

1 Historie

1.1 Zur Geschichte der Werkzeugmaschine

Herstellung und Gebrauch von Werkzeugen gehören zu den Merkmalen, die den Menschen von der Tierwelt unterscheiden. Insofern kann es nicht verwundern, dass aus prähistorischen Zeiten Zeugnisse vom Werkzeugeinsatz vorliegen. Wir wollen hier die qualitativen Entwicklungsphasen des Gebrauchs der Werkzeuge verfolgen, die „Geburt“ der Werkzeugmaschine einordnen und die Treiber ihrer Weiterentwicklung ausmachen.

Wenn wir die Entwicklungstreiber identifizieren wollen, müssen wir fragen, warum überhaupt Entwicklung stattfindet. Wie in Bild 1.1 dargestellt, gibt es prinzipiell zwei Gründe für Entwicklung in der Produktionstechnik. Zum einen ist dies neue Produkte zu ermöglichen, zum anderen geht es darum die Wirtschaftlichkeit zu steigern.

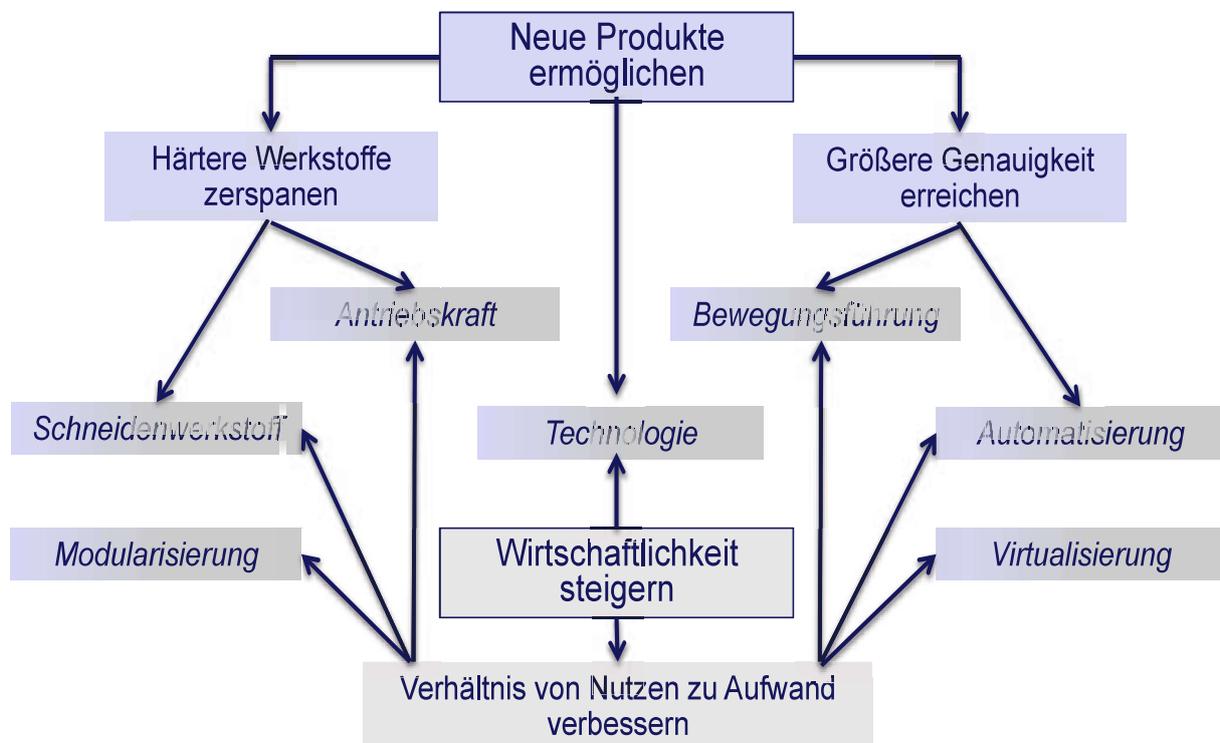


Bild 1.1 Entwicklungstreiber für die spanende Werkzeugmaschine

1.1.1 Antriebskraft

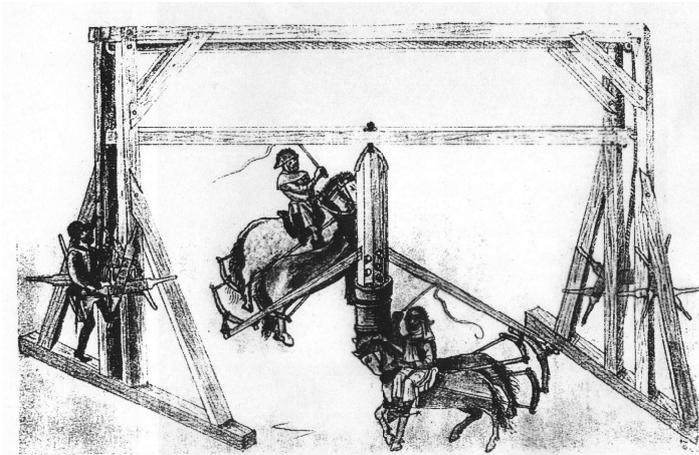
Selbstverständlich kann man mit der Darstellung aus Bild 1.3 nicht von einer Werkzeugmaschine sprechen. Dennoch zeigt das Bild mehr als nur ein *manuell betriebenes Werkzeug*. Als erstes entdecken wir eine Kurbel zur Einleitung des Drehmomentes. Die zwei angebundene Steine übernehmen zwei Funktionen. Einerseits sorgen sie mit ihrem Gewicht für eine Vorschubkraft beim Bohren, andererseits sind sie in der Lage durch ihre Trägheit als Energiespeicher für die Drehbewegung zu dienen. Wir haben damit eine urzeitliche Antriebsbaugruppe vor uns. Der Baugruppencharakter wird verstärkt durch eine Schnittstelle zum eigentlichen Werkzeug. Die deutlich zu erkennende Werkzeugaufnahme ermöglicht den Austausch eines verschlissenen Werkzeuges bei Wiederverwendung der Antriebsbaugruppe.



Bild 1.2 Fiedelbohrer, 2560 v Ch [2]

Bild 1.3 Bohrwerkzeug mit Schwungmassen [2]

Der Fiedelbohrer von Bild 1.2 zeigt uns eine andere Art Antriebsbaugruppe. Diese verfügt über eine Getriebekinematik zur Umwandlung einer hin und her gehenden Translation in eine Rotation und ermöglicht so hohe Drehzahlen.



Geschützbohrmaschine mit Pferdeantrieb. Nach der Heidelberger Handschrift des pfälzischen Büchsenmeisters Philip Moench, 1496

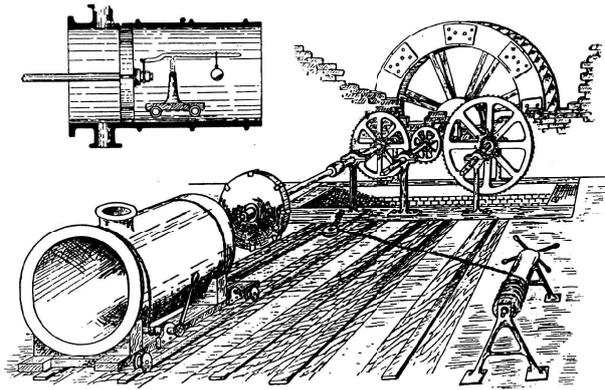
Bild 1.4 Vertikalbohrmaschine mit Pferdeantrieb, 1496 [2]

Auf die Phase der ausschließlich menschlichen Antriebskraft folgt die Nutzung von *Tieren* und *Naturkräften*, hauptsächlich für die Hauptschnittbewegung. Während die menschliche und tierische Antriebskraft physisch begrenzt ist, sind die Naturkräfte vom Ort beziehungsweise vom Wetter abhängig. Bild 1.4 stellt eine Senkrechtbohrmaschine mit Pferdeantrieb dar. Der hölzerne

Gestellaufbau weist alle Merkmale einer Zweiständer-Portalmaschine mit Querträger auf.

In Bild 1.5 ist eine Waagrechtbohrmaschine mit Wasserantrieb gezeigt. Der Mechanismus verfügt über ein Getriebe zur Momenten- und Drehzahlanpassung sowie über einen mechanisierten Bohrvorschub und eine Werkzeugführung.

Mit der *Dampfmaschine* stand ab Mitte des 19. Jahrhundert eine von physischer Begrenzung sowie von Wetter und Aufstellort unabhängige Antriebskraft zur Verfügung.



Bohrmaschine von Smeaton für die Carron-Eisenwerke (1796)

Bild 1.5 Horizontalbohrmaschine mit Wasserantrieb, 1796 [2]

Gleichzeitig konnten wesentlich größere Antriebskräfte aufgebracht werden, sodass weder die hölzernen Gestelle noch die handgeführten Werkzeuge den Belastungen standhielten. So wurden alsbald die Gestelle aus Gusseisen hergestellt und die Werkzeuge mechanisch geführt.

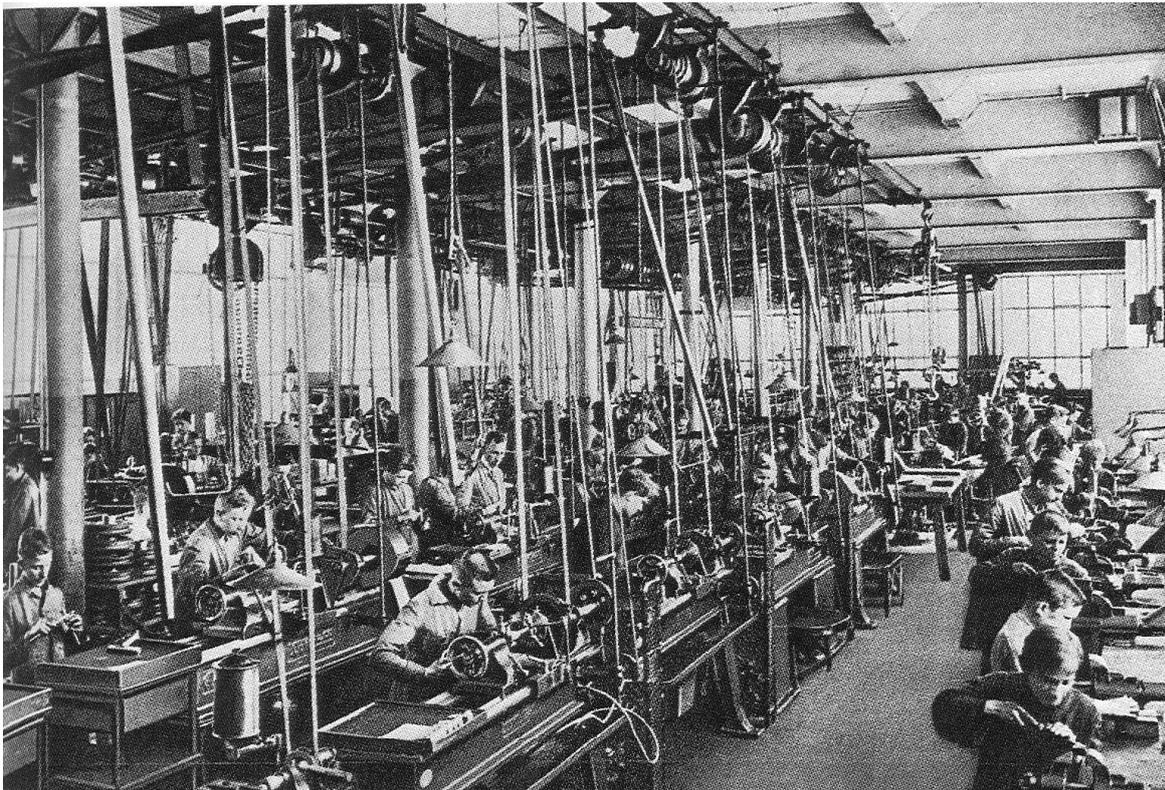


Bild 1.6 Transmissionsgetriebene Drehbänke, 1920 [2]

Der zentrale Antrieb durch die Dampfmaschine erforderte eine Verteilung der Drehbewegung an die dezentral aufgestellten Werkzeugmaschinen. Diese Aufgabe übernahm die *Transmission*, wie beispielsweise in Bild 1.6 zu sehen ist.

Der ohnehin schon schlechte Wirkungsgrad einer Dampfmaschine wurde durch diese Verteilung noch weiter gesenkt. Außerdem musste von der transmissionsgetriebenen Riemenscheibe an der Werkzeugmaschine der gesamte Antriebsbedarf, beispielsweise für die Vorschubbewegungen, mechanisch abgeleitet werden, wie es in Bild 1.7 an einer Drehbank zu sehen ist.

Den nächsten Innovationsschub leitete der *Elektromotor* ein. Damit stand ein Antrieb zur Verfügung der lokal in die Maschine gesetzt und in seiner Leistung an die spezifischen Anforderungen angepasst werden konnte. Im Vergleich zur Dampfmaschine ist der Wirkungsgrad deutlich besser. Auch eine wesentlich größere Leistung steht zur Verfügung.

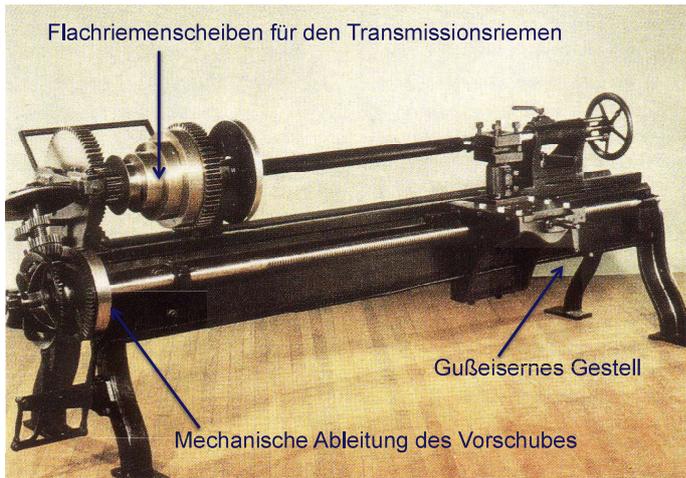


Bild 1.7 Drehbank, 1817 [2]

Mit dem *Direktantrieb* fallen mechanischen Antriebskomponenten, wie z.B. Riemen- und Kugelgewindetrieb, weg. Dadurch sind wesentlich höhere Vorschubgeschwindigkeiten und vor allem -beschleunigungen möglich. Nun steht häufig eine größere Antriebskraft zur Verfügung als für die Zerspanung notwendig ist, was ein entsprechendes Umdenken in der Auslegung und Gestaltung der gesamten Maschine erforderlich macht.

Bild 1.8 fasst die Entwicklung der Antriebskraft und daraus resultierende Folgen zusammen.

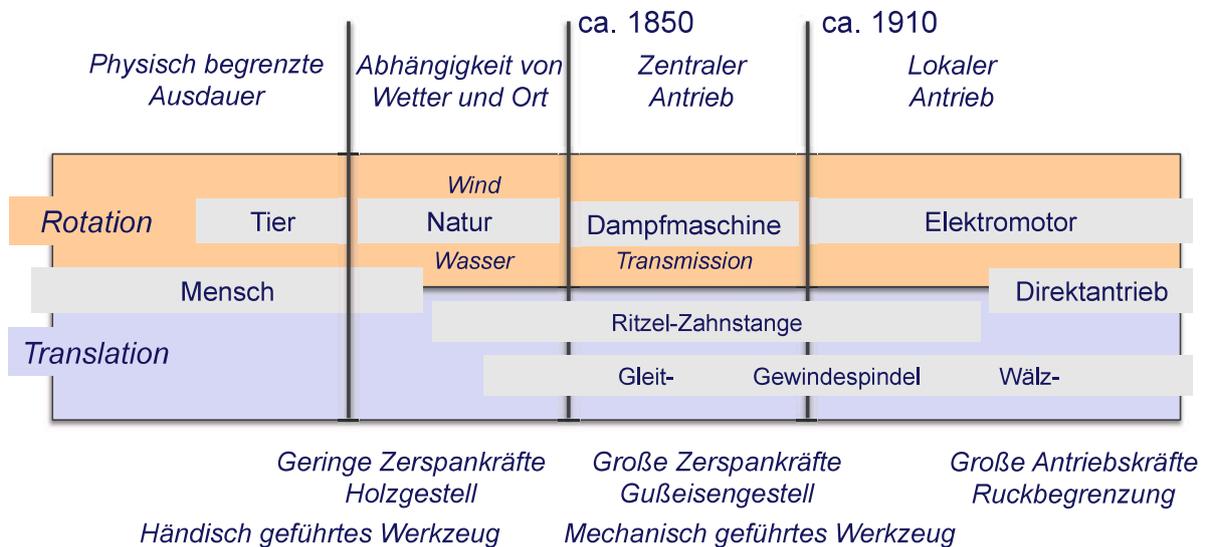


Bild 1.8 Entwicklung der Antriebe an Werkzeugmaschinen

1.1.2 Bewegungsführung - Ist das ein üblicher Begriff?

Die Vorschubbewegungen des Werkzeugs wurden bei der vorwiegend betriebenen Holzbearbeitung bis zur Industriellen Revolution *handgeführt* realisiert, wie Bild 1.9 am Beispiel einer manuell angetriebenen Drehbank zeigt.

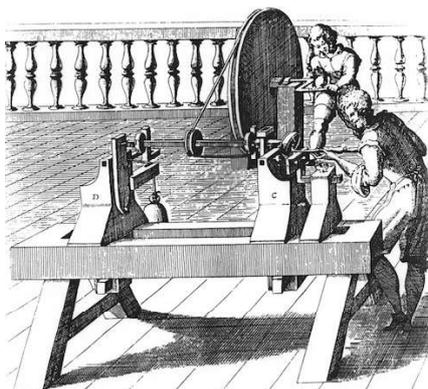


Bild 1.9 Handgeführtes Werkzeug, Drehbank, 1615 [2]

Als mit dem Dampfmaschinenantrieb größere Antriebskräfte zur Verfügung standen und statt der Holz- die Metallbearbeitung an Bedeutung gewann, musste eine Lösung gefunden werden, die wesentlich größeren Zerspankräfte sicher aufzunehmen und in das Gestell zu leiten sowie das Werkzeug beziehungsweise Werkstück definiert zu führen. Mit der Erfindung des Supports, Bild 1.10, und dem Übergang von Holz- zu Gußeisengestellen

konnten diese Anforderungen erfüllt werden. Nun war es nur ein kleiner Schritt, die im Support festgelegten Vorschubbewegungen vom Hauptantrieb durch entsprechende Getriebe und Gewindespindeln abzuleiten. Damit war die *Machine Tool* geboren. Die in Bild 1.11 dargestellte Fräsmaschine verfügt sowohl über ein gusseisernes Gestell, auch wenn es anmutet als wäre es ein Nähmaschinengestell, als auch über vom Spindeltrieb abgeleitete Vorschubantriebe in einem Kreuz-Support.

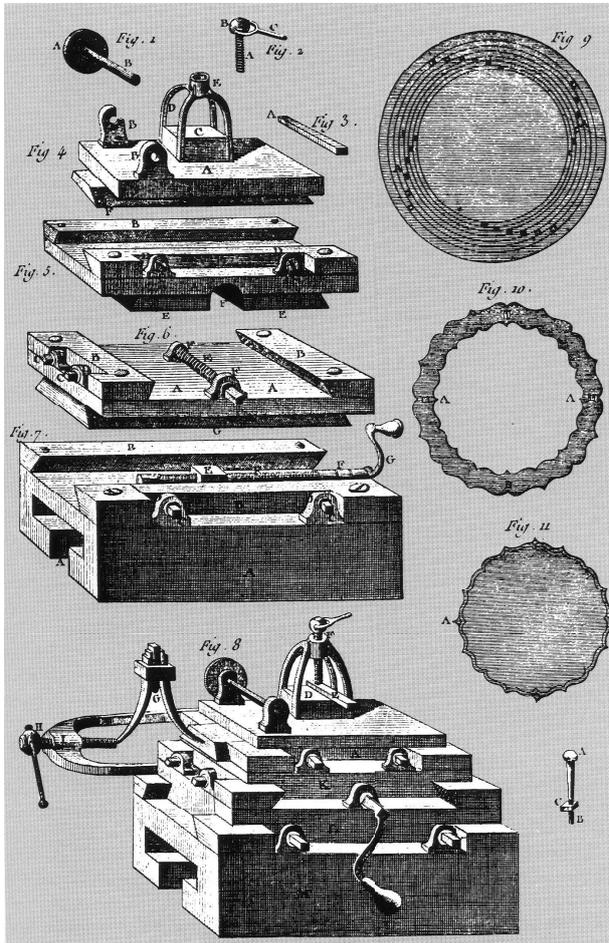


Bild 1.10 Support, 1751, England [2]

Auch mit dem Einsatz des Elektromotors an Werkzeugmaschinen änderte sich am Prinzip der vom *Hauptantrieb mechanisch abgeleiteten Vorschubbewegungen* vorerst nichts. Bild 1.12 zeigt schematisch die Ableitung des Längsvschubs vom Hauptspindeltrieb an einer Drehmaschine.

Zur Bewegungsführung gehört neben dem Antrieb auch die eigentliche Führung. Wie der Support von Bild 1.10 ausweist, ist zunächst nur die *hydrodynamische Gleitführung* bekannt. Dafür sind alle Führungsprofile von der Rund-, Rechteck- und Schwalbenschanzführung in Anwendung. Die Führungsanordnung bleibt, wie bereits der Support von 1751 zeigt, kartesisch.

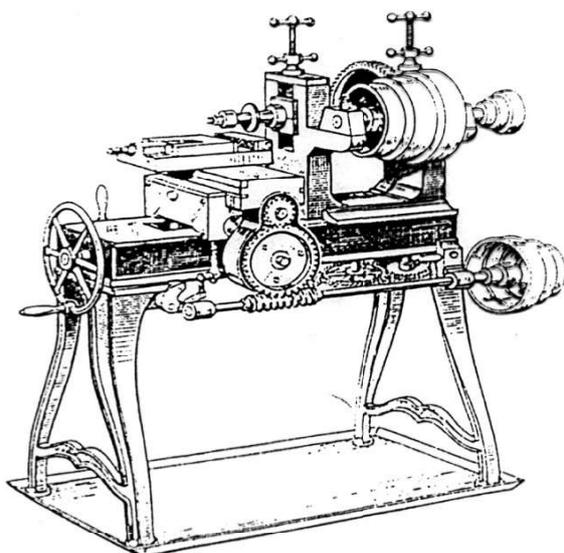


Bild 1.11 Fräsmaschine, 1850, England [2]

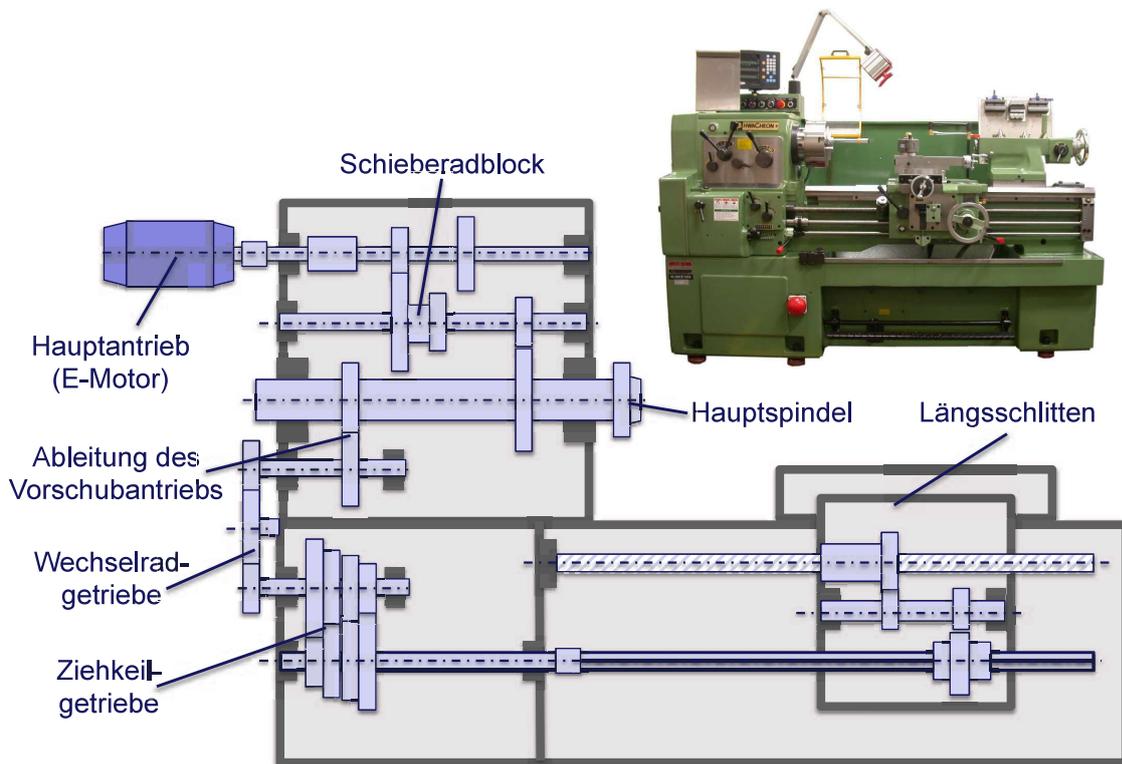


Bild 1.12 Ableitung des Längsvorschubs vom Hauptantrieb an einer Drehmaschine

Die Gleitführung wird zur wesentlich aufwändigeren *hydrostatischen Führung* weiterentwickelt. Dem Aufwand stehen bedeutende Eigenschaftsverbesserungen gegenüber. Der Reibungsbeiwert dieser Führung sinkt nicht nur dramatisch, auch der Charakter der Reibung wandelt sich, sodass kein Stick-Slip Effekt mehr möglich ist. Auch die Lastaufnahme ist, ohne die Gefahr von Fressverschleiß, wesentlich höher möglich. Darüber hinaus kann die Steifigkeit um Größenordnungen gesteigert und somit die Bewegungsgenauigkeit enorm verbessert werden. Bald setzt sich alternativ zur Gleitführung die *Wälzführung* durch. Die Geradführungen an Werkzeugmaschinen besitzen eine eigene Entwicklungshistorie, wie Bild 1.13 schematisch demonstriert. Mit der Einführung der *Profilschielenführung* (PSF) ergeben sich weitreichende Gestaltungskonsequenzen für die Gesamtmaschine. Die PSF ermöglichen eine steife Lastaufnahme in allen fünf Freiheitsgraden (außer der Bewegungsrichtung) bei kompakter Ausführung und gestatten damit die Leichtbaugestaltung der Bewegungssysteme ohne Steifigkeitsverlust.

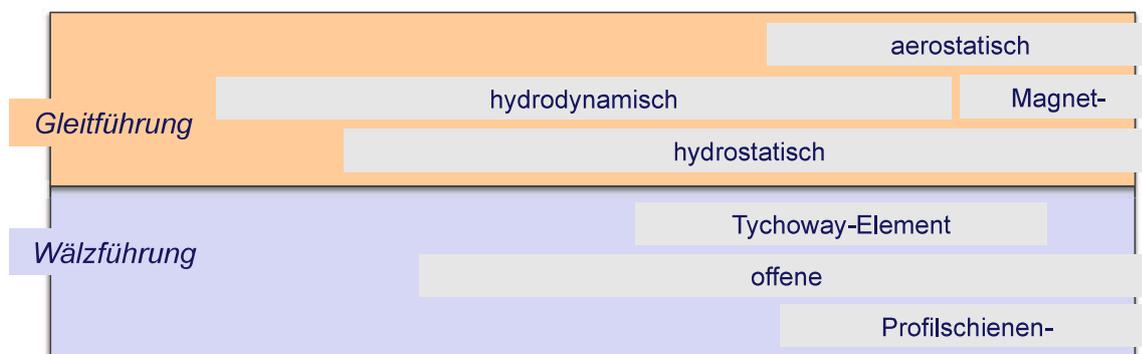


Bild 1.13 Entwicklung der Geradführungen an Werkzeugmaschinen

Einen entscheidenden Innovationsschub brachte die Einführung *lagegeregelter Vorschubachsen*. Mit dem Wegfall der Getriebezüge für die mechanisch gekoppelten Achsen wurde nicht nur Aufwand gespart, sondern es entstand auch Freiraum für die flexible Gestaltung. Wo früher die Antriebszüge wesentlich den Gestellaufbau mitbestimmten, eröffneten sich nun, auch in Zusammenhang mit dem Einsatz von PSF, völlig neue Möglichkeiten der Gestellausführung. Die einzelnen Vorschubachsen, die zur Realisierung einer räumlichen Bahnvorgabe in entsprechende Abhängigkeit zu setzen sind, werden nun nicht mehr mechanisch sondern durch Software gekoppelt.

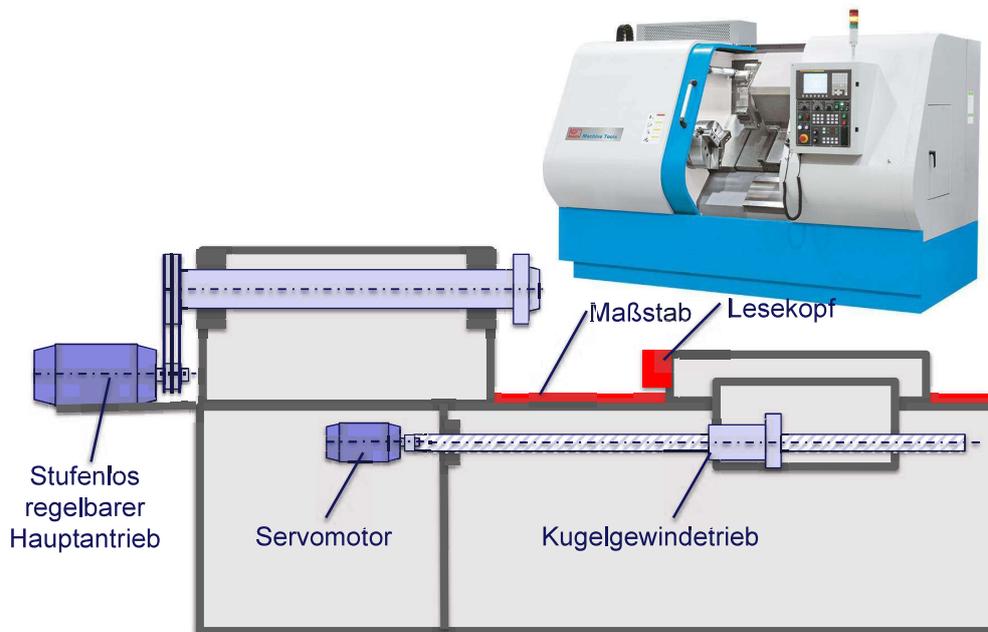


Bild 1.14 Lagegeregelter Längsvorschub an einer Drehmaschine

In Bild 1.14 ist schematisch dargestellt, wie sich – im Vergleich zu Bild 1.12 – die Antriebszüge bei Einführung geregelter Antriebe mechanisch vereinfachen.

Der nächste Qualitätssprung in der Bewegungsführung ist mit der Entwicklung der Computertechnik und der Informationsverarbeitung verbunden. Die Softwarekopplung der Vorschubachsen ermöglicht es auch nichtkartesische Kinematiken zu realisieren. Voraussetzung einer Sollwertvorgabe für die Achsen mit einem kinematischen Modell, ist die Berechnung der Sollwerte im Interpolationstakt.

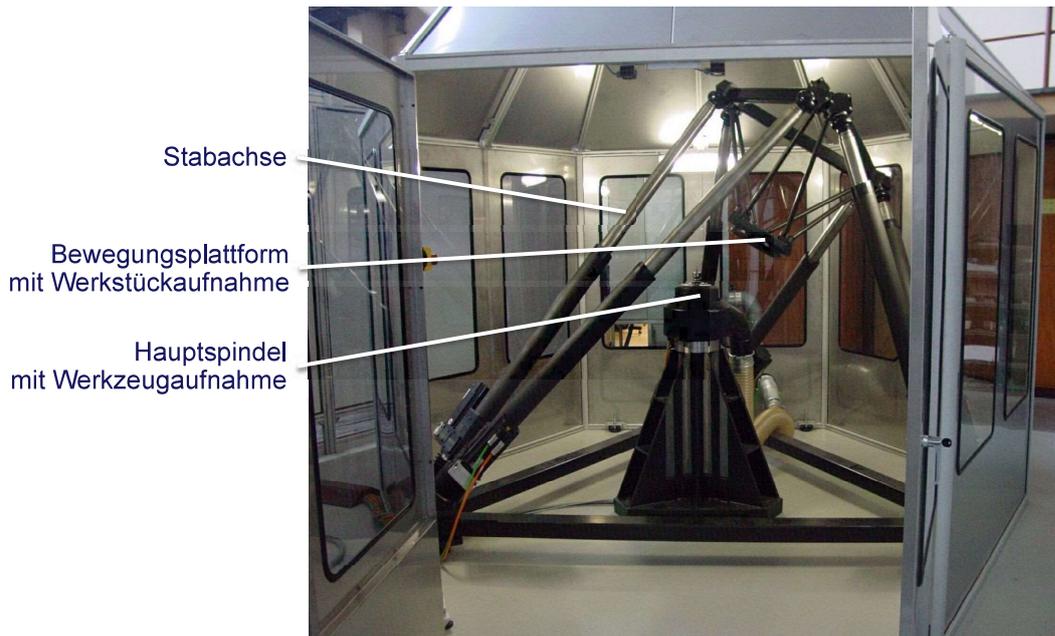


Bild 1.15 Parallelkinematik als Hexapod mit längenveränderlichen Stabachsen

Damit sind alternative Bewegungssysteme zur „freien“ Werkzeug-Werkstück-Bewegung auf Basis von Parallelkinematiken möglich. Bild 1.15 zeigt eine solche Parallelkinematik. Bild 1.16 fasst die Innovationsphase der Vorschubbewegung zusammen.

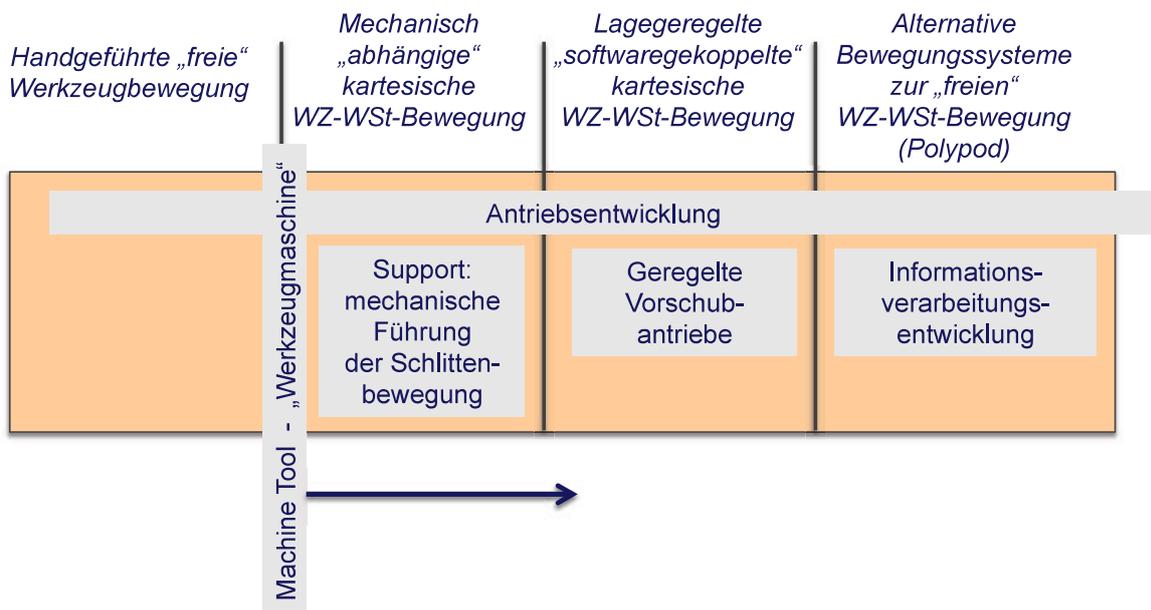


Bild 1.16 Historie der Vorschubbewegung an Werkzeugmaschinen

1.1.3 Schneidenwerkstoff

Die Wirtschaftlichkeit der Zerspanung wird prozesseitig von der Schnittgeschwindigkeit und werkzeugseitig von der Standzeit der Schneide beeinflusst. Die Standzeit ist wesentlich von der Wärmebeständigkeit des Schneidenwerkstoffs abhängig. Mit höherer Schnittgeschwindigkeit erhöht sich auch die Temperatur der Schneide. Daraus folgt die Aufgabe Schneidenwerkstoffe zu entwickeln, die eine hohe Wärmebeständigkeit haben, um so hohe Schnittgeschwindigkeiten zu ermöglichen und dadurch die Wirtschaftlichkeit des Prozesses

zu steigern. Mit der Schnittgeschwindigkeit wächst auch die prozessgünstige Vorschubgeschwindigkeit.

Bild 1.17 zeigt, wie die werkzeugabhängig mögliche Schnittgeschwindigkeit durch die Entwicklung und Verbesserung der Schneidwerkstoffe gesteigert wurde. Um aus dieser potenziell möglichen auch eine praktisch verfügbare Schnittgeschwindigkeit zu machen, bedarf es Werkzeugmaschinen, die auch entsprechende Hauptspindeldrehzahlen zulassen. Begrenzt werden die Drehzahlen hauptsächlich durch die Lagerung. Vergleichbar sind die realisierbaren Vorschubgeschwindigkeiten begrenzt durch den Entwicklungsstand der Antriebs- und Führungskomponenten. So setzte eine Innovationsspirale mit wechselweisem Entwicklungsdruck bei den Schneidwerkstoffen und den Werkzeugmaschinen ein.

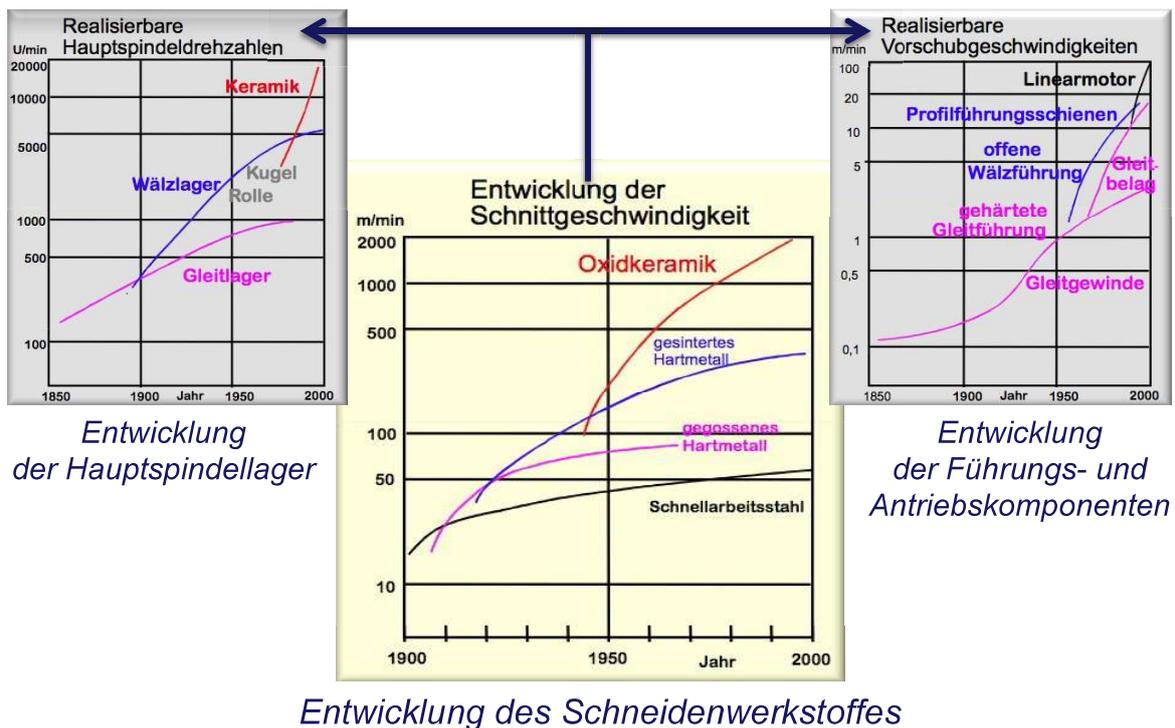


Bild 1.17 Entwicklung des Schneidwerkstoffes und die Konsequenzen

1.1.4 Automatisierung

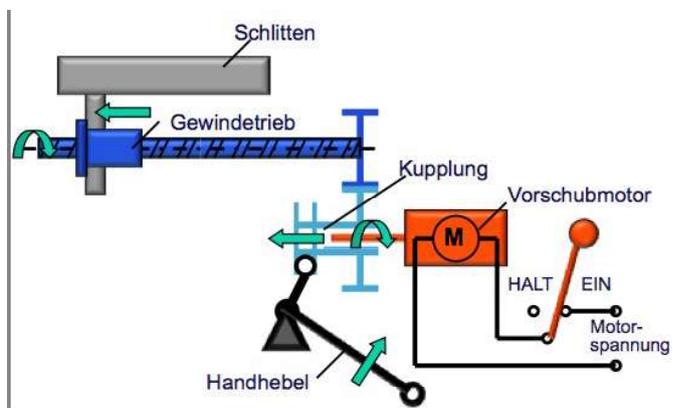


Bild 1.18 Manuelle Abschaltung

Wir wollen die Geschichte der Automatisierung auf die eigentliche Maschine begrenzen. Damit beschränken wir uns auf die Steuerung. Bei der manuellen Bedienung der Maschine ist das Arbeitsergebnis abhängig von der Erfahrung und Geschicklichkeit des Bedieners. Mit der Automatisierung wird somit nicht nur Zeit und Personal gespart, sondern auch die Bearbeitung gleichmäßig und die Genauigkeit erhöht.

Am Beispiel der Endabschaltung einer Vorschubachse soll vereinfacht die Steuerungsentwicklung gezeigt werden. Bild 1.18 stellt zunächst die manuelle Lösung dar. Mit der Geburtsstunde der Werkzeugmaschine entwickelten sich mit Hebel und Kurvenscheibe erste Elemente mechanischer Steuerungen. In Bild 1.19 sind schematisch Ausführungsvarianten von Kurvensteuerungen mit Scheibe, Trommel, Hebel und Schieber gezeigt.

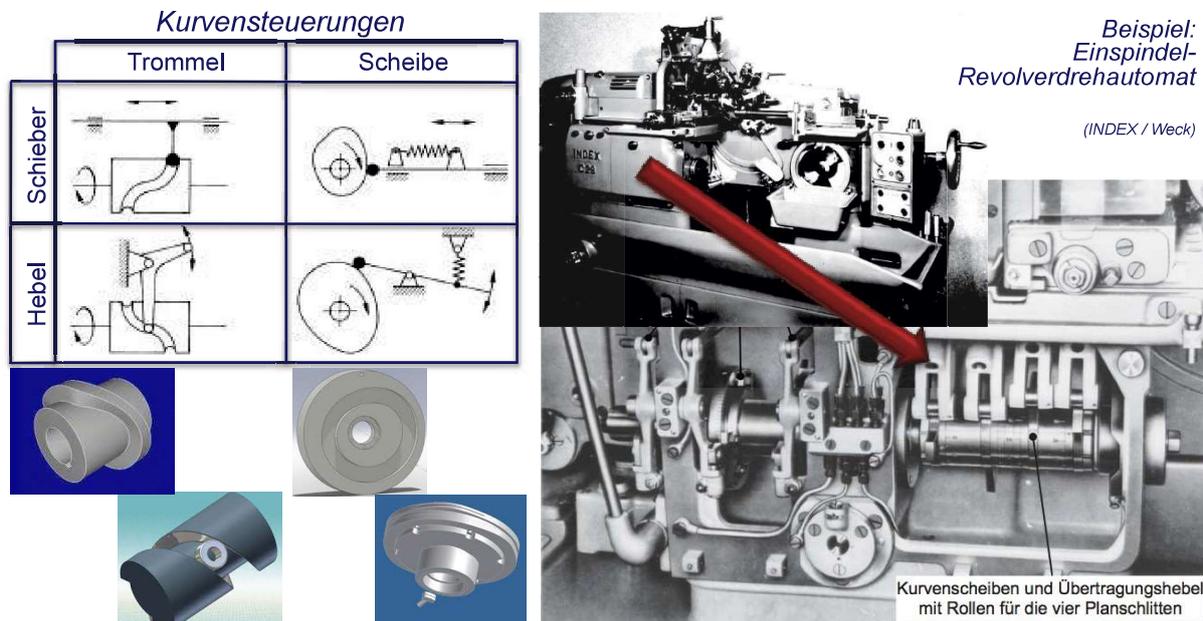


Bild 1.19 Elemente mechanischer Steuerungen [4]

Bild 1.20 zeigt die mechanische Variante für die automatische Endabschaltung der Vorschubachse (vergleiche Bild 1.18).

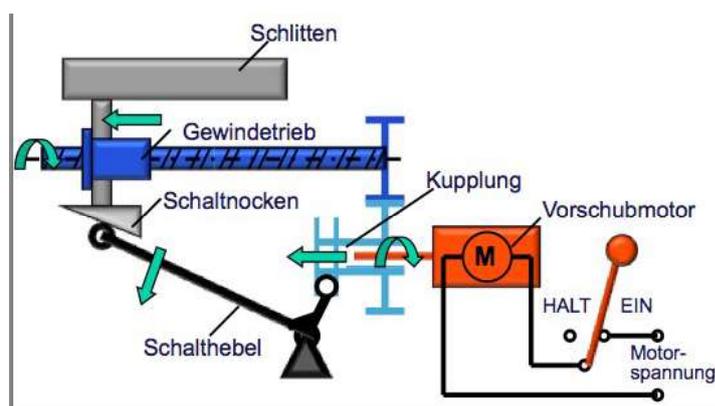


Bild 1.20 Mechanische Abschaltung

Die mechanischen Steuerungslösungen beanspruchen Gestaltungsraum für die Hebel und Gestänge. Die Realisierung automatischer Funktionen, setzte die mechanische Verbindung von Auslöser (Sensor) - und Effektorstelle (Aktor) voraus. Auch bei der hydraulischen

Steuerung ändert sich daran nichts Wesentliches. In Bild 1.21 ist das Prinzip der hydraulischen Ventilsteuerung und als Beispiel eine kompakte hydraulische Kopiersteuerung dargestellt.

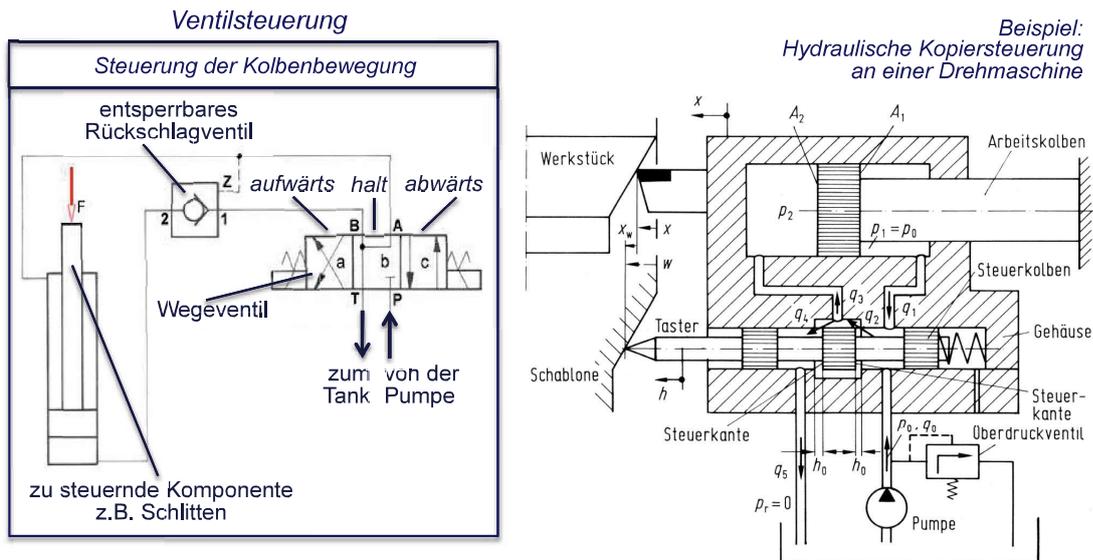


Bild 1.21 Elemente hydraulischer Steuerungen

Mit der elektrischen Steuerung ist keine direkte mechanische Verbindung zwischen Sensor und Aktor mehr erforderlich. Dies lockerte die Gestaltungszwänge. Allerdings ist die Steuerungsfunktionalität fest verdrahtet und damit unflexibel. Bild 1.22 zeigt einen Ausschnitt einer elektrischen Steuerung am Beispiel mit Nockenleiste und Relais.

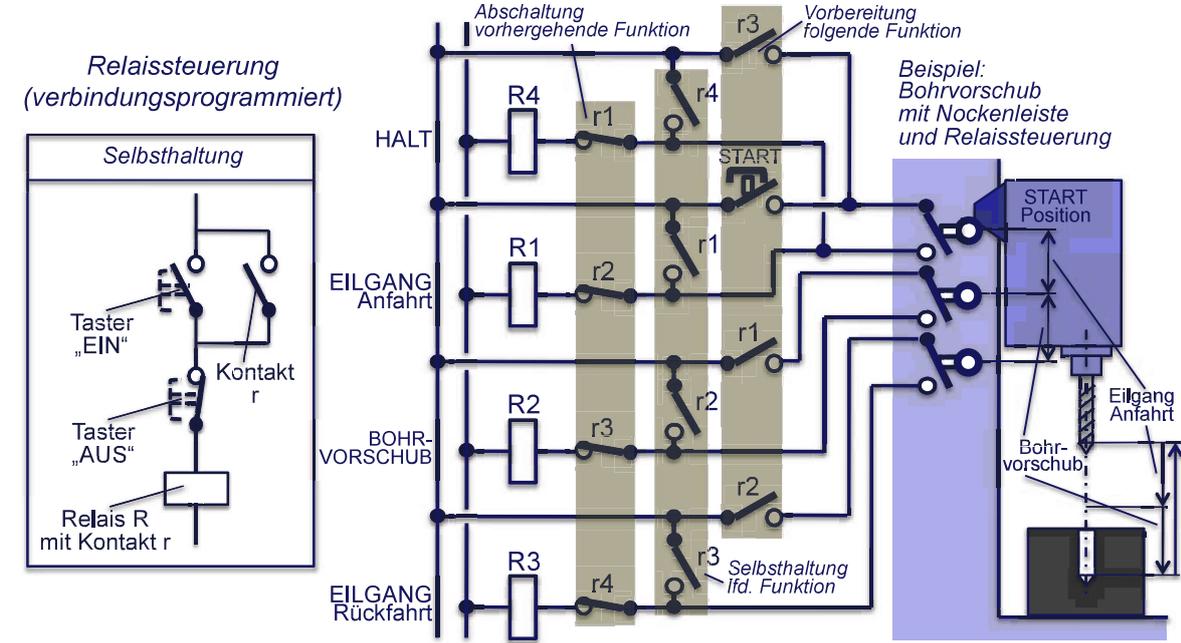


Bild 1.22 Elemente elektrischer Steuerungen

Die vereinfachte Endabschaltung der Vorschubachse mit einer elektrischen Steuerung veranschaulicht Bild 1.23. Deutlich ist die Auflösung der mechanischen Verbindung von Sensor und Aktor zu erkennen.

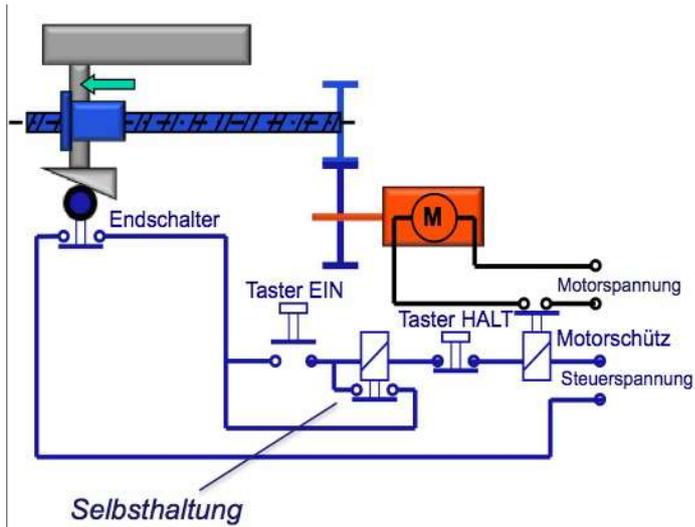


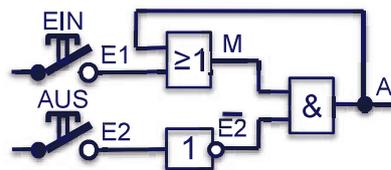
Bild 1.23 Elektrische Abschaltung

Durch die elektronische Steuerung wird außer dem Wegfall des mechanischen Zwanges auch die Verdrahtung von Funktionen überflüssig. Damit wird die Steuerungsfunktionalität programmierbar und ist somit flexibel. Bild 1.24 zeigt Elemente der elektronischen Steuerung. Die Endabschaltung als elektronische Variante zeigt Bild 1.25.

Funktionssteuerung (freiprogrammierbar)

Boolesche Operatoren			
UND		$E1 \quad E2$	$E1 \cdot E2 = A$
		0 0	0
		0 1	0
		1 1	1
ODER		$E1 \quad E2$	$E1 + E2 = A$
		0 0	0
		0 1	1
		1 1	1
NICHT		E	$\bar{E} = A$
		0	1
		1	0

Beispiel: Elektronische Realisierung der Selbsthaltung



Zyklisch aktualisierendes Rechenwerk

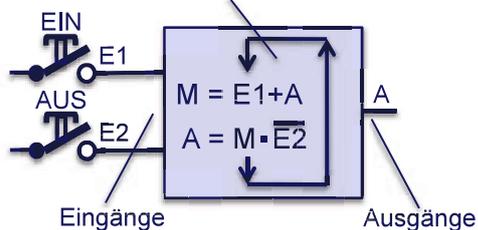


Bild 1.24 Elemente elektronischer Steuerungen

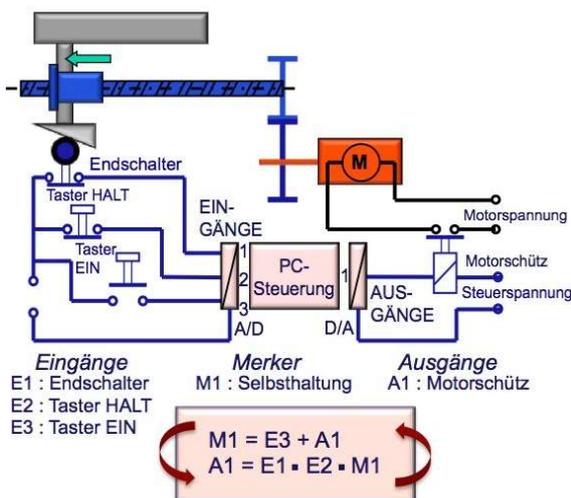


Bild 1.25 Elektronische Abschaltung

Schließlich fasst Bild 1.26 die Entwicklung der Funktionssteuerung an Werkzeugmaschinen zusammen.

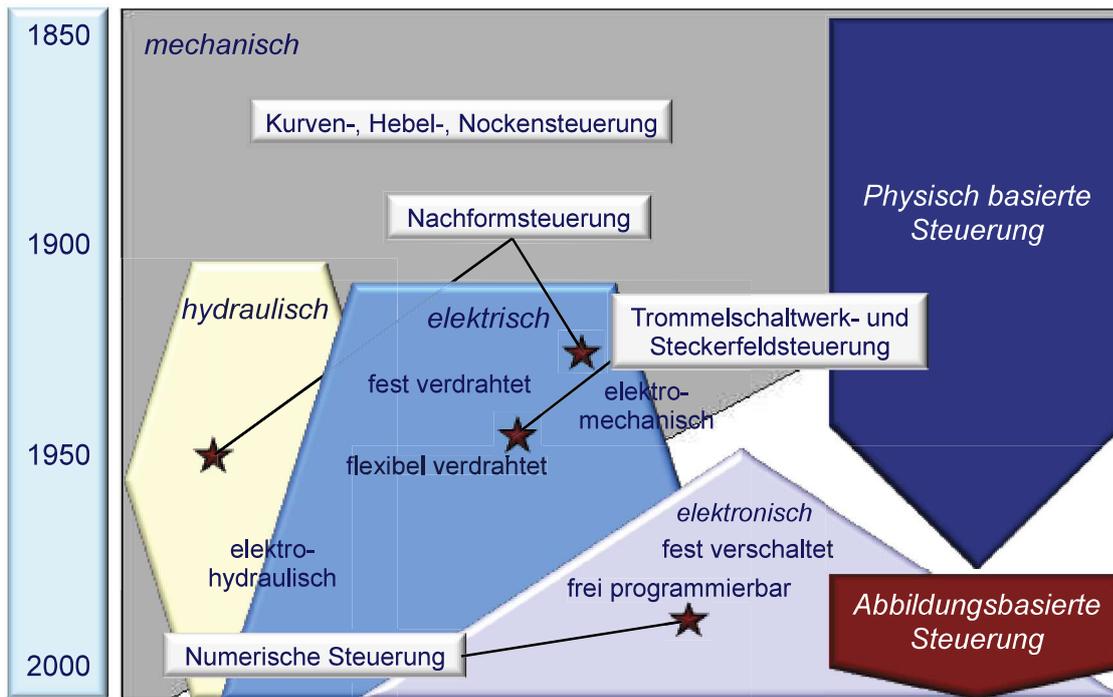
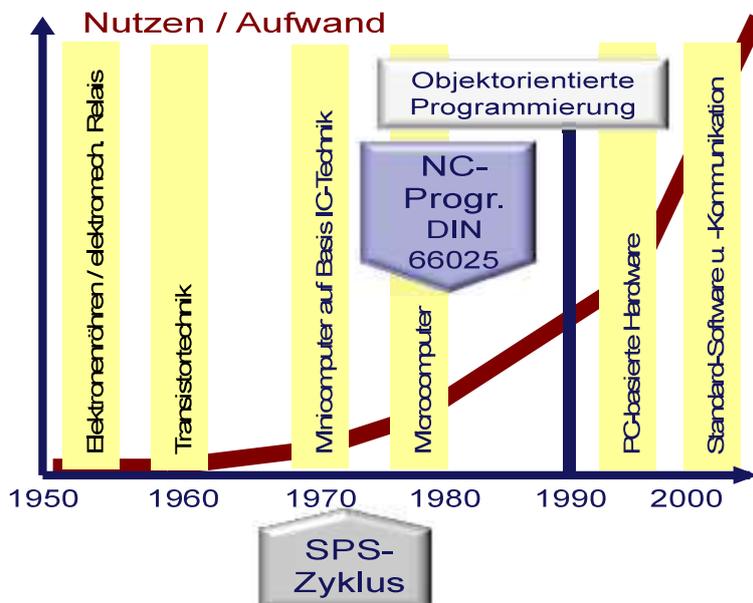


Bild 1.26 Historie der Automatisierung an Werkzeugmaschinen

Heute sind die Aufgaben der Steuerung in die Bewegungssteuerung (Numerische Steuerung, CNC = Computerized Numerical Control) und die Funktionssteuerung (SPS = Speicherprogrammierbare Steuerung, PLC = Programmable Logic Controller) aufgeteilt.

Bild 1.27 zeigt die Entwicklung der Informationsverarbeitungstechnik und ordnet CNC und SPS ein.



Entwicklung der NC-Steuerung an WZM vom Röhrenrechner bis zum PC

Bild 1.27 Entwicklung der Hardware für die elektronische Steuerung

1.1.5 Technologie

Neben den, in zwei Jahrhunderten „gereiften Standardtechnologien“ des Zerspanens mit geometrisch bestimmten Schneiden, gab es immer wieder spezielle technologische Entwicklungen die spezielle Anforderungen an die Maschinen stellten. Ob es das von Bykow in den 1950iger Jahren eingeführte *Schnelldrehen* oder die in den 1990iger Jahren zur Anwendung gebrachte, das Schleifen ersetzende *Hartfeinbearbeitung* oder die Bestrebungen zur Trockenbearbeitung waren, immer brachten diese technologischen Entwicklungen auch die Werkzeugmaschine „voran“. Wir wollen hier als Beispiele nur kurz spezielle Anforderungen an die Maschinen von drei Technologieentwicklungen aufzeigen, der Hochleistungszerspanung (High Performance Cutting, HPC), der Mikrozerspanung (Micro Cutting, MC) und der Hochgeschwindigkeitszerspanung (High Speed Cutting, HSC). Bild 1.28 zeigt die grobe Charakteristik der drei Technologien im Vergleich.

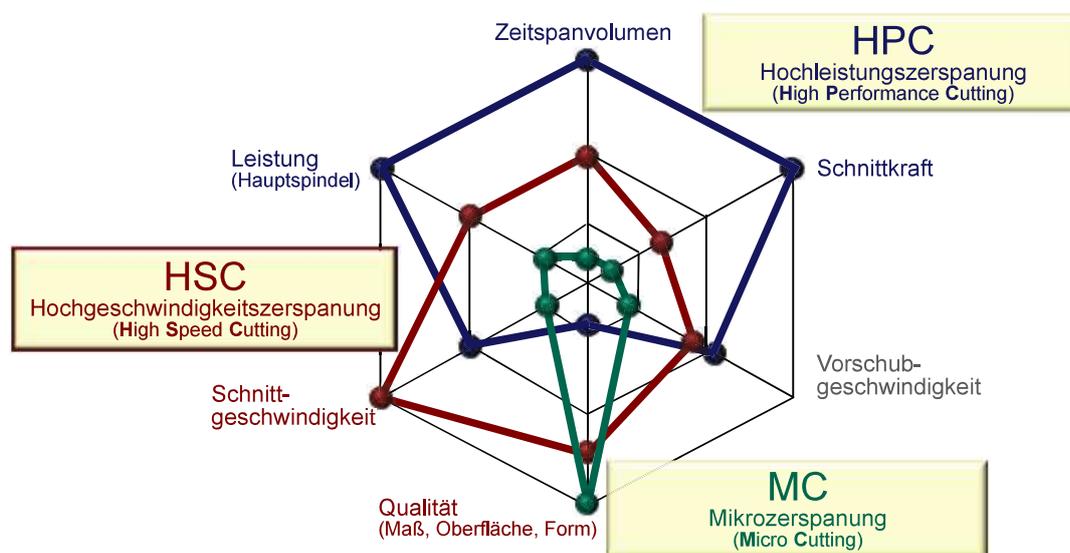


Bild 1.28 Technologieentwicklungen und ihre Charakteristik

Die *Hochleistungszerspanung* erfordert hohe Schnittkräfte und damit eine hohe Hauptspindelleistung. Aufgrund der großen Belastung müssen die Lager- und Führungskomponenten sowie das Gestell der Maschine besonders steif ausgelegt sein. Außerdem muss für eine leistungsfähige Späneabfuhr gesorgt werden, um die große Menge besonders heißer Späne möglichst schnell aus dem Arbeitsraum zu entfernen. Dennoch sind bei HPC die Auswirkungen auf die Maschine nicht so gravierend, wie bei den anderen beiden Technologien. Es kommt vielmehr auf die Optimierung des Werkzeuges an, wie die Beispiele in Tabelle 1.1 zeigen.

Kriterien für HPC	Leistungssteigerung	Maßnahmen
Standzeit erhöhen (beim Schruppen)	500 %	breitere Schneidkantenphase zur Erhöhung der Kantenstabilität
Bearbeitungszeit senken (beim Schruppen)	500 %	spezielles Schruppprofil RFT für Vollhartmetallfräser
Oberflächenqualität erhöhen	Ra < 0,2 µm	Hochpräzise Konstruktion und Fertigung von Werkzeugen
Zeitspanvolumen steigern	600 % auf konventionellem BAZ	Werkzeugauslegung mit FETTE- Optimierungsprogramm

Tabelle 1.1 Beispiele für Produktivitätsgewinne mit HPC (nach mav online)

Bei der *Mikrozerspanung* liegt es auf der Hand, dass für die extrem kleinen Werkzeuge und in der Regel auch kleinen Werkstücke spezielle Bearbeitungsmaschinen benötigt werden. Besondere Anforderungen werden an die Hauptspindel gestellt. Um zum Beispiel eine moderate Schnittgeschwindigkeit von 60 m/min bei einem Werkzeugdurchmesser von 0,25 mm zu erzielen, ist eine Drehzahl von 76400 min⁻¹ erforderlich. Auch für die Werkzeugaufnahme sind bei den winzigen Werkzeugabmessungen nicht die üblichen Lösungen verwendbar. So wie es bei der Hauptschnittbewegung auf extremen Rundlauf ankommt, ist bei den Vorschubbewegungen eine Positions- und Bahntreue im Submikrometerbereich gefordert. Bild 1.29 zeigt typische Beispiele für Werkzeug und Werkstück der Mikrozerspanung.

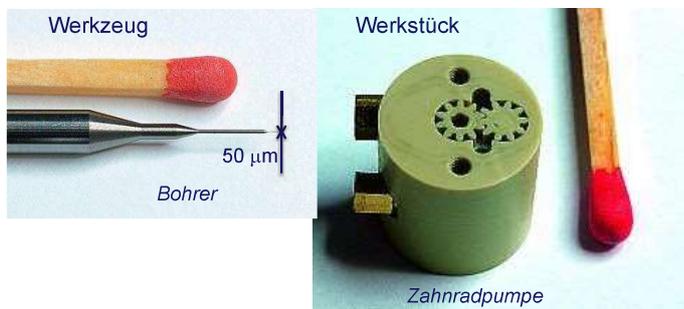


Bild 1.29 zeigt typische Beispiele für Werkzeug und Werkstück der Mikrozerspanung.

Bild 1.29 Beispiele Mikrozerspanung (nach mav online)

Im Schwerpunktprogramm 1476 der DFG (Deutsche Forschungs Gesellschaft) werden die strukturellen Konsequenzen der Mikrofertigung für die Maschinengestaltung gezogen. Als Beispiel zeigt Bild 1.30 eine „modular strukturierte, konfigurierbare Maschine für die Mikrobearbeitung mittels kooperativer Bewegungserzeugung“.

Im Schwerpunktprogramm 1476 der DFG (Deutsche Forschungs Gesellschaft) werden die strukturellen Konsequenzen der Mikrofertigung für die

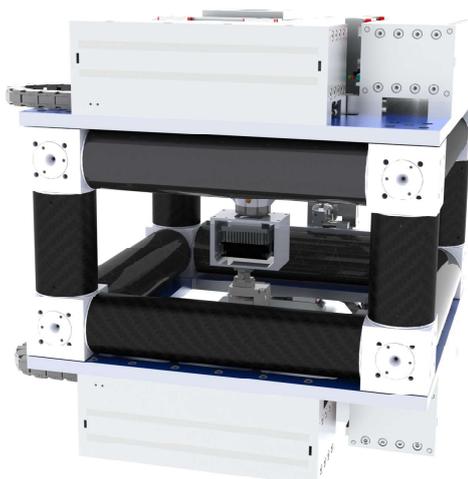


Bild 1.30 Struktur aus dem SPP „Kleine Werkzeugmaschinen für kleine Werkstücke“

Die *Hochgeschwindigkeitszerspanung* hat einen großen Innovationschub bei HSC-fähigen spanenden Werkzeugmaschinen ausgelöst. Es geht um die Vereinbarkeit von höchster Dynamik der Haupt- und Vorschubantriebe mit hoher Genauigkeit der Bearbeitung. Hochge-

schwindigkeitszerspanung definiert sich grob mit der zehnmal höheren Schnittgeschwindigkeit gegenüber der konventionellen Bearbeitung. Bild 1.31 veranschaulicht die Konsequenzen der hohen Schnittgeschwindigkeit, vor allem bei kleinen Werkzeugdurchmessern, auf die Hauptspindeldrehzahlen und Vorschubgeschwindigkeiten. Dabei kommt es zu großen Beschleunigungsanforderungen, wenn der Beschleunigungsweg kurz gehalten werden soll.

Die Lösungsansätze für mehr Antriebsdynamik gehen vorwiegend in drei Richtung, den Leichtbau der bewegten Baugruppen, den Einsatz von leistungsfähiger Antriebstechnik und der Erschließung alternativer Kinematiken. Bild 1.32 fasst die Lösungsansätze für die Steigerung der Dynamik der bewegten Baugruppen zusammen.

Zusammenhang von Schnittgeschwindigkeit und WZ-Durchmesser, Drehzahl, Vorschubgeschwindigkeit, Beschleunigung und Weg

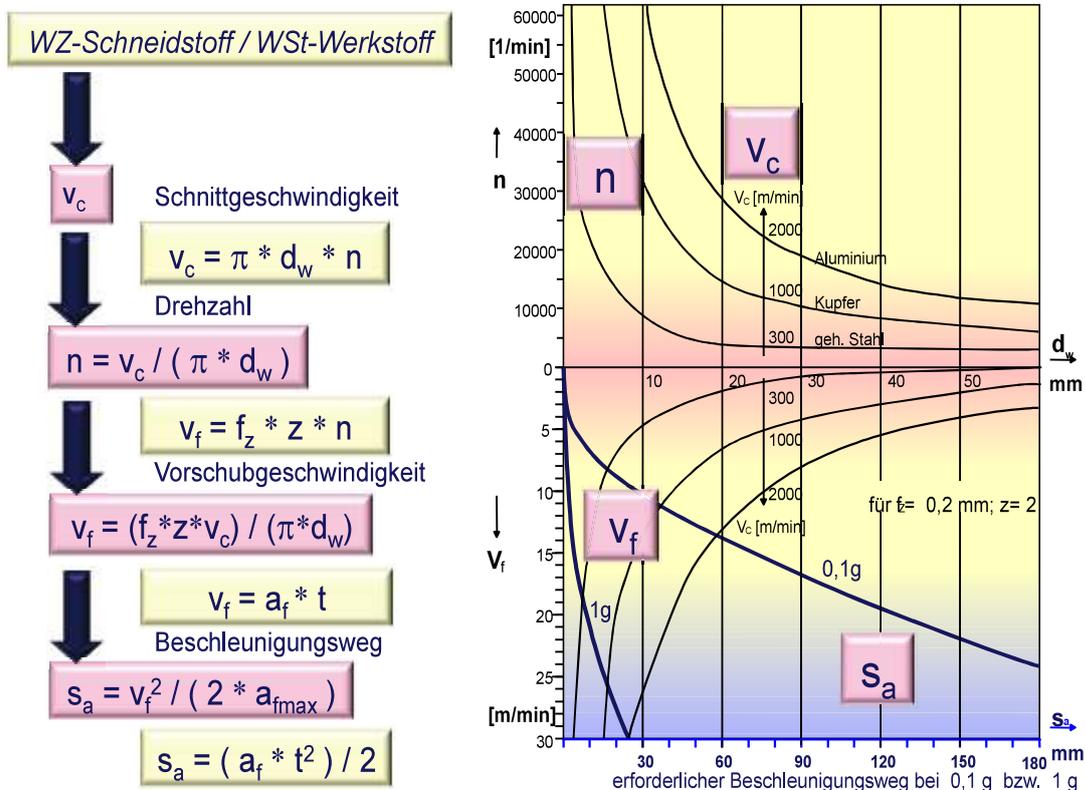


Bild 1.31 Konsequenzen 10fach größerer Schnittgeschwindigkeiten

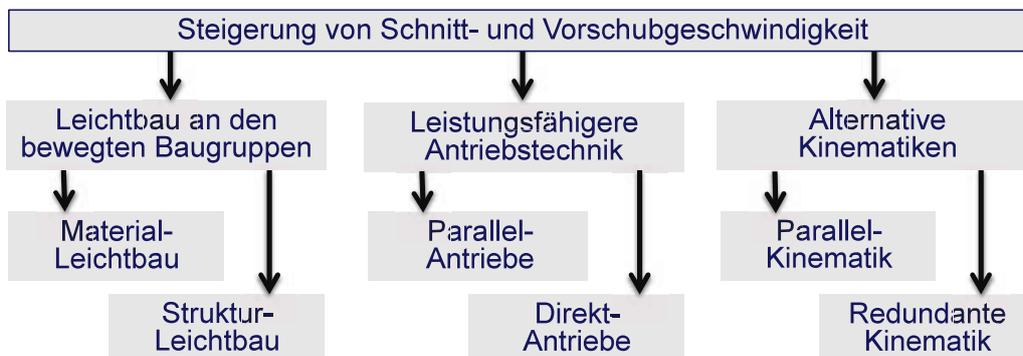


Bild 1.32 Lösungsansätze zur Steigerung der Dynamik der bewegten Baugruppen

Der Hintergrund des *Leichtbaus der bewegten Baugruppen* ist die Tatsache, dass gemäß

$$F = m * a \quad \text{bzw.} \quad a = F/m \quad (1.1)$$

bei reduzierter Masse (m) der bewegten Baugruppen mit gleicher Kraft (F) eine höhere Beschleunigung (a) erreichbar ist. Bild 1.33 zeigt Beispiele für den Materialleichtbau an Werkzeugmaschinen.



Bild 1.33 Beispiele für den Materialleichtbau an Werkzeugmaschinen

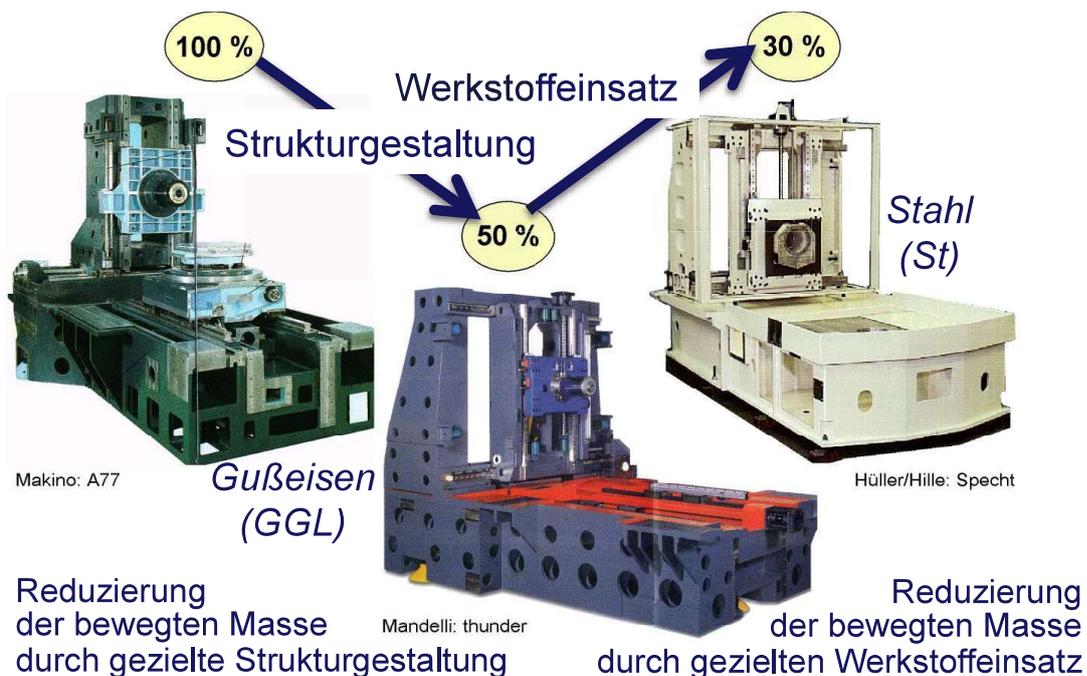


Bild 1.34 Steigerung der Dynamik durch Massereduzierung an bewegten Baugruppen

Obwohl überzeugende Massereduzierungen an den Baugruppen durch *Materialleichtbau* erreichbar sind, bleibt dessen Anwendung im Werkzeugmaschinenbau eine Ausnahme und ist meist ein Ergebnis geförderter Forschung.

Ganz anders sieht es mit dem *Strukturleichtbau* aus. Dabei wird zum Einen der rund doppelt so große Elastizitätsmodul von Stahl gegenüber Gusseisen ausgenutzt, um mit weniger Material gleich große Steifigkeit zu erreichen. Zum anderen werden die Gestaltungsmöglichkeiten der Stahl-Schweißausführung, oft auch im Zusammenhang mit kompakten Zulieferkomponenten, wie Motorspindeln und Profilschienenführungen, zur Minimierung von Masse und Maximierung von Steifigkeit ausgereizt. Bild 1.34 demonstriert beispielhaft die Reduzierung von bewegter Masse unter Beibehaltung der Steife durch gezielte Strukturgestaltung und Werkstoffeinsatz.

Die Antriebstechnik wird in zwei Gruppen, Parallelantriebe und Direktantriebe, unterteilt. Ein *Parallelantrieb*, auch als Gantry-Antrieb bezeichnet, besteht aus zwei, oder mehreren, separaten lagegeregelten Vorschubantrieben, die eine gemeinsame Antriebsachse bewegen. Über die Steuerung werden die einzelnen Antriebe synchron mit Sollwerten versorgt, sodass sich der Parallelantrieb nach außen so verhält, als gäbe es nur einen Vorschubmotor. Mit Bild 1.35 werden Möglichkeiten demonstriert, wie mit Parallelantrieben nicht nur die Dynamik der Vorschubachsen sondern auch die Genauigkeit derselben gesteigert werden kann.

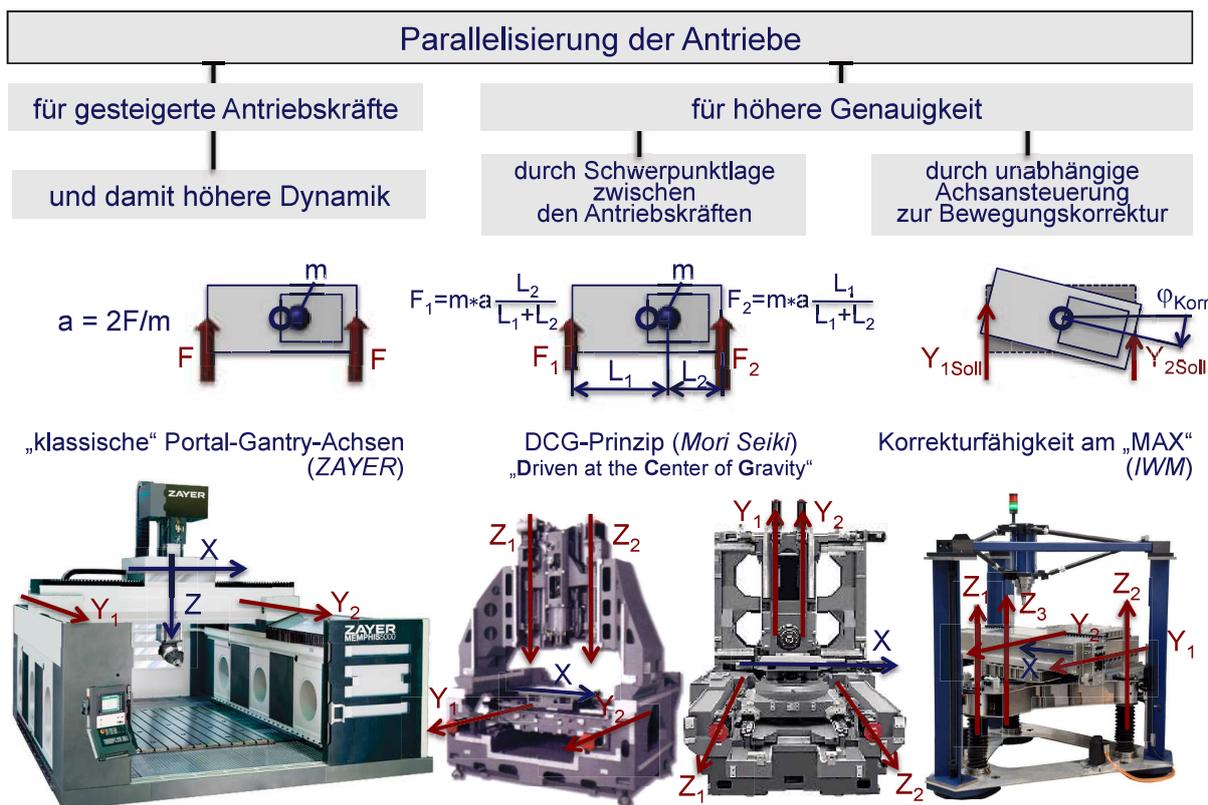


Bild 1.35 Potenzial parallelisierter Antriebe für Dynamik und Genauigkeit

Die *Direktantriebstechnik* revolutioniert den elektromotorischen Antrieb. Vereinfacht kann man sich den Linearmotor als abgewickelten Rotationsmotor vorstellen, wobei aus dem Ständer das Sekundärteil mit den Permanentmagnetstäben und aus dem Rotor das stromdurchflossene Primärteil wird. Bild 1.36 stellt den Aufbau der lagegeregelten Achse mit Linearmotor der Standardausführung mit Servomotor und Kugelgewindetrieb gegenüber. Augen-

scheinlich ist zunächst der wesentlich geringere Bauraumbedarf der Direktantriebstechnik. Mit dem Wegfall der mechanischen Übertragungselemente, kann der Linearmotor mit wesentlich größeren Geschwindigkeitsverstärkungen stabil betrieben werden. Damit ist er in der Lage, gegenüber dem konventionellen Antrieb rund das Zehnfache als Maximalgeschwindigkeit und -beschleunigung zu realisieren und wesentlich größere Positionier- und Bahnge- nauigkeiten zu erreichen.

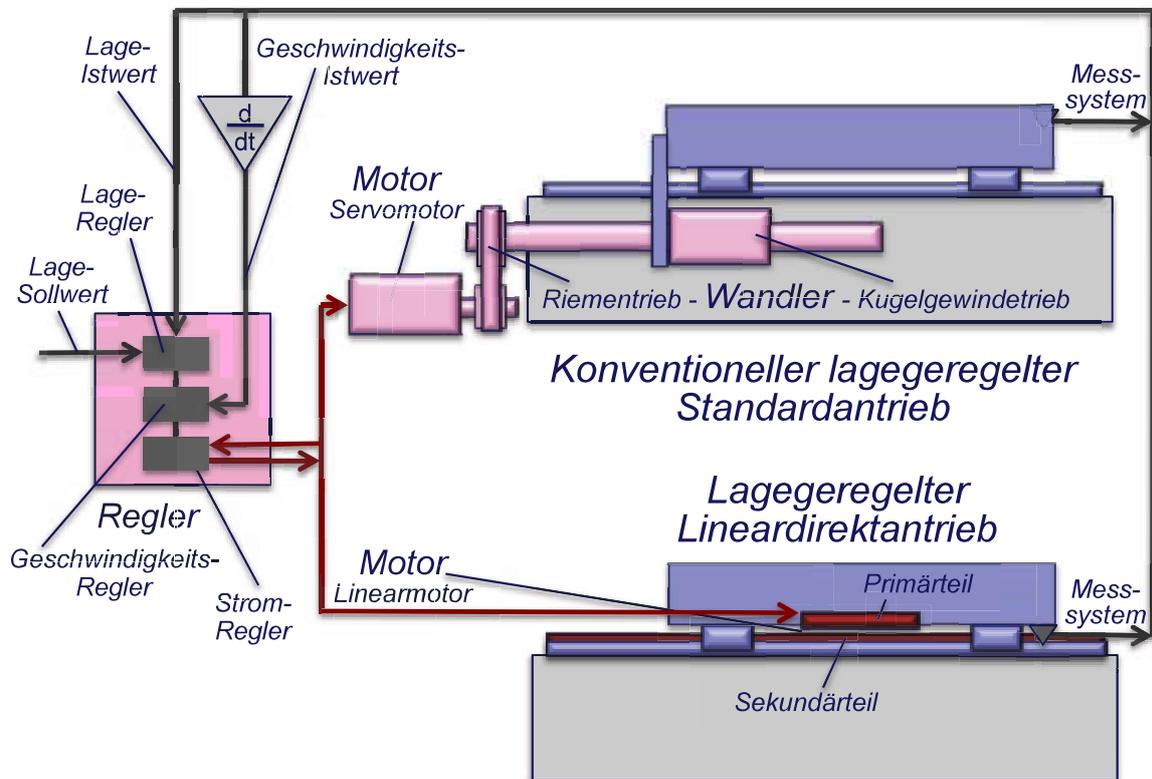


Bild 1.36 Schematischer Vergleich des Aufbaus lagegeregelter Vorschubachsen

Auch die Erschließung *alternativer Kinematiken* für die Anwendung an Werkzeugmaschinen verfolgt das Ziel, hohe Dynamik der Bewegungsachsen mit hoher Bewegungsgenauigkeit zu verbinden und dadurch die Maschinen HSC-fähig zu machen. Dazu bieten Parallelkinematik und redundante Kinematik erfolgversprechende Lösungen.

Die *Parallelkinematik* zeichnet sich gegenüber der seriellen Kinematik dadurch aus, dass nicht mehr ein Antrieb den anderen trägt und bei kartesischen Bewegungsvorgaben prinzipiell alle Antriebe an der Bewegungsrealisierung beteiligt sind. So ist im parallelkinematischen Antriebsprinzip begründet, dass damit das Minimum an bewegter Masse und das Maximum an Antriebskraft ausgeschöpft werden kann. Bild 1.37 zeigt einige Beispiele von Parallelkinematiken mit sechs Freiheitsgraden.

Die Beispiele zeigen, dass alle sechs Freiheitsgrade in der Bewegungsplattform liegen. Die Bewegungsplattform trägt bei großen und schweren Werkstücken die Motorspindel mit dem Werkzeug. Bei kleinen und leichten Werkstücken trägt die Bewegungsplattform eine entsprechende Werkstückaufnahme. So wird sichergestellt, dass in jedem Fall die minimale Masse bewegt wird. An einer *redundanten Kinematik* ist die Anzahl der steuerbaren Freiheitsgrade (Freiheitsgrade der Antriebe) größer als die Anzahl der effektiven Freiheitsgrade (Freiheitsgrade am TCP). In Bild 1.38 sind Möglichkeiten veranschaulicht, wozu diese überzähligen Antriebsachsen Verwendung finden können.

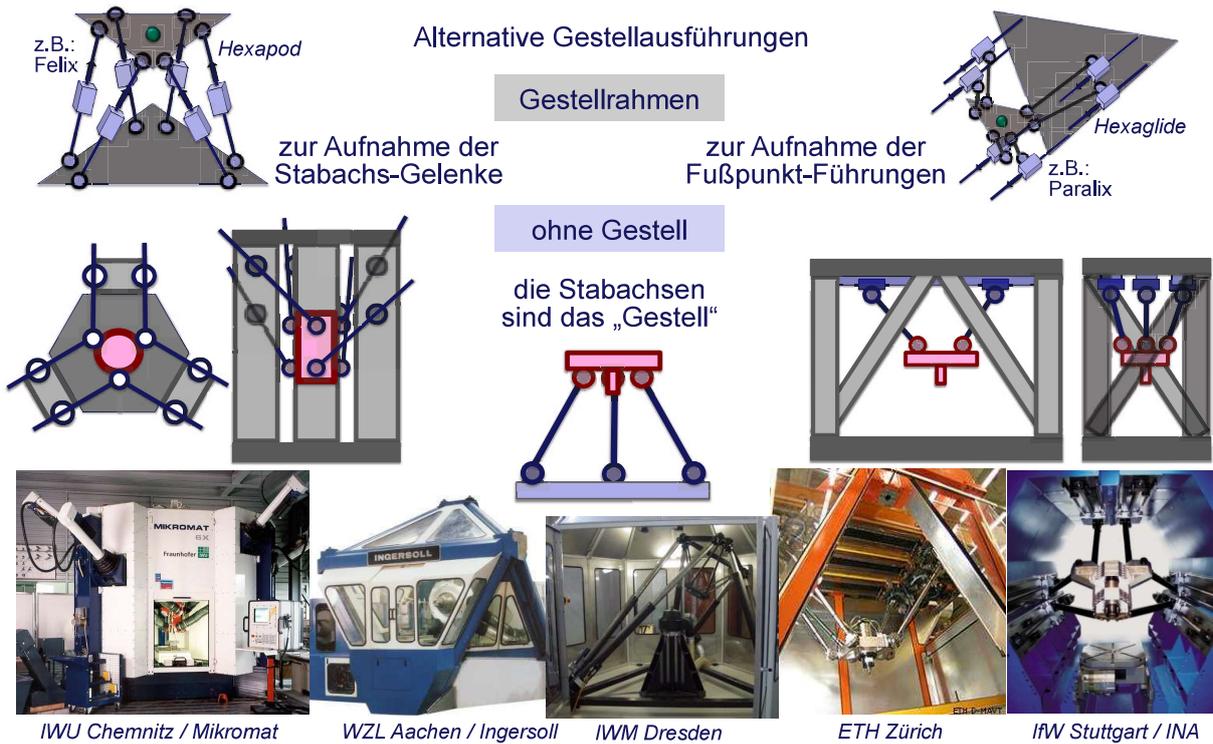


Bild 1.37 Parallelkinematiken mit 6 Freiheitsgraden

Durch Aufteilung der Bewegungsbahn in große, möglichst stetige Weganteile für die trägen Achsen und kleine, gegebenenfalls unetige Restbewegungen für die hochdynamischen, hochaufgelösten Zusatzachsen, ist es möglich hohe Dynamik mit hoher Genauigkeit zu verbinden.

Bild 1.39 fasst die bisher beschriebenen Entwicklungen zusammen und versucht eine grobe zeitliche Einordnung zu geben.

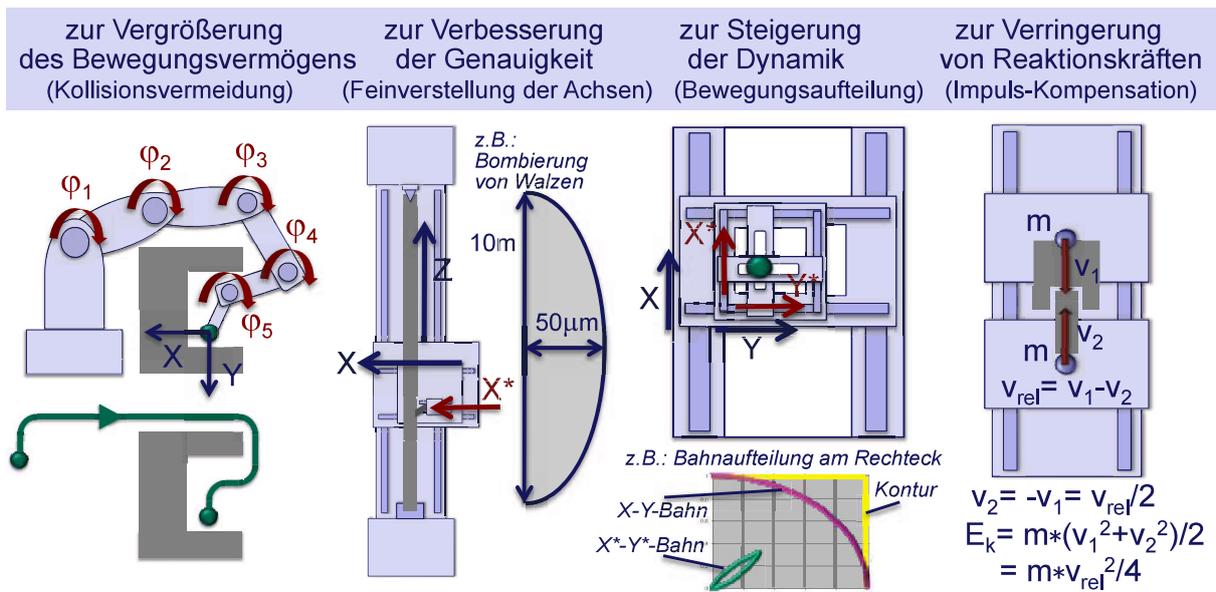


Bild 1.38 Redundante Kinematik zur Vereinbarkeit von Dynamik und Genauigkeit

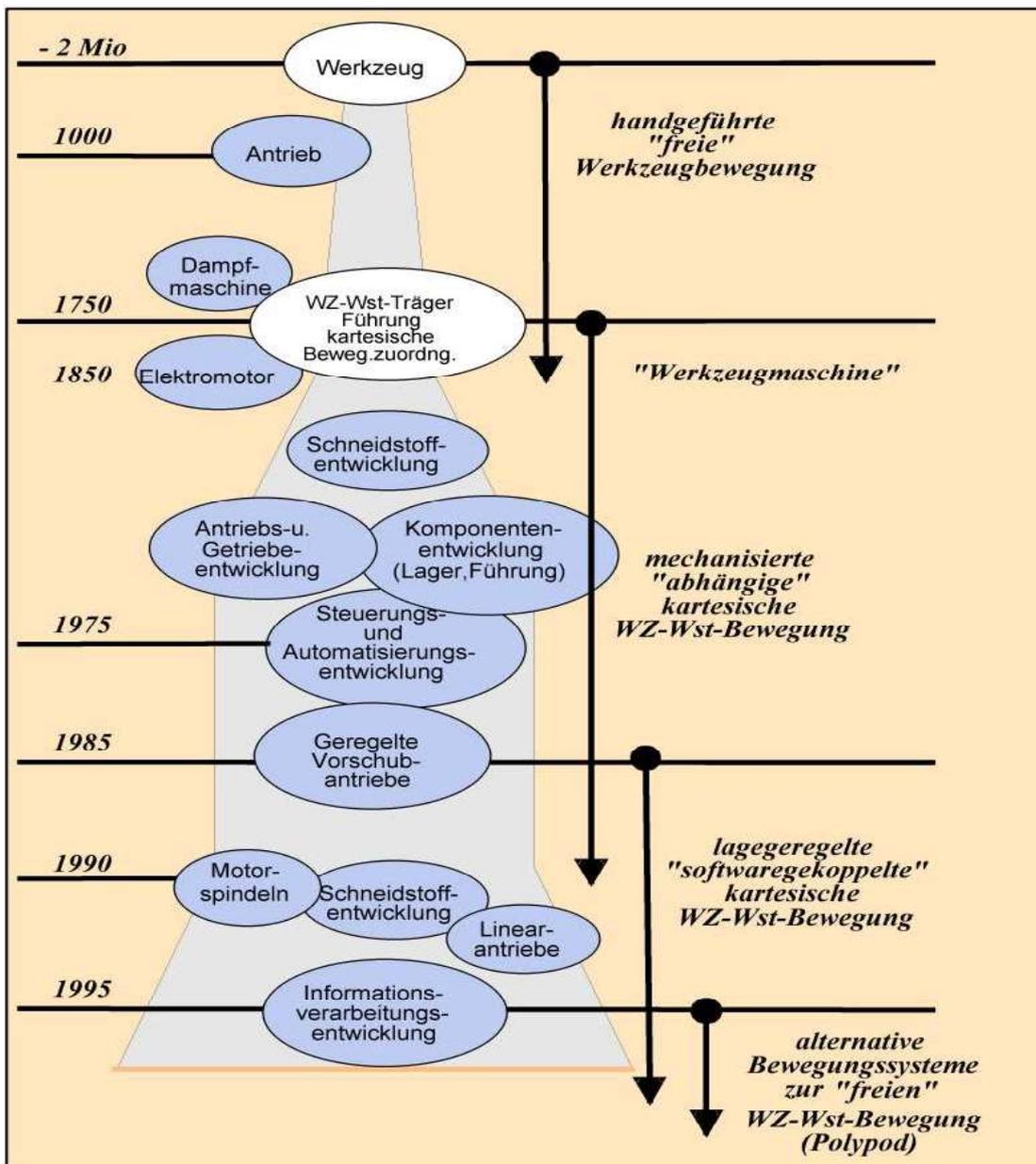


Bild 1.39 Zusammenfassung maßgeblicher Innovationen in der Geschichte der WZM

1.1.6 Modularisierung

Bevor uns im Abschnitt 1.2 zu den Innovationsbereichen und ihrer Charakteristik die Modularisierung als ein zeitloser Innovationsträger begegnet, soll ihre Bedeutung hier aus Entwicklungssicht kurz gestreift werden. Was der Austauschbau, dessen Wurzeln im 18. Jahrhundert liegen, für die Ebene der Einzel- und vor allem der Normteile ist, ist die Modularisierung für die Ebene der Baugruppen. Etwa in den 1970er Jahren war die Modularisierung unter dem Begriff des Baukastens kurzzeitig in Mode gekommen. Heute verwirklichen sich Teilaspekte der Modularisierung auf „natürliche“ Weise. Ein Grund dafür ist in den Zulieferungen der hochspezialisierten Komponentenhersteller zu finden. Bild 1.40 demonstriert den Wandel im Verhältnis von Eigenfertigung der WZM-Hersteller zu Zulieferungen von Komponentenherstellern.

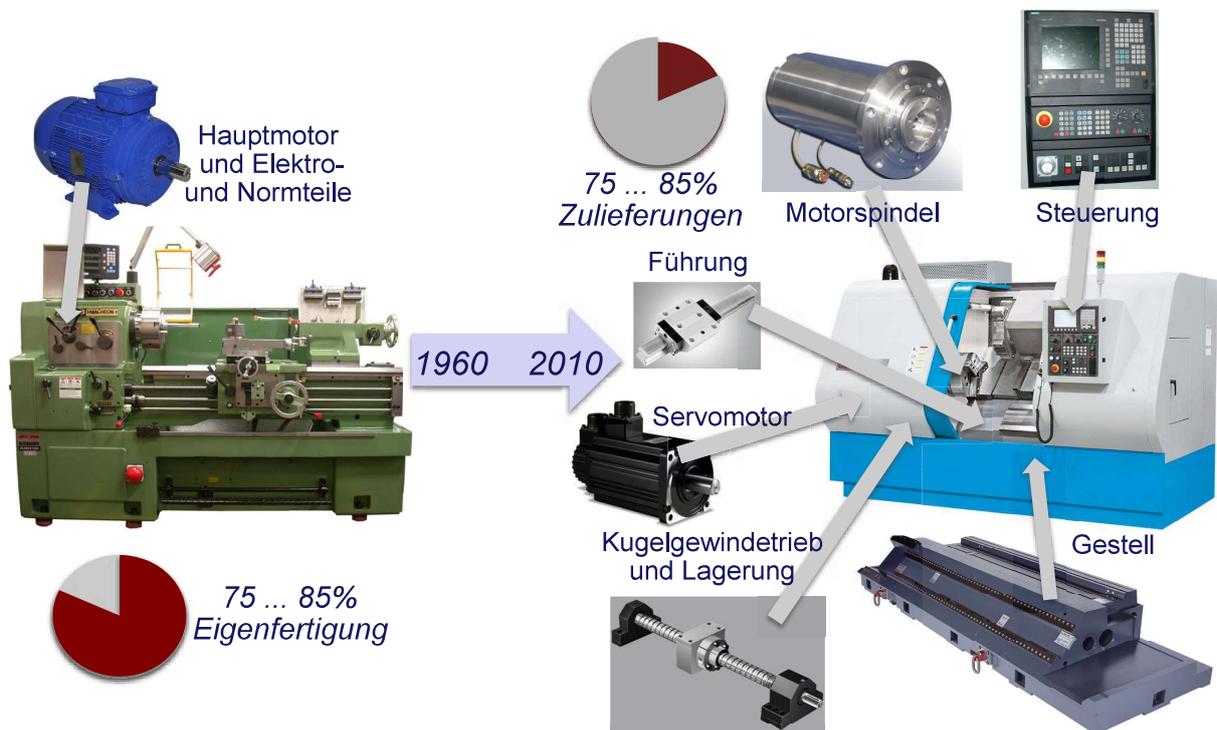


Bild 1.40 Vergleich der Wertschöpfungsanteile

Damit sind die Modulgrenzen quasi vorgezeichnet. Um zur Modularisierung im vollen Umfang zu kommen, braucht es definierte und möglichst standardisierte Schnittstellen. Diese Schnittstellen müssen neben der mechanischen Verbindung auch Medien und Informationen weiterleiten. Die Modularisierung ist auch Voraussetzung für Konfiguration und Rekonfiguration der Maschinen.

1.1.7 Virtualisierung

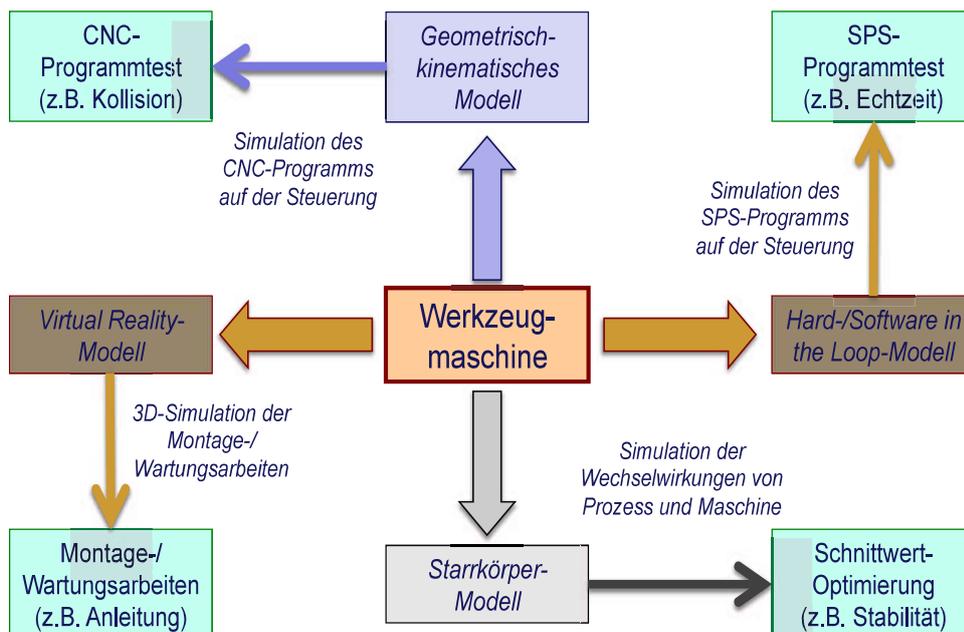


Bild 1.41 Möglichkeiten der virtuellen WZM

Die Virtualisierung wird uns schwerpunktmäßig im Abschnitt 1.3 zur Geschichte der Entwicklungswerkzeuge beschäftigen. Doch nicht nur beim KEP spielt die Virtualisierung eine immer bedeutendere Rolle, auch für die Montage, Inbetriebnahme, Produktionsvorbereitung und den Betrieb der WZM wächst die Bedeutung von Modell, Simulation, Hardware beziehungsweise Software in the Loop und Virtual Reality. In Bild 1.41 sind Anwendungsmöglichkeiten der Virtualisierung der WZM zusammengestellt.

1.2 Zu den Innovationsbereichen

Wir haben im Abschnitt 1.1 mehr oder weniger vollständig und detailliert die geschichtliche Entwicklung der Werkzeugmaschine unter verschiedenen Sichten und Entwicklungstreibern verfolgt. Ist nun die Entwicklung der WZM beendet? Sicher nicht. Aber wie geht es weiter? Was sind die Zukunftstrends? Gibt es zeitlose Prognosen dazu? Wir wollen versuchen allgemeingültige Aussagen zu den Innovationen zu erhalten.

Zunächst ordnen wir die Innovationen an WZM in das produktionstechnische Umfeld ein, wie es Bild 1.42 veranschaulicht.

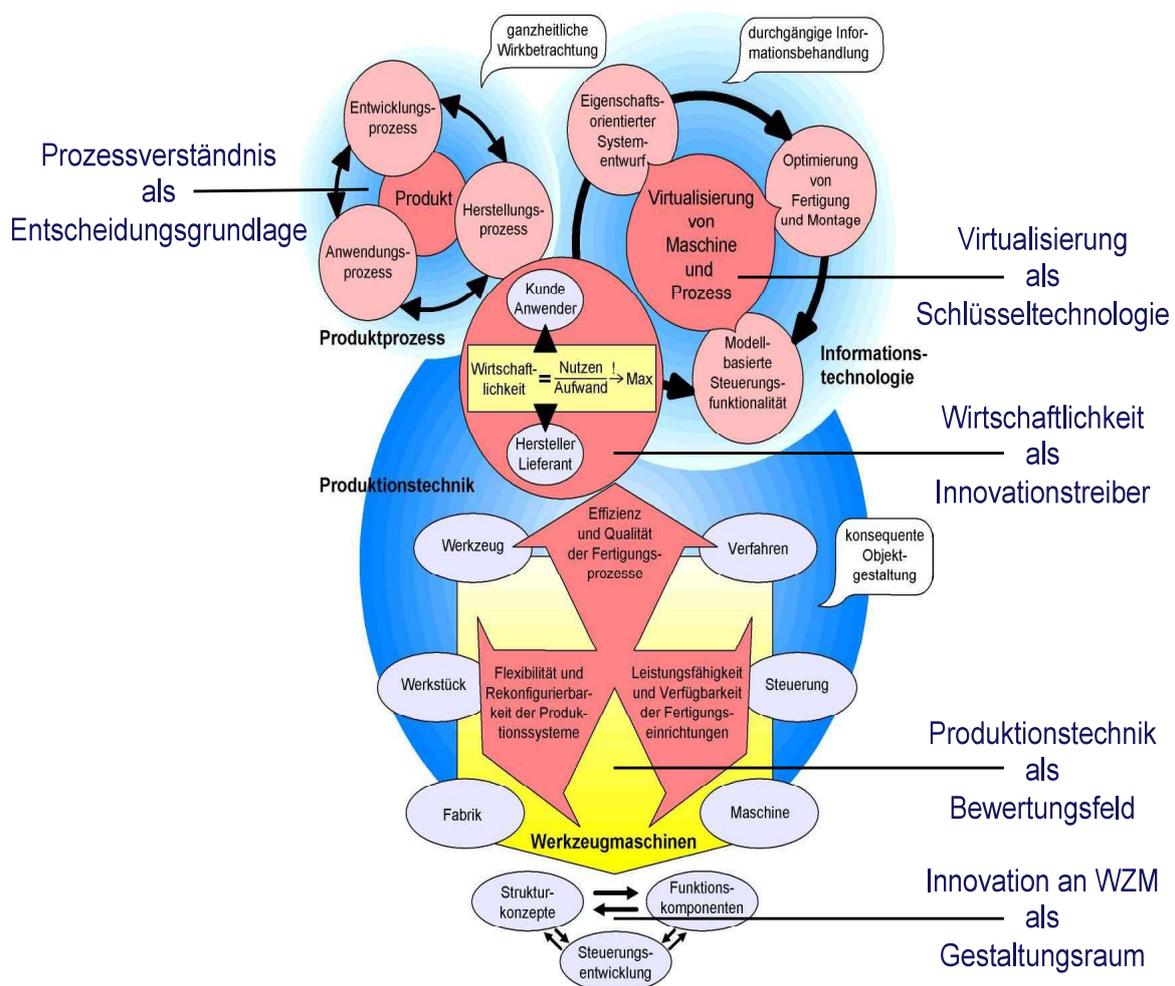


Bild 1.42 Einordnung der Entwicklung von Werkzeugmaschinen

Wirtschaftlichkeit als Innovationstreiber

Letzten Endes ist es immer das Streben nach Wirtschaftlichkeit beziehungsweise deren Verbesserung, was nach Innovationen drängt. Dabei soll unter Wirtschaftlichkeit allgemein das *Verhältnis von Nutzen zu Aufwand* verstanden werden. Nachhaltige Wirtschaftlichkeit ist nur zu erzielen, wenn beide Seiten – Lieferant bzw. Hersteller genauso wie Kunde bzw. Anwender – Vorteile aus dem Geschäft ziehen.

Prozessverständnis als Entscheidungsgrundlage

Gemeint ist der *Produktprozess*, in dessen Zentrum das Produkt steht und der die Wechselwirkungen zwischen Entwicklungs-, Herstellungs- und Anwendungsprozess beschreibt. Die ganzheitliche Betrachtung und Auswertung dieser Wechselwirkungen bildet die Basis für Entscheidungen, die den Nutzen mehrten oder den Aufwand senken oder beides.

Virtualisierung als Schlüsseltechnologie

Der Stand der *Informationstechnologie* ermöglicht die Virtualisierung von Maschine und Prozess. Damit ist der eigenschaftsorientierte Systementwurf ebenso realisierbar, wie die Optimierung von Fertigung und Montage oder die modellbasierte Steuerungsfunktionalität. Die Effektivität dieser Technologien wächst mit der Durchgängigkeit der Informationsbehandlung.

Produktionstechnik als Bewertungsfeld

Für die *Produktionstechnik* existieren für das Zusammenwirken von Werkstück, Werkzeug, Verfahren, Steuerung, Maschine und Fabrik drei zeitlose Aufgaben, an deren Erfüllung jede Lösung bewertet wird: die *Effizienz und Qualität der Fertigungsprozesse* sichern, die *Leistungsfähigkeit*

Innovation an WZM als Gestaltungsraum

Innovationen können an Werkzeugmaschinen in drei Bereichen platziert werden: den *Strukturkonzepten*, den *Funktionskomponenten* und der *Steuerungsentwicklung*, Bild 1.43.

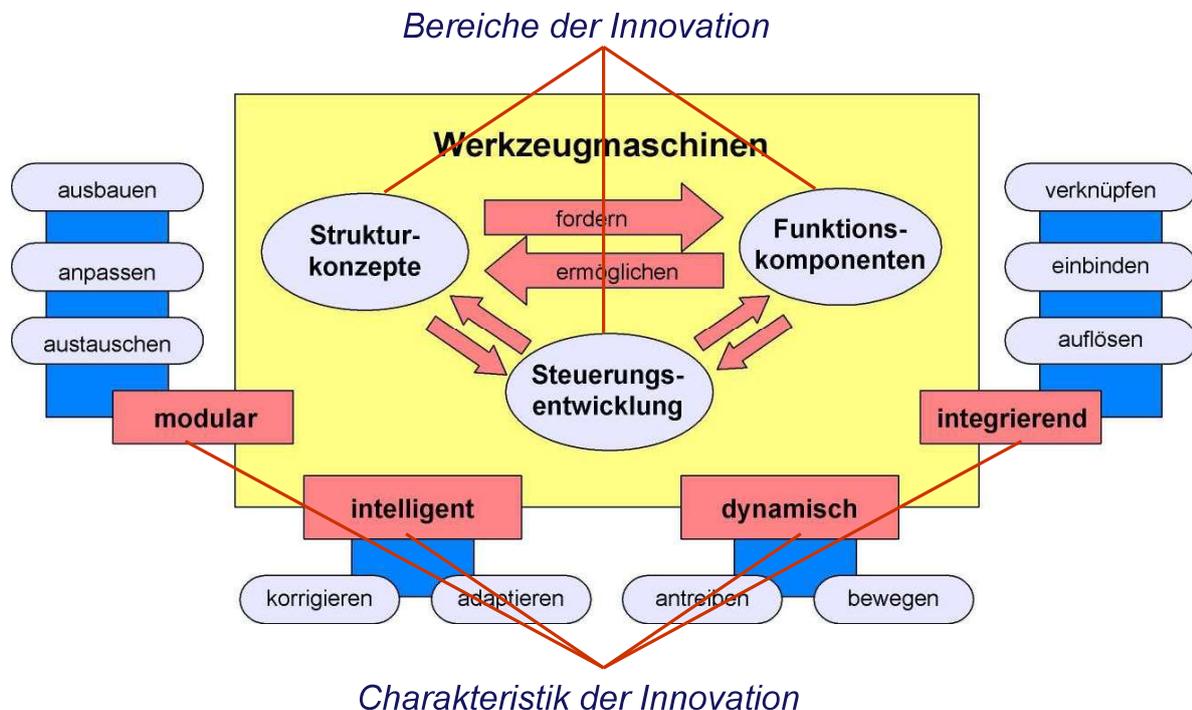


Bild 1.43 Bereiche und Charakteristik von Innovationen an Werkzeugmaschinen

Dabei sind die Bereiche in bidirektionaler Abhängigkeit durch „fordern“ und „ermöglichen“ gegenseitig verbunden. Zum Beispiel *fordert* das Strukturkonzept „Parallelkinematik“ von den Funktionskomponenten „Spezialgelenke“ und von der Steuerungsentwicklung die Möglichkeit zur Programmierung des „kinematischen Modells“. Umgekehrt *ermöglicht* zum Beispiel die Funktionskomponente „Profilschienenführung“ Strukturkonzepte in „Leichtbauausführung“.

In allen drei Bereichen sind Innovationen mit den Charakteristiken *modular*, *integrierend*, *dynamisch* und *intelligent* möglich. Zur Veranschaulichung folgen nun zu allen Möglichkeiten Beispiele.

1.2.1 Innovationsbereich modular

Durch *Modularisierung* kann man das System – *ausbauen*,
 durch Nachrüstung von Modulen das Einsatzfeld erweitern, – *anpassen*,
 durch spezielle Module den Anforderungen besser entsprechen, – *austauschen* und
 durch Austausch verschlissener oder veralteter Module Produktivität sichern.

In Bild 1.44 sind dafür Beispiele angegeben.

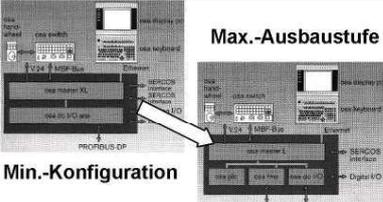
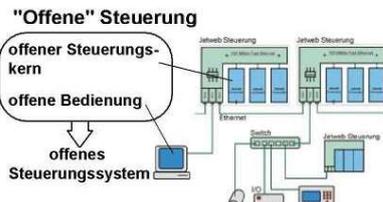
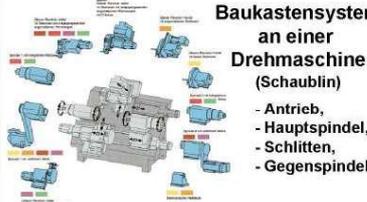
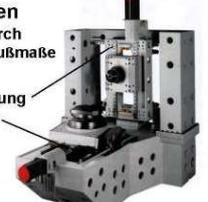
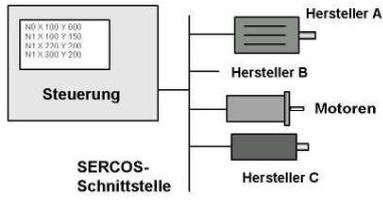
	Strukturkonzepte	Funktionskomponenten	Steuerungsentwicklung
ausbauen	 <p>Nachrüsten eines Schwenktisches (Deckel-Maho)</p>	 <p>Erweiterung des Werkzeugmagazins</p>	 <p>Max.-Ausbaustufe Min.-Konfiguration</p>
anpassen	 <p>Anpassungsmöglichkeiten einer Drehmaschine (Index)</p>	 <p>drehzahlgeregelte Servomotoren in Baureihen Anpassung der Schnitt- und Vorschubgeschwindigkeiten entsprechend den technol. Erfordernissen</p>	 <p>"Offene" Steuerung offener Steuerungskern offene Bedienung offenes Steuerungssystem</p>
austauschen	 <p>Baukastensystem an einer Drehmaschine (Schaublin)</p> <ul style="list-style-type: none"> - Antrieb, - Hauptspindel, - Schlitten, - Gegenspindel 	 <p>Achskomponenten Austauschbarkeit durch abgestimmte Anschlußmaße der Zulieferungen: Profilschienenführung Kugelgewindtrieb</p>	 <p>Steuerung SERCOS-Schnittstelle Hersteller A Hersteller B Motoren Hersteller C</p>

Bild 1.44 Entwicklungsmöglichkeiten durch Modularisierung

1.2.2 Innovationsbereich integrierend

Durch *Integration* kann man Baugruppen oder Funktionen – *verknüpfen*,
 um Synergieeffekte zu nutzen, – *einbinden*,
 um die Kompaktheit und Autonomie zu vergrößern, – *auflösen*,
 um Baugruppen oder Funktionen überflüssig zu machen.

In Bild 1.45 sind dafür Beispiele angegeben.

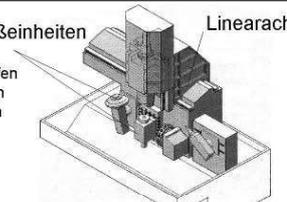
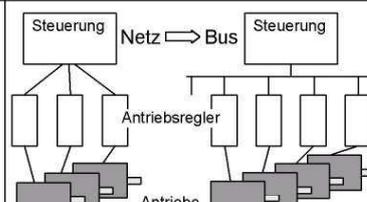
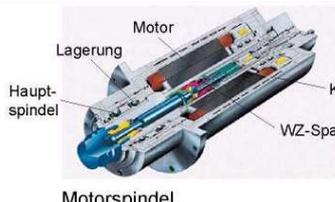
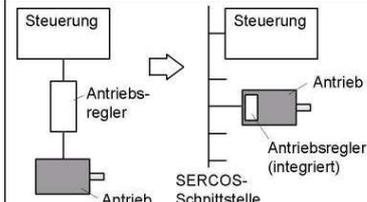
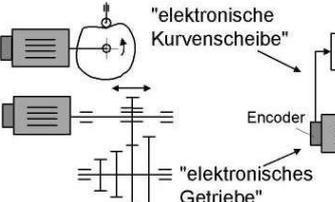
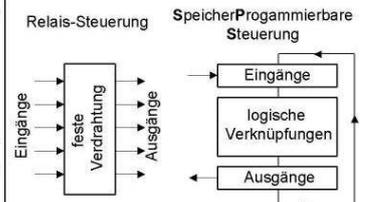
	Strukturkonzepte	Funktionskomponenten	Steuerungsentwicklung
verknüpfen	<p>Prozeßeinheiten z.B. - Schleifen - Drehen - Fräsen</p>  <p>Linearachse</p>	<p>KGT mit Mutter und Lagerpaketen</p>  <p>Führungswagen Messsystem PSF mit integriertem Wegmeßsystem</p>	 <p>Steuerung Netz Bus Steuerung Antriebsregler Antriebe</p>
einbinden	<p>angetriebene Werkzeuge eines Drehzentrums</p> 	 <p>Motorspindel</p>	 <p>Steuerung Antriebsregler Antrieb SERCOS-Schnittstelle Antriebsregler (integriert)</p>
auflösen	<p>Werkzeug-pick-up an einem Fräszentrum</p> 	 <p>Regler Encoder Motor "elektronische Kurvenscheibe" "elektronisches Getriebe"</p>	 <p>Relais-Steuerung Speicherprogrammierbare Steuerung Eingänge feste Verdrahtung Ausgänge Eingänge logische Verknüpfungen Ausgänge</p>

Bild 1.45 Entwicklungsmöglichkeiten durch Integration

1.2.3 Innovationsbereich dynamisch

Die *Dynamik* der bewegten Baugruppen kann gesteigert werden, durch – *antreiben*,
indem die effektive Antriebskraft gesteigert wird, – *bewegen*,
indem die Bewegungssysteme optimiert werden.

In Bild 1.46 sind dafür Beispiele angegeben.

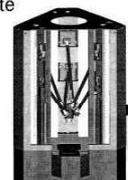
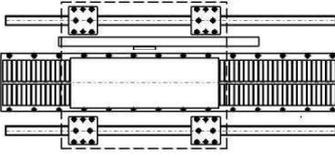
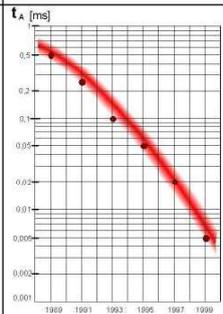
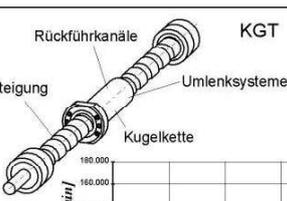
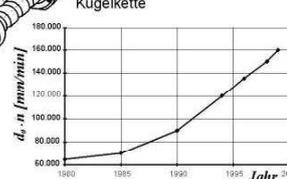
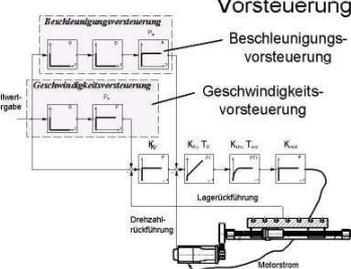
	Strukturkonzepte	Funktionskomponenten	Steuerungsentwicklung
antreiben	<p>bewegte Gelenkfußpunkte (Linapod)</p>  <p>Linearmotorstrukturen</p>  <p>Gantry-Achsen (Maho)</p>	<p>K_v bis 300 s^{-1} v bis 250 m/min a bis 80 m/s^2</p>  <p>Linearmotor</p>	 <p>t_A [ms]</p> <p>Tastzeit des Regelantriebs</p>
bewegen	<p>Minimierung der bewegten Masse (Parallelkinematik Hexact)</p> 	<p>Rückführkanäle KGT</p>   <p>d_n [mm/min]</p> <p>Jahr</p>	<p>Look Ahead Vorsteuerung</p>  <p>Erregungsverstärkung Beschleunigungsvorsteuerung Geschwindigkeitsvorsteuerung Lagerückführung Drehzahlrückführung Motorstrom</p>

Bild 1.46 Entwicklungsmöglichkeiten durch Dynamik

1.2.4 Innovationsbereich intelligent

Mit der Implementation von *Intelligenz* in Systemen oder Teilsystemen kann durch zustandsabhängiges
 – *korrigieren*,
 die Genauigkeit erhöht werden, – *adaptieren*,
 unter veränderlichen Bedingungen die Effizienz gesichert werden.

In Bild 1.47 sind dafür Beispiele angegeben.

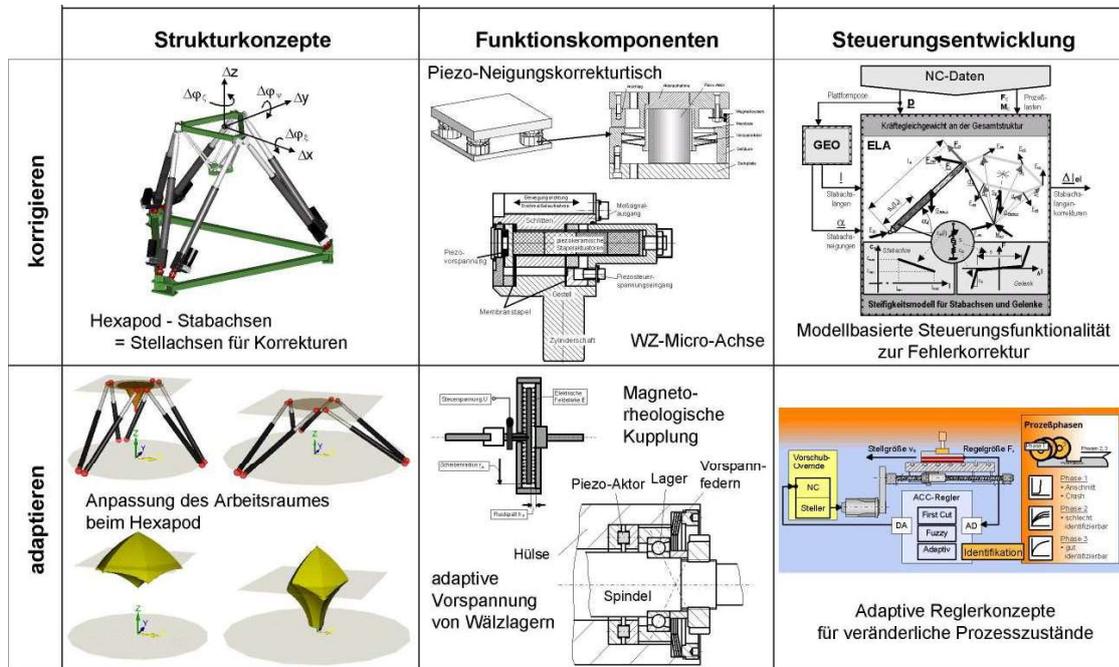


Bild 1.47 Entwicklungsmöglichkeiten durch Intelligenz

1.3 Zur Geschichte der Entwicklungswerkzeuge

Wir wollen unter den Entwicklungswerkzeugen alles verstehen, was im KEP von WZM eingesetzt wurde und wird, Informationsträger und -verarbeitungstechnik, Experimentalausstattung und -methoden, Theorien und Techniken.

1.3.1 Der Weg zum Papier

Obwohl vor der „Papierzeit“ keine konstruktive Entwicklung von Werkzeugmaschinen im eigentlichen Sinn stattfand, so ist es dennoch interessant den Weg zum Papier zu verfolgen, um die Konsequenzen für die Arbeit an Entwicklungsvorgängen aufzuzeigen. Der Fiedelbohrer von Bild 1.2 ist auf *Stein* gemalt. Das Bild stellt ein Produktionsinstrument dar und zeigt gleichzeitig den Gebrauch, eine Art Produktdokumentation. Die Verbreitung dieser Dokumentation hat sich mit Sicherheit schwierig gestaltet. Der im 4. Jahrtausend v.Chr. auf den Stein folgende Informationsträger *Tontafel* konnte zwar in gewissen Grenzen verbreitet werden, war aber infolge der geringen Abmessungen und der Form des Griffels vor allem für Keilschrifttexte in Anwendung, wie Bild 1.48 zeigt.



Bild 1.48 Tontafel, ca. 2400 v.Chr., Mesopotamien

Auf die Tontafel folgte in Ägypten ab dem 3. Jahrtausend v.Chr. der *Papyrus*. Damit war ein Informationsträger gefunden, der relativ preiswert, in großen Formaten, zum Beispiel als Rolle, herstellbar, von geringem Gewicht und damit ohne Schwierigkeiten transportierbar sowie beliebig mit Pinsel beschreib- und bemalbar war. Wegen des relativ geringen Preises konnten auch Kopien von einem Blatt oder einer Rolle angefertigt werden und zur koordinierten Ausführung eines Vorhabens

verteilt oder in Bibliotheken aufbewahrt werden. Bild 1.49 zeigt ein solches Papyrus mit mathematischen Aufzeichnungen zum Schrägungswinkel der Pyramiden.

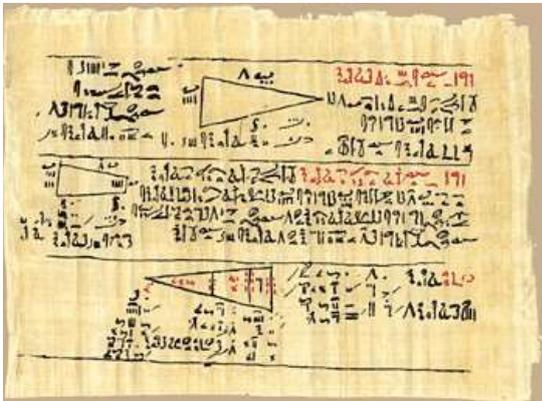


Bild 1.49 Papyrus, ca. 2000 v.Chr., Ägypten

Aufgrund der genannten Eigenschaften wurden Papyri bis ins Mittelalter verwendet, obwohl seit etwa dem 2. Jahrhundert v.Chr. in Griechenland das viel glattere, festere und beständigere, aber leider auch wesentlich teurere, aus Tierhäuten gefertigte *Pergament* in Gebrauch war.

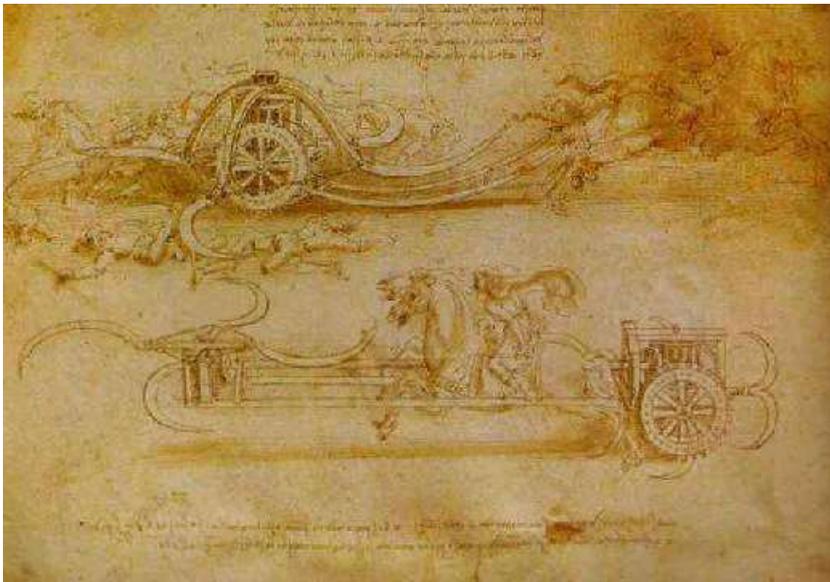


Bild 1.50 Pergament (Leonardo Da Vinci)

Zum Beispiel führte Leonardo Da Vinci neben seinen Anatomiedarstellungen seine Vielzahl an Konstruktionszeichnungen auf Pergament aus, Bild 1.50. Für die Produktion unter den Bedingungen des Handwerks reichte ein Zeichnungsexemplar. Was darauf nicht zu erkennen

oder nicht zu deuten war, wurde zwischen Konstrukteur und Handwerksmeister mündlich geklärt.

Das etwa im 2. Jahrhundert v.Chr. in China erfundene *Papier* kam über Asien und die arabische Welt nach Europa. Hier wurde es weiterentwickelt und die Herstellung mechanisiert. Die Massenproduktion von Papier ist in Europa seit dem 13. Jahrhundert belegt. Im

14. Jahrhundert trat das Papier seinen Siegeszug als Informationsträger an. Der Buchdruck und die Verbreitung von Wissen in zuvor unbekanntem Ausmaß wären ohne Papier nicht möglich gewesen. Die kostengünstige Verfügbarkeit von Papier hat vor allem die Organisationsabläufe, den Informationsaustausch und die -speicherung revolutioniert und über Jahrhunderte geprägt, so auch den KEP von WZM. Das Papier war zum universellen und einzigen Informationsträger geworden.

1.3.2 Mit Rechenschieber und Reißbrett

Als die ersten Werkzeugmaschinen in England konstruiert wurden gab es bereits vier Jahrhunderte Papier. Mit der Dampfmaschine hatte sich der Maschinenbau etabliert. In Europa waren in der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts Technische Lehranstalten gegründet worden. Es gab Lehrstühle für Konstruktionslehre, damit waren die Fertigungszeichnung und die Regeln dazu schon entwickelt. Die Konstruktion der Baugruppen bis zu den Einzelteilen für die Fertigung, die Zusammenstellung für die Montage, alles wurde in Zeichnungen auf Papier festgehalten. Stücklisten und Zeichnungsnummern gaben Auskunft, welches Teil zu welcher Baugruppe und welche Baugruppe zu welcher Maschine gehörten. Die Zeichnungen wurden am *Reißbrett* erstellt, Bild 1.51, und in der Pauserei vervielfältigt, um in der Produktion verteilt zu werden.



Bild 1.51 Konstrukteure am Reißbrett, 1926, Bosch

Auch der *Rechenschieber* war seit Mitte des 17. Jahrhunderts bekannt und bis in die 70iger Jahre des 20. Jahrhunderts das Arbeitsmittel der Ingenieure für die Berechnungen, Bild 1.52.

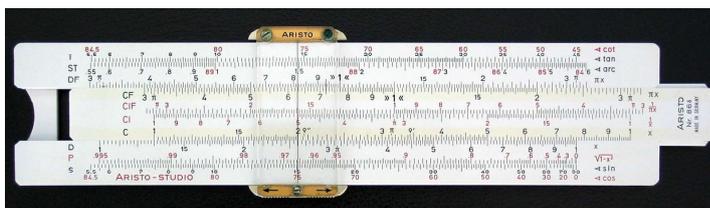


Bild 1.52 Rechenschieber

Die Berechnungen im Umfeld der Werkzeugmaschinenkonstruktion in der Zeit vor dem Digitalrechner beschränkten sich hauptsächlich auf die Auslegung der Funktionskomponenten, wie Antrieb, Getriebe, Hauptspindel, Lagerungen,

Führungen und Gestellbauteile. Die Auslegungsgrundlagen waren unterschiedlich aufbereitet und gesichert. Die, den Berechnungen zugrunde liegenden, Modelle mussten bewusst vereinfacht werden, um sie der Berechnung mit dem Rechenschieber und Tabellenwerken zugänglich zu machen. Das erforderte häufig, dass nur die Haupteinflüsse berücksichtigt werden konnten oder nichtlineare Abhängigkeiten im Arbeitspunkt linearisiert werden mussten. Diese Vereinfachungen fanden bewusst statt und setzten die Kenntnis der physikalischen Verhältnisse und die Gültigkeitsbereiche der damit gewonnenen Ergebnisse voraus.

Für Elektromotoren, Verzahnungsgetriebe und Lagerungen existierten Auslegungshilfen in Form von Formeln und Beiwerten, Tabellen und Monogrammen und von den spezialisierten Komponentenherstellern wurden diese Informationen zumeist in ihre Kataloge aufgenommen. Für Komponenten oder Werkstoffe zu denen keine Berechnungsgrundlagen oder –parameter existierten, wurden experimentelle Untersuchungen durchgeführt. So untersuchten beispielsweise Werkzeugmaschineninstitute der Technischen Hochschulen Gleitbahnbeläge und -öle, um Belastungs- und Verschleißbeiwerte für die Auslegung hydrodynamischer Gleitführungen zu ermitteln. Im Zuge der Entwicklung hydrostatischer Gleitführungen, hydraulischer Linearantriebe, Spann- und Kopiersysteme etablierte sich an den meisten WZM-Instituten die Hydraulik als eigenständige Forschungsdisziplin. Die Gestellbauteile spanender WZM werden nach Steifigkeit ausgelegt. Dazu wurden die Querschnitte der Bauteile entsprechend vereinfacht und einfache Balkenstrukturen für die Verformungsberechnung verwendet.

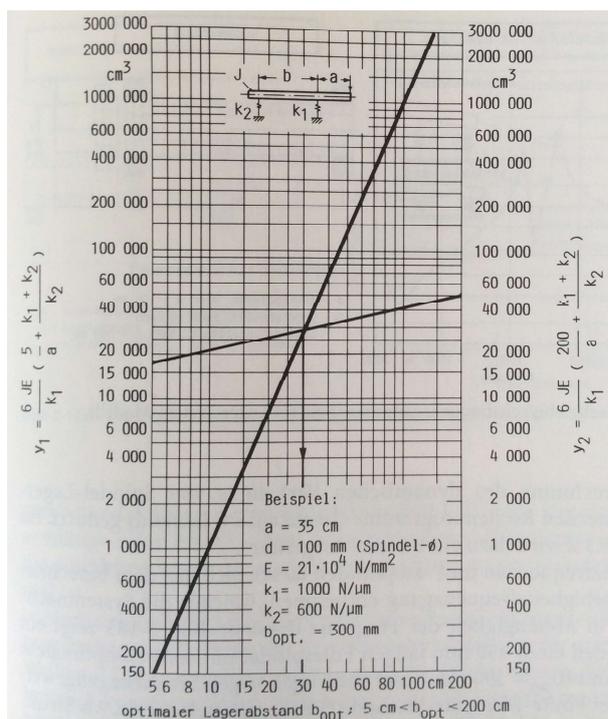


Bild 1.53 Nomogramm zur Ermittlung des optimalen Lagerabstandes [3]

Das Paradebeispiel für eine Auslegungsoptimierung aus Zeit vor dem Digitalrechner ist der „Optimale Lagerabstand“ an Hauptspindeln. Die statische Nachgiebigkeit an der Hauptspindelnahe setzt sich zusammen aus der Nachgiebigkeit der Lagerung und der der Spindelbiegung. Während der Lageranteil mit dem Lagerabstand sinkt, vergrößert sich der Biegeanteil. Daraus lässt sich eine Extremwertaufgabe formulieren. Die erste Ableitung der Gesamtnachgiebigkeit nach dem Lagerabstand ergibt eine Beziehung, in der der Lagerabstand in der dritten und der ersten Potenz vorkommt.

Bild 1.53 zeigt ein Nomogramm zur grafischen Bestimmung des optimalen Lagerabstandes.

1.3.3 Prototyp und Nullserie

Seit Werkzeugmaschinen in Serie produziert wurden, war es bis zur effektiven Rechnerunterstützung des Entwicklungsprozess üblich, dass vor der Serienproduktion erst ein Prototyp gebaut und eine Nullserie aufgelegt wurde. Die WZM-Hersteller besaßen für den Bau und die Untersuchung des Prototyps gewöhnlich eine eigene Abteilung, den *Musterbau*. Bild 1.54 zeigt schematisch die Phasen des KEP und die Rolle des Prototyps.

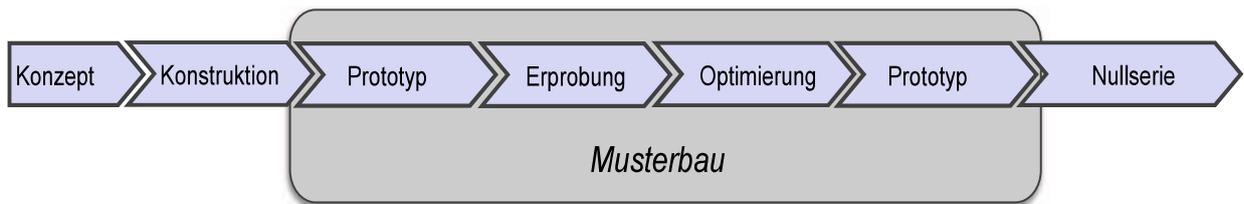


Bild 1.54 Phasen des traditionellen KEP

Der Bau des Prototyps diente vor allem fertigungs- und montagetechnischen Überprüfungen. Für die Einzelteillfertigung wurden die von der Abteilung Technologie erstellten Dokumente für die Arbeitsvorbereitung – Maschinen- und Werkzeugauswahl sowie Fertigungsfolge und -hilfsmittel – in der Fertigung überprüft, wenn nötig korrigiert und nach Möglichkeit optimiert. Die von den Zulieferern bestellten und im Wareneingang befindlichen Beschaffungen wurden von der Abteilung Qualitätskontrolle geprüft und vom Musterbau verbaut. In der anschließenden Baugruppenmontage im Musterbau erfolgte die Überprüfung der Montagefähigkeit der Einzelteile und Untergruppen sowie die Realisierung gegebenenfalls benötigter Montagehilfen. Dann wurden die Baugruppen hinsichtlich Funktionserfüllung und Verhalten messtechnisch untersucht. Wenn nötig entstanden dabei auch Prüfstände und -vorrichtungen sowie Vorgaben für die Baugruppenabnahme in der späteren Serienfertigung. Danach wurden die geprüften Baugruppen zum kompletten Prototyp montiert.

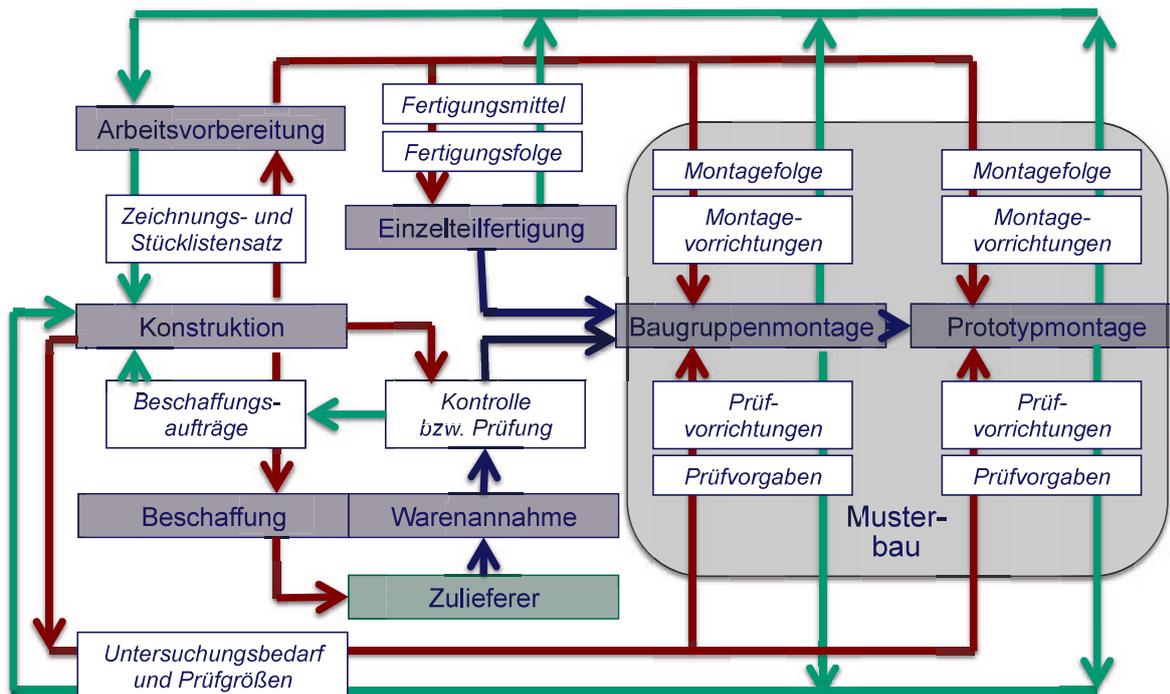


Bild 1.55 Informations- (rot, grün) und Objektflüsse (blau) bei Prototypbau und -untersuchung

Auch dabei wurden Montagefähigkeit und -reihenfolge geprüft, erprobt und optimiert und es entstanden dafür erforderliche Hilfsmittel, Vorrichtungen und Prüfvorgaben. Bild 1.55 stellt schematisch den Ablauf beim Bau und der Untersuchung des Prototypen dar.

Wenn der Prototyp optimiert war, alle Vorgaben erfüllt und die Unterlagen entsprechend aktualisiert waren, konnte die Nullserie aufgelegt werden. Diese umfasste gewöhnlich drei bis

fünf Maschinen. Die Aufgabe der Nullserie war es, die Organisation der Serienproduktion zu erproben und zu optimieren. Dazu wurden die Fachkräfte der Montage von den „Musterbauern“ eingearbeitet und organisierten gemeinsam mit ihnen die Teams für die Baugruppen- und Gesamtmontage, den Materialfluss, die Abnahmeprüfungen und die Montagevorrichtungen.

1.3.4 Ziel Konstrukteursarbeitsplatz?

Die Ära der Rechnerunterstützung für die Ingenieure begann eigentlich mit dem *Analogrechner*. Der Rechenschieber war zwar bereits ein mechanischer Analogrechner, mit dem jedoch hauptsächlich Multiplikations- und Divisionsoperationen ausgeführt wurden und keine Differentialgleichungen gelöst werden konnten. Dafür war der, seit Ende der 1950er Jahre in Anwendung befindliche, elektrische Analogrechner (Bild 1.56) prädestiniert. Er konnte mit seinen Rechenelementen, wie Integrierer, Multiplizierer, Summatoren, Koeffizientenpotentiometer, seinem Steckerfeld zum Verknüpfen der Elemente entsprechend der Struktur des Differentialgleichungssystems und seinen grafischen Ausgabegeräten nicht nur mechanische Schwingungsprobleme lösen, sondern auch Strömungs- und Temperaturfeldprobleme. Allerdings war der Analogrechner vorrangig in den WZM-Instituten im Einsatz. Ähnlich sah es mit den zu Beginn der 1960er Jahre an den Hochschulen installierten, digitalen *Großrechnern* aus.

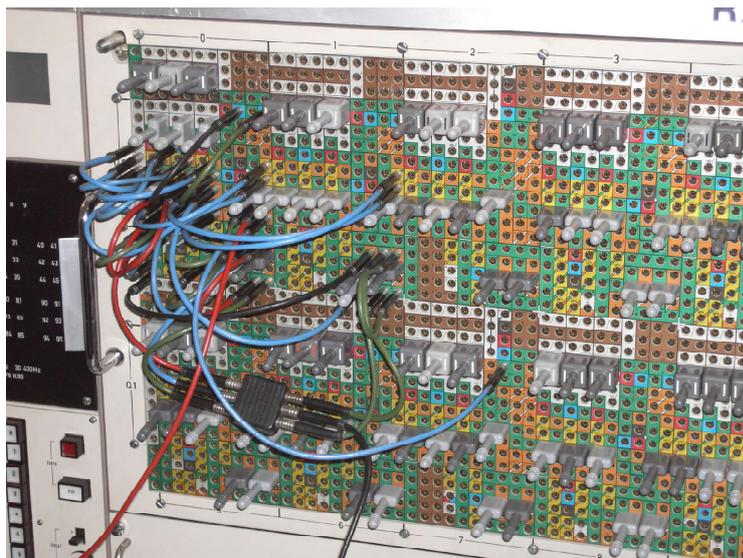


Bild 1.56 Steckerfeld Analogrechner Telefunken RA 770, 1966

Selbst als die WZM-Hersteller gegen Ende der 1960er Jahre über eigene Großrechner verfügten, nutzten sie diese hauptsächlich für Lohnrechnungen, zur Materialverwaltung und Beschaffung sowie zur Kommissionierung für die Produktionssteuerung. Bei den Konstrukteuren kam die Rechnerunterstützung mit Beginn der 1970er Jahre zuerst in

Form des Taschenrechner an. Der war zunächst nicht programmierbar, sodass die Nutzer jede auszuführende Operation eintippen mussten. Auch als Ende der 1970er Jahre programmierbare *Bürocomputer* (Bild 1.57) – auch als Kleinrechner bezeichnet – in die Konstruktionsabteilungen kamen, konnte man bei Weitem noch nicht von rechnerunterstützter Konstruktion sprechen.



Bild 1.57 Bürocomputer, Commodore, 1979

Als Nadelöhr erwiesen sich die fehlenden Programme für Auslegungs- und Verhaltensberechnungen sowie

für grafische Darstellungen. An den führenden WZM-Instituten begann man an Bürocomputerprogrammen für die Auslegung von Lagern, Führungen, Getrieben und Hauptspindeln zu arbeiten. Diese Programme wurden mit mehr oder weniger Erfolg den WZM-Herstellern angeboten. Während der 1980er Jahre entstanden in mehreren Dissertationen, neben den Auslegungsprogrammen für die Komponenten, einfache Programme zur statischen und dynamischen Verformungsanalyse an Biegebalken, die zusammengefasst zu Programm- und Datensystemen den rechnerunterstützten *Konstrukteursarbeitsplatz*, hardwareseitig bestehend aus Bürocomputer und Tischplotter, bildeten. Diese Jahre waren einerseits geprägt von der Verkündung des rechnerunterstützten Konstruktionsprozess der Werkzeugmaschinen (CAD = Computer Aided Design) und der Erforschung der Möglichkeiten durch die Wissenschaft. Andererseits wurde in der Konstruktion der WZM-Hersteller mangels kommerzieller Software weitestgehend weitergearbeitet, als gäbe es keine Rechner. Der Konstrukteursarbeitsplatz blieb ein Forschungsprojekt.

1.3.5 CAD und FEM

Hier in Kürze die Geschichte von *Computer Aided Design* (CAD) und *Finite Element Methode* (FEM) darzustellen, kann nur rudimentär gelingen. Eine ausführliche Darstellung findet man z.B. in [5]. Wir wollen deshalb mehr auf die durch den Einsatz von CAD und FEM veränderten Bedingungen beim KEP von WZM eingehen. Die theoretischen Wurzeln der FEM gehen auf die Jahre um 1900 zurück und sind beispielsweise mit Namen, wie *Rayleigh*, *Ritz* und *Galerkin* verbunden. Numerisch für den Digitalrechnereinsatz aufbereitet wurden die Algorithmen in den 1950er Jahren. Damit sind, vor allem wegen ihrer hervorragenden Publikationen, Namen, wie zum Beispiel *Argyris*, *Clough* und *Zienkiewicz* verknüpft. Die ersten Anwendungen der FEM fanden auf Großrechnern für den Flugzeug- und Automobilbau Mitte der 1960er Jahre statt. Für die CAD-Systeme mussten zunächst zwei Voraussetzungen geschaffen werden. Zum Einen betraf das die theoretischen Grundlagen der grafischen Darstellung auf Digitalrechnern.

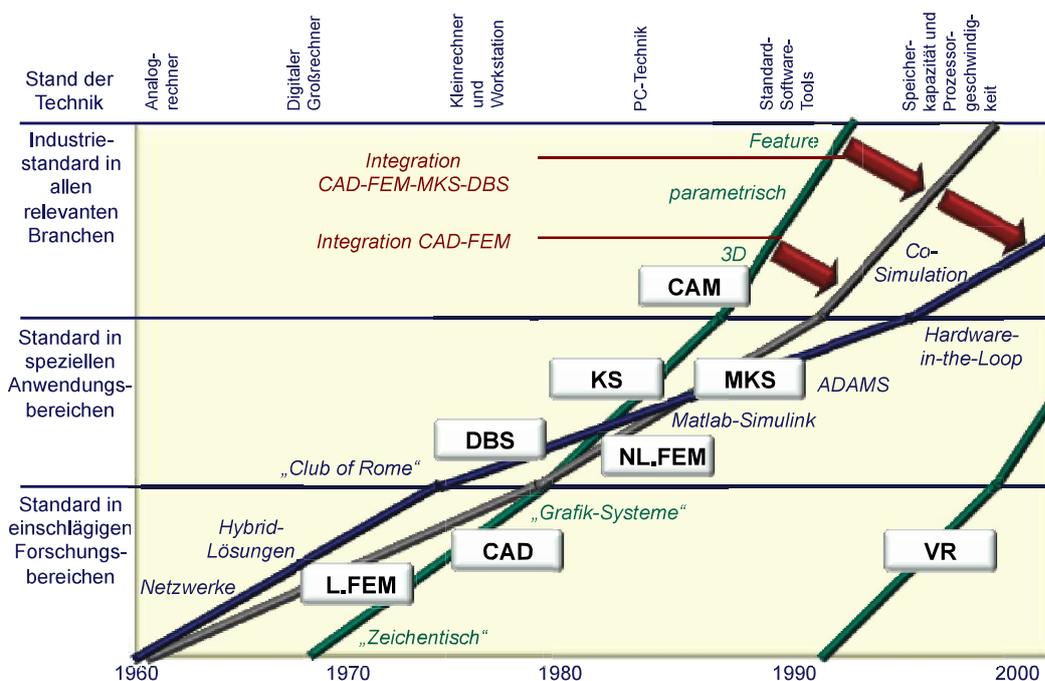


Bild 1.58 Entwicklung kommerzieller Konstruktions- und Berechnungssoftware

- L.FEM Lineare Finite Elemente Methode
- CAD Computer Aided Design
- CAM Computer Aided Manufacture
- NL.FEM Nichtlineare Finite Element Methode
- DBS Digitale Blocksimulation
- VR Virtual Reality
- MKS Mehrkörpersimulation
- KS Kinematiksimulation

Dazu entwickelte sich in den 1950iger Jahren die Computergrafik als Forschungsdisziplin. Zum Anderen setzte die Darstellungsmöglichkeit grafischer Elemente auf dem Bildschirm oder dem Drucker eine entsprechende Grafikhardware voraus. Die ersten kommerziell verfügbaren CAD- und FEM-Systeme entstanden Mitte bis Ende der 1960iger Jahre und liefen ausschließlich auf Großrechnern. Auch damit war keine ernst zu nehmende Rechnerunterstützung der Konstruktion möglich.

Die Großrechner wurden zumeist im Jobbetrieb gefahren. Das heißt, die Jobs – eine Rolle Lochstreifen oder ein Stapel Lochkarten und ein Zettel mit Anweisungen für den Operator – wurden abgegeben und nach einer Bearbeitungszeit holte man seine Ergebnisse ab. Diese Bearbeitungszeit konnte je nach Priorität einen Tag, aber auch eine Woche dauern. Da die Jobs, die mit der Produktionsorganisation oder Fertigungsvorbereitung zu tun hatten, höchste Priorität bekamen, konnte die Konstruktion schon mal ein paar Tage warten. Die Eigenentwicklung von Anwendungsprogrammen war unter solchen Bedingungen praktisch unmöglich und konnte, wenn überhaupt, nur an den Hochschulen stattfinden. Auch die, dieses Manko vermeidenden, CAD-Komplettsysteme aus Hard- und Software – ein zentraler Großrechner und in der Konstruktionsabteilung mehrere Terminals auf Kleinrechnerbasis – konnten sich nur wenige große Unternehmen leisten. Der Preis war gigantisch, die Umstellungszeit zu lang, die erforderliche Qualifikation nicht vorhanden und die Systeme noch nicht ausgereift. Die Situation begann sich Mitte der 1980iger Jahre zu ändern, als die Großrechner langsam von Workstations abgelöst wurden und die AutoCAD-Software erschien. Die 1990iger Jahre verschafften dann auf Basis der Personalcomputer und grafischer Benutzeroberflächen den CAD- und FEM-Anwendungen den Durchbruch als Standardwerkzeuge im KEP. Bild 1.58 gibt einen Überblick zur Entwicklung der im KEP verwendeten Berechnungs- und Entwurfssoftware.

1.3.6 PC und Standardsoftware

In den 1990iger Jahre tauschten die Konstruktionsabteilungen ihre Reißbretter gegen *Personalcomputer* (PC) ein, Bild 1.59. Dabei gab es, vor allem von den älteren Konstrukteuren, Unverständnis bis Widerstand, sollten sie doch auf ihr wichtigstes Arbeitsmittel, die „Zeichenmaschine“, verzichten und mehr noch, auf ihre Erfahrung und Routine mit den papiergebundenen Abläufen. Sie befürchteten, dass die „Frischlinge“ ihnen, als „alte Hasen“, etwas vormachen würden. Tatsächlich dauerte es gewöhnlich 3 bis 5 Jahre, ehe sich die Vorteile der rechnerunterstützten Arbeitsweise vollständig zeigten und sich die Konstrukteurs-erfahrung auch im neuen Umfeld bewährte.



Bild 1.59 Konstrukteure am PC, 2002, Munz

Nun hatte jeder Konstrukteur sein Textverarbeitungs-, Tabellenkalkulations-, FEM- und CAD-Programm als Standardsoftware an seinem Arbeitsplatz. Was so einfach klingt, stellte in der Praxis einen enormen Aufwand dar und glich mit den Konsequenzen einer Revolution. Die funktionierenden Organisationsabläufe und -regeln für den Informationsträger Papier mussten „über Nacht“ ersetzt werden. Doch es gab noch keine, die Anforderungen der Informationsverwaltung einer Serienproduktion, mit Änderungsdienst, Bauabweichungen, Sonderausführungen, Serienfreigabe, ..., erfüllende Software. Um nicht im Datenchaos unterzugehen, wurden die Organisationsprinzipien und -regeln einfach vom Papier auf den Computer übertragen. Ungefähr für ein halbes Jahrzehnt wurde eine „Übergangsarbeitsweise“ praktiziert, in der die Papierbestände zwar nach und nach digitalisiert wurden, aber weiter gepflegt werden mussten. Die Vorteile der Rechnerunterstützung konnten für die neu generierten CAD-Daten so nicht voll ausgeschöpft werden. Im Zuge des „Rechnereinzugs“ in die Konstruktionsabteilungen kam häufig ein hausgemachtes Problem hinzu. Die älteren, erfahrenen Konstrukteure taten sich schwerer mit der neuen Technik als die jungen, mit dem PC Versierten. Nicht selten bot man den Älteren Ruhestandsregelungen an und stellte Absolventen ein. Diese hatten jedoch nicht nur keine Konstruktionserfahrung, sondern waren mit FEM-Programmen, statt mit Querschnittswerten und Balkenbiegung, „groß“ geworden. Sie hatten demzufolge zum Beispiel kein „Gespür“ für die Steifigkeitswirkung einer Rippengestaltung oder die Auswirkungen der Last- und Randbedingungswahl bei einem FE-Modell und waren zudem „computergläubig“. Das heißt, sie vertrauten unkritisch jedem Ergebnis, da ihnen die Fähigkeiten des „Überschlags“ und der Schätzung abhanden gekommen waren. Es brauchte Zeit, ehe die Umstellung abgeschlossen war und sich die neuen Abläufe und Möglichkeiten etabliert hatten. Als die CAD-Systeme dreidimensional, parametrisch und featurebasiert und CAD-Daten automatisch für die FEM-Berechnung vernetzt wurden, zahlte sich die Rechnerunterstützung auch praktisch nicht nur im Zeit- sondern auch im Qualitätsgewinn aus.

1.3.7 Maschinenuntersuchung und Abnahmewerkstück

Die messtechnische Untersuchung der Werkzeugmaschinen kann aus verschiedenen Gründen, an verschiedenen Orten und in verschiedenem Umfang erfolgen. Aber irgendwie geht es am Ende immer um die Bewertung des Leistungsvermögens, der Arbeitsgenauigkeit, der Zuverlässigkeit oder der Umweltverträglichkeit. Tabelle 1.2 gibt dazu einige Beispiele. Die Maschinenuntersuchungen beim Hersteller verfolgen nicht nur das Ziel, die Einhaltung der Fertigungs- und Montagevorgaben oder bestimmter Eigenschafts- und Verhaltensgrößen zu prüfen, sie dienen auch dazu Schwachstellen der Konstruktion aufzudecken und sind damit ein wichtiges Entwicklungswerkzeug.

	Leistungsvermögen	Arbeitsgenauigkeit	Zuverlässigkeit	Umweltverträglichkeit
in der Montage beim Hersteller	Funktionsprüfung: z.B. Hauptspindel (Drehzahl, Moment, nutzbare Leistung), z.B. Werkzeugspannung (Haltekraft)	Geometrisch-kinematisches Verhalten: z.B. Hauptspindel (Rundlauf, Axialschlag), z.B. Werkzeugspannung (Einzugsgenauigkeit)	Reproduzierbarkeit: z.B. Werkzeugwechsler (Dauerprüfstand) Wiederanlaufverhalten nach Störung: z.B. Steuerung (Not-Aus-Test)	Geräuschmessung: z.B. Werkzeugwechsel Medienüberprüfung: z.B. Ölversorgung (Leckage)
bei der Abnahme vorm Kunden	Leistungsauslastung: z.B. Zerspanungsstabilität (maximale Schnittwerte am Kundenwerkstück)	Genormte Abnahmekriterien: z.B. geometrisch-kinematisches Verhalten (Positionsabweichungen) Standard- oder kundenspezifisches Abnahmewerkstück	Maschinen- und Prozessfähigkeitsermittlung an Kundenwerkstücken	
in der Produktion beim Kunden	Bei Nachrüstung oder Komponententausch: z.B. Werkstückwechsel (Funktionsprüfung)	Nach Havarie (z.B. Kollision) oder Verschlechterung der Arbeitsgenauigkeit (z.B. Verschleiß): neuen Referenzzustand		

Tabelle 1.2 Beispiele für messtechnische Maschinenuntersuchungen

Schlesinger hat 1927 mit seiner Schrift „Die Arbeitsgenauigkeit der Werkzeugmaschinen“ die Grundlagen für eine systematische Maschinenuntersuchung geschaffen, die die Basis für Normen zur Abnahme von WZM bildeten [2].

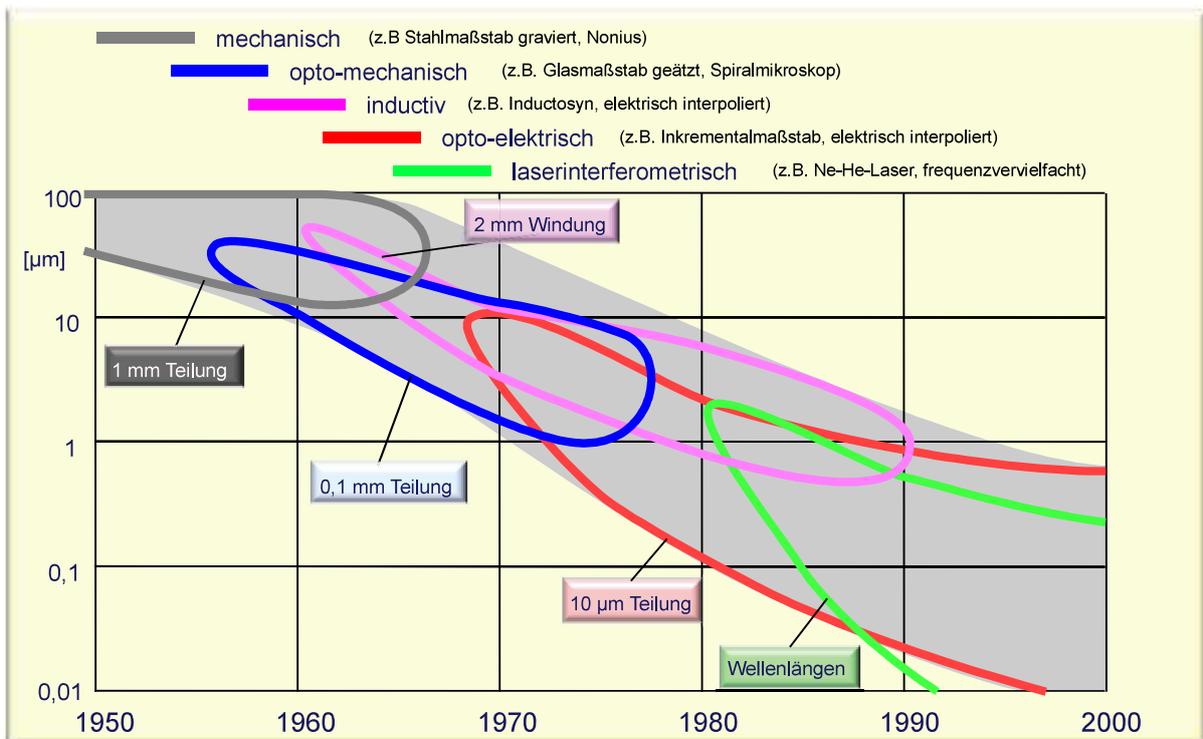


Bild 1.60 Entwicklung der Auflösung von Wegmesssystemen

Die Normung beschränkt sich jedoch in der praktischen Anwendung hauptsächlich auf die Prüfung des geometrisch-kinematischen Verhaltens, auch wenn immer wieder Versuche unternommen wurden für die anderen Verhaltensbereiche – das statische, dynamische und thermische Verhalten – Vorgehen, Kriterien und Kenngrößen zu definieren und dazu auch „Standards“ bzw. Empfehlungen existieren, die Abhängigkeiten der Größen sind zu komplex, als dass sie allgemeingültig mit wenigen Kennwerten geprüft werden könnten. Hierfür hat sich mehrheitlich das vom Kunden definierte *Prüfwerkstück* durchgesetzt, welches typische Formelemente und Prozesseinstellungen enthält, die für den Kunden interessant sind.

Natürlich hängen die Möglichkeiten und Aussagefähigkeiten messtechnischer Maschinenuntersuchungen wesentlich von den zur Verfügung stehenden Messprinzipien, -geräten und -methoden ab. Für die Erfassung geometrischer und kinematischer Fehler kamen zunächst nur Prüfnormale als Lineale, Winkel, Dorne und Prismen in Verbindung mit Messuhren bzw. Feinzeigern zur Anwendung. Zur Erfassung statischer und thermischer Verformungen wurden die zu untersuchenden Maschinen mit aufwändigen Messgestängen eingerüstet, an denen die Messuhren befestigt waren. In den 1950iger Jahren begannen die Schwingungsmessungen ein Schwerpunkt der Maschinenuntersuchungen an den WZM-Instituten zu werden und es kam vermehrt elektrische Messtechnik zum Einsatz. Zunächst durch berührungslose Relativmessungen mit kapazitiven und induktiven Aufnehmern, die als passive Sensoren über die schwingungsabhängige Änderung des Luftspalts ihre elektrischen Eigenschaften in einem Schwingkreis ändern. Gegen Ende der 1960iger Jahre begann sich dann die absolute Schwingungsmessung auf Basis des piezoelektrischen Effekts durchzusetzen. Ab den 1980iger Jahren kamen berührungslose optische Wegmessverfahren zum Einsatz. Bild 1.60 gibt am Beispiel der Wegmesssysteme einen schematischen Überblick zur Entwicklung der Auflösung.

Bild 1.61 zeigt wesentliche messtechnische Maschinenuntersuchung in der zeitlichen Einordnung ihrer erstmaligen Anwendung.

1920	1930	1940	1950	1960	1970	1980
Leistungsfähigkeit						
<i>Schnittkräfte, Werkzeugstandzeiten, Zerspanbarkeit</i>			<i>Zerspanungsstabilität Ratterkarten</i>		<i>Prüfwerkstücke</i>	<i>Fähigkeitsuntersuchung</i>
Arbeitsgenauigkeit						
<i>Geometrisch-kinematische Normen für die Abnahme</i>		<i>Schwingungsmessungen, Thermische Untersuchungen</i>		<i>Statische Schwachstellenanalyse</i>	<i>Prüfwerkstücke</i>	<i>Statistische Prüfung der Positionsgenauigkeit</i>

Bild 1.61 Zeitliche Einordnung wesentlicher Maschinenuntersuchungen

Für den KEP besonders aussagefähig sind die statische Schwachstellenanalyse sowie die Schwingungsmessungen und die thermischen Untersuchungen. Diese Untersuchungen, beispielsweise am Prototyp, geben bei entsprechender Auswertung Hinweise für die konstruktive Weiterentwicklung beziehungsweise für konstruktive Änderungen zur Einhaltung der Verhaltensvorgaben. Bild 1.62 zeigt die prinzipielle Vorgehensweise bei der experimentellen statischen Schwachstellenanalyse [4].

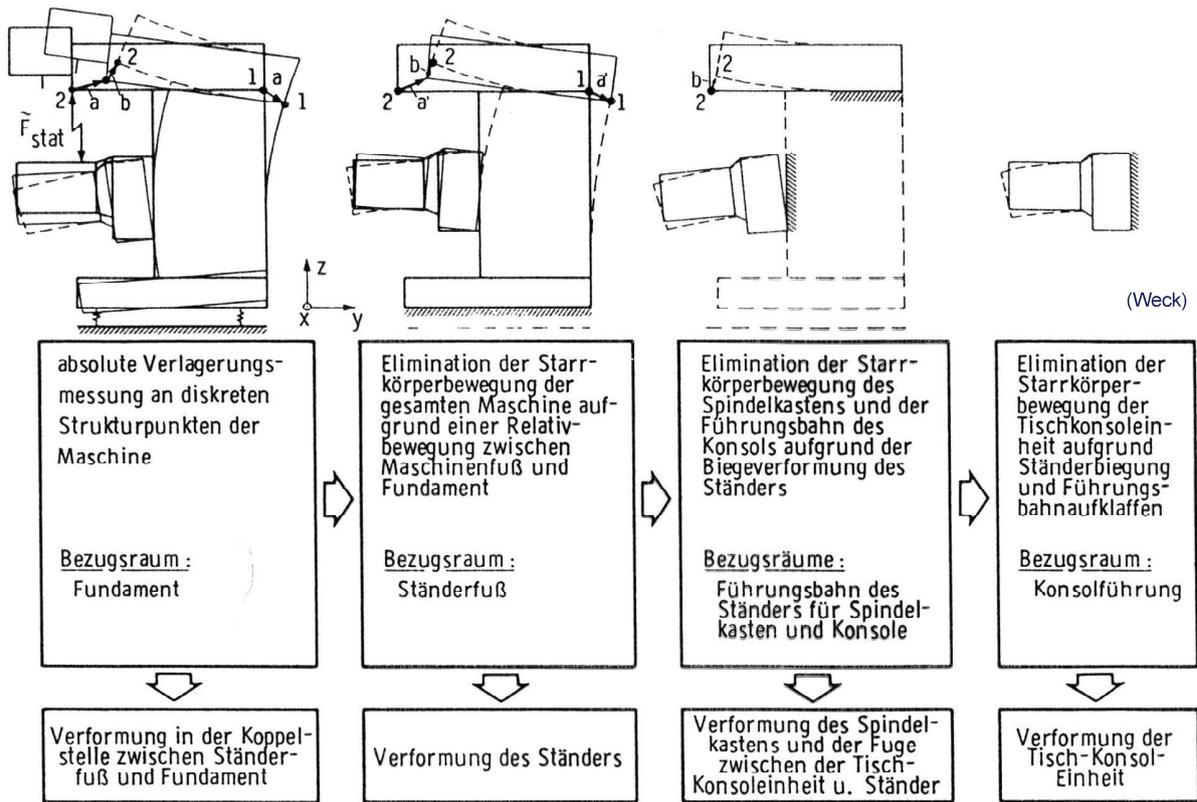


Bild 1.62 Vorgehensweise bei der experimentellen Schwachstellenanalyse [4]

Neben den von den Kunden festgelegten Abnahmewerkstücken existieren einige als Normen oder Empfehlungen definierte Prüfwerkstücke zur Ermittlung maschinentypischer Fehler. Mit Bild 1.63 sind wesentliche dieser Prüfwerkstücke zusammengestellt.



Bild 1.63 Beispiele für Standard-Prüfwerkstücke

Die Prüfwerkstücke erlauben zwar nicht in jedem Fall Einzelursachen für die am Werkstück messbaren Bearbeitungsfehler zu identifizieren, aber die Formelemente und Bearbeitungsfolgen sind so definiert, dass für die Maschinentypen weitestgehend die jeweils typischen Fehlerursachen zugeordnet werden können. Das Werkstück nach VDI 2851 ist besonders für die Abnahme von NC-Bohrmaschinen gedacht. Durch Vermessung der Bohrungsstichmaße kann zum Beispiel die Positionsgenauigkeit und Umkehrspanne der Vorschubachsen bewertet werden. Das Werkstück nach ISO 10791 ermöglicht für bahngesteuerte Fräsmaschinen beispielsweise, neben Maßabweichungen, die Ermittlung von Parallelitäts-, Rechtwinklichkeits- und Kreisformabweichungen.

1.3.8 Mit Simulation zur Virtualisierung

Bild 1.64 weist die Evolutionsstufen des Konstruierens aus [5]. Unter der Stufe „Rechnerorientierte Produktmodellierung“ finden wir Virtualisierung und Simulation unter den kennzeichnenden Merkmalen. Die Anfänge von Simulation und Virtualisierung liegen allerdings bereits in der Stufe „Rechnerunterstützte Konstruktion“. In Bild 1.64 sind die Entwicklung von Effizienz und Qualität des Konstruktionsprozesses dargestellt.

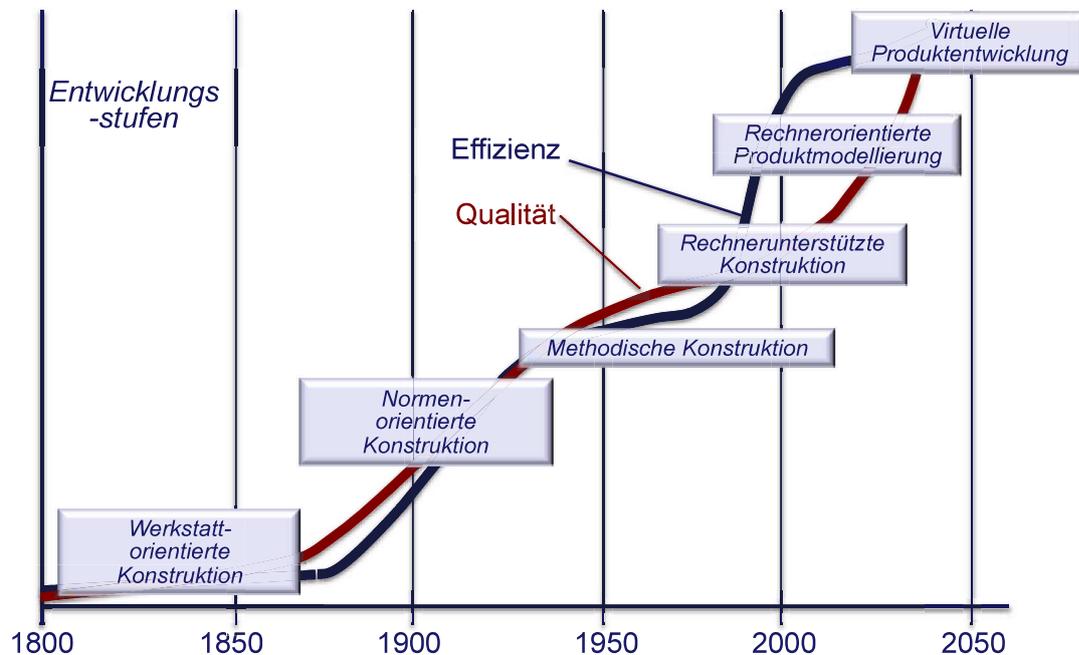


Bild 1.64 Entwicklung von Effizienz und Qualität des KEP

Es fällt auf, dass sowohl für die Effizienz als auch für die Qualität der Konstruktion durch die „Normenorientierte Konstruktion“ und die „Rechnerunterstützte Konstruktion“ die Anstiege am größten sind. Insbesondere ist der Anstieg der Effizienz in der Rechnerunterstützten Konstruktion beeindruckend. Allerdings beeinflusst die Anwendung der Simulation im KEP von Werkzeugmaschinen vorrangig die Qualität.

Simulation ist nach VDI 2013 die „Nachbildung eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierfähigen Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind“.

Es ist also nicht alles, was ein „Modell“ als „Nachbildung eines Systems“ für die Berechnung verwendet, Simulation. Das eigentliche Merkmal der Simulation findet sich in den „dynamischen Prozessen“. Der Stammbaum der Werkzeugmaschinendynamik, Bild 1.65, verdeutlicht die zentrale Stellung der Simulation für alle zeitlichen und nichtlinearen Veränderungen im Verhalten der WZM.

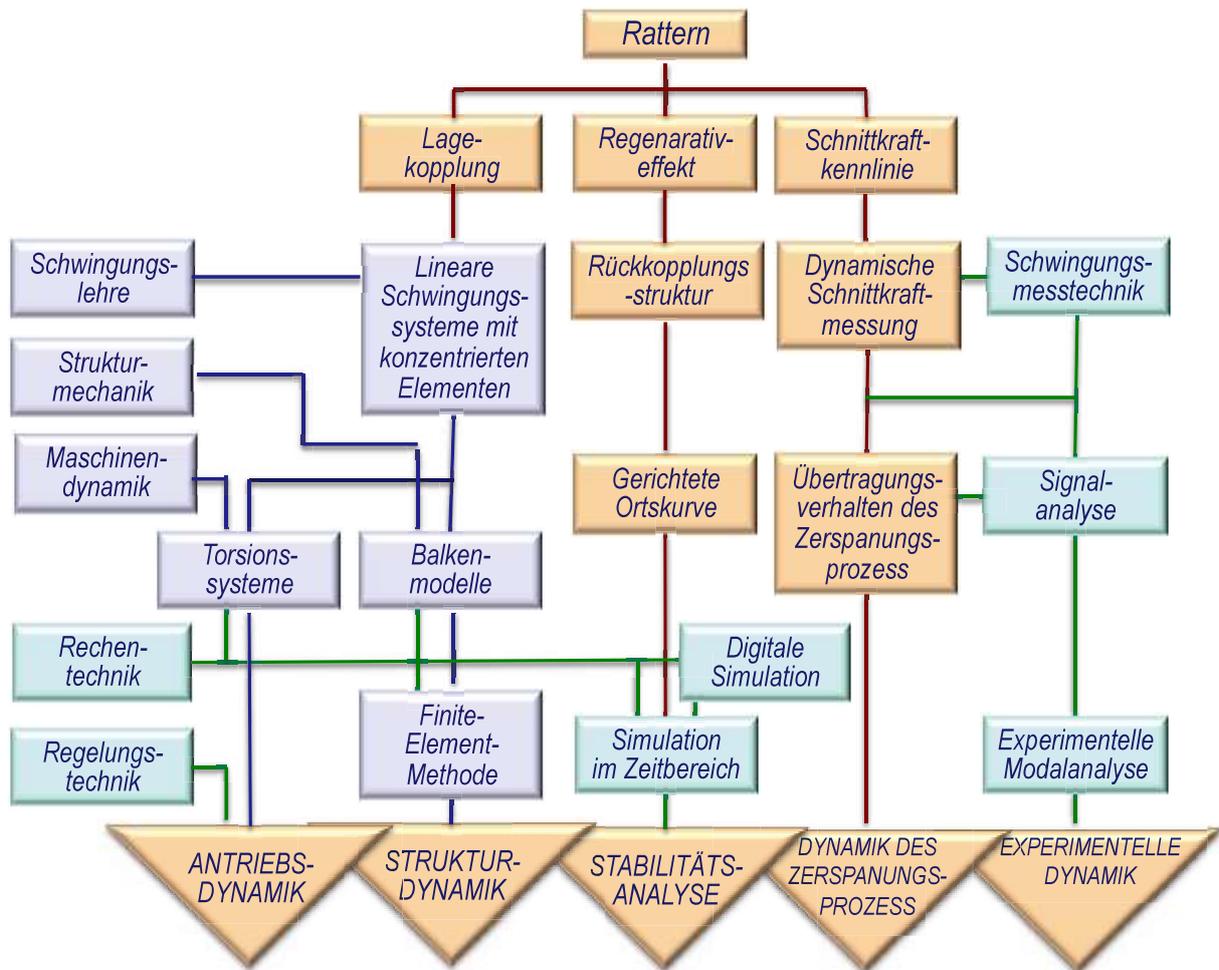


Bild 1.65 Stammbaum der Werkzeugmaschinen-dynamik

Mit Bild 1.66 sind „Spielarten“ der Simulation zusammengestellt, wobei für die Last-Verformungs-Zeit-Analyse an WZM die Mehrkörpersystem-Simulation (MKS) sowie die Digitale Blocksimulation (DBS) große Bedeutung haben. Beide Simulationsmethoden sind an leistungsfähige Rechentechnik gebunden und wurden in den späten 1960er Jahren an Forschungsinstituten für Großrechner entwickelt. In den 1990er Jahren war dann auch Simulation auf PC möglich und fand mit anwenderfreundlicher Windows-Oberfläche und kommerziell vertrieben den Weg in die Industrie. Während die MKS ausschließlich mechanische Systeme abbilden kann, ist die DBS prinzipiell für Multi-Domäne-Modelle geeignet. Da für die Dynamikanalyse von WZM in der Regel Modelle mit mechanischen, antriebs- und regelungstechnischen sowie prozessbeschreibenden Anteilen benötigt werden, ist die objektorientierte DBS vorteilhaft, gegenüber der MKS. Diese kann nur in Co-Simulation den Beschreibungsbedarf abdecken.

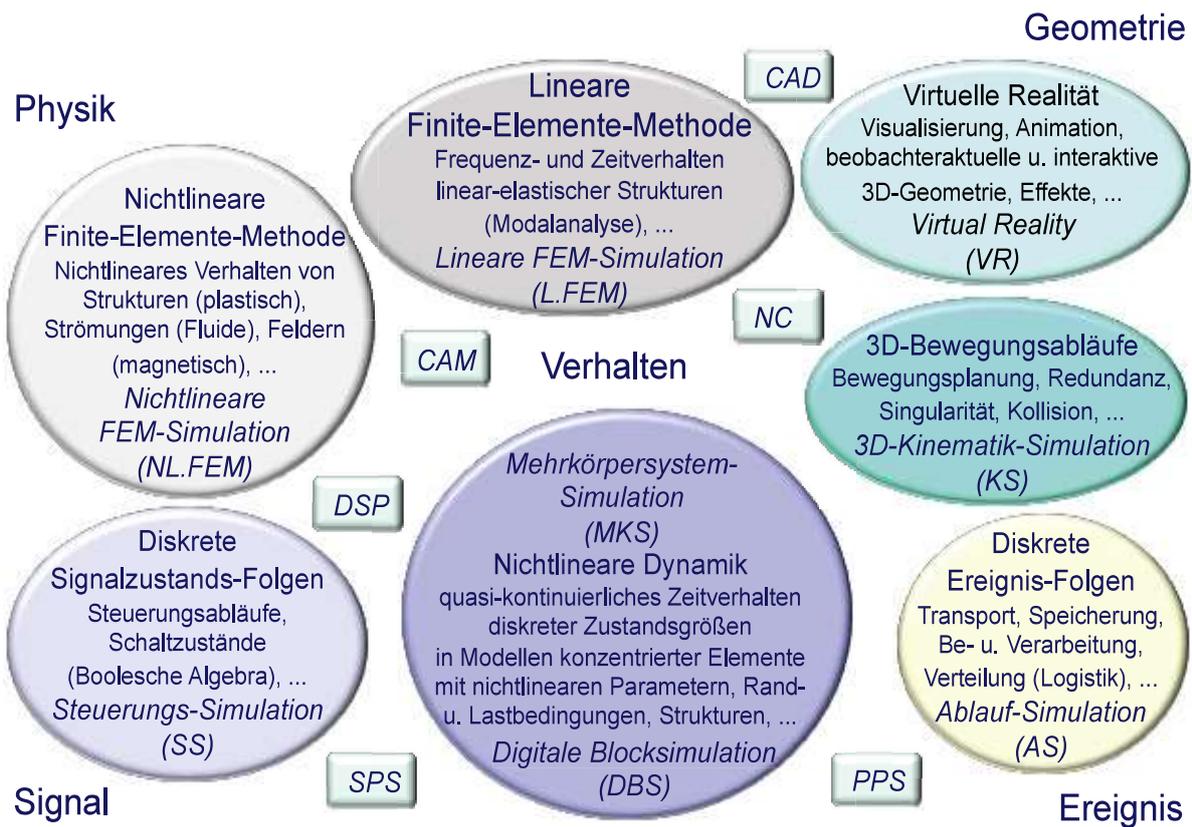


Bild 1.66 Methoden, Anwendungen und Umgebung der Simulation

Bild 1.66 gibt eine Übersicht zu Abbildbereich, Modellen, Algorithmen, Aussagen und Analyseergebnissen.

Abbildbereich	Modelle	Algorithmen	Aussagen	Analyseergebnisse
Geometrie	Digitale Geometrie- modelle	CAD-Systeme	Entwurf, Gestaltung	Abmessungen, Montierbarkeit ...
		Kinematik- analyse	Bewegungsraum	WSt-WZ-Lage, Kollision ...
Struktur- mechanik	Lineare Fini- te-Elemente- Modelle (einschl. Konzentrierte Elemente.	Lineare FEM-Systeme (Matrizen- gleichungen)	Stationäres lineares statisches, dynami- sches und thermi- sches Verhalten der Struktur	Spannungen, Verformungen, Eigenfrequenzen, Schwingungsformen, Frequenzgänge
Struktur- thermik				Temperaturverteilung (Beharrungszustand, Übergangsfunktion)
Prozess- umformung	Nichtlineare Finite Ele- mente- Modelle	Nichtlineare FEM-Systeme	Nichtlineares Mate- rial- und Kontakt- verhalten von Werkzeug und Werkstück	Spannungen, Blechstärken, Versagenskriterien, Umformkräfte
Prozess- zerspanung				Spannungen, Randzonen, Oberflächen, Zerspankräfte
Magnet und Spannungsfelder			Feldgrößen- verläufe	Feldlinien und -stärkeverteilung
Strömungs- probleme				Strömungslinien, Druckverteilung
Mechatron. Antriebs und Bewegungs- systeme	Starrkörper- modelle	MKS- Simulatoren	Nichtlineare Bewegungsdynamik	Zeitverläufe der Be- wegungs und Kraft- größen
Elektrische Schaltkreise	Netzwerk- modelle	Block- simulatoren	Signal- und Zustandsgrößen- verläufe (Potential-und Flußgrößen)	Ansteuer- und Regel- verhalten
Hydraulik und Pneumatik				Strom- Spannungs- verhalten
Ersetzende Prozeß- beschreibung				Durchfluß- Druck- verhalten
Isostationäre Thermik				Kraft- Verlagerungs- Verhalten
			Wärmestrom- Temperatur- verhalten	
Logistik			Zeitdiskrete Ereignisfolge für Transport-, Spei- cher, Be-und Ver- arbeitungs, Vertei- lungsabläufe	Leistung, Durchlaufzeit, Bestand, Termintreue, Auslastung, ...

Tabelle 1.3 Zuordnung von Modellinhalten, -algorithmen und -ergebnissen

„Die methodische Überführung eines Konstruktionsprozesses in einen rechnerintegrierten Ablauf mit gleichzeitiger Darstellungsmöglichkeit des wirklichen Verhaltens der zu entwickelnden Objekte wird *Virtualisierung* genannt“[5].

Das „wirkliche Verhalten“ wird an entsprechenden Modellen „der zu entwickelnden Objekte“ durch Simulation generiert. Insofern handelt es sich nicht um das „wirkliche“ Verhalten, sondern um das, entsprechend dem Modellbegriff, prognostizierte Verhalten eines Modells. Die oben zitierte Definition der Virtualisierung bezieht sich nur auf den Konstruktionsprozess. Die Virtualisierung mit der Simulation des Verhaltens hat außer den Ebenen des Objektbereiches mit den Lebensphasen und den Domänen noch zwei weitere Dimensionen. Die vollständigen Sichten auf die Virtualisierung zeigt Bild 1.67. Es stellt die Vision der Virtualisierung der gesamten Beziehungen und Wechselwirkungen der Produktionstechnik dar und geht weit über die Virtuelle Produktentwicklung hinaus.

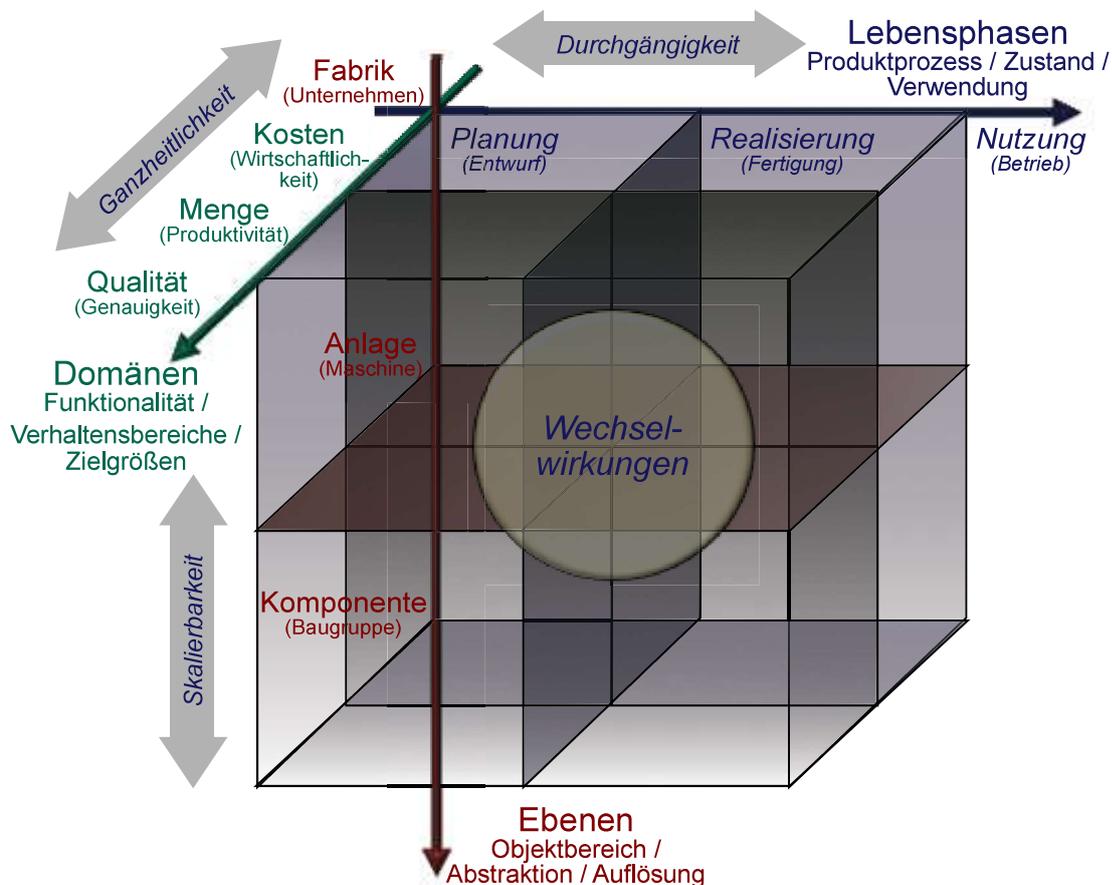


Bild 1.67 Sichten auf die Virtualisierung

Die ersten Schritte zur Umsetzung dieser Vision wurden in den 1990iger Jahren mit der digitalen Simulation des Verhaltens auf der Komponentenebene gemacht. In den folgenden Jahren wurde die Modellierung auf Anlagen und andere Verhaltensbereiche ausgedehnt sowie Wechselwirkungen berücksichtigt. Dennoch stehen wir erst am Anfang dieser Aufgabe. Bild 1.68 veranschaulicht in konkretisierter Form beispielhaft die Wechselwirkungen zwischen Ebenen und Domänen.

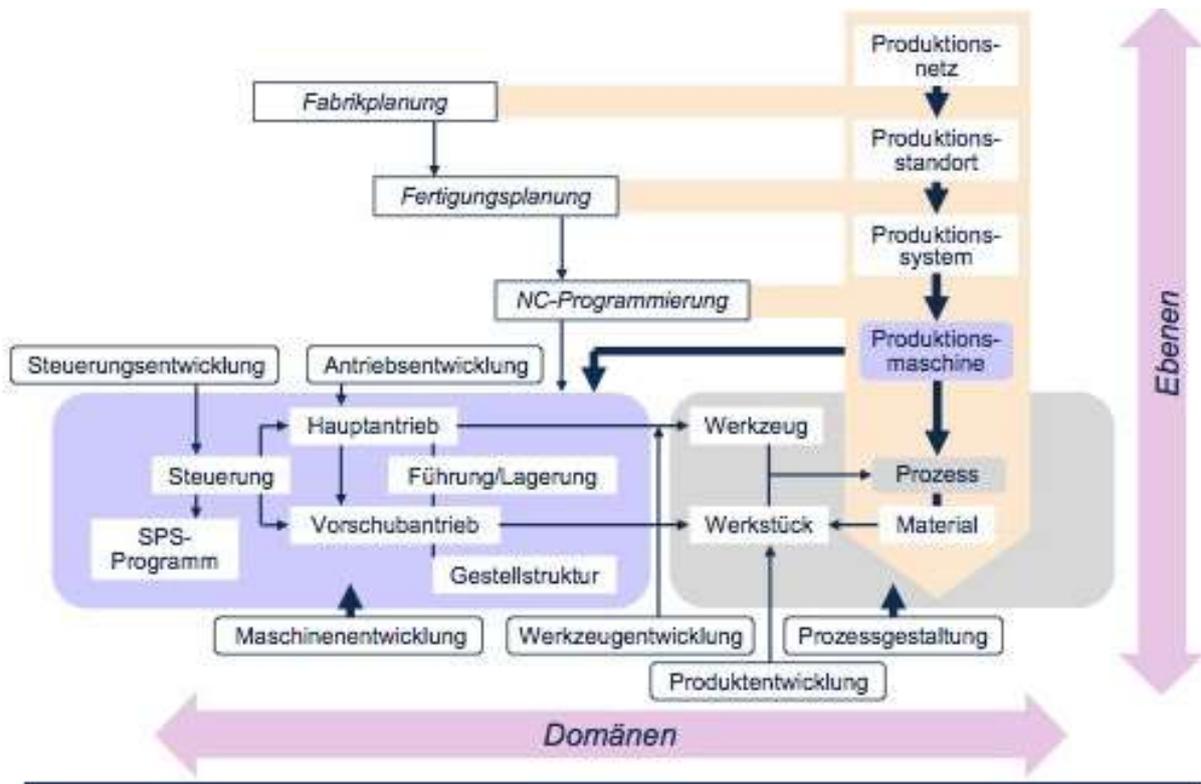


Bild 1.68 Prozesse und Abhängigkeiten zwischen Ebenen und Domänen

Konkret auf den KEP von WZM bezogen, sind seit den 2000er Jahren Arbeiten zur Verwirklichung des „Virtuellen Prototyp“ bekannt. Die ausgewiesene Motivation dazu ist die Zeiteinsparung innerhalb des KEP, wie Bild 1.69 veranschaulicht. Durch die Einsparung von Material- und Fertigungskosten sowie von aufwändigem Messequipment mit dem Wegfall des „realen“ Prototyps, trägt der Virtuelle Prototyp auch zur Ressourcenschonung bei. Während am materiell vorhandenen Prototyp die Optimierungsmöglichkeiten theoretisch und praktisch stark eingeschränkt sind, sind am Virtuellen Prototyp, das heißt am Modell, diese Grenzen weiter gefasst, womit ein Qualitätsgewinn verbunden ist, Bild 1.70.

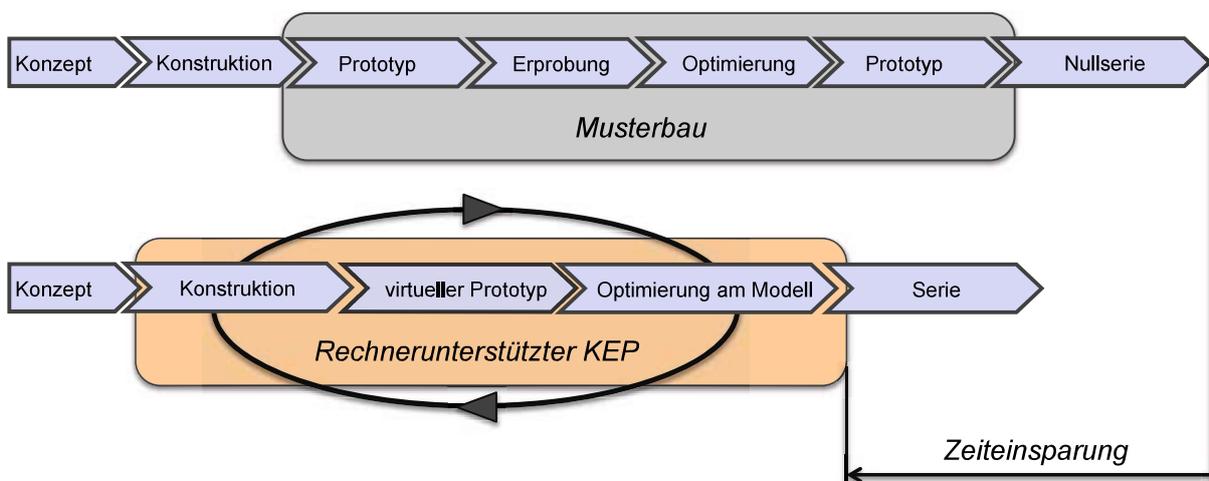


Bild 1.69 Zeiteinsparung durch den virtuellen Prototyp

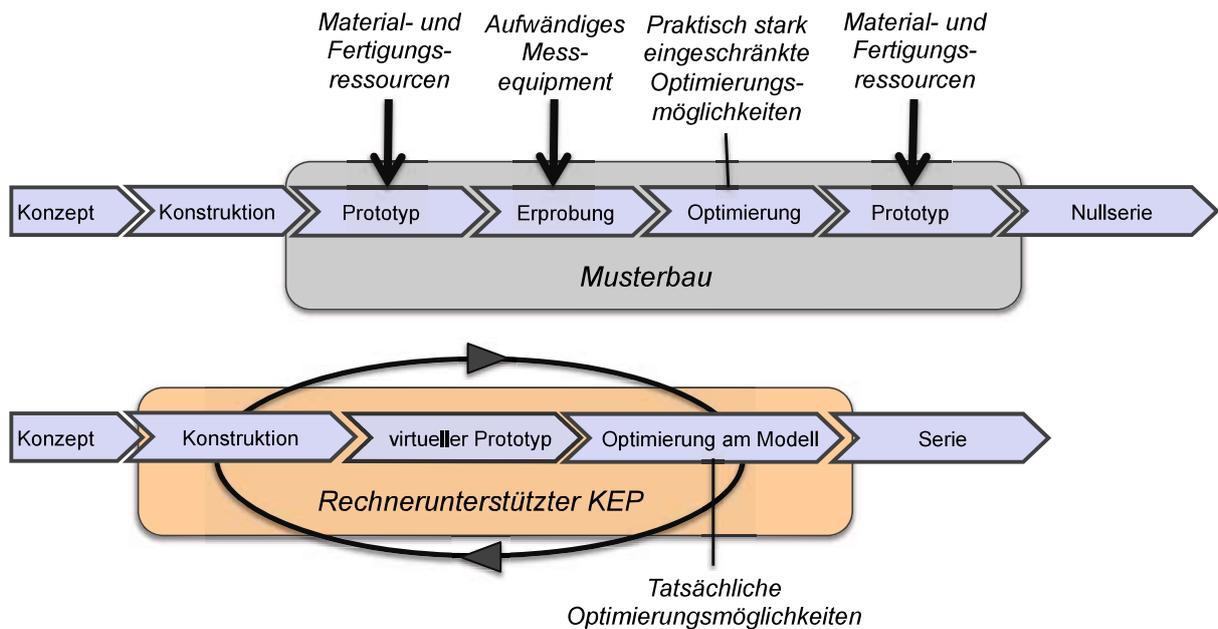


Bild 1.70 Qualitätsgewinn und Ressourcenschonung durch den virtuellen Prototyp

Systematische Herangehensweisen an den KEP von Maschinen, gekennzeichnet durch exakte Entwurfsdarstellungen mit vollständiger Bemaßung, Auslegungs- und Verhaltensberechnungen sowie deren experimentelle Überprüfung, sind allerdings keine Erscheinung der Neuzeit. *Leupold* formulierte bereits 1724 in seiner Schrift „Theatrum machinarum generale. Schauplatz des Grundes mechanischer Wissenschaften“[2] die in Bild 1.71 dem modernen Vorgehen gegenübergestellten Grundsätze für den KEP. Es ist beeindruckend, wie allgemein und weitsichtig seine Anforderungen sind. Im Folgenden sind einige Auszüge aus seinem Werk angegeben:

„...Sollten alle Künste und Maschinen, ...in einem deutlichen Riß, nach allen nötigen Stellungen, Teilen und besonderen Stücken, nach akkuratem Maßstab gezeichnet, und soviel als möglich, deutlich beschrieben, und nach der Theorie berechnet werden.

Will bei jeder Maschine, so genau als möglich, die Kraft berechnen, und was hingegen vor Effekt erfolgt, oder was die Maschine jetzo tut, und nach denen Prinzipiiis oder Theorie tun sollte. Woraus dann zu ersehen sein wird, wie weit die Maschine das ihre tut, ob wie viel dahero zu verbessern übrig ist.

Hierbei sollen alle mechanische und physikalische Fundamente und Ursachen, so wohl des Effekts als der Fehler, durch Experimenta und Risse deutlich erklärt werden, die Berechnung, sowohl geometrisch als mechanisch, oder wie es am allerdeutlichsten fällt, Anweisungen getan werden, wo und wie man einige Verbesserungen hoffet ...“

J.Leupold, 1724

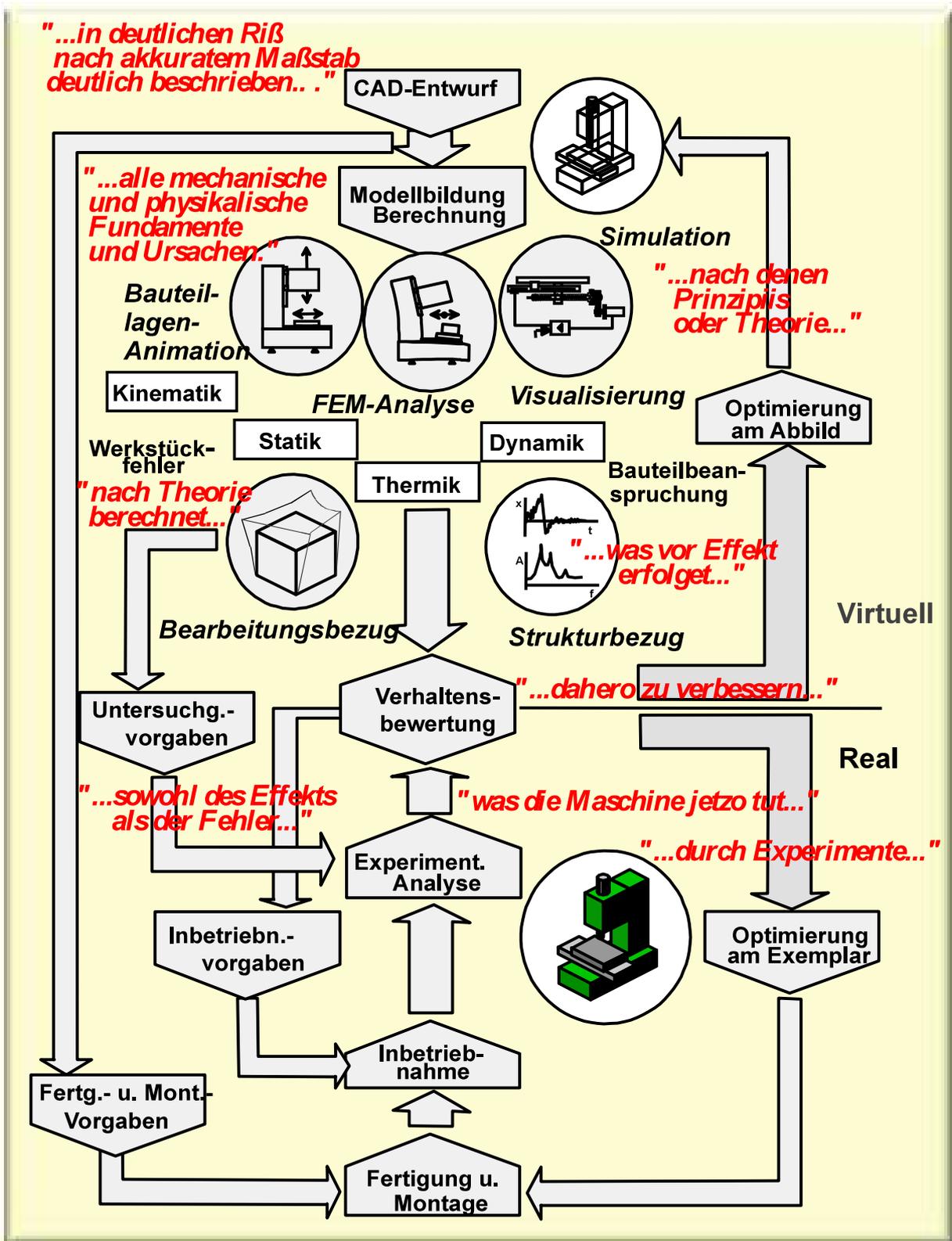


Bild 1.71 Leupolds Anforderungen an den KEP im Spiegel moderner Vorgehensweisen

1.3.9 Vernetzung und Cloud

Seit Mitte der 1990iger Jahre kann ein Trend zur Vernetzung der einzelnen Software-Tools zur Produktbeschreibung und -fertigung, sowie zur Verhaltensberechnung und -messung beobachtet werden. Zunächst wurden in den unabhängigen Tools Schnittstellen für den Da-

tenaustausch implementiert, zum Beispiel zwischen CAD und FEM, FEM und MKS oder DBS und Messdatenerfassung. Mit Beginn der 2000er Jahre wurden kommerzielle Angebote von Integrationslösungen (Bild 1.58) für die automatische Vernetzung der FEM-Objekte auf der Grundlage von CAD-Daten sowie zur Co-Simulation – der Online-Kopplung von zwei Simulatoren – von nichtlinearer Prozess-FEM und MKS oder DBS bereitgestellt.

Seit etwa 2010 nutzt die Industrie zunehmend die Vernetzung zur Kommunikation, den Datenaustausch und die Softwarekopplung, sowohl innerbetrieblich als auch zu den Kunden und Geschäftspartnern. Staatlich gefördert, unter dem Projekttitel „Industrie 4.0“, soll sich die Verschmelzung von realer und virtueller Produktionstechnik, auf der Basis leistungsfähiger Informationstechnik, der Cloud und dem Internet, zügig entwickeln und eine 4. Industrielle Revolution (Bild 1.72) einleiten.

„Die Wirtschaft steht an der Schwelle zur vierten industriellen Revolution. Durch das Internet getrieben, wachsen reale und virtuelle Welt zu einem Internet der Dinge zusammen. Mit dem Zukunftsprojekt Industrie 4.0 wollen wir diesen Prozess unterstützen.“ [BMBF]

„Industrie 4.0 ist ein Zukunftsprojekt im Bereich der Hightech-Strategie der deutschen Bundesregierung und der Industrie, mit dem in erster Linie die Informatisierung der Fertigungstechnik vorangetrieben werden soll. Das Ziel ist die „intelligente Fabrik“ (*Smart Factory*), die sich durch Wandlungsfähigkeit, Ressourceneffizienz, ergonomische Gestaltung sowie die Integration von Kunden und Geschäftspartnern in Geschäfts- und Wertschöpfungsprozesse auszeichnet. Technologische Grundlage sind cyber-physische Systeme und das „Internet der Dinge“ [6].

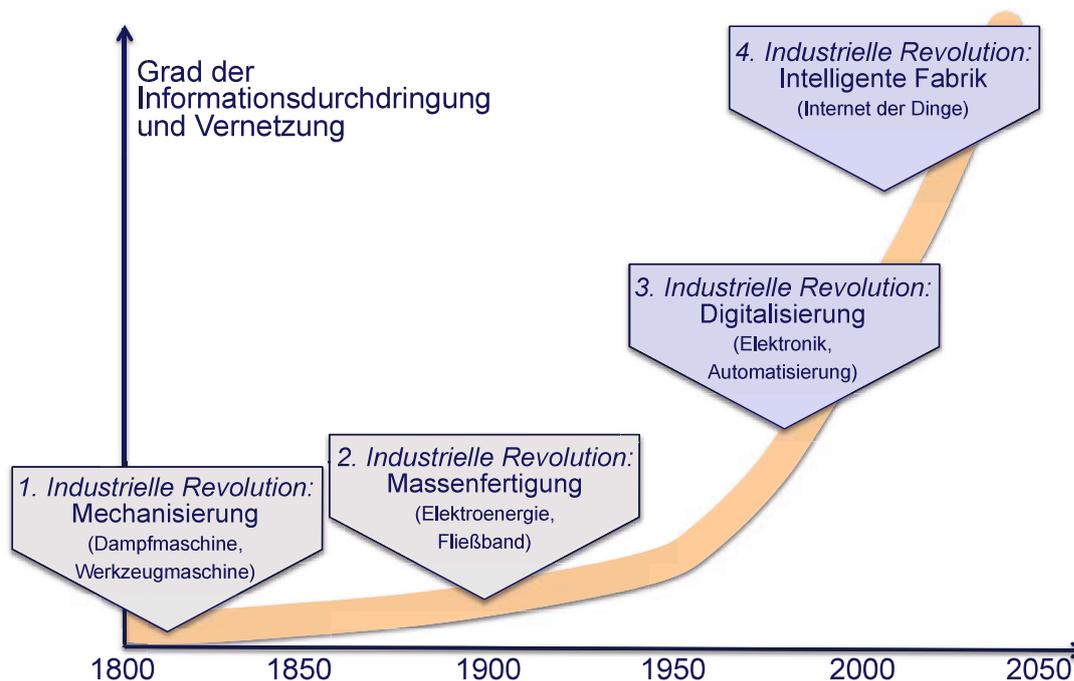


Bild 1.72 „Industrielle Revolution“