

Scharfe Prozessdigitalisierung

Inline-Bewertung von Spritzgießprozessen mit maschinellen Lernverfahren

Trotz Covid-19-bedingter Einschränkungen – oder gerade deswegen – wird die Digitalisierung von Fertigungsprozessen vorangetrieben. Wie die Entwicklung eines werkzeugintegrierten Assistenzsystems zur Produktionsregelung beim Spritzgießen zeigt, ist die Einbindung von Sensorik und intelligenter Auswerteelektronik ein sinnvoller Ansatz, um die Produktivität der Kunststoffverarbeiter zu verbessern, Ressourcen zu schonen und Werkzeugstandzeiten zu verlängern.



Im Technikum der Schneider Form GmbH: Szenen aus den DoE-Versuchen bei der Herstellung eines Pkw-Stoßfängers © Schneider Form

Für Spritzgießunternehmen spielt die Qualität ihrer Kunststoffprodukte eine zentrale Rolle. Diese Qualität in einem diskontinuierlichen Verfahren sicherzustellen, ist eine komplexe Anforderung. Dazu muss der verantwortliche Einrichter in der Lage sein, alle Prozessparameter optimal aufeinander abzustimmen. Daneben müssen wirtschaftliche Aspekte wie Prozessstabilität, -geschwindigkeit, Ressourcen- und Energieeffizienz beachtet werden. Zudem muss der Prozess Schwankungen in der Versorgung, im mechanischen Prozessablauf, in den Rohstoffeigenschaften und Umgebungsbedingungen standhalten sowie eine störungsfreie Produktion ermöglichen.

Die Unversehrtheit des Spritzgießwerkzeugs gerät dabei häufig aus dem Blickwinkel, was zu Produktionsausfällen aufgrund fehlerhafter Handhabung führen kann. Maßgeblich für die Produktivität eines Spritzgießverarbeiters ist dabei

die Erfahrung jedes Maschinenbedieners im Umgang mit dem Werkzeug und mit dem Prozess. Allzu oft gehen diese Erfahrungswerte mit dem Ausscheiden langjähriger Mitarbeiter aus dem Unternehmen verloren.

Werkzeugatmung als Indikator für die Bauteilqualität

Dieser Know-how-Verlust lässt sich überwinden durch ein „Werkzeugintegriertes Assistenzsystem zur Produktionsregelung beim Spritzgießen hochkomplexer und anspruchsvoller Bauteilspezifikationen“, kurz Wasabi. Basierend auf Algorithmen aus dem Bereich der maschinellen Lernverfahren, führt der digitale Assistent eine indirekte permanente Qualitätskontrolle während eines Produktionszyklus durch und berücksichtigt dabei die Werkzeugatmung, die bei jedem Spritzgießprozess auftritt. Die Ausprägung dieser elasti-

schen Werkzeugverformung, die sich unmittelbar durch eine schlechtere Bauteilqualität auswirkt (Gratbildung, Maßabweichung, schwankendes Bauteilgewicht), ist ein Indikator für die unsachgemäße Handhabung eines (fachgerecht ausgelegten) Werkzeugs. Indirekt wirkt sich die Atmung auch auf die Maschinen- und Werkzeugstandzeit aus, z.B. durch temporäre Deformation beweglicher Werkzeugbauteile oder eine Schiefstellung der Maschinenplatte.

Bauteilüberwachung und Verschleißkontrolle müssen dort ansetzen, wo die Defekte entstehen: im Werkzeug bzw. in der Kavität. Eine entsprechende Schnittstelle zwischen Mensch, Maschine, Werkzeug und Produkt wollen die Projektpartner Schneider Form GmbH und Hochschule Schmalkalden in Wasabi entwickeln. Der Systeminput aus im Werkzeug verbauten Sensoren wird über angepasste maschinelle Lernverfahren gewertet

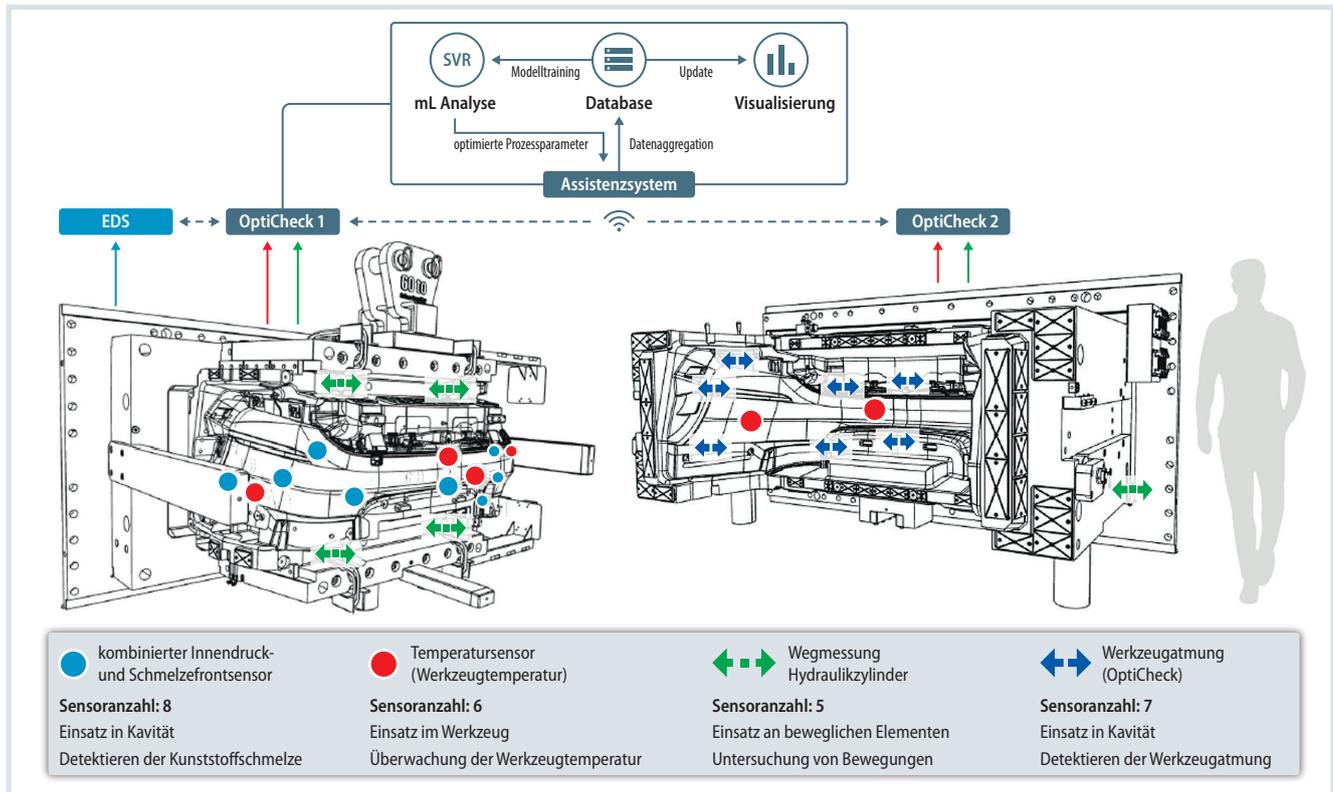


Bild 1. Systemkonzept Wasabi: An der beweglichen Werkzeugeite sind 16, an der festen Seite zehn Sensoren installiert Quelle: Schneider Form; Grafik: © Hanser

und ausgegeben. Der Output des Systems ist eine verständlich aufbereitete Beurteilung des aktuellen Prozesszyklus, mit der selbst unerfahrenes Personal die Prozessstabilität und Bauteilqualität bewerten und sicherstellen kann.

Die Ausgabe, die das Assistenzsystem bereitstellt, ist eine indirekte Qualitätsbewertung des Kunststoffbauteils und eine direkte Bewertung der Prozessparameter unter Berücksichtigung der produktionsbedingten mechanischen Belastung des Werkzeugs. Das System verkürzt die Einfahrprozedur beim erneuten Rüsten von Werkzeugen, sorgt für eine permanente Überwachung im Zyklus, registriert nicht notwendige mechanische Belastungen des Werkzeugs und unterstützt den Einrichter sowie den QM-Mitarbeiter bei seiner Arbeit. Das Wissen rund um den Prozess verbleibt dauerhaft dort, wo es benötigt wird: am Werkzeug.

Mit geeigneten Sensoren zum Assistenzsystem

Der Assistent wurde entwickelt mit einer Pkw-Stoßstange als Forschungsobjekt. Das Bauteil besitzt komplexe und anspruchsvolle Bauteilspezifikationen, z. B. in Form bestimmter geometrischer Merk-

male und Anforderungen an die Oberflächenqualität. Bei einem Bauteilgewicht von 3,7 kg stellt jeder Zyklus, bei dem die Qualitätskriterien nicht erfüllt werden, eine finanzielle Belastung für das Spritzgießunternehmen dar. Die Erfahrung zeigt, dass im Rahmen des Einfahrprozesses bis zu 30 Zyklen notwendig sind, um die geforderte Qualität reproduzierbar herzustellen.

Für die Entwicklung eines Assistenzsystems, das derart komplexe Prozesse zu einer einfach verständlichen Bewertung bündelt, sind umfangreiche Untersuchungen notwendig. Zusammenhänge zwischen Sensorsignalen, Bauteilqualität und Werkzeugatmung müssen untersucht werden, zudem lineare und nichtlineare funktionelle Zusammenhänge und Wechselwirkungen zwischen allen betrachteten Größen. Das dafür bereitgestellte 40 t schwere Spritzgießwerkzeug wird über elf Heißkanaldüsen kaskadierend gefüllt. Die Fließweglänge beträgt dabei ca. 1400 mm vom Zentrum bis zu einer „Ohrenspitze“ (Radlaufkante). Auf diesem Weg wird die Kunststoffschmelze ständig wechselnden thermischen und mechanischen Belastungen ausgesetzt. Für die Messungen wurden 26 Sensoren über die beiden Werkzeughälften verteilt (**Bild 1**).

Die Verwendung der vielen Sensoren stellt sicher, dass der Prozessablauf ganzheitlich betrachtet werden kann. Die Messdaten werden durch Kombination der beiden weiterentwickelten Ursysteme EDS („Eingebettetes Diagnosesystem“) [1] und OptiCheck [2, 3] verarbeitet. Für Wasabi ist jede Werkzeughälfte mit einem OptiCheck-System zur Datenerfassung ausgestattet (**Bild 1**). An der beweglichen Seite werden die Signale von 16 Sensoren erfasst. Mit einem speziell hierfür entwickelten 8-fach Signalkonditionierer (EDS) wird die Kavität mit einer Frequenz von 1 kHz überwacht. Die Messdaten der festen Seite basieren auf den Signalen von zehn Sensoren; diese werden an das primäre System (OptiCheck auf der beweglichen Seite) gesendet. Dort werden alle Datenpakete synchronisiert und abgespeichert.

Generierung der Datenbasis für den Einsatz maschineller Lernverfahren

Für die Anwendung maschineller Lernverfahren ist eine verifizierte Datenbasis unabdingbar (**Bild 2**). Die Versuchsplanung und -durchführung muss einen Bereich des Prozessfensters abbilden, der eine ausreichende Anzahl an positiv wie »

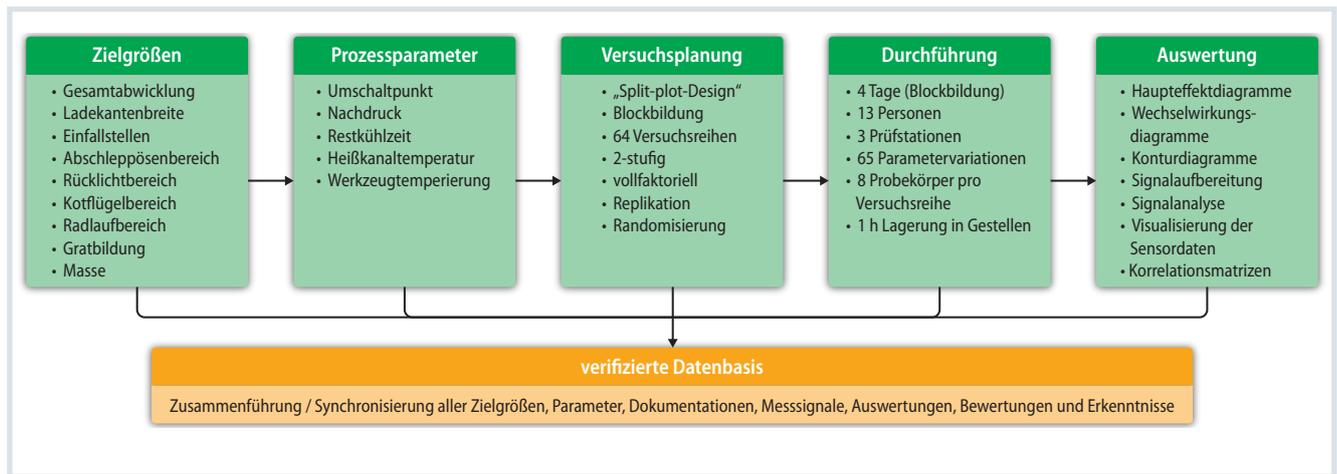


Bild 2. Ansatz zur Generierung einer verifizierten Datenbasis. Der erhebliche Versuchsumfang ist der Bauteil- und Werkzeuggröße geschuldet

Quelle: Hochschule Schmalkalden; Grafik: © Hanser

Die Autoren

Michael Werner, M. Eng. ist als wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Forschungsgruppe „Angewandte Kunststofftechnik“ für die Bereiche Sensortechnik, Signalanalyse und maschinelle Lernverfahren verantwortlich; m.werner@hs-sm.de

Prof. Dr.-Ing. Thomas Seul ist Inhaber der Professur für Fertigungstechnik und Werkzeugkonstruktion an der Fakultät Maschinenbau der Hochschule Schmalkalden; t.seul@hs-sm.de

Prof. Dr.-Ing. Andreas Wenzel ist Professor für Eingebettete Systeme und Technische Informatik an der Fakultät Elektrotechnik der Hochschule Schmalkalden.

Norbert Greifzu, M.Sc., ist wissenschaftlicher Mitarbeiter Angewandte Systemtechnik AST im Fraunhofer IOSB und für die Entwicklung des 8-fach Signalkonditionierers verantwortlich.

Markus Lehr ist langjähriger Mitarbeiter bei der Schneider Form GmbH, Dettingen unter Teck, und in dieser Funktion der Produktmanager des Systems OptiCheck sowie Koordinator des Forschungsprojekts Wasabi.

Dank

Die dem Beitrag zugrundeliegenden Inhalte wurden durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen eines KMU-innovativ Verbundprojekts gefördert (FKZ: 02P18K591).

auch negativ bewerteten Bauteilqualitäten zulässt. Eine Methode zur Generierung einer solchen Datenbasis ist die statistische Versuchsplanung mittels Design of Experiments (DoE).

Der hohe personelle Aufwand dafür (**Bild 2**) ist notwendig, um die korrekte Handhabung der Bauteile zu sichern. Der zeitliche Aufwand wird durch die Vielzahl an Parametervariationen bestimmt. Der erhebliche Versuchsumfang ist der Bauteil- und Werkzeuggröße geschuldet. Die Anzahl der Versuchsreihen und der Probekörper (pro Versuchsreihe) definieren den Umfang der Datenbasis. Dieser Umfang bestimmt bereits, welche maschinellen Lernverfahren grundsätzlich anwendbar sind. Resultat der DoE-Durchführung sind über 1000 aufgezeichnete Prozesszyklen mit 548 voll dokumentierten Probekörpern. Die Kartierung der Oberflächengüte erfolgte durch eine Messroutine mit der Inspect-Software von GOM und einem Atos Triple Scankopf. In der Routine wurden die Messbereiche vordefiniert und über Falschfarbenbilder in die Stufen negativ-falsch, richtig und positiv-falsch unterteilt.

Maßgebliche Einflussgrößen

Das Resultat der DoE charakterisiert die Parameter Nachdruck und Werkzeugtemperatur als maßgebliche Einflussgrößen für die Qualität der Zielkriterien (**Bild 3**). Hervorstechend ist dabei der Nachdruck. Daher werden das Nachdruckprofil und sein Einfluss detaillierter untersucht. Die Auswertung aller Versuchsreihen zeigt, dass die geforderte Bauteilqualität nur in einem

kleinen Prozessfenster zu erzielen ist. Ein Großteil der Versuchsreihen erfüllt nicht alle Qualitätskriterien. Die geplante und durchgeführte DoE erzielt eine Modellgenauigkeit von 95,45 %. Dieses Ergebnis ist für die Generierung einer verifizierten Datenbasis ein sehr gutes Resultat.

In den Prozesssignalen ist der Einfluss der beiden signifikanten Faktoren ebenfalls zu sehen. Bei einer Werkzeugtemperatur von 20 °C steigt der Werkzeuginnen-Druck lokal im Zentrum um bis zu 20 bar stärker an als bei Versuchen mit 40 °C. Dadurch entsteht eine lokale Verformung des Werkzeugs, die sich negativ auf die Bauteilqualität (Gratbildung) und die Werkzeugstandzeit auswirkt. Bei einem Werkzeuginnen-Druck von bis zu 350 bar (**Bild 4**) verformt sich dieser Bereich um 0,075 mm (Sensor 4). Eine Verformung in dieser Größenordnung bewirkt bereits einen starken Grat an den Bauteilrändern. Aus den Grafiken wird auch ersichtlich, dass sich das Werkzeug infolge des steigenden Innendrucks vorrangig im unteren Bereich öffnet (Sensor 7). Dort ist die Verformung mit 0,19 mm mehr als doppelt so groß wie im Zentrum.

Ebenfalls ist in den Versuchen zu sehen, dass die Werkzeugatmung synchron gedämpft zum Werkzeuginnen-Druck verläuft (**Bild 4**, siehe Rahmen). Weiterhin lässt sich der gesamte Prozesszyklus in seinem Ablauf in den Sensordaten nachweisen: Einspritzen, Umschaltpunkt, Nachdruckphase und das Schaltprofil der Kaskadensteuerung für die elf Heißkanaldüsen sind über die Druckkurven ersichtlich (**Bild 5**).

Die Auswertung der Sensorik ergab, dass sich sechs der acht Kombisensoren

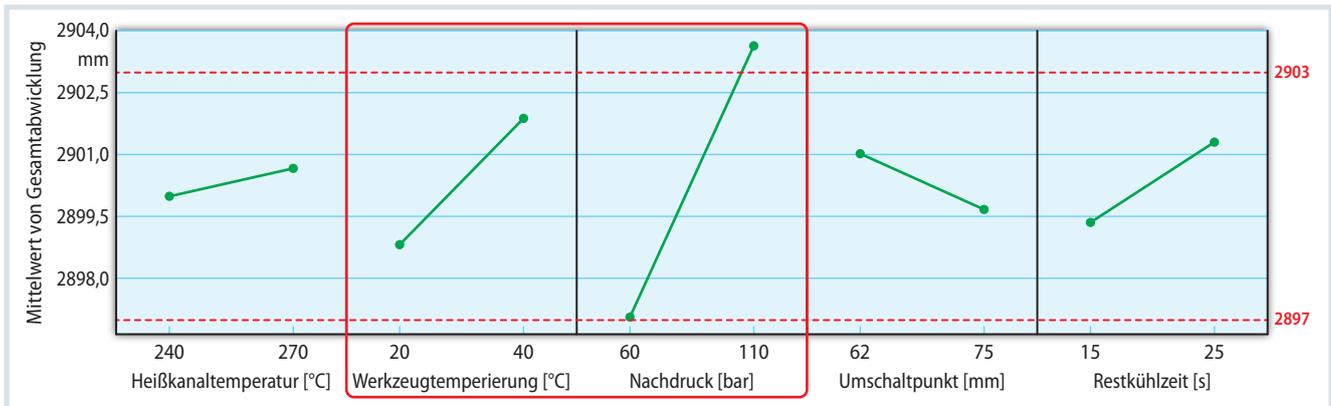


Bild 3. Haupteffektdiagramm für die Gesamtabwicklung. Der Minitab-Auszug zeigt, wie sich einzelne Faktoren auf das Zielkriterium auswirken

Quelle: Hochschule Schmalkalden; Grafik: © Hanser

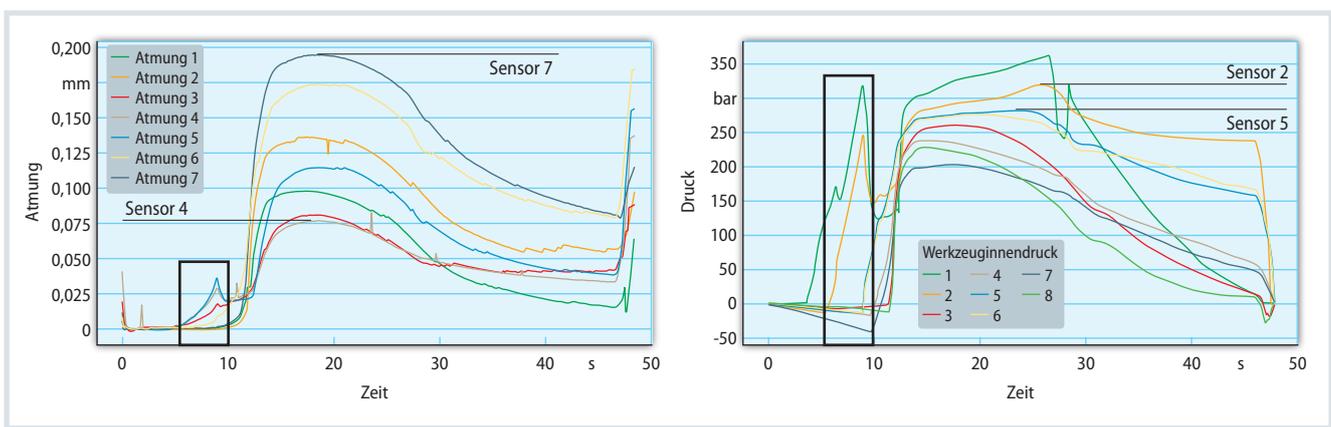


Bild 4. Gegenüberstellung Werkzeugatmung und Werkzeuginnendruck. Sensor 4 befindet sich im Zentrum, Sensor 7 im unteren Bereich des Werkzeugs (links). Rechts die äquivalenten Innendrucksignale für diese Bereiche (Sensoren 2 und 5) Quelle: Hochschule Schmalkalden; Grafik: © Hanser

in ihrem Drucksignal gleich verhalten. Ersichtlich ist nur ein geringfügiger zeitlicher Versatz durch den Bauteildurchbruch für die Abschleppöse. Die Anzahl der Sensoren kann nach diesem Stand in zukünftigen Werkzeugen verringert werden.

Algorithmus erkennt Zusammenhänge

Durch die Auswertung der Versuchsreihen über die Statistik-Software Minitab sind die linearen Zusammenhänge zwischen Parametern und Qualitätskriterien (Haupteffektdiagramm) sowie Wechselwirkungen zwischen den Faktoren (Parametern) ersichtlich. Die Korrelationsmo-

delle liefern eine quantifizierte Aussage darüber, welche Faktoren monoton lineare Zusammenhänge besitzen. Alle Erkenntnisse beziehen sich auf den Zusammenhang zwischen Parameter und Zielgröße. Um den Zusammenhang zwischen Sensordaten und Bauteilqualität herzustellen, müssen spezielle, dem Input angepasste Programme erarbeitet werden. Diese Programme liefern Merkmalskombinationen, die einen zielführenden Lernansatz für maschinelle Lernverfahren bieten. Die Kombinationen müssen programmierseitig zu einem passenden Input zusammengeführt werden. Ein geeignetes maschinelles Lernverfah-

ren ist die Support Vector Regression (SVR) aus der Familie der Support-Vector-Maschinen.

Das Resultat der ersten Anwendung zeigt, dass die SVR bei 201 Datensätzen eine Vorhersagegenauigkeit von 96,66% erreicht. Die prozentuale Abweichung zwischen den Messergebnissen und der Vorhersage liegt bei allen Testdaten unter 3%. Die Ergebnisse sind ein Indikator dafür, dass das Lernverfahren nicht durch eventuelles Over-fitting die Bewertung auswendig gelernt hat, sondern dass der Algorithmus die charakteristischen Zusammenhänge zwischen Input und Ergebnis erkennt. Durch die Überlage- »

Kunststoffe

www.kunststoffe.de/umfrage

Sagen Sie uns Ihre Meinung!



Unter allen Teilnehmern verlosen wir 10 E-Books



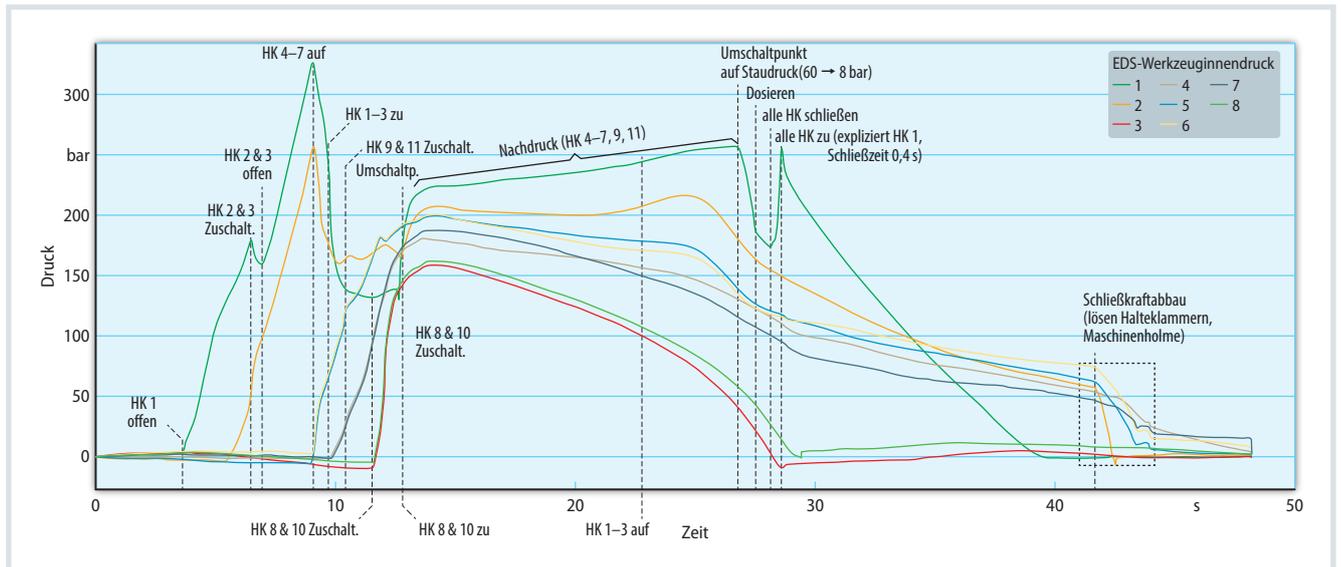


Bild 5. In den Drucksignalen des Wasabi-Systems lässt sich das Schaltprofil der Kaskadensteuerung für die elf Heißkanaldüsen ablesen

Quelle: Hochschule Schmalkalden; Grafik: © Hanser

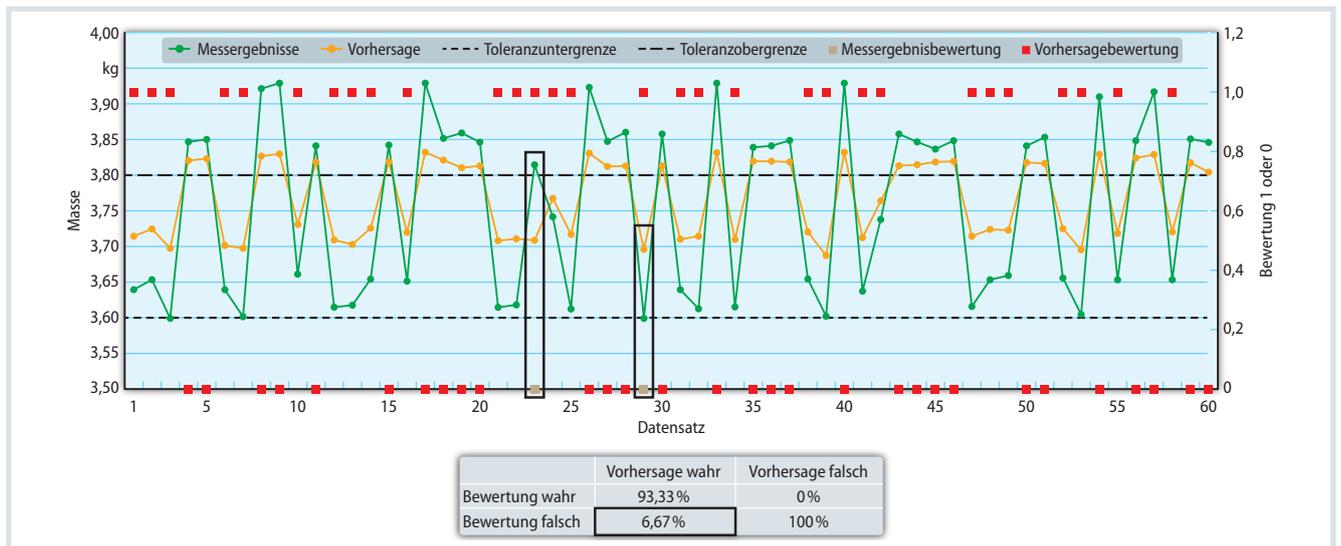


Bild 6. Vergleich zwischen Messergebnis und Vorhersage: Grafische Aufbereitung der Regressionsergebnisse (anhand des Bauteilgewichts) mit Permutationsmatrix Quelle: Hochschule Schmalkalden; Grafik: © Hanser

Die Darstellung von Messergebnissen und Vorhersage wird durch diesen Umstand visualisiert. Der charakteristische Verlauf der dokumentierten Ergebnisse spiegelt sich in den Regressionsgraphen wider. In der Grafik (**Bild 6**) wurden die Bewertungen hinterlegt (graue und rote Punkte), die sich bei Übereinstimmung überlagern; dadurch sind

die beiden Berechnungsfehler und infolgedessen die fehlerhafte Bewertung ersichtlich (schwarzer Rahmen).

Die tabellarische Auflistung der Ergebnisse zeigt, dass 6,67% der Aussagen eine differenzierte Bewertung erhalten haben (**Bild 6**). Diese Fehlinterpretation ist der ungünstige Fall der Fehlaussagen. Das Messergebnis liegt außerhalb der geforderten Toleranz und das Bauteil wäre damit Ausschuss. Die SVR und anschließende Klassifikation bewertet diese Zyklen jedoch als in Ordnung. Durch weitere Anpassungen der SVR werden derartige Fehlaussagen reduziert, um eine sichere Bewertung der Bauteilqualität zu gewährleisten.

Ausblick

Der Ansatz von Wasabi macht Systemerweiterungen in Richtung einer autarken Prozessführung vorstellbar. Mit entsprechenden Maschinenfreigaben kann das System in einem „close loop“-Prozess Produktionsschwankungen bzw. -störungen eigenständig erkennen und nachsteuern. Dies sind nur Teilergebnisse aus den bisherigen Untersuchungen. Die weiteren Arbeiten umfassen eine zweite DoE, in der gezielt die Erkenntnisse der bisherigen Arbeiten untersucht werden. Auf diese Weise werden die maschinellen Lernverfahren weiter konditioniert, um exaktere Vorhersagen treffen zu können. ■

Service

Literatur & Digitalversion

➤ Das Literaturverzeichnis und ein PDF des Artikels finden Sie unter www.kunststoffe.de/onlinearchiv