

Diskussionsbeitrag zu einem methodischen Ansatz für Entscheidungen in Zielkonflikten während der Konzeptphase der Entwicklung automatisierter Produktionsanlagen

Peter Lochmann, Jens-Peter Majschak

Die wesentlichen Eigenschaften eines technischen Systems werden bereits in der Konzeptphase durch die Auswahl von Lösungsprinzipien vorbestimmt. Bei der Entwicklung automatisierter Produktionsanlagen stehen dabei die vier Zielgrößen Qualität, Zeit, Kosten und Flexibilität im Fokus. In der Literatur wird angenommen, dass zwischen diesen Anforderungen ein Zielkonflikt besteht, der von den Eigenschaften eines technischen Systems herrührt und die gleichzeitige Optimierung einer Anlage bzgl. aller vier Zielgrößen unmöglich macht. In diesem Beitrag wird deshalb ein methodischer Ansatz zu Diskussion gestellt, der die Untersuchung des Zielkonfliktes im konkreten Anwendungsfall ermöglicht und eine Entscheidungshilfe bei der Auswahl von Lösungskonzepten bieten kann. Ausgangspunkt ist ein dynamisches Systemmodell der Wechselwirkung zwischen Produkt und Produktionsanlage, sowie ein Ansatz zur Konzeptauswahl auf Grundlage der Polyoptimierung. Mit Hilfe parametrischer Modellbildung und Simulation kann die Entwicklungsaufgabe als mehrkriterielles Optimierungsproblem formuliert werden.

Schlagwörter: Produktionsanlagen, Konzeptauswahl, Zielkonflikt, Polyoptimierung

Einleitung

Eine im Produktionsmanagement, in der Fabrikplanung und der Anlagenentwicklung allgemein akzeptierte Annahme geht von vier, sich widersprechenden Zielstellungen in der verarbeitenden Industrie aus:

- Geringe Qualitätsabweichungen der Produkte,
- hohe Anlagenausbringung,
- geringe Produktionskosten und
- große Zahl herstellbarer Produktvariationen.

Dieser Zielkonflikt wird an vielen Stellen als unumstritten vorausgesetzt, z. B. (Gunasekaran, 2005; Lanza et al., 2009; Maganha et al., 2020; Majschak et al., 2017; Nakhla, 1995), und in einzelnen Studien bestätigt (Bech et al., 2018; Mapes et al., 2000; Mason et al., 1994; Trattner et al., 2019). Daraus leitet (Chryssolouris, 2013) vier Merkmale der Produktion ab: Qualität, Zeit, Kosten und Flexibilität. Sie gelten als grundsätzliche Kategorien für Anforderungen an Produktionsanlagen und können nicht gleichzeitig optimal erfüllt werden. Implizit wird dabei angenommen, dass die Eigenschaften der Produktionsanlagen Ursache des Zielkonfliktes sind, vgl. auch (Ehrlenspiel & Meerkamm, 2013).

Im Entwicklungsprozess werden die Eigenschaften einer Produktionsanlage bereits während der Konzeptphase durch die Festlegung der Wirkprinzipien und Funktionsstrukturen wesentlich vorbestimmt (Majschak, 1997; Tränkner, 1980; Weber et al., 2019). Die Entwicklung von Produktionsanlagen kann demnach zielgerichteter durchgeführt werden, wenn es gelingt, die Anforderungskategorien Qualität, Zeit, Kosten und Flexibilität als technische Anforderungen zu formulieren und den Zielkonflikt zwischen ihnen schon in der Konzeptphase darzustellen. Dieser Beitrag stellt deshalb einen methodischen Ansatz zur Diskussion, mit dem die These vom Zielkonflikt für den konkreten Anwendungsfall geprüft werden kann und der darüber hinaus eine Grundlage für eine Entscheidungshilfe bei der Konzeptauswahl bildet.

Methodische Grundlagen

Polyoptimierung als Entscheidungshilfe bei Zielkonflikten

Der dargestellte Zielkonflikt ist ein für die Ingenieursarbeit typisches Entwicklungsproblem mit widersprüchlichen Anforderungen. Probleme dieser Art können mit der mathematischen Methode der Polyoptimierung, auch Pareto-Optimierung oder Vektoroptimierung genannt, beschrieben werden. Hierbei sind die Eigenschaften des technischen Systems im Zielgrößenvektor $\boldsymbol{\mu} \in \mathbf{M}$ enthalten und die beeinflussbaren Entwurfsvariablen durch die Steuergrößen $\boldsymbol{p} \in \mathbf{P}$ gegeben. Der Zusammenhang zwischen den Entwurfsvariablen und den Eigenschaften des technischen Systems wird durch die Vektorzielfunktion $\boldsymbol{\mu} = f(\boldsymbol{p})$ hergestellt (Ester, 1987; Messac, 2015; Peschel & Riedel, 1976). Eine Entwicklungsaufgabe ist damit durch folgendes, mehrkriterielles Optimierungsproblem definiert:

$$\min\{\boldsymbol{\mu} = f(\boldsymbol{p}) \mid \boldsymbol{p} \in \mathbf{P}, f: \mathbf{P} \rightarrow \mathbf{M}, \boldsymbol{\mu} \in \mathbf{M}\} \quad (1)$$

Abb. 1 a) zeigt beispielhaft ein Optimierungsproblem mit zwei Zielgrößen μ_1 und μ_2 . Die Pareto-Menge $\mathbf{M}^* \subseteq \mathbf{M}$ enthält alle pareto-optimalen Zielvektoren, bei denen keine

Zielgröße verbessert werden kann, ohne eine andere zu verschlechtern. Die Menge der zugehörigen Entwurfsvarianten heißt funktional-effiziente Menge $\mathbf{P}^* \subseteq \mathbf{P}$ (Ester, 1987; Schumacher, 2020). Auf dieser Grundlage entwickeln (Mattson & Messac, 2003, 2005) eine Methode zur Auswahl von Lösungskonzepten. Sie unterscheiden dabei zwischen einem Entwurfskonzept k , das durch einen Satz von Entwurfsvariablen \mathbf{p}^k eine prinzipielle Lösung abbildet, und einer Entwurfsvariante v , die durch konkrete Werte $\mathbf{p}^{k,v}$ der Entwurfsvariablen eine spezielle Ausprägung des Konzeptes darstellt. Die Optimierungsaufgabe lautet damit für $k = 1, 2, \dots, n$:

$$\min\{\boldsymbol{\mu} = f^k(\mathbf{p}^k) \mid \mathbf{p}^k \in \mathbf{P}^k, f^k: \mathbf{P}^k \rightarrow \mathbf{M}, \boldsymbol{\mu} \in \mathbf{M}\}. \quad (2)$$

In einem gemeinsamen Diagramm wie in Abb. 1 b) aufgetragen, lassen sich die Konzepte anschaulich vergleichen. Hierbei gilt ein Entwurfskonzept als pareto-dominant gegenüber einem anderen, wenn alle seine Entwurfsvarianten besser als alle Entwurfsvarianten des anderen Konzeptes sind. Ergeben sich aus den Anforderungen der Entwicklungsaufgabe Bereiche des Zielgebietes $\mathbf{B} \subseteq \mathbf{M}$, die von besonderem Interesse sind, kann auf dieser Basis ein am besten geeignetes Konzept ermittelt werden. Weitere Ansätze für Entscheidungshilfen auf Grundlage der Polyoptimierung finden sich in (Ester, 1987; Peschel & Riedel, 1976).

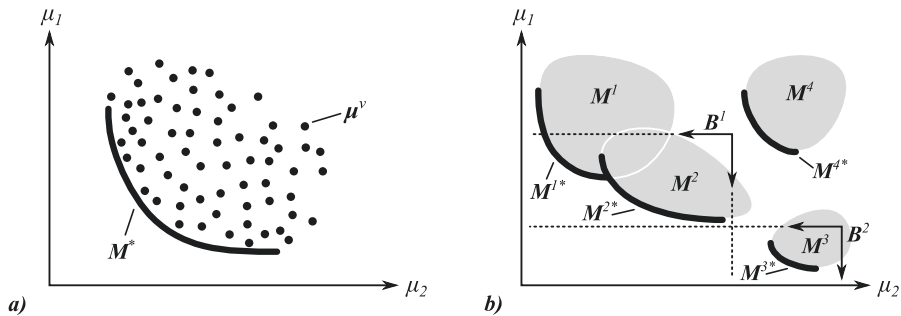


Abbildung 1: Polyoptimierung mit zwei Zielgrößen μ_1 und μ_2 . a) Pareto-Menge \mathbf{M}^* der Entwurfsvarianten $\boldsymbol{\mu}^v \in \mathbf{M}$, in Anlehnung an (Ester, 1987). b) Vergleich von vier Konzepten 1 bis 4: Lösungsmengen \mathbf{M}^1 bis \mathbf{M}^4 , zugehörigen Pareto-Mengen \mathbf{M}^{1*} bis \mathbf{M}^{4*} und Zielgebiete \mathbf{B}^1 und \mathbf{B}^2 . 1 und 2 teilweise dominant in \mathbf{B}^1 , 3 dominant in \mathbf{B}^2 . In Anlehnung an (Mattson & Messac, 2003, 2005).

Das Wirkpaarungsmodell als Ausgangspunkt der Modellbildung

Die Wirkpaarung nach Abb. 2 ist ein grundlegendes Modell bei der Analyse, Synthese und Optimierung von Maschinensystemen der Stoffverarbeitung. In dieser Modellvor-

stellung wird die gewünschte Zustandsänderung am Verarbeitungsgut, die Verarbeitungsaufgabe, infolge der Wechselwirkung zwischen dem Arbeitsorgan und dem Verarbeitungsgut umgesetzt. Der zeitlich, räumlich und energetische Ablauf der gezielten Einwirkung des Arbeitsorganes und der Zustandsveränderung des Verarbeitungsgutes bilden den Verarbeitungsvorgang. Auf Grundlage dieses Wirkpaarungsmodells baut eine Systematisierung der Verarbeitungsvorgänge und Wirkpaarungen nach Verarbeitungsaufgaben, Gutklassen, Wirkprinzipien und Funktionsprinzipien auf (Goldhahn, 1978; Majschak, 2020). In (Hennig, 1977; Tränkner, 1980) werden Methoden zur Synthese von Verarbeitungsmaschinen- und anlagen beschrieben. (Majschak, 1997; Weber et al., 2019) stellen Ansätze für computerbasierte Assistenzsysteme zum Auffinden von Lösungsprinzipien vor. Damit sind wichtige Beiträge zur Unterstützung der Suche von Lösungsprinzipien in der Konzeptphase bereits geleistet, aber Fragen zur ihrer Auswahl nach quantitativen Gesichtspunkten weiterhin offen. (Schmidt, 2000; Weile, 1996) haben jedoch gezeigt, dass Vorhersagen des dynamischen Verhaltens von Verarbeitungssystemen und der Vergleich von Lösungskonzepten mit Hilfe der Simulation von Verarbeitungsvorgängen allgemein möglich sind. Darauf aufbauend kann das Wirkpaarungsmodell als Grundlage für die Ermittlung der Vektorzielfunktion $\mu = f(\mathbf{p})$ dienen.

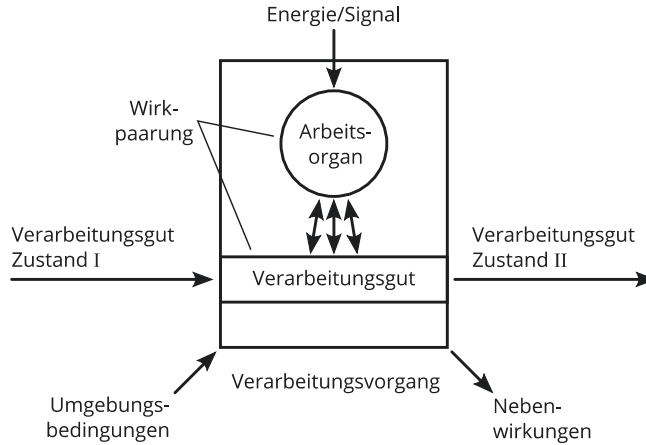


Abbildung 2: Modell der Wirkpaarung, nach (Goldhahn, 1978; Majschak, 2020).

Zielstellung und Lösungsansatz

Ziel dieses Beitrages ist es, eine Methode zu diskutieren, die dem Entwickler von Verarbeitungsanlagen eine Entscheidungshilfe bei der Auswahl von Lösungskonzepten in

Aussicht stellt und der wissenschaftlichen Untersuchung der beiden folgenden Arbeitsthesen im konkreten Anwendungsfall dienen kann:

1. Produktionsanlagen weisen einen grundsätzlichen Widerspruch zwischen den produktionswirtschaftlich relevanten Anforderungskategorien Qualität, Zeit, Kosten und Flexibilität auf.
2. Dieser Zielkonflikt hat seinen Ursprung in den technischen Eigenschaften der Produktionsanlagen und wird bei der Entwicklung bereits in der Konzeptphase durch die Wahl des Lösungsprinzips vorbestimmt.

Gesucht ist demnach ein Modell, das die vier Anforderungskategorien und ihren Zusammenhang beschreibt, sowie ein Verfahren, das Lösungskonzepte hinsichtlich dieser Anforderungen vergleichbar macht. Der vorgestellte Ansatz nimmt deshalb beide Bereiche der Konstruktionswissenschaft nach (Ehrlenspiel & Meerkamm, 2013) auf: Erstens, eine in Abschnitt 4 vorgestellte Theorie des technischen Systems auf Grundlage der dynamischen Systembetrachtung (Bossel, 2004) und des Wirkpaarungsmodells (Goldhahn, 1978). Zweitens, eine in Abschnitt 6 vorgestellte Theorie des Konstruktionsprozesses, die auf der Polyoptimierung (Ester, 1987; Peschel & Riedel, 1976) und dem Ansatz zur Konzeptauswahl von (Mattson & Messac, 2003, 2005) aufbaut. Die parametrische Simulation entsprechend Abschnitt 5 dient der Vorhersage des Verhaltens der Wirkpaarung im konkreten Anwendungsfall.

Systemmodell

Dynamisches Wirkpaarungsmodell

Die Vorhersage der Eigenschaften und Wirkungen von zeitveränderlichen Systemen sowie ihr Vergleich erfordern verhaltensklärende Modelle, die nach (Bossel, 2004) mit Hilfe von Differentialgleichungen in Abhängigkeit der Eingangsgrößen $x(t)$, Ausgangsgrößen $y(t)$ und Zustandsgrößen $z(t)$ eines Systems beschrieben werden können. Die Zustandsgleichung f eines dynamischen Systems lautet:

$$\frac{dz}{dt} = f(z(t), x(t), t). \quad (3)$$

Auf dieser Grundlage lässt sich für die Wirkpaarung ein quantitatives, dynamisches Systemmodell ableiten. Als Eingangsgrößen wirken die gezielte Energiezufuhr $e(t)$ und unerwünschte Umwelteinwirkungen $u(t)$. Der Systemzustand der Wirkpaarung setzt sich aus den Zustandsgrößen des Arbeitsorgans $z_{AO}(t)$ und des Verarbeitungsgutes $z_{VG}(t)$ zusammen. Die Ausgangsgrößen umfassen entsprechend die Nebenwirkungen $n(t)$. Der zeitlich veränderliche Systemzustand der Wirkpaarung ergibt sich dann unter Annahme zeitlich konstanter Parameter aus der Zustandsgleichung f mit

$$\frac{d(\mathbf{z}_{\text{VG}}(t))}{dt} = \mathbf{f}\left(\begin{pmatrix} \mathbf{z}_{\text{AO}}(t) \\ \mathbf{z}_{\text{VG}}(t) \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \mathbf{e}(t) \\ \mathbf{u}(t) \end{pmatrix}, t\right). \quad (4)$$

Im Zeitraum $t_V = t_{II} - t_I$ vom Beginn der Einwirkung des Arbeitsorgans bis zum Ende der Einwirkung bildet die Zustandsgleichung damit die ursächlichen Zusammenhänge des Verarbeitungsvorgang ab und ist damit bestimmend für die Eigenschaften einer Produktionsanlage. Die Anforderungskategorien der Produktion können damit in das Arbeitsfeld des Ingenieurs und die Ebene technischer Entscheidungen übertragen werden.

Übertragung der Anforderungskategorien

Das für die Kategorie *Qualität* relevante Qualitätsmaß der Produktion ist ausgehend von (Reeves & Bednar, 1994; Shewhart, 1931) nach Abb. 3 a) die Abweichung Δq des Qualitätskennwertes q_i eines Produktes i von einem festgelegten Nennwert q_{Nenn} mit

$$\Delta q = q_i - q_{\text{Nenn}}. \quad (5)$$

Maßgebend ist dabei der Zustand des Verarbeitungsgutes am Ende des Verarbeitungsvorgangs, sodass die Qualität Δq über

$$\Delta q = f(\mathbf{z}_{\text{VG}}(t_{II}), q_{\text{Nenn}}) \quad (6)$$

direkt von der Zustandsgleichung der Wirkpaarung abhängt. In der Praxis sind meistens zulässige Toleranzbereiche Δq_{max} der Qualitätskennwerte festgelegt, die als Qualitätskriterium dienen, vgl. (Troll, 2021).

Die Kategorie Zeit umfasst die Eigenschaften einer Produktionsanlage, die auf Produktdurchlaufzeiten oder zeitbezogene Produktionsmengen zurückführen (Chryssoulouris, 2013). Sie beziehen sich auf die Dauer t_V des Verarbeitungsvorganges, die deshalb als Zeitmaß

$$t_V = t_{II} - t_I = f(\mathbf{z}_{\text{VG}}(t)) \quad (7)$$

dienen kann und direkt vom Verlauf der Zustandsänderung abhängt. Unter der Vorgabe produktspezifischer Qualitätskriterien $\Delta q \leq q_{\text{max}}$ leiten sich daraus wichtige Kenngrößen des Betriebsverhaltens wie die Gesamtanlageneffektivität oder der Qualitätsgrad ab, vgl. (DIN, 2014; Focke & Steinbeck, 2018; Nakajima, 1989).

Die Kosten der Produktion werden durch die technische Lösung der Produktionsanlage beeinflusst, können aber während des Entwicklungsprozesses und insbesondere in der Konzeptphase nur näherungsweise vorausgesagt werden. Behelfsmäßig werden deshalb technischen Ersatzgrößen verwendet, bspw. der Bauraum, die Anzahl der

Baugruppen oder die Antriebsleistung, mit denen zumindest die Investitionskosten abgeschätzt werden können, vgl. (Ehrlenspiel et al., 2020; Fischer, 2008; Weber, 2018). In diesem Sinne wird als Kostenmaß der technische Aufwand

$$\alpha = f(\mathbf{p}_{AO}, \mathbf{e}(t)) \quad (8)$$

festgelegt, der von den Entwurfsvariablen des Arbeitsorgans \mathbf{p}_{AO} und der für den Verarbeitungsvorgang notwendigen Energiezufuhr $\mathbf{e}(t)$ abhängt.

Flexibilität ist ein Maß für die Fähigkeit einer Produktionsanlage, verschiedene Produktvariationen herstellen zu können (Beach et al., 2000). Implizit wird dabei die Erfüllung festgelegter Qualitätskriterien vorausgesetzt, häufig auch die Einhaltung bestimmter Ausbringungsbereiche. Dies führt zu Untersuchungen der Robustheit eines Systems, die die Auswirkungen von Änderungen einzelner Systemgrößen auf bestimmte Kennwerte des Systemverhaltens beschreibt (Göhler et al., 2016; Jen, 2005; Stricker & Lanza, 2014). Die veränderlichen Systemgrößen sind hier die variierende Anfangszustände der Verarbeitungsgüter $\Delta z_{VG}(t_1)$ und die Abweichung der Kennwerte der Verarbeitungsgüter $\Delta \mathbf{p}_{VG}$, die die Produktvariationen abbilden. Als Flexibilitätsmaß dient deshalb entsprechend Abb. 3 b) die Robustheit

$$r = f(\Delta z_{VG}(t_1), \Delta \mathbf{p}_{VG}, \Delta q_{\max}, \Delta t_{V,\max}), \quad (9)$$

wobei Δq_{\max} und $\Delta t_{V,\max}$ die zulässigen Bereiche der Produktqualität und Vorgangsdauer beschreiben, vgl. (Troll, 2021).

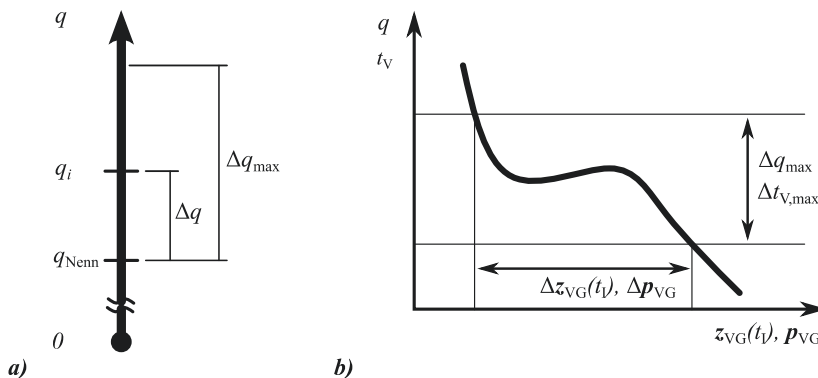


Abbildung 3: a) Zusammenhang der Kenngrößen der Qualität. Qualitätskennwert q_i des Produktes i , Nennwert q_{Nenn} , Abweichung des Kennwertes vom Nennwert Δq , Qualitätskriterium Δq_{\max} . Hier dargestellt ist das Qualitätskriterium erfüllt: $\Delta q < \Delta q_{\max}$. b) Robustheit des Verarbeitungsvorgangs. Produktvariation $\Delta \mathbf{p}_{VG}$ und $\Delta z_{VG}(t_1)$, Qualitätskriterium Δq_{\max} , zulässige Vorgangsdauer $\Delta t_{V,\max}$.

Die hier vorgestellten Eigenschaftsmaße stellen die Zielgrößen dar, die die Entwicklungsaufgabe ausmachen und können im *Eigenschaftsvektor der Wirkpaarung*

$$\boldsymbol{\mu}_{\text{WP}} = \begin{pmatrix} \Delta q \\ t_V \\ \alpha \\ r \end{pmatrix}$$

zusammengefasst werden. Die Abhängigkeit dieser Eigenschaften von den Entwurfsvariablen des Arbeitsorgans $\boldsymbol{p}_{\text{AO}}$ über die Zustandsfunktion \boldsymbol{f} schafft den Ausgangspunkt für die Bestimmung der Vektorzielfunktion $\boldsymbol{\mu}_{\text{WP}} = \boldsymbol{f}(\boldsymbol{p}_{\text{AO}})$ zur Formulierung des Entscheidungsproblems.

Wirkpaarungskonzepte und parametrische Simulation

Gemäß der Unterscheidung von Konzept und Variante nach (Mattson & Messac, 2003, 2005) gilt für die Zustandsgleichung eines Systemkonzeptes

$$\frac{dz}{dt} = \boldsymbol{f}^k(\boldsymbol{z}(t), \boldsymbol{x}(t, t, \boldsymbol{p}^k)). \quad (10)$$

Das Lösungskonzept k einer Wirkpaarung wird beeinflusst durch das Wirkprinzip und das Funktionsprinzip, die sich in der Zustandsfunktion \boldsymbol{f}^k und dem Satz der Entwurfsvariablen des Arbeitsorgans $\boldsymbol{p}_{\text{AO}}^k$ ausdrücken, vgl. (Tränkner, 1980). Die Zustandsgleichung eines Wirkpaarungskonzeptes lautet dann

$$\frac{d \begin{pmatrix} \boldsymbol{z}_{\text{AO}}(t) \\ \boldsymbol{z}_{\text{VG}}(t) \end{pmatrix}}{dt} = \boldsymbol{f}^k \left(\begin{pmatrix} \boldsymbol{z}_{\text{AO}}(t) \\ \boldsymbol{z}_{\text{VG}}(t) \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \boldsymbol{e}(t) \\ \boldsymbol{u}(t) \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \boldsymbol{p}_{\text{AO}}^k \\ \boldsymbol{p}_{\text{VG}} \end{pmatrix} \right). \quad (11)$$

wobei $\boldsymbol{p}_{\text{VG}}$ die Kennwerte des Verarbeitungsgutes beschreibt. Die Zustandsfunktion und den Satz der Entwurfsvariablen verändert der Entwickler durch Wechsel des Wirkprinzips und des Funktionsprinzips. Wird dieser Zusammenhang bei der Modellbildung durch parametrische Systemmodelle berücksichtigt, sind Vergleiche von Konzepten mit Hilfe von Simulationen möglich, vgl. (Bossel, 2004). In den Zielstellungen der Entwicklungsaufgabe werden in der Regel allerdings keine expliziten Forderungen an die Zustandsgrößen des dynamischen Systems formuliert. Bei der Simulation von Wirkpaarungen müssen deshalb Zustandsgrößen der Wirkpaarung festgelegt werden, die als Indikatoren für Eigenschaften in den Kategorien Qualität, Zeit, Kosten und Flexibilität dienen, vgl. (Schmidt, 1998).

Optimierungsproblem für die Konzeptauswahl

Das allgemeine Optimierungsproblem für die Konzeptauswahl lässt sich nun auf den Verarbeitungsvorgang anwenden, wonach gilt

$$\min\{\boldsymbol{\mu}_{\text{WP}} = f^k(\boldsymbol{p}_{\text{AO}}^k) \mid \boldsymbol{p}_{\text{AO}}^k \in \boldsymbol{P}^k, f^k: \boldsymbol{P}^k \rightarrow \boldsymbol{M}, \boldsymbol{\mu}_V \in \boldsymbol{M}\}. \quad (12)$$

Diese Aufgabe liest sich: Suche alle besten Varianten \boldsymbol{P}^{k*} eines Wirkpaarungskonzeptes k durch Variation der Entwurfsvariablen $\boldsymbol{p}_{\text{AO}}^k$ im Entwurfsraum \boldsymbol{P}^k , sodass die Bewertungskriterien der Wirkpaarung $\boldsymbol{\mu}_{\text{WP}}$ im interessanten Gebiet der Wirkpaarungseigenschaften \boldsymbol{M} minimal werden. Führt man diese Optimierungsaufgabe für die zur Auswahl stehenden Wirkpaarungskonzepte mit Hilfe einer Simulation durch, erhält man für jedes Konzept die pareto-optimalen Varianten. Diese Pareto-Mengen können mit Hilfe der Analysemethoden nach (Mattson & Messac, 2003, 2005) untersucht werden und die Ergebnisse dieser Analysen in einem diskursiven Verfahren bei der Entscheidung für ein Wirkpaarungskonzept helfen.

Anwendungsbeispiel

Schweißen von Kunststofffolien

Als Illustrationsbeispiel dient das Verschließen von Beutelpackungen aus Kunststofffolien durch Schweißen. Dieser Fügevorgang wird in Verpackungsanlagen für verschiedenen Beutelformen angewendet, z.B. Abb. 4 a). Durch Aufschmelzen und Ineinanderfließen der Packstoffe entsteht dabei entsprechend Abb. 4 b) eine stoffschlüssige Verbindung in der Fügezone, wobei sich der Schweißvorgang gemäß dem idealen Verarbeitungsdiagramm nach Abb. 4 c) aus den Teilvorgängen Erwärmen, Pressen und Abkühlen zusammensetzt. Die für die Produktion interessanten Eigenschaften des Schweißvorganges sind in Tab. 1 zusammengetragen.

(DIN, 2021) benennt verschiedene Schweißverfahren, wobei hier exemplarisch nur die Verfahren Wärmekontakt-, Heizkeil-, Rollband- und Ultraschallschweißen betrachtet werden. Die ersten drei nutzen das Wirkprinzip Festkörperkontakt, also den Wärmeübergang von einem heißen Schweißorgan auf den Packstoff. Das Ultraschallschweißen nutzt Reibungswärme, die bei hochfrequent oszillierender Kompression des Packstoffes entsteht.

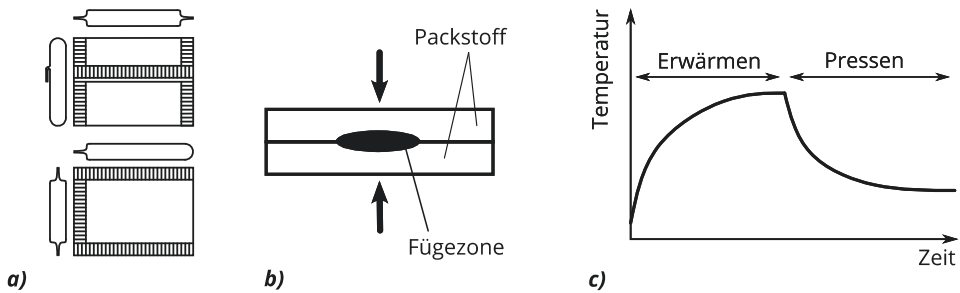


Abbildung 4: a) Verschiedene Beutelformen: Oben Schlauchbeutel, unten Siegelrandbeutel, unter Verwendung von (Bleisch et al., 2011). b) Schema des Schweißvorgangs, nach (Bleisch et al., 2011). c) Ideales Verarbeitungsdiagramm des Schweißvorgangs, nach (Schmidt, 2000).

Tabelle 1: Anforderungen an den Schweißvorgang beim Schlauchbeutel-Verfahren, unter Verwendung von (Bleisch et al., 2011, 2014).

Kategorie	Eigenschaften	Anforderung
Qualität	Δq Nahtdichtigkeit Nahtfestigkeit Optik	Keine oder geringe Durchlässigkeit Hohe mechanische Widerstandsfähigkeit Keine Bräunung, Blasenbildung
Zeit	t_v Dauer des Vorgangs	Synchronisation mit anderen Vorgängen
Aufwand	a Energieeinsatz Bauraum	Plastifizierung der Fügezone, Aufwenden der Presskraft, Bewegung der Schweißorgane Wenig Platzbedarf
Flexibilität	r Packstoff Nahtform Beutelformat	Variation des Materials und Schichtaufbaus Variation, z.B. Flossennaht, Überlappnaht Länge, Breite, Art der Beutelkante

Wirkprinzipien und Modellansatz für das Schweißen

(Schmidt, 2000) schlägt zur Simulation des Erwärmens beim Schweißvorgangs die Modellierung als Temperaturfeldproblem vor, wobei die untersuchte Zustandsgröße des Systems die Temperatur T in der Fügezone ist. Das Verhalten der Wirkpaarung ist dann durch die allgemeine Differentialgleichung der Wärmeübertragung gegeben:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + (\nabla \mathbf{v})T = \frac{1}{\rho c_v} (-\nabla \lambda \nabla T + \phi). \quad (13)$$

Die Terme beschreiben von links nach rechts die Temperaturänderung, die Konvektion, die Wärmeleitung und innere Wärmequellen (Potente, 2004; Schmidt, 1998). Tab. 2

gibt eine Übersicht der spezifischen Terme der Wärmeeinleitung für die Wirkprinzipien Festkörperkontakt und Reibung. Das jeweilige Wirkprinzip schlägt sich damit direkt in der Zustandsgleichung des dynamischen Wirkpaarungsmodells und damit in den Eigenschaften der Wirkpaarung nieder.

Tabelle 2: Spezifische Terme der Differentialgleichung der Wärmeübertragung für die Wärmeeinleitung in den Packstoff, unter Verwendung von (Potente, 2004; Schmidt, 2000).

Wirkprinzip	Spezifischer Term	Erläuterung
Festkörperkontakt	$T_i = \frac{b_{AO}T_{AO} + b_{VG}T_{VG}}{b_{AO} + b_{VG}},$ $b = \sqrt{\rho c_v \lambda}$	Grenzflächentemperatur T_i , Temperatur des Arbeitsorgans T_{AO} , Verarbeitungsgutes T_{VG} , Dichte ρ , Wärmekapazität c_v , Wärmeleitfähigkeit λ
Reibung (Ultraschall)	$\phi = \frac{1}{2} \varepsilon E' \omega \eta$	max. Wechseldehnung ε , Elastizitätsmodul E' , Kreisfrequenz ω , Verlustfaktor η

Das Temperaturfeld in der Fügezone kann damit als Indikator für die Qualität des Schweißvorganges herangezogen werden, denn es gibt Auskunft über die Schmelzbildung des Packstoffes, die wiederum die Ausbildung der Schweißnaht bestimmt (Schmidt, 2000). Das Qualitätskriterium ist demzufolge eine gleichmäßige Temperatur in der Fügezone zwischen der zum Aufschmelzen notwendigen Plastifizierungstemperatur T_{pl} und der materialzerstörenden Zersetzungstemperatur T_z . Die Indikatoren für die Anforderungskategorien Zeit, Kosten und Flexibilität leiten sich gemäß Tab. 3 aus dem Erwärmungsvorgang ab.

Tabelle 3: Indikatoren der Eigenschaften des Schweißvorganges.

Kategorie	Indikator
Qualität	$\Delta q = \Delta T(t_S) = T(t_S) - T_{pl}$: Abweichung der Temperatur in der Fügezone am Ende des Teilvorganges Erwärmen
Zeit	$t_V = t_E$: Dauer der Erwärmung
Aufwand	$a = \int P(t) $: Energieeinsatz
Flexibilität	$r = \{\Delta T(t_I), \Delta p_{VG} \mid T_{pl} < T(t_S) \leq T_z, t_E \leq t_{E,max}\}$: Zulässige Schwankungen der Anfangstemperatur und Änderungen der Kenngrößen der Packmittel.

Polyoptimierungsaufgabe und Vergleich der Schweißverfahren

Auf Grundlage der Überlegungen in Abschnitt 6 lautet die Optimierungsaufgabe für den Erwärmungsvorgang eines Schweißverfahrens k

$$\min \left\{ \left(\begin{array}{c} \Delta T(t_S) \\ t_E \\ \int |P(t)| \\ -\Delta T(t_1), -\Delta p_{VG} \end{array} \right) = f^k(\mathbf{p}_{AO}^k) \mid \Delta T(t_S) < T_z - T_{pl}, t_E \leq t_{E,max} \right\}. \quad (14)$$

Im Folgenden werden anhand der Literatur grundsätzliche Aussagen über die Eigenschaften der Wirkprinzipien Festkörperkontakt und Reibung wiedergegeben, die die Lösung des Problems andeuten und den Zielkonflikt zwischen den vier Eigenschaftskategorien vorwegnehmen.

Beim Wärmekontaktschweißen und Ultraschallschweißen unterschieden sich die Temperaturprofile im Packstoff auf Grund der unterschiedlichen Wirkprinzipien grundsätzlich, siehe Abb. 5. Je kürzer die Schweißzeiten sind, desto größer ist das Temperaturgefälle im Packstoff.

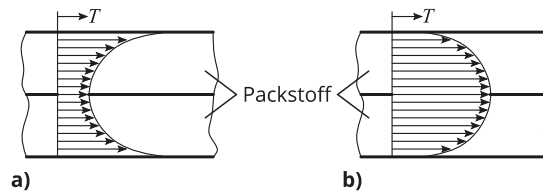


Abbildung 5: Prinzipielle Temperaturprofile im Packstoff a) beim Wärmekontaktschweißen, nach (Potente, 2004), und b) beim Ultraschallschweißen, vgl. (Bach, 2014).

Beim Wärmekontaktschweißen wird die minimale Vorgangsdauer deshalb durch die maximal zulässige Temperatur an den Außenseiten begrenzt. Beim Ultraschallschweißen hingegen hängt die Wärmeeinleitung stark von den Packstoffeigenschaften ab, vgl. Tab. 2. Mit dem Ultraschallschweißverfahren sind damit im Allgemeinen kürzere Schweißzeiten möglich, allerdings wirken sich Veränderungen der Packmittel stärker auf den Vorgang aus als beim Wärmekontaktschweißen, vgl. (Bach, 2014; Potente, 2004). Der grundlegende Zielkonflikt zwischen Qualität, Zeit und Flexibilität ist damit skizziert.

Rollbandschweißen und Heizkeilschweißen nutzen beide das Wirkprinzip Festkörperkontakt, unterscheiden sich aber darin, dass beim Rollbandschweißen der Packstoff an den Außenseiten und beim Heizkeilschweißen direkt in der Fügenaht erwärmt wird. Beide Verfahren unterscheiden sich nach Abb. 6 hinsichtlich der möglichen Abzugsgeschwindigkeit des Packmittels, der erforderlichen Schweißtemperatur und Länge des Schweißorgans. Bei beiden Verfahren steigt die erforderliche Länge des Arbeitsorgans mit der Abzugsgeschwindigkeit an (Schmidt, 2000). Damit ist der Zielkonflikt zwischen Qualität, Zeit und Kosten auch hier skizziert.

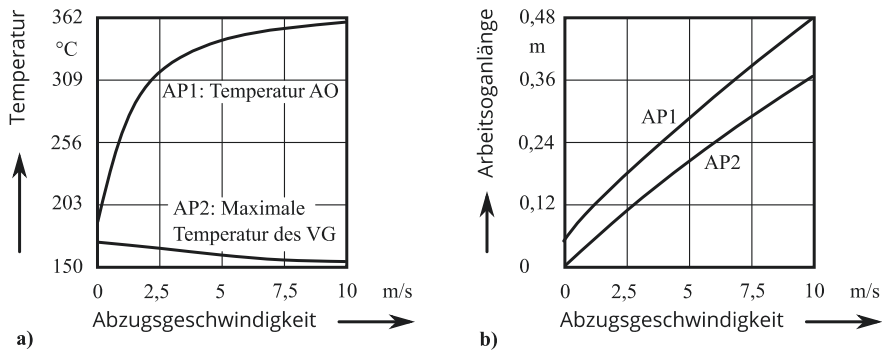


Abbildung 6: Zusammenhang zwischen a) Schweißtemperatur und der Abzugsgeschwindigkeit sowie b) der Schweißtemperatur und der Arbeitsorganlänge für die Schweißverfahren Rollbandschweißen (AP1) und Heizkeilschweißen (AP2), nach (Schmidt, 2000).

Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieses Beitrages wurde ein methodischer Ansatz zur Diskussion gestellt, der es ermöglicht die Anforderungen der verarbeitenden Industrie unter den Kategorien Qualität, Zeit, Kosten und Flexibilität in Form konkreter, technischer Zielgrößen zu formulieren und verschiedene, optimale Lösungskonzepte hinsichtlich dieser Zielgrößen zu vergleichen. Kern des Ansatzes ist ein dynamisches Wirkpaarungsmodell, das die Zielgrößen als Systemeigenschaften abbildet. Es wurde gezeigt, dass unter Nutzung dieses Modells und einer parametrischen Simulation von Verarbeitungsvorgängen ein mehrkriterielles Optimierungsproblem formuliert werden kann, dessen Lösung alle gleichwertigen Varianten eines Konzeptes enthält. Ferner wurde argumentiert, dass diese Menge den Zielkonflikt zwischen den Anforderungskategorien für eine konkrete Entwicklungsaufgabe aufzeigen kann und damit die Auswahl von Lösungskonzepten auf eine objektivere Entscheidungsgrundlage stellt.

Der vorgestellte Ansatz ist als Diskussionsgrundlage zu werten und bleibt darüber hinaus noch eingehend anhand beispielhafter Anwendungen zu überprüfen. Die hier berücksichtigten Unterscheidungsmerkmale von Konzepten beschränken sich außerdem auf das Wirkprinzip, können aber beliebige, andere Merkmale sein. Des Weiteren sollten ergänzende Möglichkeiten zur Bewertung der Pareto-Mengen in Betracht gezogen werden, um die hier vorgestellte Auswahlmethode zu präzisieren.

Literaturverzeichnis

- Bach, S. (2014). *Untersuchung der Vorgänge und Einflüsse beim Ultraschallfügen flexibler polymerer Packstoffe* [Dissertation]. Dresden: Technische Universität Dresden.
- Beach, R., Muhlemann, A. P., Price, D. H. R., Paterson, A., & Sharp, J. A. (2000). A review of manufacturing flexibility. In: *European Journal of Operational Research*, 122(1), 41–57. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(99\)00062-4](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(99)00062-4)
- Bech, S., Brunoe, T. D., & Larsen, J. K. (2018). Changeability of the manufacturing systems in the food industry – A case study. In: *Procedia CIRP*, 72, 641–646. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.03.014>
- Bleisch, G., Langowski, H.-C., & Majschak, J.-P. (2014). *Lexikon Verpackungstechnik* (2., stark überarb., erg. u. erw. Aufl.). Hamburg: Behr.
- Bleisch, G., Majschak, J.-P., & Weiß, U. (2011). *Verpackungstechnische Prozesse / Lebensmittel-, Pharma- und Chemieindustrie*. Hamburg: Behr.
- Bossel, H. (2004). *Systeme, Dynamik, Simulation: Modellbildung, Analyse und Simulation komplexer Systeme*. Norderstedt: Books on Demand.
- Chrissolouris, G. (2013). *Manufacturing Systems: Theory and Practice*. Heidelberg: Springer Science & Business Media.
- DIN. (2014). *DIN 8743—Verpackungsmaschinen und Verpackungsanlagen—Kennzahlen zur Charakterisierung des Betriebsverhaltens und Bedingungen für deren Ermittlung im Rahmen eines Abnahmelaufs*.
- DIN. (2021). *DIN 1910—Schweißen—Schweißen von Kunststoffen—Verfahren*.
- Ehrlenspiel, K., Kiewert, A., Lindemann, U., & Mörtl, M. A. (2020). *Kostengünstig Entwickeln und Konstruieren: Kostenmanagement bei der integrierten Produktentwicklung* (8. Aufl.). Heidelberg: Springer Vieweg.
- Ehrlenspiel, K., & Meerkamm, H. (2013). *Integrierte Produktentwicklung—Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit* (5. überarb. u. erw. Aufl.). München: Carl Hanser Verlag.
- Ester, J. (1987). *Systemanalyse und mehrkriterielle Entscheidung*. Berlin: Verlag Technik.
- Fischer, J. O. (2008). *Kostenbewusstes Konstruieren: Praxisbewährte Methoden und Informationssysteme für den Konstruktionsprozess*. Heidelberg: Springer.
- Focke, M., & Steinbeck, J. (2018). *Steigerung der Anlagenproduktivität durch OEE-Management: Definition, Vorgehen und Methoden—Von manuell bis Industrie 4.0*. Wiesbaden: Springer Gabler.
- Göhler, S., Eifler, T., & Howard, T. J. (2016). Robustness Metrics: Consolidating the Multiple Approaches to Quantify Robustness. In: *Journal of Mechanical Design*, 138(111407). <https://doi.org/10.1115/1.4034112>
- Goldhahn, H. (1978). *Beitrag zur Verallgemeinerung wirkpaarungstechnischer Zusammenhänge* [Habilitation]. Dresden: Technische Universität Dresden.
- Gunasekaran, S. (2005). Automation of Food Processing. In G. V. Barbosa-Cánovas (Hrsg.), *Food Engineering: Bd. IV* (S. 745–757). EOLSS Publications.
- Hennig, J. (1977). *Ein Beitrag zur Methodik der Verarbeitungsmaschinenlehre* [Habilitation]. Dresden: Technische Universität Dresden.

- Jen, E. (2005). Stable or Robust? What's the Difference? In *Robust Design* (S. 7–20). New York: Oxford University Press.
- Lanza, G., Rühl, J., & Peters, S. (2009). Bewertung von Stückzahl- und Variantenflexibilität in der Produktion. In: *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 104(11), 1039–1044. <https://doi.org/10.3139/104.110193>
- Maganha, I., Silva, C., & Ferreira, L. M. D. F. (2020). The impact of reconfigurability on the operational performance of manufacturing systems. In: *Journal of Manufacturing Technology Management*, 31(1), 145–168. <https://doi.org/10.1108/JMTM-12-2018-0450>
- Majschak, J.-P. (1997). *Rechnerunterstützung für die Suche nach verarbeitungstechnischen Prinziplösungen* [Dissertation]. Dresden: Technische Universität Dresden.
- Majschak, J.-P. (2020). Anwendung für Maschinensysteme der Stoffverarbeitung. In B. Bender & D. Göhlich (Hrsg.), *Dubbel Taschenbuch für den Maschinenbau 2: Anwendungen* (S. 65–78). Heidelberg: Springer.
- Majschak, J.-P., Mauermann, M., Müller, T., Richter, C., Wagner, M., & Reinhart, G. (2017). Verarbeitungsanlagen und Verpackungsmaschinen. In *Handbuch Industrie 4.0: Geschäftsmodelle, Prozesse, Technik* (S. 379–427). München: Carl Hanser Verlag.
- Mapes, J., Szejczewski, M., & New, C. (2000). Process variability and its effect on plant performance. In: *International Journal of Operations & Production Management*, 20(7), 792–808. <https://doi.org/10.1108/01443570010330775>
- Mason, G., van Ark, B., & Wagner, K. (1994). Productivity, Product Quality and Workforce Skills: Food Processing in Four European Countries. In: *National Institute Economic Review*, 147(1), 62–82. <https://doi.org/10.1177/002795019414700105>
- Mattson, C. A., & Messac, A. (2003). Concept Selection Using s-Pareto Frontiers. In: *AIAA Journal*, 41(6), 1190–1198. <https://doi.org/10.2514/2.2063>
- Mattson, C. A., & Messac, A. (2005). Pareto Frontier Based Concept Selection Under Uncertainty, with Visualization. In: *Optimization and Engineering*, 6(1), 85–115. <https://doi.org/10.1023/B:OPTE.0000048538.35456.45>
- Messac, A. (2015). *Optimization in practice with MATLAB for engineering students and professionals*. New York: Cambridge University Press.
- Nakajima, S. (Hrsg.). (1989). *TPM Development Program: Implementing Total Productive Maintenance*. Cambridge MA: Productivity Press.
- Nakhla, M. (1995). Production control in the food processing industry: The need for flexibility in operations scheduling. In: *International Journal of Operations & Production Management*, 15(8), 73–88. <https://doi.org/10.1108/01443579510094107>
- Peschel, M., & Riedel, C. (1976). *Polyoptimierung: Eine Entscheidungshilfe für ingenieurtechnische Kompromißlösungen*. Berlin: Verlag Technik.
- Potente, H. (2004). *Fügen von Kunststoffen: Grundlagen, Verfahren, Anwendung*. München: Carl Hanser Verlag.
- Reeves, C. A., & Bednar, D. A. (1994). Defining quality: Alternatives and implications. In: *Academy of Management Review*, 19(3), 419–445. <https://doi.org/10.5465/amr.1994.9412271805>
- Schmidt, F. (2000). *Vorgangsdeduzierte Verarbeitungstechnik* [Habilitation]. Dresden: Technische Universität Dresden.
- Schmidt, F. (1998). Simulation des Verhaltens von Verarbeitungssystemen. In: *Verarbeitungsmaschinen und Verpackungstechnik Integrativ Entwickeln*, 89–109.

Schumacher, A. (2020). *Optimierung mechanischer Strukturen: Grundlagen und industrielle Anwendungen* (3. Aufl.). Heidelberg: Springer Vieweg.

Shewhart, W. A. (1931). *Economic Control of Quality of Manufactured Product*. London: Macmillan and Co. Ltd.

Stricker, N., & Lanza, G. (2014). The Concept of Robustness in Production Systems and its Correlation to Disturbances. In: *Procedia CIRP*, 19, 87–92. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.04.078>

Tränkner, G. (Hrsg.). (1980). *Verarbeitungsmaschinen: Bd. 3,2*. Berlin: Verlag Technik.

Trattner, A., Hvam, L., Forza, C., & Herbert-Hansen, Z. N. L. (2019). Product complexity and operational performance: A systematic literature review. In: *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 25, 69–83. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2019.02.001>

Troll, C. (2021). *Synthese und Umsetzung optimaler Bewegungen unter Berücksichtigung der einstellbaren Maschinendrehzahl* [Dissertation]. Dresden: Technische Universität Dresden. Unveröffentlicht.

Weber, Paul, Oehm, L., Carsch, S., Schult, A., & Majschak, J.-P. (2019). Entwicklungsassistenz zum Entwurf Innermaschineller Verfahren für Verarbeitungsmaschinen. In: *Entwickeln Entwerfen Erleben in Produktentwicklung und Design 2019*, 185–200.

Weber, Peter. (2018). *Kostenbewusstes Entwickeln und Konstruieren: Grundlagen—Methoden—Beispiele* (4. Aufl.). Stuttgart: UTB GmbH expert verlag.

Weile, F. (1996). *Komplexe Untersuchung von Antriebs- und Verarbeitungssystemen mittels Simulation am Beispiel von Schlauchbeutelmaschinen* [Dissertation]. Dresden: Technische Universität Dresden.

Kontakt

Dipl.-Ing. Peter Lochmann
peter.lochmann@tu-dresden.de

Prof. Dr.-Ing. Jens-Peter Majschak
verarbeitungsmaschinen@tu-dresden.de

Technische Universität Dresden
Professur für Verarbeitungsmaschinen/Verarbeitungstechnik
Bergstr. 120
01069 Dresden
www.verarbeitungsmaschinen.de