

Inline-Qualitätserfassung und datenbasierte Qualitätsprognose

Mit Automatisierung und künstlicher Intelligenz die digitale Transformation gestalten

Die Sicherung der Wettbewerbsfähigkeit am Standort Deutschland erfordert neben einer kosteneffizienten Produktion insbesondere hochwertige Produkte. Die Vorwerk Elektrowerke stellen sich dieser Herausforderung. In Zusammenarbeit mit dem Institut für Produkt Engineering der Universität Duisburg-Essen erprobt das Unternehmen eine 100%-Inline-Qualitätserfassung sowie eine Qualitätsprognose durch maschinelles Lernen.

Die Vorwerk Elektrowerke GmbH & Co. KG fertigt hochwertige Haushaltsgeräte, die unter Markennamen wie *Thermomix* und *Kobold* weltweit bekannt sind. Da diese Produkte meist im gehobenen Preissegment angesiedelt sind, stellen die Kunden entsprechend hohe Ansprüche an die Produktqualität. Das spiegelt sich in den Qualitätsanforderungen wider, die für die verbauten Kunststoff-Formteile gelten. Diese werden im Werk Wuppertal, dem größten Produktionsstandort der Vorwerk Gruppe, im Dreischichtbetrieb vorwiegend im Spritzgießprozess hergestellt.

Eine Produktion am Hochlohnstandort Deutschland erfordert gemeinhin kontinuierliche Innovationen im Bereich der Prozesstechnik, damit das Unternehmen sowohl unter Qualitäts- als auch Kostenaspekten langfristig wettbewerbsfähig bleibt. In diesem Rahmen hat sich Vorwerk entschlossen, gemeinsam mit dem Institut für Produkt Engineering (IPE) der Universität Duisburg-Essen den Mehrwert einer optischen 100%-Inline-Qualitätserfassung sowie der direkten Vorhersage der Formteilqualität auf Basis der Prozessdaten für die Spritzgießproduktion zu untersuchen.

Dichtigkeit als oberstes Ziel

Zunächst galt es, ein geeignetes Formteil auszuwählen. Die Wahl fiel dabei auf den Filterdeckel des Staubsaugers Kobold VK 200 (Titelbild). Dieser ist aus Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS) hergestellt und verfügt über eine Dichtlippe aus einem thermoplastischen Elastomer (TPE). Produziert wird der Filterdeckel (Bild 1) auf einer hydraulischen Zweikomponenten-

Spritzgießmaschine (Typ: 500-2000-180-CX Z; Hersteller: Krauss-Maffei Technologies GmbH, München).

Neben der Montagefähigkeit und einer optisch einwandfreien Oberfläche des Formteils ist die Dichtungswirkung der Dichtlippe von großer Bedeutung. Andernfalls würde die Funktion des Staubsaugers beeinträchtigt und der Kunde durch unerwünschte Nebengeräusche belästigt, wenn die Luft durch den Dichtungsbereich strömt. Um die Dichtungswirkung sicherzustellen, sind zwei Dinge erforderlich:

- die vollständige Ausformung der Dichtlippe sowie
 - die korrekte, umlaufende Position der TPE-Kontur.
- Letztere geht direkt mit der Formteilkontur der Hartkomponente einher, sodass diese, repräsentiert durch zwei Breitenmaße, im Zentrum der Untersuchungen stehen sollte.

Inline-Erfassung der Formteilkontur

Für die Erprobung wurde ein Kamerasystem (Typ: CV-X; Hersteller: Keyence Deutschland GmbH, Neuenburg) verwendet (Bild 2). Da für die Erfassung der Formteilkontur keine Farbinformationen benötigt werden, kommt ein Schwarz-Weiß-Sensor zum Einsatz. Um die Variation der betrachteten Breitenmaße hinreichend genau abbilden zu können, fiel die Wahl auf den mit 21 Megapixeln in dieser Modellreihe höchstauflösenden Sensor. Das gesamte Kamerasystem wurde sowohl hardware- als auch softwareseitig durch die Mabri.Vision GmbH, Aachen, in den bestehenden Prozess eingebunden.

Die Formteile werden dabei unmittelbar nach der Entnahme abgelichtet, noch während sie sich im Griff des Roboters befinden. Die Auslösung erfolgt über ein Triggersignal, das der Handlingroboter an die Kamerasteuerung sendet. Im Anschluss daran wird das Formteil über ein automatisches Fördersystem der Montagelinie zugeführt. Über einen Untersuchungszeitraum von rund vier Wochen wurden mehr als 22000 Staubsauger-Formteile produziert und deren Qualitätsparameter auf dem beschriebenen Wege erfasst.



Kunden, die sich für den Staubsauger Kobold VK 200 entscheiden, erwarten höchste Qualität. Um diese sicherzustellen, laufen im Produktionswerk in Wuppertal Versuche zur Einführung von Industrie-4.0-Maßnahmen © Vorwerk

Möglichst einfache Handhabung

Insgesamt zeigte sich das System sehr robust. Es ist dabei so ausgelegt, dass es mit dem Einschalten des Roboters automatisch hochfährt und die Qualität aller fortan produzierten Teile erfasst. Die aus den aufgenommenen Bildern extrahierten Formteilmaße wurden einmalig definiert, anschließend automatisch erfasst und mit einem Zeitstempel versehen. Für eine problemlose Weiterverarbeitung ist es daher wichtig, die Uhrzeiten von Spritzgießmaschine und Kamerasystem zu synchronisieren. Dies lässt sich im Falle eines dauerhaften Einsatzes durch Verbindung zu einem Zeitserver sicherstellen, indem das System an das Unternehmensnetzwerk angeschlossen wird.

Im Rahmen der optischen Qualitätserfassung werden zur grundsätzlichen Erprobung zwei Breitenmaße erfasst. Diese werden als maximaler lotrechter Abstand von der mittleren Rippe des Formteils zur Außenkontur bestimmt und im weiteren Verlauf als Maß 1 und Maß 2 bezeichnet. Die Gesamtbreite des Formteils ergibt sich als Summe der beiden Einzelmaße. Durch die Erfassung der Einzelmaße lassen sich über die ebenso qualitätsrelevante Gesamtbreite hinaus Aussagen über einen möglichen asymmetrischen Verzug des Formteils treffen.

Zusätzlich zu der beschriebenen Inline-Qualitätserfassung hat das Projektteam untersucht, ob sich die betrachteten Qualitätsmerkmale auch indirekt – d. h. ohne Messung – aus den im Istwert-Protokoll der Spritzgießmaschine abgelegten Prozessdaten vorhersagen lassen. Hierfür kommen Verfahren aus dem Bereich des maschinellen Lernens zum Einsatz, das ein Teilgebiet der künstlichen Intelligenz ist. Obwohl diese Thematik bereits in der Vergangenheit untersucht wurde [1–4], konnten sich verfügbare Anwendungen [5] bislang kaum in der Praxis durchsetzen.

Maschinelles Lernen zur Vorhersage von Qualitätsmerkmalen

Aufbauend auf langjährigen Erfahrungen im Bereich der Analyse von Spritzgieß-Prozessdaten erforscht das IPE die verschiedenen für die Formteil-Qualitätsprognose relevanten Aspekte. Ziel ist ein ganzheitliches System, das alle erforderlichen Datenverarbeitungsschritte automatisiert durchführt [6] und dem Nutzer somit eine einfache Handhabung ermöglicht (Bild 3). Das Vorgehen umfasst im Einzelnen:

- die Datenvorbereitung,
- die Konstruktion und Selektion von Prozesskennzahlen,
- die Modellbildung inkl. Hyperparameteroptimierung,



Bild 1. Für die Funktionstüchtigkeit der Dichtlippe (TPE) des Filterdeckels ist die Kontur des Formteils entscheidend © IPE



Bild 2. Das verwendete Kamerasystem CV-X verfügt über einen SW-Sensor mit einer Auflösung von 21 Megapixeln © Keyence

- die Modellauswahl und Qualitätsprognose mit dem besten Modell, sowie
- die Modelladaptation bei veränderten Prozesszusammenhängen.

Der für eine einwandfreie Verarbeitung erforderlichen Datenvorbereitung (Normierung etc.) schließt sich mit der Bildung und Auswahl der als Eingang für die Qualitätsprognose verwendeten Prozessmerkmale der erste zentrale Schritt für eine erfolgreiche Prognose an [7]. Eigene Untersuchungen [8] haben ergeben, dass ein filterbasierter Ansatz mit sequenzieller Vorwärtsselektion als Suchstrategie und korrelationsbasierter Merkmalsselektion [9] beim Spritzgießen die besten Ergebnisse liefert.

Für die eigentliche Modellbildung kommen sieben „State of the Art“-Lernverfahren aus dem Bereich des überwachten Lernens zum Einsatz. Neben bekannten Verfahren wie künstlichen neuronalen Netzen sind dies beispielsweise die Stützvektormethode und die Gaußprozess-Regression. Diese werden als »

Will & Hahnenstein GmbH

Spezialisten in Sachen Beheizung!

TROCKNER UND TEMPERANLAGEN

für Kunststoffe, Beschichtungen und Bauteile aller Größen

- Kammer- und Durchlauf Typen
- mit gesteuerter Ab- und Umluft
- definierte Frischluftzufuhr
- sehr exakte Temperatur- und Feuchtführung

- mit SPS-Steuerungen
- Temperaturbereich 0-500°C
- Beschickungssysteme: Hordenwagen, Regalgestelle und Förderbahnen nach Wunsch

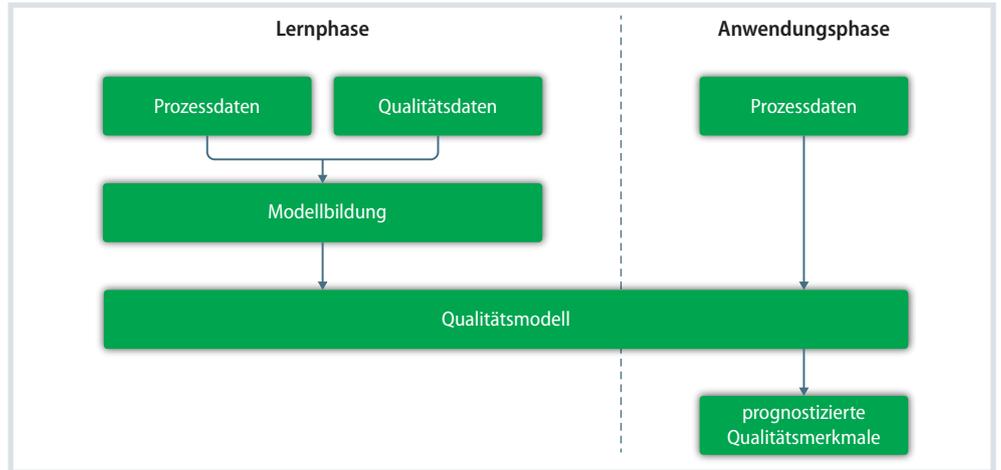
📍 Bahnhofsweg 22, D-57562 Herdorf

☎ Tel. +49 (0) 2744 9317-0 - Fax +49 (0) 2744 9317-17

✉ E-Mail: info@will-hahnenstein.de

🌐 www.will-hahnenstein.de

Bild 3. Die automatische Modellbildung ist für den Nutzer mit nur geringem Aufwand verbunden: Nach der Bereitstellung der Lerndaten läuft alles Weitere automatisch. Quelle: IPE; Grafik: © Hanser



Im Profil

Die **Vorwerk & Co. KG** wurde 1883 in Wuppertal gegründet und entwickelte sich im Laufe der mehr als 130-jährigen Firmengeschichte von einer Teppichfabrik zu einer breit aufgestellten, internationalen Unternehmensgruppe. Ihr Kerngeschäft umfasst die Entwicklung, die Produktion und den Vertrieb hochwertiger Haushaltsprodukte. Die Vorwerk Elektrowerke sind dabei Teil des Familienunternehmens, das insgesamt mehr als 12.300 festangestellte Mitarbeiter beschäftigt. Als größter Produktionsstandort der Gruppe mit Sitz in Wuppertal fertigen die Vorwerk Elektrowerke Haushaltsgeräte wie die multifunktionale Küchenmaschine Thermomix oder den Staubsauger Kobold.

➤ corporate.vorwerk.de

Die Autoren

Alexander Schulze Struchtrup, M.Sc. ist seit 2018 Gruppenleiter Spritzgießen am Institut für Produkt Engineering (IPE) der Universität Duisburg-Essen; alexander.schulzestruchtrup@unidue.de

Dipl.-Ing. Alexander Mahl ist seit 2015 Projektingenieur Kunststofftechnik bei der Vorwerk Elektrowerke GmbH & Co. KG.

Dimitri Kvaktun, M.Sc. ist seit 2019 wissenschaftlicher Mitarbeiter am IPE.

Dipl.-Ing. Martin Thalemann ist seit 2015 Gruppenleiter Kunststofftechnik bei Vorwerk.

Prof. Dr.-Ing. Reinhard Schiffers ist seit 2017 Inhaber des Lehrstuhls für Konstruktion und Kunststoffmaschinen am IPE.

Dank

Der Dank der Autoren gilt der Mabri.Vision GmbH, Aachen, sowie der Keyence Deutschland GmbH, Neu-Isenburg, für die gute Zusammenarbeit bei der Installation und Erprobung des Inline-Kamerasystems.

Service

Literatur & Digitalversion

➤ Das Literaturverzeichnis und ein PDF des Artikels finden Sie unter www.kunststoffe.de/2020-08

English Version

➤ Read the English version of the article in our magazine *Kunststoffe international* or at www.kunststoffe-international.com

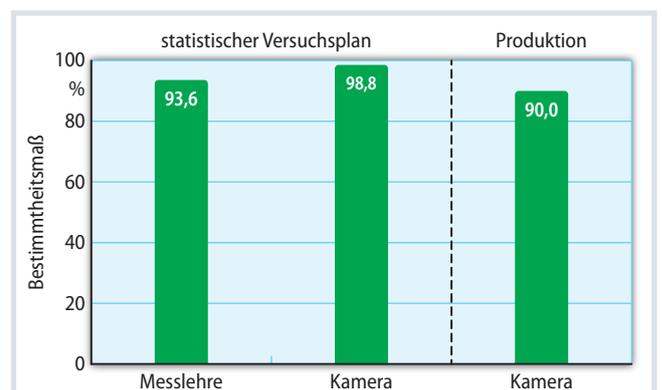


Bild 4. Die erzielten Modellgüten zeigen, dass eine Prognose der Qualitätsmerkmale auf Basis der Prozessdaten grundsätzlich gut möglich ist. Voraussetzung hierfür sind präzise Qualitätsdaten. Quelle: IPE; Grafik: © Hanser

Teil des Gesamtsystems parallel trainiert und treten gegeneinander an – nur das Modell, das bei den Validierungsdaten die beste Leistung erzielt, wird letztlich für die Prognose verwendet.

Damit die einzelnen Lernverfahren ihre maximale Leistungsfähigkeit ausreizen, werden die jeweiligen Hyperparameter, die Modellstruktur und Lernprozess steuern, bei der Modellbildung automatisch optimiert. Im Laufe der Zeit können sich die Zusammenhänge zwischen Prozess- und Qualitätsgrößen verändern, wodurch die Prognosegüte abnimmt.

Dies kann durch ebenfalls berücksichtigte Verfahren, mit denen sich ein sogenannter Concept Drift detektieren lässt, erkannt und durch rechtzeitige Modelladaptation vermieden werden. Das IPE konnte auf Basis eigener Erkenntnisse, die in umfangreichen Untersuchungen gesammelt wurden, das Prognosesystem so gestalten, dass ein Betrieb auf einem Desktop-PC der aktuellen Generation mit vertretbarem Rechenaufwand möglich ist.

Leistungsfähigkeit unter Beweis gestellt

Für die Evaluierung der Qualitätsprognose wurde neben den rund 22.000 Zyklen aus der Serienproduktion ein 75 Spritzgießzyklen umfassender statistischer Versuchsplan durchgeführt. Im Rahmen des Versuchsplans wurden die folgenden, erfahrungsbasiert ausgewählten Maschineneinstellparameter variiert:

- Einspritzgeschwindigkeit der Hartkomponente (ABS),

- Nachdruckhöhe der Hartkomponente,
- Kühlwasservorlauftemperatur,
- Kühlzeit.

Aufgrund der geringeren Zyklenzahl im statistischen Versuchsplan war es möglich, die Qualitätsmerkmale neben der Inline-Kamera zusätzlich mit einer speziell für dieses Formteil gefertigten Messlehre manuell zu erfassen, die auch im normalen Serienbetrieb zum Einsatz kommt. Dies erlaubt einen Vergleich, wie gut sich die mit beiden Messverfahren generierten Qualitätsdaten für die Modellbildung eignen. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass die Schwindung der Formteile zum Zeitpunkt der Erfassung mit dem Kamerasystem noch nicht abgeschlossen ist, so dass eine Abweichung zu den finalen Maßen vorliegt.

Grundsätzlich ist festzuhalten, dass die Modellbildung auch auf Basis historischer Prozess- und Qualitätsdaten möglich ist. Erstere werden ohnehin fortlaufend von der Spritzgießmaschine mitgeschrieben. Voraussetzung ist jedoch eine zyklusgenaue Zuordnung der Qualitätsdaten.

Für die Bewertung der gebildeten Modelle wird das Bestimmtheitsmaß verwendet. Dieses kann Werte zwischen 0% und 100% annehmen und gibt an, welchen Anteil der Gesamtstreuung des Qualitätsmerkmals das Modell erklärt. Die Ergebnisse zeigen, dass eine Qualitätsprognose mit Bestimmtheitsmaßen von bis zu 98,8% grundsätzlich sehr gut möglich ist (Bild 4).

Im statistischen Versuchsplan liegen die Modellgüten auf Basis der Kameradaten mit Bestimmtheitsmaßen zwischen 95,7% für Maß 1 und 98,8% für die Gesamtbreite etwas oberhalb der Modellgüten auf Basis der Messlehrendaten mit 87,8% für Maß 1 bis 93,6% für die Gesamtbreite. Die Bestimmtheitsmaße für die Prognose von Maß 2 liegen jeweils dazwischen. Alle diese Modellgüten sind jedoch durchweg als zufriedenstellend einzustufen.

Autonome Prozesse, geringer Ausschuss

In der Serienproduktion liegen die Bestimmtheitsmaße der beiden Teilbreiten (Maß 1 und Maß 2) hingegen deutlich unterhalb des Bestimmtheitsmaßes der Gesamtbreite. Letzteres weist mit 90,0% jedoch eine sehr hohe Modellgüte auf. Wie eine weitere Analyse ergab, sind die niedrigen Bestimmtheitsmaße der Teilbreiten (12,6% und 18,1%) auf eine unzureichende Genauigkeit des Kamerasystems bei der Erfassung der Position der mittleren Rippe zurückzuführen, die als Referenz verwendet wird. Diese tritt auf, wenn die Ausrichtung des Formteils am Greifer Schwankungen um die Hochachse unterliegt, könnte jedoch durch Anpassung des Messsystems behoben werden.

Da sich die Fehler der Teilbreiten genau aufheben, ist die Gesamtbreite nicht betroffen. Im Falle des statistischen Versuchsplans wirkt sich diese Problematik kaum negativ aus, weil aufgrund der Variation der Maschineneinstellungen die Teilstreuung im Verhältnis zur Messunsicherheit überwiegt. Insgesamt ist festzuhalten, dass eine Modellbildung auch auf Basis von Daten aus der Serienproduktion möglich ist, sofern eine hinreichende Messmitteltauglichkeit gegeben ist.

Insgesamt sind die Voraussetzungen für den zukünftigen Einsatz der untersuchten Techniken sehr gut, meint auch Werksleiter Dr.-Ing. Markus Koch (Bild 5): „Wettbewerbsfähigkeit am Hochlohnstandort Deutschland lässt sich erreichen, wenn die Autonomiezeiten von Fertigungsprozessen hoch und somit der Mitarbeiterinsatz gering ist. Gelingt dies bei niedrigem Aus-



Bild 5. Permanente Qualitätsüberwachung als Pflicht, autonome Prozessführung als Kür – Werksleiter Dr.-Ing. Markus Koch zeigt sich zufrieden mit den Untersuchungen
© Vorwerk

schluss, wie bei einer permanenten Qualitätsüberwachung, ist der Pflicht Rechnung getragen. Die Kür wird erreicht, wenn Prozessanpassungen in Abhängigkeit von Formabweichungen erfolgen können, ohne dass manuell eingegriffen werden muss.“

Fazit

Mit der Untersuchung des Inline-Kamerasystems sowie der modellbasierten Formteil-Qualitätsprognose haben sich die Vorwerk Elektrowerke entschieden, die digitale Transformation aktiv zu gestalten und so ihre Wettbewerbsfähigkeit langfristig zu sichern. Das Kamerasystem erwies sich über den Testzeitraum als einfach zu bedienen und sehr robust. Ebenfalls erfolgreich verlief die Erprobung des Qualitätsprognosesystems. Die hohen Modellgüten zeigen, dass eine Prognose der Formteil-Qualitätsmerkmale gut möglich ist. Voraussetzung hierfür ist jedoch eine hohe Güte der in der Lernphase verwendeten Qualitätsdaten. ■

LEISTER
LASER PLASTIC WELDING

Helec 5 200

Your **Experts**
in **Laser Plastic Welding.**

swiss made

www.leister.com **We know how.**