

# Qualitätsprognose für Spritzgussteile durch maschinelles Lernen

## Welchen Mehrwert bietet hierfür die Werkzeuginnendrucksensorik?

Allgemeines Ziel der Qualitätsprognose ist es, auf Basis von Prozessdaten Aussagen über die resultierende Formteilqualität abzuleiten. Dem Werkzeuginnendruckverlauf wird allgemein eine hohe Aussagekraft für spritzgegossene Formteile zugeschrieben. Es stellt sich die Frage, ob die Qualitätsprognose genauere Ergebnisse liefert, wenn über die Prozessdaten aus der maschineninternen Sensorik hinaus auch die Daten aus der Werkzeugsensorik einfließen.

Nur wenige Spritzgießwerkzeuge verfügen über Werkzeuginnendrucksensoren. Ob sich ihr Einsatz für die Qualitätsprognose lohnt, wird am Institut für Produkt Engineering der Universität Duisburg-Essen untersucht © IPE



Alle kunststoffverarbeitenden Unternehmen stehen vor der permanenten Herausforderung ihre Kosten- und Qualitätsziele sowie ihre Lieferfristen zu erfüllen. Vor diesem Hintergrund sind die Hersteller in Hochlohnländern besonders gefordert, weil eine überlegene Teilequalität oft die einzige Möglichkeit ist, sich im Wettbewerb durchzusetzen. Da dies zu einem hohen Aufwand für die Qualitätssicherung führt, wird bereits seit einiger Zeit versucht, die Qualität von Spritzgussteilen aus Prozessdaten mithilfe von maschinellen Lernverfahren vorherzusagen [1–4].

Diese haben sich jedoch in der Industrie vor allem aus zwei Gründen bisher nicht durchgesetzt: Zum einen aufgrund der unvermeidlichen Lernphase, die für

die Erstellung eines Qualitätsvorhersagemodells erforderlich ist und während der noch keine Prognose möglich ist. Zum anderen aufgrund der Komplexität der Anwendung, die eine Vielzahl an Schritten erfordert, die in der Vergangenheit weitgehend manuell durchgeführt wurden.

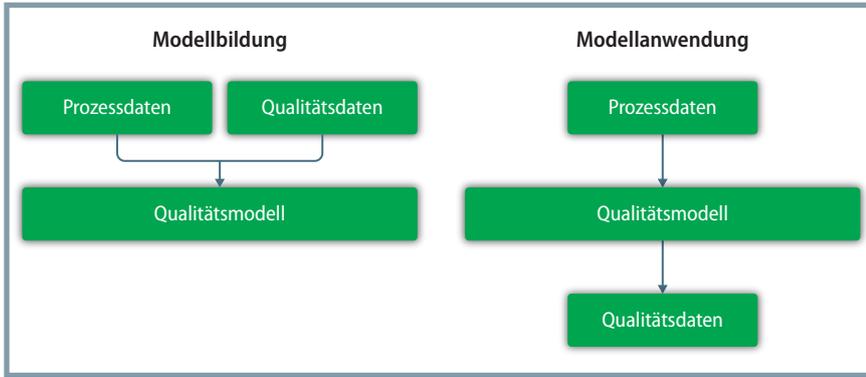
In diesem Kontext wird am Institut für Produkt Engineering (IPE) der Universität Duisburg-Essen die Anwendung maschineller Lernverfahren für die Qualitätsprognose systematisch untersucht [5, 6]. Ziel ist die Automatisierung der Datenanalyseschritte, die nach der Generierung von Prozess- und Qualitätsdaten nötig sind, um den Aufwand für den Anwender zu minimieren. Dies beinhaltet die Entwicklung und Anwendung geeigneter Algorithmen zur automatischen Auswahl

von Daten, Prozessmerkmalen sowie maschinellen Lernalgorithmen einschließlich einer Hyperparameteroptimierung und Modellanpassung.

### Grundlagen der Formteil-Qualitätsprognose

Darüber hinaus lässt sich der vorgestellte Ansatz universell einsetzen und daher auch für andere Kunststoffverarbeitungsverfahren anwenden. Dieser Beitrag geht gezielt auf die Frage ein, wie sich der Einsatz von Werkzeuginnendrucksensoren auf die Güte von Modellen zur Formteil-Qualitätsprognose mittels maschineller Lernverfahren auswirkt.

Die Formteil-Qualitätsprognose verfolgt das Ziel, auf Basis von Prozessdaten



**Bild 1.** Vor der modellbasierten Qualitätsprognose ist eine Lernphase erforderlich, in der sowohl Prozess- als auch Qualitätsdaten bereitgestellt werden. Quelle: IPE, Grafik: © Hanser

Aussagen über die Ausprägungen der Formteil-Qualitätsmerkmale zu treffen. Im Kontext des maschinellen Lernens wird diese Lernform, bei der sowohl Eingangs- als auch Ausgangsgrößen eines Modells vorliegen, als überwachtes Lernen bezeichnet [7]. Hierbei unterscheidet man die Anwendungen der Regression und Klassifikation. Die Regression beschäftigt sich mit der Prognose kontinuierlicher Qualitätsmerkmale, beispielsweise eines Formteilmaßes, während die Klassifikation die Prognose diskreter Werte, beispielsweise „Einfallstelle vorhanden“ oder „nicht vorhanden“, zum Ziel hat [8].

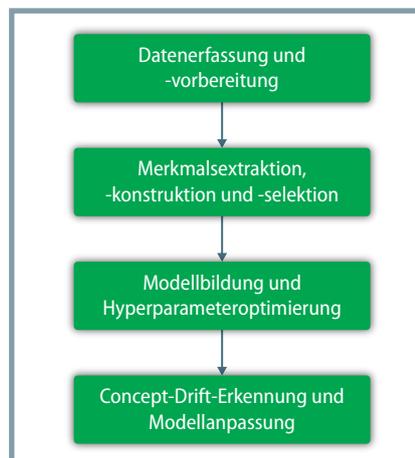
Vor der Anwendung eines Qualitätsmodells ist in beiden Fällen eine Lernphase erforderlich. Hier werden dem Lernverfahren sowohl Prozess- als auch Qualitätsdaten bereitgestellt. Die Prozessdaten müssen dabei üblicherweise als skalare Werte, sogenannte Prozessmerkmale, bereitgestellt werden. Wird das Istwertprotokoll der Spritzgießmaschine als Datenquelle verwendet, ist dies automatisch der Fall. Ein Beispiel stellt der maximale Masse-Druck dar. In jedem Zyklus existiert pro Prozessmerkmal daher genau ein Wert, dieser wird als Merkmalsausprägung bezeichnet. Aufgabe des Qualitätsmodells ist es, aus den Ausprägungen der Prozessmerkmale die Ausprägung des Qualitätsmerkmals vorherzusagen (Bild 1).

Allerdings haben nicht alle Prozessmerkmale dieselbe Aussagekraft für das Qualitätsmerkmal, und es bestehen Redundanzen der Merkmale untereinander. Werden irrelevante oder redundante Merkmale in die Modellbildung einbezogen, hat dies eine unnötig hohe Modellkomplexität und Berechnungszeit sowie einen höheren Bedarf an Lerndaten zur Folge. Zudem besteht die Gefahr einer

Überanpassung, die mit einer Verschlechterung der Modellgüte einhergeht. Um dies zu verhindern, empfiehlt sich vor der eigentlichen Modellbildung eine Selektion der Merkmale. Diese kann sowohl wissensbasiert als auch algorithmisch erfolgen.

**Durchgängige Datenverarbeitungskette**

Für eine objektive Auswahl einer aussagekräftigen Merkmalskombination existieren verschiedene Algorithmen, die sich in die Gruppen der Filter-, Wrapper- und eingebetteten Methoden unterteilen lassen [9]. Während Wrapper- und eingebettete Methoden auf unterschiedliche Art und Weise bereits für die Merkmalsselektion auf die verwendeten Lernverfahren zurückgreifen, handelt es sich bei den Filter-Methoden um Heuristiken. Da bei den Filter-Methoden keine Modellbildung erforderlich ist, benötigen diese nur



**Bild 2.** Die durchgängige Datenverarbeitung erlaubt die automatisierte Generierung von Qualitätsmodellen. Quelle: IPE, Grafik: © Hanser

einen verhältnismäßig geringen Rechenaufwand.

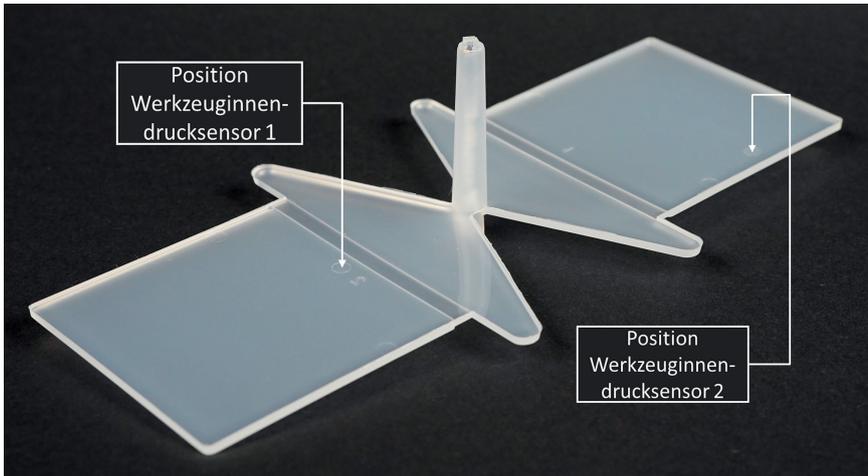
Während in früheren Forschungsarbeiten meist lediglich ein einzelnes Lernverfahren verwendet wurde, ist es – auch aufgrund steigender Rechenleistung – mittlerweile Stand der Technik, mehrere Lernverfahren zu nutzen und das jeweils beste Modell für die Prognose zu verwenden. Die Auswahl der optimalen Hyperparameter, die die Modellstruktur und den Lernprozess steuern, erfolgt automatisiert via Bayes-Optimierung. Hierfür wird eine fünffache Kreuzvalidierung (Datenaufteilung jeweils 80% Training und 20% Validierung) durchgeführt. Auf eine detaillierte Darstellung der resultierenden Hyperparameter wird an dieser Stelle mit Blick auf die eigentliche Zielsetzung des Beitrags verzichtet.

Als Kriterium für die Bewertung der Modellgüte wird das Bestimmtheitsmaß (R<sup>2</sup>) verwendet. Dieses gibt an, welchen Anteil der Streuung des Qualitätsmerkmals das Modell erklärt [11]. Durch Kombination der beschriebenen Schritte ergibt sich eine durchgängige Datenverarbeitungskette (Bild 2), die eine vollständig automatisierte Generierung von Qualitätsmodellen erlaubt.

**Das Formteil wird nach der Entnahme gewogen und fotografiert**

Die für die Datengenerierung erforderlichen Versuche werden auf einer voll-elektrischen Spritzgießmaschine (Typ: PX 120-380; Hersteller: KraussMaffei Technologies GmbH, München) durchgeführt. Produziert werden Platten-Formteile (Bild 3) aus Polypropylen (Typ: Moplen HP501H; Hersteller: LyondellBasell Industries N.V., Rotterdam/Niederlande) unter Verwendung eines Kassettenwerkzeugs (Typ: AIM mit Einschub ISO D2; Hersteller: Axxicon Moulds Eindhoven B.V., Eindhoven/Niederlande). Das Werkzeug ist mit zwei Werkzeuginnendrucksensoren (Typ: Unisens 6157BA; Hersteller: Kistler Instrumente GmbH, Sindelfingen) ausgerüstet. Für die beiden Sensoren liegen im Istwertprotokoll der Maschine jeweils der maximale sowie der Umschaltmasse-Druck und das Werkzeuginnendruckintegral vor.

Sowohl das Gewicht als auch die Länge des Formteils werden mit einer 100-%-Qualitätserfassung aufgezeichnet. Hierzu wird das Formteil nach der Entnahme »



**Bild 3.** Das Werkzeug zur Formgebung des Platten-Formteils verfügt über zwei Werkzeuginnen-drucksensoren © IPE

durch einen Linearroboter zunächst automatisch auf einer Präzisionswaage (Typ: Entris 1531-1S; Hersteller: Sartorius Lab Instruments GmbH & Co. KG, Göttingen) gewogen und nach Ablage auf dem För-

derband der Produktionszelle mit einer digitalen Spiegelreflexkamera (Typ: Eos 5D Mark III mit Objektiv EF 70–200 mm f/4L USM; Hersteller: Canon KG, Tokio/Japan) fotografiert.

Die Gewichtsinformationen werden mittels RS-232-Schnittstelle auf einen Messrechner übertragen. Auf diesem werden zudem die Längeninformatio- nen mit der Software Matlab, Version R2019b, aus den Formteilbildern extrahiert.

### Vollfaktorieller statistischer Versuchsplan

Um die Prozess- und Qualitätsdaten zu erzeugen, wird ein vollfaktorieller statistischer Versuchsplan mit Zentralpunkt und Sternpunkten verwendet. Durch die Variation von Einspritzgeschwindigkeit, Nachdruckhöhe und -zeit, Kühlzeit und Temperatur der Zylinderzone 11 (Düse) ergeben sich 860 Zyklen, die für die Modellbildung und -bewertung verwendet werden.

Aus den rund 40 im Istwertprotokoll enthaltenen Prozessmerkmalen werden mit einem filterbasierten Ansatz die fünf Merkmale ausgewählt, die in Kombination die größte Aussagekraft haben. Verwendet wird hierfür eine sequenzielle Vorwärtsauswahl mit Pearson-Korrelation als Relevanzkriterium. Um Redundanzen der Merkmale untereinander zu bestrafen, wird als Selektionsmetrik die korrelationsbasierte Merkmalsauswahl (engl. correlation-based feature selection, CFS) verwendet [10]. Diese wählt die Prozessmerkmale entsprechend dem besten Verhältnis von Relevanz (bezüglich der

Qualitätsgröße) zu Redundanz (bezüglich der bereits selektierten Merkmale) aus.

Die fünf ausgewählten Merkmale bilden die Eingangsgrößen für die Modelle, die auf 80% der verfügbaren Daten gelernt werden. Für die diesem Beitrag zugrundeliegenden Untersuchungen werden die folgenden sieben überwachten Lernverfahren zur Regression verwendet:

- multiple lineare Regression,
- künstliche neuronale Netze,
- Stützvektormethode,
- Gaußprozessregression,
- k-nächste Nachbarn,
- binäre Entscheidungsbäume,
- Ensemble aus binären Entscheidungsbäumen.

Um zu untersuchen, welchen Mehrwert die werkzeuginnendruckbasierten Prozessmerkmale für die Qualitätsprognose bieten, werden mit den genannten Lernverfahren jeweils drei Modelle gebildet:

- ein Modell, bei dem die Merkmalsauswahl alle im Istwertprotokoll enthaltenen Prozessmerkmale berücksichtigt,
- ein Modell, bei dem die Merkmalsauswahl alle im Istwertprotokoll enthaltenen Prozessmerkmale, ausschließlich der werkzeuginnendruckbasierten, berücksichtigt,
- und eines, das nur werkzeuginnendruckbasierte Merkmale verwendet.

### Höhere Modellgüten beim Formteilgewicht

Unabhängig vom verwendeten Lernverfahren sowie den genutzten Merkmalen weisen die Modelle für das Formteilgewicht höhere Modellgüten auf als die Modelle für die Formteillänge: Bei der Gewichtsprognose werden Bestimmtheitsmaße von bis zu über 99% erreicht (**Bild 4**), während das höchste Bestimmtheitsmaß bei der Längenprognose rund 78% beträgt (**Bild 5**).

Für die meisten Lernverfahren unterscheiden sich die Modellgüten der Modelle der Istwerte mit und ohne die vom Werkzeuginnendruck abgeleiteten Merkmale nur geringfügig. Die hohe Übereinstimmung in der Mehrzahl der Fälle deutet darauf hin, dass die vom Werkzeuginnendruck abgeleiteten Prozessmerkmale in dem hier untersuchten Prozess eine hohe Redundanz zu den restlichen Prozessmerkmalen aufweisen und somit nur in geringem Maße zusätzliche Informationen enthalten.

## Die Autoren

**Alexander Schulze Struchtrup, M.Sc.** ist seit 2016 wissenschaftlicher Mitarbeiter und seit 2018 Gruppenleiter Spritzgießen am Institut für Produkt Engineering (IPE) der Universität Duisburg-Essen; alexander.schulze-struchtrup@uni-due.de

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

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

### Dank

Der Dank der Autoren gilt der KraussMaffei Technologies GmbH, München, für die Bereitstellung der Spritzgießproduktionszelle sowie der LyondellBasell Industries N.V., Rotterdam/Niederlande, für die Bereitstellung des Kunststoffgranulats.

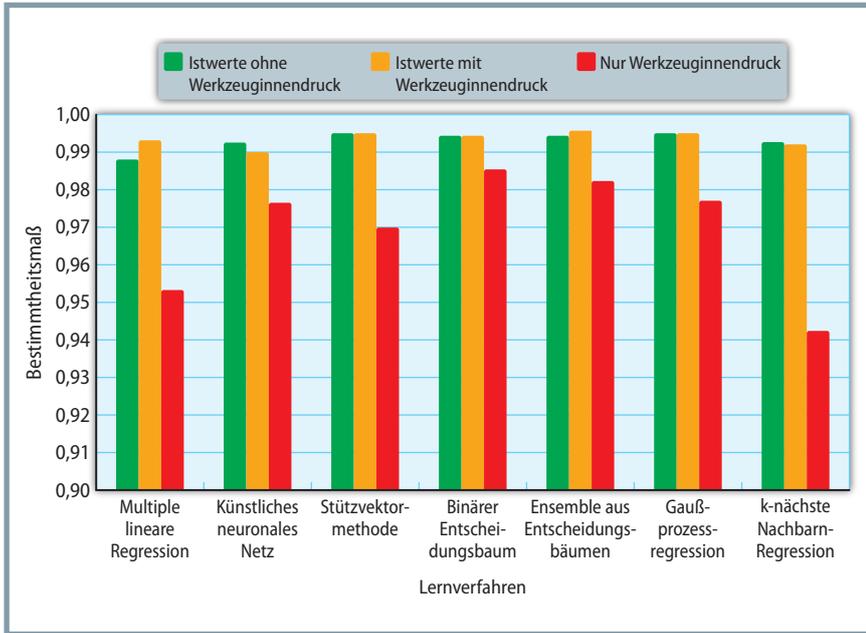
## Service

### Literatur & Digitalversion

- Das Literaturverzeichnis und ein PDF des Artikels finden Sie unter [www.kunststoffe.de/2020-06](http://www.kunststoffe.de/2020-06)

### English Version

- Read the English version of the article in our magazine *Kunststoffe international* or at [www.kunststoffe-international.com](http://www.kunststoffe-international.com)



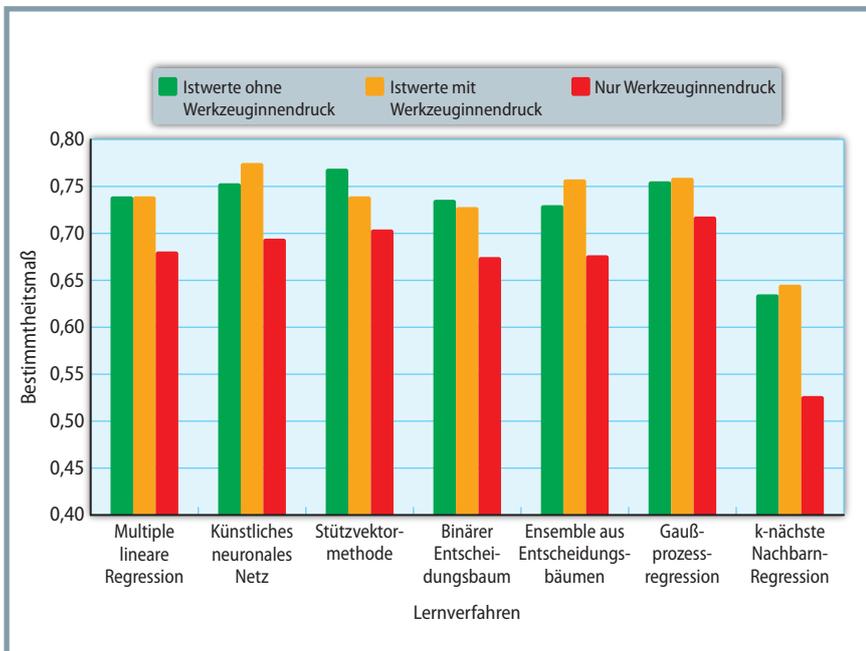
**Bild 4.** Die Prognose des Formteilgewichts ist mit sehr hohen Modellgüten möglich. Nur die Qualitätsprognose mit ausschließlich werkzeuginnendruckbasierten Prozessmerkmalen führt zu etwas niedrigeren Modellgüten. Quelle: IPE, Grafik: © Hanser

Dies bestätigt sich bei Betrachtung der Korrelationen der Merkmale untereinander: Die werkzeuginnendruckbasierten Prozessmerkmale korrelieren bis zu 98,3% mit den restlichen nicht werkzeuginnendruckbasierten Kennzahlen (insbesondere dem Umschaltmassedruck) im Istwertprotokoll.

Werden für die Modellbildung hingegen ausschließlich auf dem Werkzeuginnendruck basierende Prozessmerkmale verwendet, verschlechtert sich die Modellgüte gegenüber den beiden anderen Modellgruppen bei allen Lernverfahren deutlich. Während dies bei der Gewichtsprognose aufgrund des allgemein hohen Niveaus der Modellgüten zu verschmerzen ist, muss man eine Prognose ausschließlich auf Basis der werkzeuginnendruckbasierten Merkmale im vorliegenden Fall als problematisch einstufen.

**Fazit:**  
*(k)eine Empfehlung*

Die Ergebnisse der algorithmischen Merkmalsselektion bestätigen die hohe Aussagekraft der aus den Werkzeuginnendruckverläufen extrahierten Prozessmerkmale. Bei jeder Selektionsmethode wurde mindestens ein werkzeuginnendruckbasiertes Prozessmerkmal ausgewählt. Die so erzielbaren Modellgüten zeigen jedoch, dass eine Einbeziehung dieser Merkmale nur in wenigen Fällen eine signifikante Verbesserung mit sich bringt. Der Grund dafür sind Redundanzen, die zu den übrigen, im Istwertprotokoll enthaltenen Merkmalen bestehen. Eine Qualitätsprognose ausschließlich auf Basis eines über die Spritzgießmaschinensteuerung ausgewerteten Werkzeuginnendrucksignals ist bei allen Lernverfahren mit deutlichen Verschlechterungen der Modellgüte verbunden und kann daher nicht empfohlen werden. ■



**Bild 5.** Die Modellgüten bei der Prognose der Formteillänge liegen etwas unter denen der Gewichtsprognose, zeigen jedoch qualitativ dasselbe Verhalten. Quelle: IPE, Grafik: © Hanser