

Horst Goldhahn, Jens-Peter Majschak

Hoch effiziente Maschinensysteme für die individualisierte Massenproduktion

1 Einführung

Verarbeitungsmaschinen stellen aus Natur- und Kunststoffen Massenbedarfsgüter für den täglichen Konsum mit hoher Produktivität her. Je nach Abgrenzung finden sich nach eigenen Recherchen in zentralen Statistiken variierende Angaben, nach denen der Anteil von Verarbeitungsmaschinen am Produktionsvolumen des deutschen Maschinenbaus zwischen 8% und 25% beträgt. In verfahrenstechnischen Prozessen werden aus Rohstoffen Grundstoffe hergestellt, die durch Weiterverarbeitung in Verarbeitungssystemen zu Endprodukten mit geometrisch definierter Form gebracht, gegebenenfalls zusammengefügt und verpackt werden müssen, um dem Kunden als Konsumgüter angeboten werden zu können.

Da die Unterscheidung zwischen teilweise autarken Baugruppen (Modulen), Maschinen und aus verketteten Maschinen bestehenden Anlagen im Zuge der fortschreitenden Modularisierung und Dezentralisierung von Antriebs- und Steuerungstechnik immer schwieriger wird und da die meisten Aussagen ohnehin auf alle drei Kategorien zutreffen, ist es zweckmäßig, von Verarbeitungssystemen zu sprechen. Um jedoch eingeführte Begriffe benutzen zu können, soll im Folgenden stellvertretend der Begriff *Verarbeitungsmaschine* verwendet werden. Zu den *Verarbeitungsmaschinen* gehören Kunststoff-, Glas-, Keramik-, Papier-, Papierverarbeitungs-, Nahrungsmittel-, Pharmazeutische, Druck- und Verpackungsmaschinen sowie zahlreiche Sondermaschinen.

2 Besondere Auswirkungen von Verarbeitungsmaschinen in der Wertschöpfungskette am Beispiel der Lebensmittelverarbeitung und -verpackung

In *Verarbeitungsmaschinen* kreuzen sich komplexe Stoff-, Energie- und Informationsströme. Es werden vorwiegend *Verarbeitungsgüter* aus biogenen

Stoffen oder Kunststoffen verarbeitet, deren Verarbeitungsverhalten wegen stark vernetzter, schwankender und oft unbekannter Einflussparameter nicht hinreichend oder nur mit erheblichem Aufwand analysierbar und modellierbar ist. Daher ist die Bestimmung der Eigenschaften dieser Verarbeitungsgüter entlang der Wertschöpfungskette zwar im Sinne einer effizienten Verarbeitung und einer final hohen Produkt- und Verbrauchersicherheit sehr wünschenswert, stellt aber heute noch eine große Herausforderung dar. Risiken für die Stabilität der Hochleistungsprozesse müssen dennoch minimal gehalten, Risiken für den Verbraucher nach bestem Wissen ausgeschlossen werden. Da angesichts der hohen Produktivität selbst kurze Stillstände zu hohen Produktionsverlusten führen, sind die Anforderungen an Zuverlässigkeit, Standzeit der Werkzeuge, kurze Stillstandszeiten für Reinigen, Umrüsten, Sterilisieren oder Formatwechsel enorm. Branchenbedingt existieren teilweise schwierige Einsatzbedingungen wie abrasive Stäube, Sterilproduktion, Reinigung mit chemischen, mechanischen, fluidtechnischen und thermischen Mitteln (häufig auch kombiniert eingesetzt) oder durch teilweise niedrig qualifiziertes Bedienpersonal. Hinzu kommt die Komplexität von Systemen, in denen in der Regel große Teile der Herstellung sowie die Verpackung vom unverpackten Produkt bis hin zur beladenen und gekennzeichneten Palette verkettet und durchautomatisiert ablaufen.

Daraus resultieren vielfältige Wechselwirkungen, komplizierte und sehr dynamische Fehlerfortpflanzungsmechanismen, die es zu beherrschen gilt. Nicht selten bewirkt die Überwachung und Beherrschung von Risiken neben dem ohnehin großen Aufwand für die Funktionserfüllung noch einen erheblichen Zusatzaufwand. Beispielhaft sei hier die Gewährleistung eines einwandfreien Hygienezustandes von Lebensmitteln genannt. Sie macht mangels Möglichkeiten eines permanenten Monitorings repräsentative Stichprobenuntersuchungen an hergestellten Produkten ebenso notwendig wie regelmäßige Reinigungs- und gegebenenfalls Sterilisationsmaßnahmen an den Maschinen, Apparaten und relevanten Teilen der Produktionsumgebung.

Dabei ist das Ziel, Produktverunreinigungen durch Vorprozesse, die Maschinen selbst oder die Prozessumgebung sicher auszuschließen und so die entsprechend lautenden gesetzlichen Vorgaben zu erfüllen. Da derartige Maßnahmen immer auch in Verbindung mit Produktwechseln notwendig werden, steigt der Aufwand aufgrund steigender Produktvielfalt und damit sinkender Auftragsgrößen seit Jahren an. So belegten Betriebsdatenanalysen in einer Molkerei bereits 2009, dass in Milchverarbeitungsanlagen die Zeit zum Reinigen und Sterilisieren bis zu 20% der zur Verfügung stehenden

Maschinenarbeitszeit ausmacht (vgl. Weile 2009). Jüngere Untersuchungen erbrachten teilweise noch höhere Werte, und das nicht nur in der Molkerei-, sondern beispielsweise auch in Pharma-Prozessen.

Der Trend zu individuell gestalteten Produkten führt zunehmend zur informationellen Verknüpfung von Bestell-, Produktions-, Auslieferungs- und Abrechnungsprozessen. Sie schaffen zusätzliche Komplexitätsebenen, die zwar insgesamt eine höhere Effizienz zum Ziel haben, die jedoch vom *einzelnen* handelnden Menschen sowohl beim Einsatz der Maschinen (Konsumgüterproduktion) wie auch bei ihrer Entwicklung und Herstellung (Maschinenbau, Automatisierungstechnik usw.) nur noch schwer zu überschauen sind.

3 Entwicklungsstufen

Im Zuge der Entwicklung von Verarbeitungsmaschinen von genialen mechanischen Einzellösungen zu standardisierten hochflexiblen und -effizienten modularen Systemen haben sich die Anforderungen an die Entwickler, Methoden und Werkzeuge deutlich verändert.

Zu Beginn des 20. Jh.s waren die genialen Ideen Einzelner und ihre handwerklichen und unternehmerischen Fähigkeiten zur Umsetzung dieser Idee maßgebend für die Entstehung und Entwicklung der Mechanisierung der Konsumgüterproduktion. Als bald führten die im Zuge des Wettbewerbs und des gesellschaftlichen Bedarfs wachsenden Anforderungen an Produktivität und Effizienz zu immer höheren Maschinengeschwindigkeiten. Im Zeitalter zentraler Antriebstechnik rückte damit die Mechanismentechnik als Kernkompetenz in den Mittelpunkt des Verarbeitungsmaschinenbaus. Durch Erreichen von physikalischen Belastungsgrenzen der Verarbeitungsgüter, die immer stärkere Prozessverkettung und steigende Qualitätsanforderung nahm dann zunehmend der Prozess der Verarbeitung selbst eine dominierende Rolle in Entwicklungs- und Optimierungsansätzen ein. Es bildete sich die Spezifik der Fachrichtung als interdisziplinäre Verbindung aus verfahrens- und verarbeitungstechnischer sowie maschinenbaulicher Kompetenz heraus.

Ein weiterer Wandlungsprozess trat mit dem Zeitalter mechatronischer Systeme ein: Sie ermöglichten es, in weit besserem Maße, auf Prozessspezifika und Schwankung von Prozessbedingungen dediziert und wirkstellennah zu reagieren, und lieferten eine völlig neue Basis für prozessorientierte Steuerung und Regelung und eröffneten auch in maschinenbaulicher Hinsicht völlig neue Potenziale zur Effizienzerhöhung. Als Beispiel seien Massereduzierung, Minimierung mechanischer Getriebe (mit entsprechender Schmierung) genannt, die wiederum statt Guss- auch rationelle Blechkonstruktio-

nen im Stütz- und Hüllsystem ermöglichte. Gleichzeitig waren aber nun vom Maschinenbauunternehmen weitere Kompetenzen in Verbindung mit Elektrotechnik, Elektronik, Informationstechnik und Informatik bereitzuhalten. Umso stärker wuchs auch die Bedeutung der Prozesskompetenz: war es zuvor „nur“ notwendig und möglich, aus den Prozessanforderungen und Verarbeitungseigenschaften abgeleitete Bewegungsanforderungen direkt in „Hardware“, also in Mechanismen abzubilden und so eine direkte Verbindung aus Erfahrung und maschinentechnischer Realisierung herzustellen, machte die Programmierung von elektronischen Steuerungen eine explizite Formulierung von Zusammenhängen und Quantifizierung von Parametern zwingend notwendig.

Dieser Trend setzt sich in Gegenwart und Zukunft fort, wenn Modularisierung, adaptive und selbstkonfigurierende Systeme helfen sollen, die weiter steigenden Anforderungen an Flexibilität, Sicherheit und Effizienz zu erfüllen. Um im Sinne einer Optimierungsmöglichkeit verschiedene Alternativen aufstellen zu können, wird die Funktionsabfolge (im Sinne der VDI-Richtlinie 2221 „Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte“; vgl. VDI 1993) als Funktionsstruktur speziell bezogen auf den Funktionsbereich Stoff, im sogenannten innermaschinellen Verfahren abgebildet.

Die Variation der Topologie bzw. Morphologie des innermaschinellen Verfahrens gestattet prospektive Abschätzungen der Folgen für den Aufbau der übrigen Funktionsbereiche und somit erste Effizienzvergleiche zwischen alternativen Verfahrensvarianten. Diese konsequente Umsetzung einer funktionsorientierten Analyse und Synthese von Verarbeitungsverfahren und -maschinen gewinnt auch in dem Maße an Bedeutung, wie der Entwicklungsprozess in interdisziplinäre Zusammenarbeit zwischen Verfahrenstechnik-, Mechanik-, Elektrik-, Software- und weiteren Spezialisten übergeht. Schon heute beträgt der Anteil der Softwareentwicklung bis zu 60% am Arbeitsaufwand bei der Entwicklung einer Verarbeitungsmaschine. Gerade dadurch wird die explizite Beschreibung der zu realisierenden Vorgänge zur Voraussetzung für die Abbildung in Software anstelle festkörpermechanisch festgelegter Funktionszusammenhänge.

In zukünftigen Szenarien (vgl. etwa BMBF 2013) geht man davon aus, dass anstelle vordefinierter Verbindungen zwischen Teilprozessen die beteiligten Module selbst untereinander kommunizieren und sich zu einem optimalen Gesamtverfahren konfigurieren. Basis hierfür sind hochintegrierte elektronische Komponenten (embedded systems), die die Anbindung der einzel-

nen Module und Komponenten an Netzwerke ermöglichen. Über diese Netzwerke werden Informationen zum herzustellenden Produkt, übergeordneten, vor- und nachgelagerten Prozessen (Lebensweg des entstehenden Produktes und ein sich dabei immer weiter vervollständigendes virtuelles Abbild desselben) mit dem virtuellen Abbild der Prozesskomponenten verbunden. Das schrittweise herzustellende Produkt soll praktisch selbst durch den Herstellungsprozess navigieren und die einzelnen Herstellungsschritte inklusive ihrer notwendigen Parametrierung induzieren. Dies ermöglicht maximale Flexibilität für eine nachfragegetriebene Produktion in vollständig vernetzten Produktions- und Distributionsumgebungen. Voraussetzung hierfür ist aber eine weitgehend vollständige Welt an digitalen Material-, Prozess-, Struktur- und Verhaltensmodellen, um die notwendige Effizienz und Sicherheit der Prozesse und letztlich der Produkte zu gewährleisten. Vom heutigen Stand der Technik aus betrachtet stellt das für Verarbeitungsprozesse eine enorme Herausforderung dar. Entwicklungen, die in diese Richtung treiben, sind aber selbst in der Lebensmittelindustrie deutlich sichtbar, wenn man beispielsweise auf die Entwicklung der Lebensmittelmärkte schaut. So wächst der (weitgehend internetbasierte) Versandhandel innerhalb Europas seit einigen Jahren mit zweistelligen Wachstumsraten (vgl. Welt 2013).

4 Herausforderungen und Chancen

Die besonderen Herausforderungen der gegenwärtigen und zukünftigen Entwicklung liegen in

- einer neuen globalen Arbeitsteilung,
- neuen Möglichkeiten und Anforderungen bezüglich des Umgangs mit Ressourcen,
- individualisierter Massenproduktion: Flexibilität vs. Effizienz,
- Produktsicherheit in volatilen Wertschöpfungsketten,
- grundlegend neuen Konzepten für die Mensch-Maschine-Interaktion (versus Substitution menschlicher Bediener),
- neuen Methoden und Werkzeugen interdisziplinären Entwickelns und damit
- der Ausbildung interdisziplinär agierender Fachkräfte ohne Verlust wichtiger Kernkompetenzen.

Globalisierter Wettbewerb schafft u.a. den Druck zur Differenzierung und damit zur Individualisierung von Konsumgütern. Um dennoch effizient und nachhaltig zu produzieren, bedarf es teilweise gänzlich neuer Verfahren

bzw. neuartiger maschinentechnischer Umsetzungen: hoch parametrierbar, modular, adaptiv/selbst optimierend. Dies trifft sowohl auf die verarbeitungs- und verfahrenstechnischen Grundvorgänge wie auch auf die peripheren Prozesse der Detektion/ Kontrolle (Sensoren, Bildverarbeitung, sensorlose Diagnosesysteme), des Umrüstens (Werkzeugwechsel-, Verstell- und Zuführsysteme), der Reinigung und der Sterilisation zu. Da vom gegenwärtigen Standpunkt schwer absehbar ist, dass eine solch hochflexible und dennoch effiziente und sichere Produktion bedienerlos zu realisieren ist, stellt sich die Frage nach neuen Konzepten für den Umgang des Menschen mit hochkomplexen Automatisierungssystemen noch in verschärfterem Maße. Damit ist sowohl die Mensch-Maschine-Interaktion in der Maschinenanwendung (Konsumgüterproduktion) gemeint, wie auch in der Entwicklung und Herstellung der Produktionssysteme (Verarbeitungsmaschinen) selbst. Letztere wird nicht nur in Deutschland nahezu vollständig von mittelständischen Unternehmen geprägt. Schon heute stehen diese Unternehmen mit mehr als 80% Exportanteil vor der Frage, wie man wirtschaftlich vertretbar global verteilte Zielmärkte bedient, in denen die Systeme auf teilweise große Unterschiede hinsichtlich ihrer Betriebsbedingungen angepasst sein müssen. Insbesondere kulturell wie fachlich völlig unterschiedlich geprägte Bediener sollen mit komplexen Hightech-Systemen effizient und sicher Konsumgüter produzieren, die wie Lebensmittel schon aus Gründen des Verbraucherschutzes hohen und höchsten Qualitätsanforderungen genügen sollen.

Die Summe aller umrissenen Anforderungen verbreitert das Spektrum der im Maschinenbau benötigten Fachkompetenzen auf Spezialisten wie Konstrukteure, Verfahrenstechniker, Mikrobiologen, Strömungstechniker, Elektro-/Automatisierungstechniker, Softwareentwickler, Ergonomen, Werkstoffwissenschaftler, Mediengestalter, ...

Es ist gerade vor dem Hintergrund des steigenden Anforderungsniveaus unwahrscheinlich, dass sich derartige Kompetenzen in Einzelpersonen vereinigen lassen. Einzige Alternative ist die interdisziplinäre Zusammenarbeit von Spezialisten. Vor den Forschungs- und Bildungseinrichtungen stehen damit folgende Aufgaben:

- Abbau von Sprach-, Methoden-, Modell-, Wissens- und Erfahrungsdefiziten;
- Bereitstellung von formalisiertem Wissen (Idealform digitales Modell), wobei eine besondere Herausforderung die Verarbeitung von Natur- und Kunststoffen ist;

- Interdisziplinäre Netzwerke in sowie zwischen Wissenschaft und Industrie ermöglichen bzw. befördern interdisziplinäres Denken, Finden, Kommunizieren und Kooperieren;
- Fachübergreifende Werkzeuge und Arbeitsplattformen auf der Basis von integrierenden Sprachen, Methoden und Werkzeugen.

Sowohl für Maschinenbauer, ihre Lieferanten wie auch ihre Kunden stellen sich zudem neue Fragen über interdisziplinäre Wertschöpfungsmodelle:

- Wer verkauft das Produkt, wer die Maschine, wer die Technologie samt der dazu benötigten Modelle?
- Wer versteht den Prozess, der Maschinenbauer oder -betreiber, der Lieferant von Automatisierungskomponenten oder ein Engineering-Dienstleister?
- Kommen Prozess- oder Materialmodelle aus dem Datawarehouse und wer betreibt oder beliefert dieses?

Wenn auch viele dieser Fragen für den Bereich der Massenverbrauchsgüterproduktion zunächst noch irrelevant scheinen, liefert die jüngere Entwicklung spezieller Branchen wie der Softwareindustrie oder der Druck- und Medienindustrie interessante Anschauungsbeispiele.

Literatur

- BMBF – Bundesministerium für Bildung und Forschung (Hg.) (2013): Zukunftsbild Industrie 4.0. Berlin. – URL: www.bmbf.de/pubRD/Zukunftsbild_Industrie_40.pdf
- VDI – Verein Deutscher Ingenieure (1993): Richtlinie 2221 „Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte“. Düsseldorf (VDI)
- Weile, F. (2009): Condition Monitoring aus Sicht des Anwenders. Vortrag VDMA-Workshop „Condition Monitoring“, Frankfurt am Main, 08.05.
- Welt (2013): Der Lebensmittel-Versand wächst zweistellig. In: DIE WELT, 12.7. – URL: <http://www.welt.de/wirtschaft/article117989580/Der-Lebensmittel-Versand-waechst-zweistellig.html>