägen und feilen zu können. Die Lösung dieses Bearbeitungsproblems brachten die spanabhebenden Werkzeugmaschinen. Zwischen 1800 und 1840 entstand die moderne Drehmaschine als wirkliche Schlüsselmaschine der Industrialisierung (siehe Bild 3), und abgeleitet von ihr Maschinen zum Bohren und Hobeln (Bild 6). Bis 1860/70 stützte man sich in der Hauptsache auf diese drei Gattungen, mit denen sich die ersten vier Oberflächenelemente fertigen liessen. Fürs Fräsen waren die Werkzeuge nicht ausgereift (siehe Bild 13), deshalb beschränkte es sich auf die Fertigung von Zahnrädern (Bild 7) und von Sechskanten an Schrauben und Muttern. Das Schleifen diente weiterhin nur zur Grobbearbeitung und zum Schärfen. Gesteuert wurden diese Werkzeugmaschinen von Hand. Frühe Ansätze zur Automatisierung gab es jedoch bei schwierigen Formen und grossen Stückzahlen, vor allem bei Schrauben und Muttern.

Die stählernen Maschinenwerkzeuge waren einfach und hatten wenige Schneiden, was das Schärfen erleichterte, aber die Leistung begrenzte. Die Schnittgeschwindigkeiten lagen bei 10 m/min und damit rund zwei Zehnerpotenzen niedriger als heute, weil der unlegierte Kohlenstoffstahl seine Härte verlor, wenn er sich beim Spanen über 180 °C erhitzte. Schleifstoffe stammten immer noch aus Naturvorkommen; künstlich gebundene Schleifscheiben steckten in den Kinderschuhen, weil die Bindemittel entweder temperaturempfindlich oder spröde waren – daher die untergeordnete Rolle des Schleifens.

Kernstück der Maschinisierung war der Kreuzsupport, eine «mechanische(n) Vorrichtung an Stelle der menschlichen Hand zum Halten, Anwenden und Führen» des Werkzeugs, wie James Nasmyth 1841 schrieb, um dann pathetisch, aber korrekt festzustellen: «... ohne die Einführung [dieses] Prinzips hätten wir nicht den tausendsten Teil der glanzvollen Dinge erlangt, die unserem Blick enthüllt und seitdem so wundervoll und umfassend verwirklicht worden sind.»[4] Dieser Mechanismus war ein reales zweidimensionales Achsensystem, aber noch kein Koordinatensystem, denn er besass keine Massstäbe an den Schlittenbahnen. Gemessen wurde noch gut 100 Jahre lang nur von aussen, direkt am Werkstück.

Auf der Drehmaschine bewegte sich nun nicht nur, wie schon auf der Handdrehbank, das Werkstück mechanisch zwanggeführt im Kreise, sondern auch, auf geraden Bahnen, das Werkzeug. Die Kontur war durch Führungsflächen in den Maschinen festgelegt und von der Kraft und Geschicklichkeit der menschlichen Hand unabhängig geworden. Hatte man die Werkzeugspitze erst einmal auf einen Messwert eingestellt, konnte man die Kontur bis zu ihrem Ende durchziehen. Für technische Teile brauchte man nur noch wenige Messpunkte, aber frei geschwungene Formen waren mit diesem Mechanismus nur sehr schwer zu fertigen. Die neue Leichtigkeit bei der Herstellung technischer Teile wurde erkauft mit der Erschwernis bei frei geschwungenen Konturen.

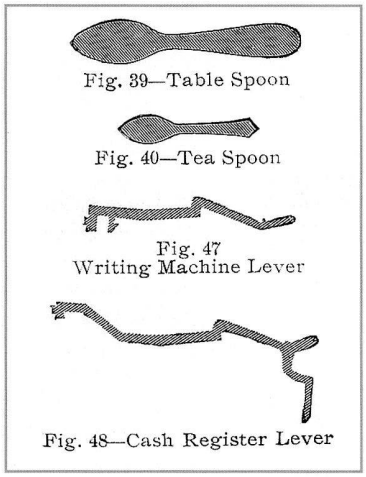


Bild 9: Blechrohlinge für Löffel und für Teile von Büromaschinen. (Quelle: Joseph V. Woodworth: Dies – their Construction and Use for the Modern Working of Sheet Metals, London 1903, S. 31, Fig. 18, Auszüge)

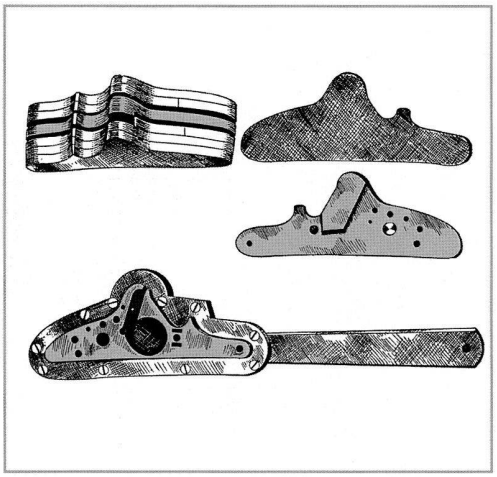


Bild 10: Schlossplatte einer Muskete, oben rechts als Schmiederohteil, darunter bearbeitet, oben links eingesetzt in eine Feilschablone, unten in der Prüfschablone. (Quelle: Frederick A. Halsey: Methods of Machine Shop Work. New York 1914, S. 12, Fig. 2)

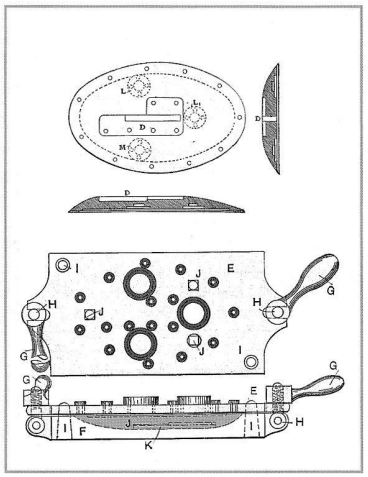


Bild 11: Aluminium-Fussplatte eines elektrischen Tuchschneidegerätes, darunter die zugehörige Bohrschablone mit 20 Bohrbuchsen. (Quelle: Joseph V. Woodworth, American Tool Making and Interchangeable Manufacturing, New York 1917; S. 93, Fig. 82 u. 83, Bohrbuchsen und Werkstück grau angelegt)

Der klassische Betrieb des industriellen Maschinenbaus war die «Maschinenfabrik und Eisengiesserei» (Bild 8), die sich in der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts herausbildete. Sie hatte normalerweise vier Kernabteilungen, von denen nur eine in nennenswertem Umfang Werkzeugmaschinen nutzte:

1. Die Giesserei erzeugte mit dem Kupolofen Eisengussteile unabhängig vom Hüttenwerk. Der Formenbau als qualifizierte Haupttätigkeit war ebenso wie die Hilfstätigkeiten Handarbeit. Eine angegliederte Modelltischlerei baute hölzerne Gussmodelle.
2. Die Schmiede mit mehreren Essen und Ambossen und nach 1850/60 auch mit Dampfhammer oder Schmiedepresse fertigte in Handarbeit Schmiederohlinge.
3. In der «Mechanischen Werkstatt» oder «Dreherei» konzentrierten sich die neuen Werkzeugmaschinen. Sie bewältigten den Löwenanteil der mittleren Bearbeitung. Ihrer geringen Genauigkeit und der erwähnten Messprobleme wegen lieferten sie aber nur halbfertige Teile, denen die letzte Exaktheit fehlte.
4. Im Montagesaal wurde dann wie in vorindustrieller Zeit von Hand gepasst und das Endprodukt zusammengebaut.

Für manche Produkte, etwa Eisenbahnfahrzeuge, brauchte man zusätzliche Abteilungen, z. B. eine Stellmacherei für hölzerne Waggonkästen, eine Kesselschmiede für genietete Dampferzeugungsanlagen u. a. m.

Weil ganz verschiedene Maschinen nachgefragt wurden, war die Produktpalette der Fabriken sehr breit. Auch wer sich auf eine Maschinenart spezialisieren konnte, musste immer noch viele Varianten und Baugrössen liefern. Nur ganz gängige Maschinen konnten auf Lager produziert werden. Dieser «grosse» Maschinenbau, wie er um 1900 genannt wurde, betrieb daher Einzelfertigung auf Kundenbestellung, wobei es für Standardteile wie Schrauben, Muttern, Stehbolzen, Nietnägel u. a. interne Inseln der Massenfertigung gab.

Die Einzelfertigung war aber nicht nur marktökonomisch bedingt, sondern auch technologisch. Obwohl Meter und Yard inzwischen genau definiert waren, gab es weiterhin keine strenge Anbindung ans gesellschaftliche Masssystem. Die ungenauen Zollstöcke blieben die einzigen allgemeinen Massverkörperungen im Betrieb, man benutzte weiterhin Tasterzirkel. Der um 1850 aufkommende Messschieber als Kombination dieser beiden Messmittel vereinfachte den Messvorgang, brachte jedoch keine Steigerung der Genauigkeit. So musste man nach wie vor von Hand passen. Die Werkzeugmaschinen beseitigten zwar den Engpass bei der mittleren spanenden Bearbeitung, aber für die handarbeitliche Fertigstellung wurden umso mehr qualifizierte Montageschlosser gebraucht. Der industrielle Maschinenbau des 19. Jh. war durch ein prekäres Gleichgewicht von Handarbeit und Maschinenarbeit gekennzeichnet (Bild 8).

Mit einem modernen Begriff könnte man die Maschinenfabrik des 19. Jahrhunderts als ein «nichtautomatisches flexibles Fertigungssystem» bezeichnen, das aus handgesteuerten Werkzeugmaschinen und vielen Facharbeitern an Maschinen- und Handarbeitsplätzen bestand. Mit hoher Flexibilität, aber geringer Produktivität fertigte sie die als Einzelstücke

benötigten Investitionsgüter für den fortschreitenden Industrialisierungsprozess. Sie geriet unter Rationalisierungsdruck, wo vielteilige Mechanismen zu massenhaft nachgefragten Konsumgütern wurden, also immer wieder gleiche Teile gefertigt werden mussten.

Massenfertigung: American System of Manufacturing

Frühe Ansätze zu einer modernen Massenfertigung von vielteiligen Mechanismen mit austauschbaren Teilen lassen sich bis ins Frankreich des frühen 18. Jahrhunderts zurückverfolgen.[5] Ende des Jahrhunderts griffen die Amerikaner den Austauschbau von Musketenschlössern auf. Mit der 1808 im Marinearsenal in Portsmouth eingerichteten Maschinerie für die Flaschenzugblöcke der Segelschiffstakelage gab es in Grossbritannien einen spektakulären Einzelfall.[6] Massenfertigung wurde dort aber erst auf der Londoner Weltausstellung von 1851 richtig wahrgenommen, und zwar als amerikanisches Phänomen.

In den USA waren die Ansätze aus Frankreich konsequent weiterverfolgt worden. Sie hatten nach 1800 auch im privaten Sektor Fuss gefasst.[7] Um 1860 war das «american system of manufacturing» in Bezug auf Austauschbau voll entwickelt und wurde ausser für Handfeuerwaffen auch für Nähmaschinen und Taschenuhren angewandt:[8]

- Die Bearbeitungsverfahren unterschieden sich nicht grundlegend vom «grossen» Maschinenbau. Rohteile wurden gegossen oder geschmiedet, Letzteres oft schon im Gesenk. Die mittlere spanende Bearbeitung erfolgte anfangs von Hand, dann zunehmend auf Maschinen. Passgenauigkeit erreichte man auch hier nur in Handarbeit.
- Dank veränderter Messmethoden entstanden aber austauschbare Teile in getrennter Fertigung. Als Prüfmittel diente nicht mehr das Gegenstück, sondern eine Lehre oder Schablone. So kam man – noch ohne numerisch zu messen – bei sorgfältigem Anpassen zu so kleinen Teiletoleranzen und Passungsspielen (≤ 0,1 mm), dass man bei der Montage nicht mehr nacharbeiten musste.
- Auch hier gab es keine strenge Anbindung ans Masssystem: Als rein betriebsinternes Massnormal diente ein funktionsfähiger Prototyp des Produkts, dessen Teile man als Prüflehren für die sich abnutzenden Schablonen und Lehren der Fertigung benutzte.

Der amerikanische Bürgerkrieg sorgte für die Verbreitung des Systems, weil viele Privatfirmen Kriegsmaterial produzierten und dafür die Methoden übernehmen mussten.[9] Natürlich wurde versucht, die Fertigungsvorgänge zu straffen und immer mehr Handarbeit auf Maschinen zu verlagern. Daraus ergaben sich langfristige Entwicklungen, die die Fertigungstechnik insgesamt verändern sollten.

Erstens differenzierte sich im Zusammenhang mit neuen Herstellungsverfahren der Teilecharakter. Wie erwähnt,

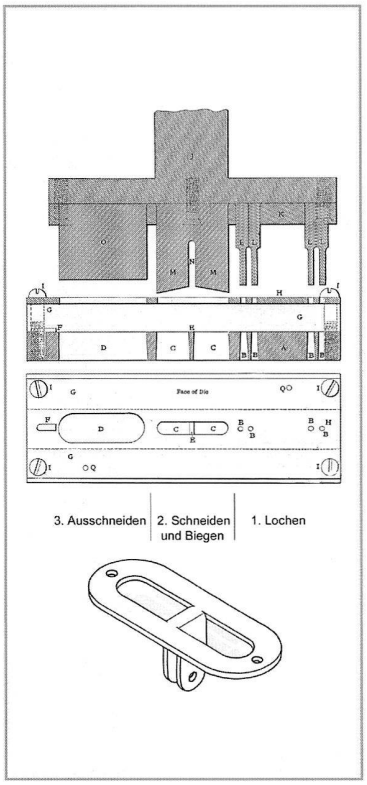


Bild 12: Folgeschnitt- und Biegewerkzeug zur Herstellung eines Blechteils (unten, Skizze d. Verf.), oben der Stempel und die Matrize, beide im Schnitt; darunter die Matrize in Draufsicht. Der Blechstreifen wird von rechts durchgeschoben, zuerst gelocht, dann werden die Laschen geschnitten und gebogen, schliesslich das Ganze ausgeschnitten. (Quelle: Joseph V. Woodworth, Dies – their Construction and Use for the Modern Working of Sheet Metals, London 1903, S. 64, Fig. 64)

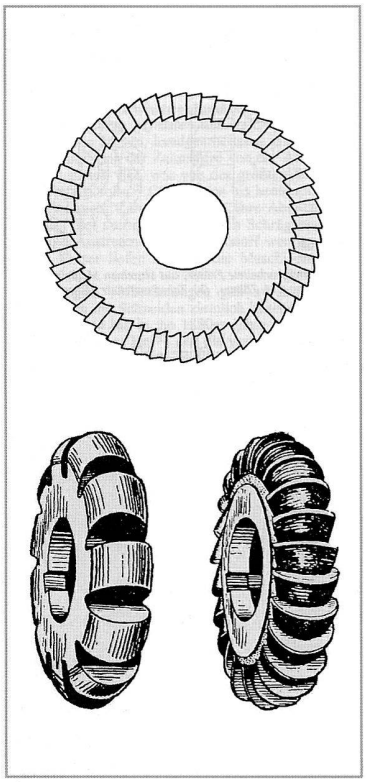


Bild 13: Alter feinzahniger Fräser (Skizze d. Verf. nach Robert S. Woodbury: History of the Milling Machine. Cambridge, Mass. 1960, S. 52, Fig. 19), darunter neuere, gröber gezahnte Fräser für die Spannuten an Wendelbohrern. (Quelle: Frederick A. Halsey: Methods of Machine Shop Work. New York 1914, S. 233, Fig. 227 und 228)

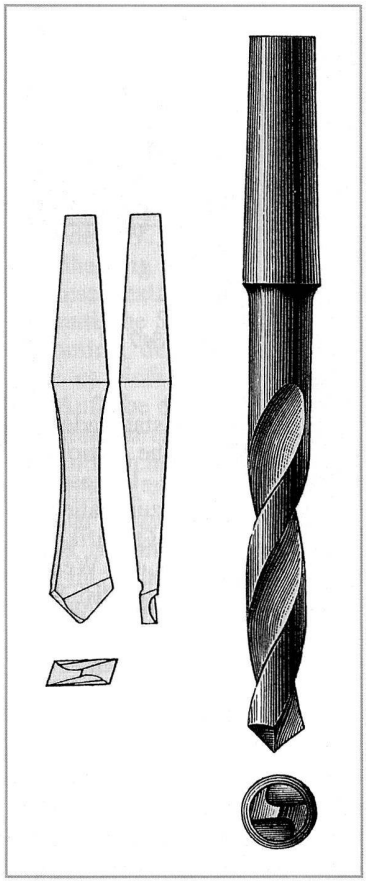


Bild 14: Herkömmlicher Spitzbohrer (Quelle: Johan Josef Prechtl: Technologische Encyclopädie, Bd. 2. Stuttgart 1830, Tf. 34, Fig. 3) und moderner Wendelbohrer. (Quelle: A. Ledebur: Lehrbuch der mechanisch-metallurgischen Technologie. Braunschweig 1905, S. 505, Abb. 542)

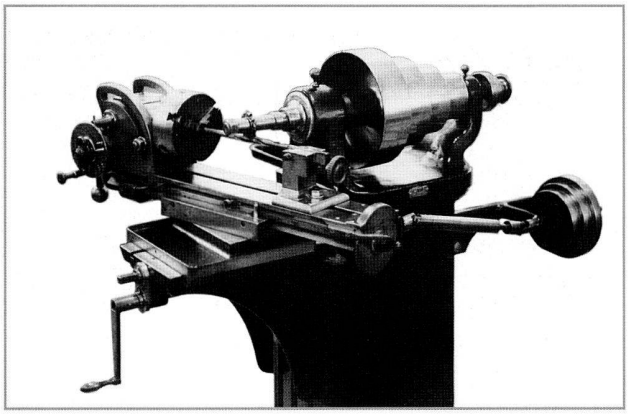


Bild 15: Universalfräsmaschine von Brown & Sharpe, Providence, Rhode Island, 1862, mit eingespanntem Spannutenfräser und Wendelbohrer als Werkstück. (Foto: V. Benad-Wagenhoff)

schmiedete man schon vor 1850 Rohteile für Schusswaffen nicht mehr frei Hand, sondern präziser im Gesenk, um die weitere Bearbeitung zu reduzieren. Nach 1860/70 baute man in Nähmaschinen und Lokomotiven vermehrt Teile aus gehärtetem Stahl ein, um Verschleiss und Wartungsaufwand zu mindern. Seit etwa 1900 stellte man in metallischen Dauerformen kleine, sehr präzise Teile aus Metallspritzguss her, die kaum noch Nachbearbeitung verlangten. Am augenfälligsten war aber die Ausbreitung der Blechteile. Mit der Durchsetzung industrieller Walzverfahren nahm nicht nur die Verwendung von Profilen und Grobblechen im «grossen» Maschinenbau zu, z. B. für Dampfkessel und Tragwerke. Auch Feinblech eroberte sich ein breites Feld, zuerst bei einfachen Alltagsgegenständen wie Besteck, Geschirr oder Verpackungen, dann bei komplexen Kleinmechanismen wie Büromaschinen. Dort verdrängten sie zunehmend die Massivteile, und dabei war eine andere Genauigkeit der Teile und der Werkzeuge gefordert als beim Kaffeelöffel, der ja nur in die Tasse passen muss (Bild 9).

Zweitens gab man den Werkzeugen nach 1860 eine wirksamere Gestalt. Um möglichst gleiche Teileformen zu fertigen, nutzte man die Formspeicherung. Anfangs setzte man Feilschablonen ein (Bild 10), die bald von Formdrehmeisseln oder Formfräsern (siehe Abb. 13) abgelöst wurden. Lochmuster fertigte man mit Hilfe von Bohrschablonen (Bild 11). Schnittwerkzeuge (Bild 12) lieferten komplizierte Konturen an Blechen, dreidimensionale Werkstückoberflächen entstanden in Schmiedegesenken und später wesentlich genauer in Spritzgussformen. Die Produktivität stieg, weil man anstelle der einschneidigen Dreh- und Hobelmeissel häufiger mehrschneidige Fräser mit groben Zähnen nutzte, die leichter herzustellen waren und besser zerspanten als die alten vielzahnigen «Feilscheiben» (Bild 13). Die herkömmlichen Spitzbohrer wurden durch den Wendelbohrer ersetzt, der genauer arbeitet und sich in Bohrlehren verwenden lässt (Bild 14). Schliesslich wurde das Problem mit den Schleifscheiben in Angriff genommen: Man entwickelte keramische Bindungen und konnte um 1880 endlich grosse, robuste Scheiben brennen; nach 1890 kamen synthetische Mineralien hinzu.

Drittens entstanden neue Werkzeugmaschinen. Sie waren zwar nicht grundsätzlich verschieden von den europäischen und – mit einer Ausnahme – auch nicht genauer, aber viel bedienfreundlicher und oft stärker automatisiert. Für kleine Gesenkschmiedeteile und für die Blechbearbeitung nutzte man in grossem Umfang Fallhämmer und Pressen. Zur Herstellung der Wendelbohrer entwickelte die Firma Brown & Sharpe 1862 die Universalfräsmaschine, die sich auch für Fräswerkzeuge und vielerlei andere Teile eignete (Bild 15). Zum Schärfen dieser Werkzeuge entstand bei derselben Firma 1868 die Universal-Rundschleifmaschine, die auch für kleine Teile aus gehärtetem Stahl angewendet wurde (Bild 16). Eine ganz wichtige Gruppe waren die automatischen Drehmaschinen[10]. Für die Massenfertigung kleiner Gewindeteile entstand nach 1850 die handgesteuerte Revolverdrehmaschine, daraus nach 1870 der Einspindelautomat

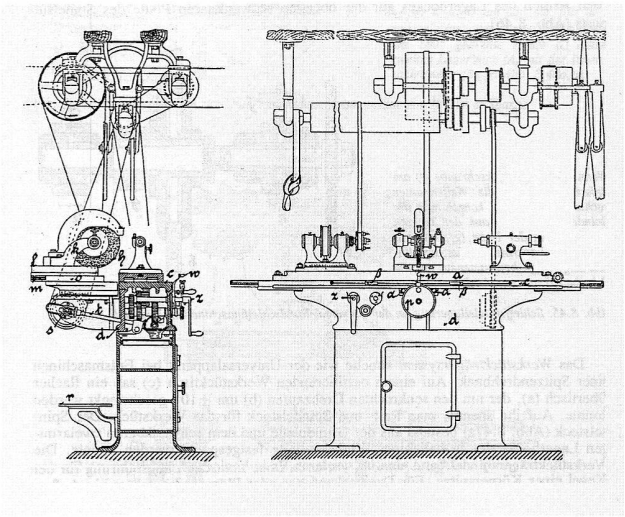


Bild 16: Universal-Rundschleifmaschine von Brown & Sharpe, 1875. (Quelle: Herrmann Fischer: Werkzeugmaschinen. Fräs- und Schleifmaschinen. In: Zeitschrift des Vereins Deutscher Ingenieure 30 (1886), S. 559 ff., Fig. 28–29)

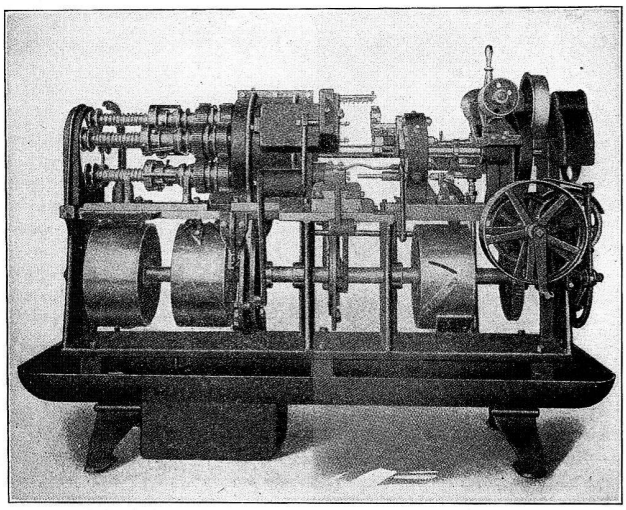


Fig. 100. — Universal Multiple-Spindle Automatic Screw Machine

Bild 17: Fünfspindel-Drehautomat der Universal Machine Screw Company, Hartford, Conn. (Quelle: C. L. Goodrich u. F. A. Stanley: Automatic Screw Machines and their Tools. New York 1909, S. 114; Fig. 100)

und nach 1885 der Mehrspindler (Bild 17). Damit wurde es möglich, rotationssymmetrische Kleinteile wie Schmiernippel, aber auch Kugellagerschalen für Fahrräder oder Ventile für Verbrennungsmotoren in grossen Massen schnell und billig zu produzieren. Allerdings war das Einrichten dieser Maschinen sehr aufwendig. Vor allem die «Programmierung» der Automaten durch die Berechnung und Herstellung der stählernen Steuerkurven war so zeitintensiv, dass sich kleine Stückzahlen und ein häufiges Umstellen auf neue Teile nicht rentierten. Diese Art der Automation war starr und unflexibel.

Viertens hat man die einfachen Anreiss-, Mess- und Prüfmittel (siehe Abb. 5) des klassischen Maschinenbaus durch ein sehr aufwendiges Instrumentarium ersetzt (Bild 18 bis 21). Die erwähnten Feil- und Bohrschablonen erübrigten das langwierige Anreissen am Rohteil. Für genaues Messen im Werkzeugbau kam die Messschraube («Mikrometer») in Gebrauch, die allerdings für die normale Fertigung zu empfindlich war. Die Tasterzirkel, die sich leicht verstellten, ersetzte man durch feste Dorn- und Rachenlehren, mit denen das Mass immer noch nach Gefühl bestimmt wurde. Durch Kombination zweier Lehren von geringem Massunterschied entstanden jedoch Grenzlehren, mit denen sich die Massabweichung objektiv eingrenzen liess. Nachteil dieser festen Lehren war, dass man für jedes Mass und jede Toleranz mindestens eine brauchte. Eine flexiblere Möglichkeit zur objektiven Messung boten die Feintaster, die mittels Hebelübersetzung geringe Abweichungen sichtbar machten. Mit ihnen kann man für beliebige Teilemasse Messanordnungen aufbauen, wobei der Aufwand geringer ist als bei festen Lehren.

Das «american system» war ein «teilautomatisches, unflexibles Fertigungssystem» aus handgesteuerten und automatisierten Werkzeugmaschinen und aus angelernten Arbeitern. Es ermöglicht hohe Produktivität bei geringen Stückkosten. Der enorme Aufwand für Vorrichtungen für Mess- und Prüfmittel und für das Einrichten der automatischen Maschinen, bei starrer Ausrichtung der jeweiligen Produktion auf einen Prototyp, beschränkte die neuen Methoden auf Massenprodukte, die keinem Wandel unterlagen, und erschwerte betriebsübergreifende Fertigung, wie wir sie heute in der Automobilindustrie mit ihren vielen Zulieferern kennen.

«Maschinenfabrikation»: Schleifen und systematisierte Feinmessung

Etwa seit 1890 veränderten sich die ökonomischen und technischen Randbedingungen des klassischen Maschinenbaus. Die Stagnationsphase nach der Gründerkrise von 1873 ging zu Ende. Ihr folgten Konjunkturzyklen, die bis zum Ersten Weltkrieg insgesamt einen starken Aufschwung brachten. Der Bedarf an Maschinen für die Industrie und an technischen Konsumgütern wuchs. Allein das stellte die Fertigung schon vor neue Herausforderungen. Hinzu kam, dass Hochleistungsmaschinen mit hohen Arbeitsgeschwindigkeiten und -drücken entwickelt wurden, wie Kältemaschinen oder Kraftfahrzeuge und Flugapparate mit schnell laufenden Verbrennungsmotoren. Die neuen Verfahren der Flussstahlerzeugung stellten zwar festere Werkstoffe zur Verfügung, aber diese waren schwerer zu zerspanen. Es entstand ein ähnlicher Bearbeitungsengpass wie zu Beginn des 19. Jahrhunderts.

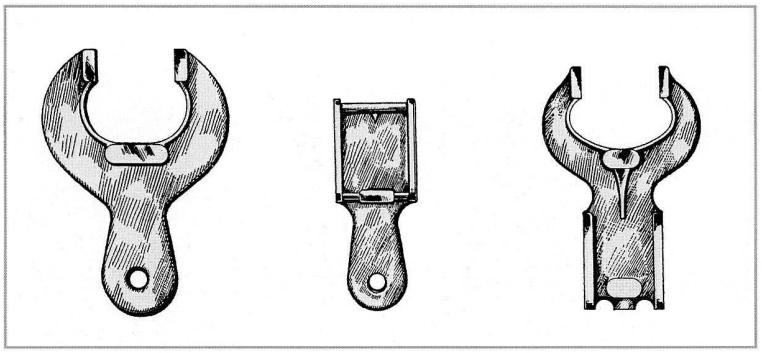


Bild 18: Rachen- und Dornlehren, links für Aussenmass, in der Mitte für innen, rechts als Kombination. Sie besitzen gegenüber den Tasterzirkeln den Vorteil, dass das Mass sich nicht durch Unachtsamkeit verstellen kann. (Quelle: Frederick A. Halsey: Methods of Machine Shop Work. New York 1914, S. 16, Fig. 3, Auszüge)

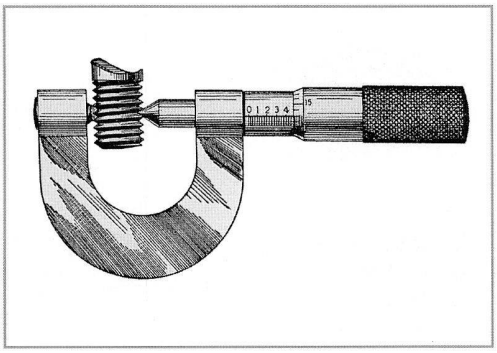


Bild 20: Messschraube, hier mit Messbacken für Gewinde. (Quelle: Frederick A. Halsey: Methods of Machine Shop Work. New York 1914, S. 127, Fig. 110)

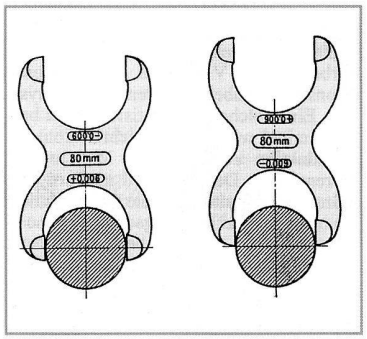


Bild 19: Grenzlehren und ihre Funktion: Geht die Lehrenseite mit dem grösseren Mass über die gedrehte Welle, während die kleinere nur anschnäbelt, so liegt die Welle innerhalb der Toleranzgrenzen. (Quelle: Max Kurrein: Messtechnik. Berlin 1921, S. 19, Fig. 38 u. 39)

In der einschlägigen Literatur wird dessen Beseitigung gerne dem Taylorschen Schnellschnittstahl und dem elektrischen Einzelantrieb zugeschrieben. All das spielte bei dem Produktivitätsschub um 1900 eine Rolle, betraf aber nicht den Kern des Problems:

- Der Schnellschnittstahl löste das Bearbeitungsproblem nicht, sondern verschärfte es erst einmal, weil durch schnelleres Zerspanen die Menge der von Hand zu passenden Teile noch stärker wuchs. Allerdings setzte mit ihm eine stetige Verbesserung der Schneidstoffe ein, sodass heute mit mehr als 100-fach höherer Schnittgeschwindigkeit gearbeitet wird.
- Der elektrische Einzelantrieb beseitigte zwar das Gewirr der Riementransmissionen, hatte aber keine unmittelbare Auswirkung auf Geschwindigkeit und Genauigkeit der Bearbeitung, und seine Durchsetzung zog sich bis in die 1930er Jahre hin. Mit ihm begann jedoch die Elektrifizierung der Maschinen, die bald auf Schalt- und Steuervorgänge ausgedehnt wurde und auf lange Sicht in die Elektronisierung automatischer Steuerungen mündete.

Gern wird auch die Fliessfertigung als wichtiges Element der nach 1900 einsetzenden Produktivitätssteigerung angeführt. Sie ist jedoch nur eine mögliche Folge der Austauschbarkeit: Wenn die Teile passend von der Maschine kommen, kann die Montage als Fliessprozess organisiert werden. Marktökonomisch und betriebsorganisatorisch birgt dieser aber so viele Probleme, dass er sich nur sehr langsam und nie flächendeckend durchgesetzt hat.

Im Zentrum des Umbruchs, der nach 1900 als Synthese von klassischem Maschinenbau und amerikanischem System stattfand, standen die Maschinisierung der Passarbeit durch leistungsfähige Schleifmaschinen und eine betriebsübergreifende Objektivierung und Systematisierung des Messens:

- Dank der Entwicklung einer schweren Rundschleifmaschine (Bild 22) liessen sich grosse Spanmengen genau abnehmen und schnell die endgültigen Masse erreichen. Schleifen wurde vom Korrektur- zum Produktionsverfahren. Die Rundpassungen als häufigste Passungsart waren nun maschinell herstellbar.
- Diese zügige Feinbearbeitung verlangte rationellere Messmittel. Für die Zustellung der Schleifscheibe integrierte man Messgewinde in die Maschine. Zum schnellen und exakten Nachmessen dienten die beschriebenen Mikrometer, Grenzlehren und Feintaster. Letztere wurden durch ausgeklügelte Zwischengetriebe so verbessert, dass sie bis auf tausendstel Millimeter genau messen konnten (Bild 23).
- Fertige Teilemasse wurden aber nicht nur exakt gemessen, sondern durch Grenzlehren- und Passungssysteme auch systematisiert. Das bis dahin subjektiv als «lose», «stramm» oder «fest» charakterisierte Spiel zwischen Welle und Bohrung wurde genormt, indem man, nach Nennmassen gestaffelt, seine Grösse experimentell ermittelte, für die Teilemasse Toleranzen festlegte und entsprechende Grenzlehren fertigte. Die genormten Passungsspiele ergaben sich dann aus den Kombinationen der tolerierten Wellen und Bohrungen.

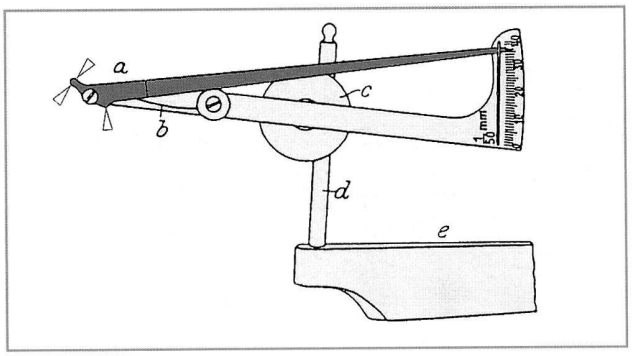


Bild 21: Einfacher Fühlhebel, Übersetzung ca. 1:20 – die Tastpunkte am kurzen Hebelende sind mit Pfeilen markiert. (Quelle: Max Kurrein: Messtechnik. Berlin 1923, S. 49)

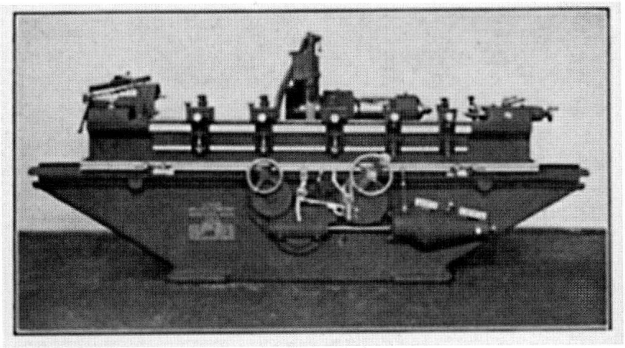


Bild 22: Schwere Rundschleifmaschine von Charles Norton, 1901. (Quelle: Frederick A. Halsey: Methods of Machine Shop Work. New York 1914, S. 272, Fig. 274)

- Das Überprüfen und Nachjustieren der Lehren geschah mit Prüfmassen, die ihrerseits kontrolliert und streng an das gültige Urmass angebunden wurden. Die Einführung der Johanssonschen Kombinations-Endmasse (Bild 24), mit denen sich in feinster Abstufung hochgenaue Massrepräsentanten zusammenstellen liessen und die mit einem Lichtwellenkomparator überprüft werden konnten, vereinfachte diese Prozedur so weit, dass sie um 1930 nicht mehr in staatlichen Laboren wie der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt stattfand, sondern in den Betrieben selbst.

Moderne Betriebe richteten Messlabore ein, deren Technik aus den Naturwissenschaften stammte. Sie gingen weg vom Prototyp als Messnormal, hin zu einem abstrakten, betriebsübergreifenden System, das die Genauigkeit nicht nur in der Massenfertigung, sondern auch bei kleinen Serien oder Einzelstücken besser garantierte, den Umfang des Instrumentariums aber dank der Feinmesstaster eher wieder begrenzte und vor allem die Möglichkeit schuf, austauschbare Teile von ausserhalb zu beziehen.

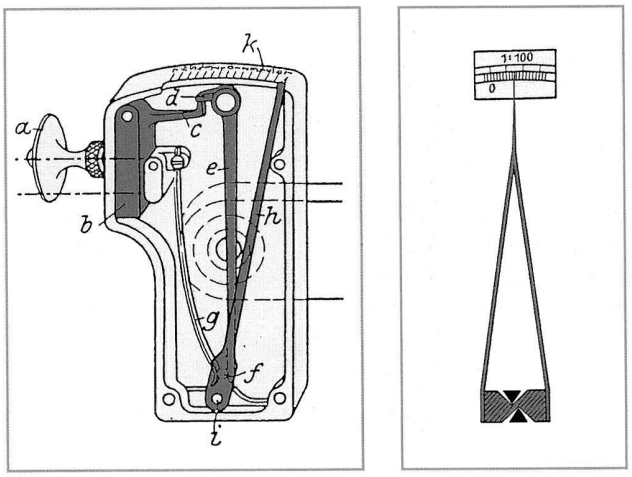


Bild 23: Feinzeiger mit dreifachem Hebelsystem (b-c, d-e, f-h), Übersetzung bis ca. 1:120 (Quelle: Max Kurrein: Messtechnik. Berlin 1923, S. 49) und Prinzipschema des schneidengelagerten «Minimeters» von Hirth, Übersetzung 1:100 bis 1:1000. (Quelle: G. Berndt und H. Schulz: Grundlagen und Geräte technischer Längenmessung. Berlin 1921, S. 114)

Feinstbearbeitung und Numerisierung

Für die Maschinisierung der Passarbeit hatte man mit dem präzisen Schleifen und Messen einen Weg gefunden. Bald traten aber neue Probleme auf, deren Lösung Folgen nicht nur für die Fertigung, sondern für die Steuerung betrieblicher Abläufe weit darüber hinaus haben sollte.

Das eine Problem war die mangelnde Qualität geschliffener Oberflächen, die sich mit der weiteren Leistungssteigerung von Maschinen zeigte – man denke an die rasante Entwicklung der Automobil- und Flugmotoren zwischen 1900 und 1945. Beim Schleifen entstand durch Überhitzung eine kristallin gestörte Randzone, die unter Belastung schnell verschliss und zum Ausfall der Teile führte. Abhilfe schufen Feinstbearbeitungsverfahren wie das althergebrachte Läppen und das neu entwickelte Honen (Hubschleifen), die mit geringer Energie in sehr feinen Spänen diese Schicht abtrugen. Die Messung der Oberflächengüte ermöglichten seit den 1930er Jahren vor allem Tastschnittgeräte, die wie Plattenspieler Bereiche der Oberfläche abtasteten und ein vergrössertes Profil der Mikrogestalt lieferten. Die Darstellung solcher Profile (Bild 25) verdeutlicht die Qualitätssprünge vom Drehen zum Schleifen und vom Schleifen zur Feinstbearbeitung. Der Zugewinn an Funktionssicherheit lag z. B. bei Automobilmotoren darin, dass mit feinstbearbeiteten Flächen die Lagerspiele dauerhaft im richtigen Bereich blieben, statt sich schon nach

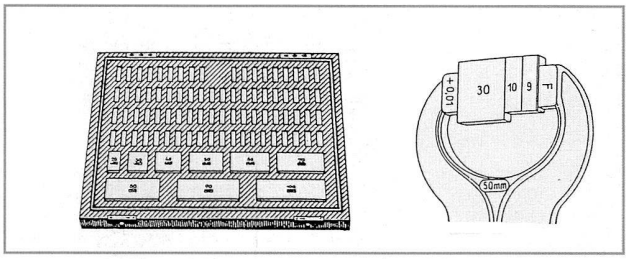


Bild 24: Johanssonscher Endmasse-Satz (Quelle: G. Berndt, Messwerkzeuge und Messverfahren für metallbearbeitende Betriebe. Berlin 1932, S. 27, Abb. 5) und Prüfung einer Rachenlehre mit solchen Endmassen. (Quelle: Max Kurrein: Messtechnik. Berlin 1921, S. 22, Fig. 44)

wenigen tausend Kilometern durch Verschleiss unzulässig zu vergrössern.

Das andere Problem war, dass der Werkzeugbau zum Engpass für die Massenfertigung wurde. Er steht als sich wiederholende Einzelfertigung hinter jeder modernen Massenproduktion. Bis etwa 1940 war er zu langsam, weil er die Werkzeugteile noch von Hand zusammenpasste. Man brauchte immer mehr formspeichernde Werkzeuge von hoher Komplexität und Genauigkeit: Folgeschnitte für Elektromotorenbleche, Tiefziehwerkzeuge für Karosserien, Spritzgiessformen für Zählergehäuse u. a. m. Wegen der Austauschbarkeit der auf ihnen hergestellten Teile mussten diese Werkzeuge, selbst wenn sie defekt oder verschlissen waren, in noch engeren Toleranzen als die Teile identisch erneuert werden. Die alten Passmethoden verzögerten den Ersatz, im Extremfall stoppte das die Massenfertigung. In den USA begann man deshalb um 1910, den Werkzeugbau zu rationalisieren. Dabei entstand mit den «Lehren»- oder Koordinaten-Bohrwerken das Konzept einer messfähigen Werkzeugmaschine, in deren Arbeitsraum sich eine Werkzeugspitze oder ein Messfühler genau positionieren lassen. Neben das nachformende Kopieren einer frei erzeugten Gestalt trat als Alternative zum ersten Mal das numerische Generieren.

Wie eingangs erwähnt, nutzen schon die herkömmlichen Werkzeugmaschinen das Nachformen, wenn sie die in ihren Gerad- und Rundführungen vorgegebenen Konturen aufs Werkstück übertragen. Eine sehr alte Anwendung für kompliziert geschwungene Linien ist der Storchschnabel zum Verkleinern und Vergrössern von Zeichnungen, der auch zum Steuern von Graviermaschinen verwendet wird. Prägestempel für Münzen und Medaillen hat man bereits im 18. Jahrhundert auf Kopierfräsmaschinen vorgearbeitet, die ein vergrössertes Gipsrelief abtasteten. Später wurden geschwungene Konturen an Dreh- und Frästeilen gefertigt, indem man den Weg des Werkzeugs durch Abtasten einer Schablone steuerte. Seit den 1920er Jahren gewannen solche Verfahren beim Bau von Schmiedegesenken und von grossen Tiefziehwerkzeugen für Karosserien an Bedeutung. Kopierfräswerke

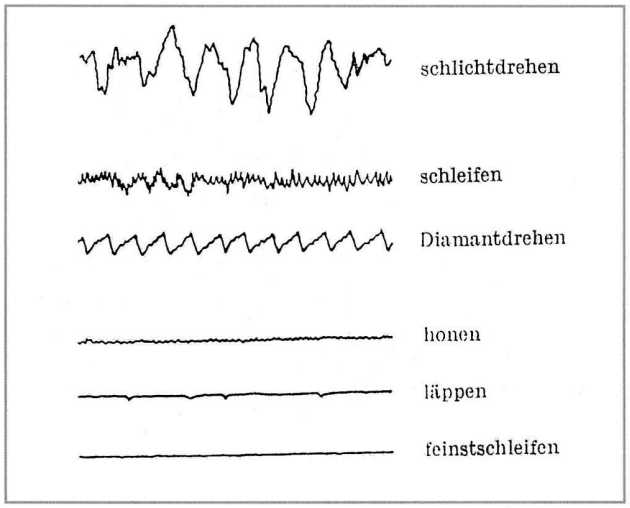


Bild 25: Oberflächenprofile an schlicht, fein und feinst bearbeiteten Teilen von Automobilmotoren. Schlichtdrehen entspricht der mittleren spanenden Bearbeitung, Schleifen der seit 1900 eingeführten maschinellen Feinbearbeitung; das Diamantdrehen erzeugt ähnlich feines Profil. Honen, Läppen und Feinstschleifen bringen dagegen einen deutlichen Qualitätssprung. (Quelle: Georg Schlesinger: Messung der Oberflächengüte. Berlin 1951, S. 11, Auszüge)

(Bild 26) tasteten elektrisch oder hydraulisch ein Modell ab und übertrugen dessen Grobgestalt auf die Werkzeugteile. Die Feinbearbeitung erfolgte noch von Hand. In den 1930ern entstanden ausserdem hydraulische Kopiersteuerungen für Drehmaschinen. Diese Konzepte waren durchaus zweckmässig und hielten sich bis in die Jahrzehnte nach dem Zweiten Weltkrieg. Sie unterlagen aber letzten Endes dem numerischen Prinzip.

Beim numerischen Generieren entsteht die Gestalt auf der Grundlage einer zahlenmässigen Beschreibung von Kontur oder Oberfläche. Auch das gab es im Ansatz bei den herkömmlichen Maschinen, wenn vor dem Durchfahren des Konturzuges das Einzelmass numerisch festgelegt und die Werkzeugspitze positioniert wurde. Nun aber ging es darum, kompliziert geschwungene Konturen nicht mehr als Modell zu speichern, sondern immer wieder neu zu erzeugen, indem man jeden einzelnen Punkt der Werkstückoberfläche durch exaktes numerisches Positionieren der Werkzeugschneide herausarbeitete. Dafür brauchte man eine Werkzeugmaschine mit Feinmesssystemen für alle Raumrichtungen. Das Achsensystem des Supports musste zum Koordinatensystem werden. Wenn das Ganze automatisch arbeiten sollte, war auch noch eine numerische Steuerung nötig, die Massangaben schnell in Maschinenbewegungen und Werkzeugpositionen umsetzen konnte.

Der Weg zur messfähigen Werkzeugmaschine begann um 1910 mit einem drängenden Problem des Werkzeugbaus,

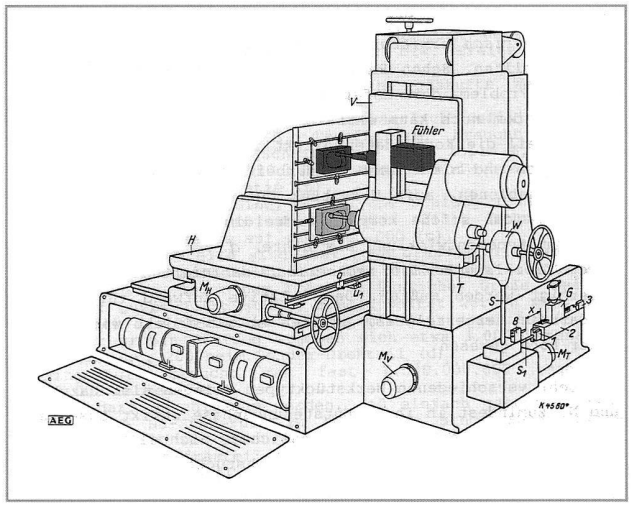


Bild 26: Kopierfräsautomat der Fa. Curd Nube, 1939. (Quelle: Wolfgang Schmid und Friedrich Olk: Fühlergesteuerte Maschinen. Essen 1939, S. 110, Abb. 72)

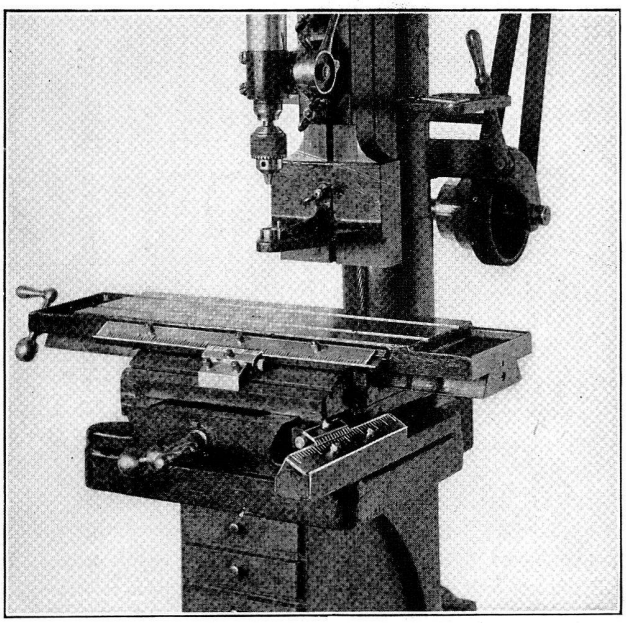


Bild 27: Frühes Koordinatenbohrwerk der Sigourney Tool Company, um 1907. (Quelle: Frederick A. Halsey: Methods of Machine Shop Work. New York 1914, S. 211, Fig. 195)

der regelmässigen Erneuerung von Bohrlehren. Die Löcher für Führungsbuchsen bohrte man bis dahin auf der Drehmaschine vorsichtig mit einem einschneidigen Meissel aus. Für jede Bohrung wurde der Lehrenrohling auf der Planscheibe exakt ausgerichtet und festgespannt. Um diese mühselige Prozedur zu verkürzen, rüstete man die Werkstückschlitten von vertikalen Bohr- oder Fräsmaschinen mit Massstab und Nonius aus und konnte so die Bohrungsmittelpunkte in zwei Raumrichtungen exakt und schnell unter die Werkzeugspitze bringen (Bild 27). Bald kam die vertikale Raumachse hinzu. Vor 1920 begann man, Lehrenbohrwerke regelrecht neu zu konstruieren. Um 1940 entstand als notwendige Ergänzung die Koordinatenschleifmaschine, mit der auch gehärtete Stahlteile fertig bearbeitet werden konnten. Schliesslich entstand nach 1950 die Koordinatenmessmaschine: Mit ihr konnte man ungestört von Bearbeitungsaufgaben im gesamten Arbeitsraum in feinsten Abstufungen messen. Die herkömmliche Längenmessmaschine aus dem 19. Jahrhundert war dagegen lediglich ein vergrössertes, hochgenaues «Mikrometer» für ein Einzelmass gewesen, und auch die Feintasteranordnungen hatten nur einige wenige Masse an den Werkstücken erfasst, für die sie eingerichtet waren.

Mit solchen messfähigen Werkzeugmaschinen konnte man im Prinzip auch ganz andere Teile fertigen: Statt einzelne Bohrpositionen anzulaufen (Punktsteuerung), liessen sich mit entsprechender Steuertechnik Konturzüge fahren (Wegsteuerung). Als nach dem Zweiten Weltkrieg Mathematiker und Computeringenieure in den USA nach neuen Anwendungen für ihre Grossrechner suchten und im militärischen Flugzeugbau komplizierte, z. T. aerodynamisch geformte Teile gefräst werden sollten, kam es zur Verbindung dieses Konzepts mit der elektronischen Rechentechnik. Erste Versuche bestanden 1948 noch darin, eine vom Rechner gelieferte Koordinatenliste am handgesteuerten Lehrenbohrwerk abzuarbeiten (Bild 28). Die Automatisierung dieses Vorganges gelang innerhalb der nächsten Jahre durch mechanische und elektronische Komponenten, die zum Teil aus der Rüstungsentwicklung während des Zweiten Weltkrieges stammten (Schrittmotor, Wegmesssystem, Kugelumlaufspindel). 1952 lief am MIT die erste NC-Fräsmaschine. Langfristig erwies sich dieses Steuerungskonzept gegenüber der starren mechanischen Automatisierung als hochflexibel.

Um 1800 war mit der Verbreitung des Kreuzsupportes das Problem aufgetreten, dass sich freie geschwungene Konturen zwar leicht mit der menschlichen Hand generieren liessen, aber auf den viel produktiveren Werkzeugmaschinen nur umständlich hergestellt werden konnten. Erst 150 Jahre später waren die Maschinen und ihre Steuerungen so weit, dass sie diese Fertigungsaufgabe beherrschten. Mit der Einführung der elektronischen Vernetzung seit 1960/70 entfaltete sich das Potential des numerischen Ansatzes. Einerseits versteht die CNC-Maschine Zahlen, die ihr zugespielt werden, und kann sie in komplexe Teilegestalten umsetzen, auch in solche, die exakten mathematisch-naturwissenschaftlichen Zusammenhängen gerecht werden wie z. B. Strömungsprofile; frei Hand generierte Formen, etwa im Karosseriedesign, können auf Messmaschinen digitalisiert und in die Maschine eingege-

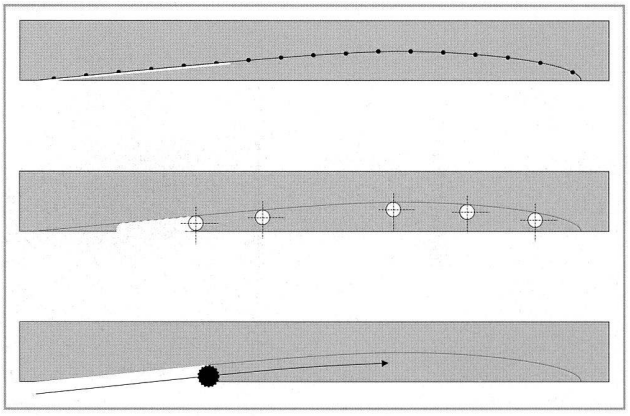


Bild 28: Herstellung einer Schablone für Rotorblätter von Hubschraubern: oben traditionell durch Anreissen und Körnen von 17 Profilpunkten, Anreissen des Verlaufs mit Kurvenlineal, dann Aussägen und Feilen; in der Mitte Ausbohren von 200 am Rechner ermittelten und von Hand angesteuerten Punkten auf dem Koordinatenbohrwerk (nichtautomatische Punktsteuerung), zuletzt Wegfeilen der kleinen Erhebungen zwischen den die Kurve tangierenden Bohrungen; unten kontinuierliches Fräsen mit automatischer Bahnsteuerung. (Skizzen d. Verf. nach Beschreibung bei David Noble: Forces of Production, New York 1994, S. 98 ff.)

ben werden. Andererseits wird der Zustand der CNC-Maschine elektronisch erfasst und nach aussen kommuniziert, sodass Rohteilezufuhr, Werkzeugersatz, Kostenermittlung u. v. a. schneller und präziser erfolgen können. Die Möglichkeiten dieses Ansatzes sind noch längst nicht ausgeschöpft.

1 Die hier sehr knapp skizzierte Entwicklung ist in den Veröffentlichungen des Verf. z. T. sehr viel ausführlicher dargestellt. In den drei zuerst aufgeführten Veröffentlichungen finden sich zudem weitergehende Literaturbelege: Volker Benad-Wagenhoff: Industrieller Maschinenbau. Werkstattpraxis und Entwicklung spanabhebender Werkzeugmaschinen im deutschen Maschinenbau 1870–1914. Stuttgart 1993 (Dissertation TH Darmstadt 1989); Ders.: Record Playback gegen Numerical Control – eine Scheinalternative?! In: Ders. u. Reiner Oelsner (Bearb.): Workshop Automatisierungsmythen – Tagungsheft (LTA-Forschung, Heft 10), Mannheim 1993, S. 24–40; Ders.: Massenfertigung und Automatisierung im 19. und 20. Jahrhundert. In: Beiträge zur Geschichte von Technik und technischer Bildung, Folge 15 (1997), S. 35–57; Ders.: Industrieller Maschinenbau im 19. und frühen 20. Jahrhundert. In: Thomas Hänseroth und Carsten Krautz (Hg.): Beiträge zur Geschichte des Sächsischen Werkzeugmaschinenbaus im Industriezeitalter (Saxonia – Schriftenreihe des Vereins für sächsische Landesgeschichte e. V., Bd. 6), Dresden 2000, S. 11–30; Ders.: Über das Tausendstel hinaus – Geometrische Genauigkeit in der maschinenbaulichen Fertigung zwischen 1800 und 1950. In: Walter Masing u. a.: Qualitätsmanagement – Tradition und Zukunft. München 2003.

2 Stahl meint hier nach der alten Terminologie ein schmiedbares Eisen mit ca. 0,4–2 % Kohlenstoff, das sich auch schmelzen und giessen lässt und vor allem durch Abschrecken gehärtet werden kann, sodass es für Werkzeuge verwendbar ist. Die moderne Terminologie bezeichnet u. a. nicht härtbare, schmiedeeisenartige Legierungen als Stahl und verwischt damit diese technikhistorisch wichtige Unterscheidung.

3 DIN 8580, Fertigungsverfahren. Einteilung. Ausgabe Juni 1974.

4 James Nasmyth, Remarks on the Introduction of the Slide Rest Principle in Tools and Machines in the Production of Machinery. In: Robertson Buchanan: Practical Essay on Mill Work and other Machinery, 3. Auflage, London 1841, S. 394.

5 Charles H. Fitch: Report on the Manufactures of Interchangeable Mechanism. Washington 1883, S. 2.

6 K. R. Gilbert: The Portsmouth Blockmaking Machinery. London 1965.

7 Donald R. Hoke: Ingenious Yankees. The Rise of the American System of Manufactures in the Private Sector. New York 1990.

8 Frederick A. Halsey: Methods of Machine Shop Work. New York 1914, S. 15.

9 Ebenda.

10 Ausführlich dazu Jürgen Ruby: Maschinen für die Massenfertigung. Stuttgart 1995.