

Kneten ganzheitlich verstehen

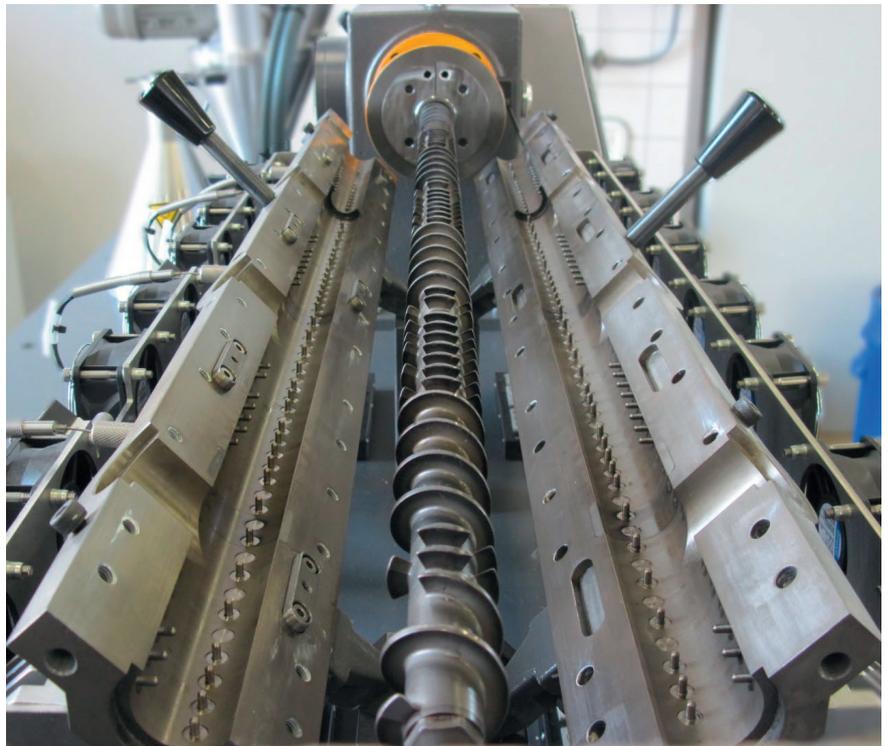
Mit verfahrenstechnischem Verständnis das Verhalten von Ko-Knetern effizient vorhersagen

Durch sein besonderes Arbeitsprinzip erfüllt der Ko-Kneter höchste Mischanforderungen. Er kann jedoch bislang nicht simulationsgestützt ausgelegt werden, weil Prozesswissen und Modellierungsansätze fehlen. Systematische Untersuchungen sowie analytische und numerische Modelle überwinden diese Hürde und bilden die Basis einer rechnergestützten Optimierung.

Die Eigenschaften technischer Kunststoffe werden maßgeblich durch die dem Kunststoff beigemischten Zusatzstoffe beeinflusst [1]. Der Ko-Kneter (vgl. **Titelbild**) ist ein Einschneckenextruder zur Aufbereitung und Modifizierung von Polymeren und anderen Stoffen. Obwohl der Ko-Kneter ein Spezialist für die Verarbeitung hochgefüllter Kunststoffe, Kautschuke und TPE (Thermoplastische Elastomere) ist, dringt er in immer neue Einsatzgebiete vor. Insbesondere bei hohen Mischanforderungen oder bei der Aufbereitung temperatur- und scherempfindlicher Kunststoffe ist dieser Maschinentyp gefragt.

Die Prozessauslegung von Ko-Knetern wird auch heute noch hauptsächlich durch ein Trial-and-Error-Vorgehen bestimmt, das eine Reihe von empirisch optimierten Baureihen und Konfigurationen hervorgebracht hat. Allerdings ist eine solche Optimierung der Prozesse sehr zeit- und kostenintensiv, und es gibt kaum Möglichkeiten, die Unternehmen dabei effizient zu unterstützen. Simulationen hingegen ermöglichen eine kostengünstige Variation verschiedenster Prozessbedingungen, wodurch sich zudem tiefere Erkenntnisse gewinnen lassen, die experimentell nur schwer erfassbar sind.

Aufgrund der geometrischen Verhältnisse und der Funktionsweise des Ko-Kneters können die zahlreichen Untersuchungen von Ein- und Mehrschnecken Systemen nicht ohne weiteres auf den Ko-Kneter übertragen werden. Schwierigkeiten bei der Beschreibung und der mathematischen Modellierung stellen die oszillierende Bewegung der Schnecke, die räumlichen Unterbrechungen der Schneckenstege sowie die Interaktionen mit den Knetzähnen dar. Aus diesem Grund muss ein gutes verfahrenstechnisches Ver-



Blick ins Innere des Ko-Kneters, dessen Verhalten bei der Verarbeitung von Polyethylen und Polystyrol simuliert wurde © SKZ

ständnis für die Vorgänge im Kneter geschaffen werden und basierend darauf müssen neue Modelle entwickelt werden.

Funktionsprinzip des Ko-Kneters

Der Ko-Kneter ist ein Einschneckenextruder, der neben der rotierenden Schneckenbewegung eine überlagernde oszillierende Bewegung in der Schneckenachse durchführt [2]. Dieses Funktionsprinzip bewirkt neben radialen Mischprozessen eine zusätzliche Längsvermischung, das höchste Mischanforderungen erfüllt. Das Verfahrensteil besteht aus einem axial teilbaren Schneckengehäuse und der modular aufgebauten Schnecke (**Titelbild**).

Hier finden verschiedene Förder- und Knetelemente mit unterschiedlichen Flügelängen Verwendung. Dank des modularen Aufbaus kann die Schnecke an die jeweiligen Anforderungen angepasst werden. Entlang der Achse befinden sich an der Zylinderwand in vier Reihen Knetzähne, die in den Schneckenkanal hineinragen.

Um bei den Bewegungsabläufen eine Berührung der Knetzähne mit der Schnecke zu verhindern, sind die Schneckenstege nicht durchgängig, sondern in die Schneckenflügel unterteilt. Dieser Aufbau führt in Kombination mit der Bewegung zu gut kontrollierbaren Scherkräften, großen Relativverschiebungen der

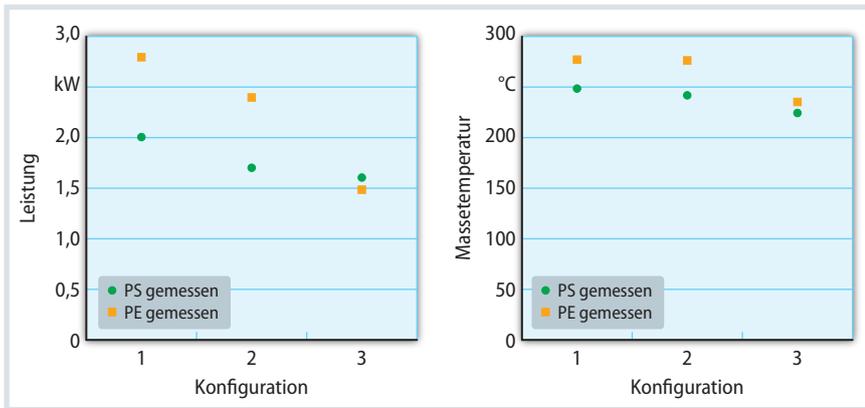


Bild 1. Eingebraachte Leistung (links) und Schmelzetemperaturen (rechts) am Extruderende für einen Durchsatz von 8 kg/h und eine Drehzahl von 400 min^{-1} dargestellt bei unterschiedlichen Schneckenkonfigurationen Quelle: SKZ, Grafik: © Hanser

Masseschichten und schließlich zu einem hohen Mischeffekt. Deshalb wird der Ko-Kneter zum Compoundieren von temperatur- und scherempfindlichen Kunststoffen, Kautschuken sowie in der Lebensmittelindustrie eingesetzt [3]. Um trotz der oszillierenden Bewegung einen kontinuierlichen Materialaustag zu gewährleisten, wird der Ko-Kneter beispielsweise mit einem Einschnecken-Austragsextruder gekoppelt [4]. Die hier vorgestellten Untersuchungen fokussieren sich auf das Ko-Kneter-Verfahrensteil, da für die Ausstragsaggregate auf vorhandene Arbeiten zurückgegriffen werden kann [5, 6].

der Schneckenkonfiguration 3 werden nach der ersten Knetzone vorwiegend Fördererlemente eingesetzt, um dort das Prozessverhalten mit reduzierten Scherungen untersuchen zu können. Für die Schneckenkonfigurationen wurden verschiedene Betriebsparameter wie Pinanzahl, Drehzahl und Durchsatz variiert und deren Einflüsse auf den Verarbeitungsprozess von Polyethylen (PE) und Polystyrol (PS) untersucht.

Für mischintensive Schnecken ist die benötigte Leistung für PE höher als die für PS, wie **Bild 1 links** exemplarisch zeigt. Die-

ser Unterschied lässt sich durch die höhere Viskosität (MFR = $0,3 \text{ g}/10 \text{ min}$) und die höhere Aufschmelzenthalpie (ca. 500 J/g) des teilkristallinen PE gegenüber dem amorphen PS mit niedrigerer Viskosität (MFR = $3,7 \text{ g}/10 \text{ min}$, Aufschmelzenthalpie ca. 150 J/g) erklären. Hinsichtlich der Schneckenkonfiguration zeigte sich, dass die Elemente mit breiten Flügeln (KN) insgesamt weniger Energie in das Material einbringen als die Elemente mit schmalen Flügeln (KL). Dies überrascht, da breite Flügel eine höhere mittlere Schergeschwindigkeit bei KN-Elementen erwarten lassen. Allerdings ist aufgrund der breiteren Flügel auch das Fördervermögen besser, sodass der Füllgrad niedriger ist und dieser Effekt für die untersuchten Materialien überwiegt.

Die Massetemperaturen am Extruderende (**Bild 1 rechts**) spiegeln den unterschiedlichen Leistungseintrag wieder; Schneckenkonfiguration 3 zeigt dabei, dass bei geeigneter Konfiguration die Materialien eine niedrigere Massetemperatur aufweisen und PE trotz der höheren Viskosität bei ähnlichen Temperaturen wie PS verarbeitet werden kann.

Um die Vorgänge in der Maschine zu verstehen, ist deshalb auch die Beurteilung von Schmelztransport, Vollfüllungen, Rückstaulängen und Verweilzeit- ➤

Experimentelle Untersuchung

Für die Experimente kam ein Labor-Ko-Kneter (Typ: MX 30–22 F40–6, Baujahr 2014, Hersteller Buss AG, Pratteln/Schweiz) mit 30 mm Schneckendurchmesser, einem L/D-Verhältnis von 22 und einem Hub von 5,5 mm zum Einsatz. Es wurden insgesamt drei Schneckenkonfigurationen untersucht: Die Schneckenkonfiguration 1 verfügt in der Schmelzeförderzone hauptsächlich über KL-Elemente (Knetelemente mit verkürzten Flügeln). Bei der Schneckenkonfiguration 2 wurden anstelle von KL-Elementen KN-Elemente eingesetzt, die längere Flügel aufweisen, wodurch eine stärkere Scherwirkung zustande kommen soll, da das Material über einen längeren Zeitraum zwischen Flanke und Knetbolzen geschert wird. Außerdem wird die Rückströmung der Polymermasse reduziert, wodurch KN-Elemente eine höhere Förderwirkung aufweisen, was sich wiederum auf eine Verkürzung der Verweilzeit des Kunststoffes auswirkt [2]. In

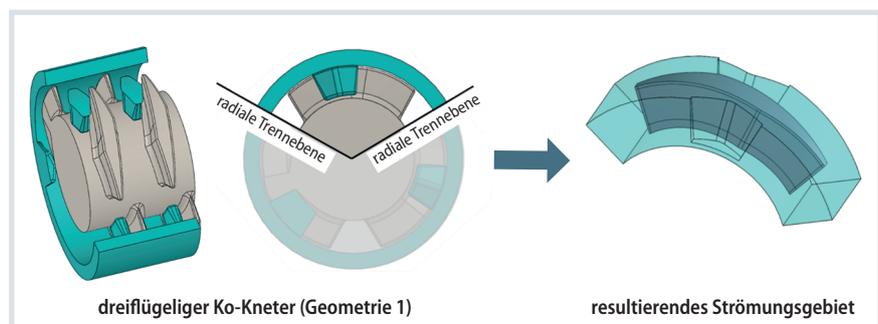


Bild 2. Vereinfachung der Rechengeometrie mit axialer und radialer Begrenzung am Beispiel eines dreiflügeligen Ko-Kneters (Geometrie 1) Quelle: IKT, Grafik: © Hanser

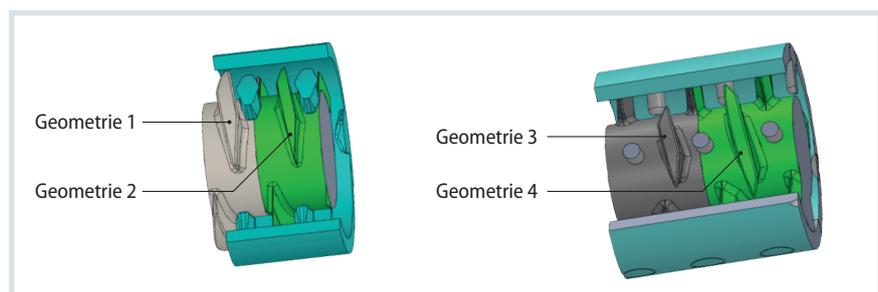


Bild 3. Simulierte Geometrievariationen: Geometrien 1 und 2 sind dreiflügelige Ko-Kneter, Geometrie 3 und 4 besitzen 4 Flügel. Unterschied zwischen Geometrie 1 und 2 ist die Breite des Flügels und Geometrie 3 und 4 unterscheiden sich in Breite und Länge der Flügel Quelle: IKT, Grafik: © Hanser

ten essentiell. Der lokale Füllgrad des Extruders wurde dazu über Dead-Stop-Versuche ermittelt. In diesen Versuchen wird der Extruder rapide gestoppt und der Zylinder geöffnet, sodass die Vorgänge in

Die Autoren

Jochen Kettemann, M.Sc., ist seit 2016 wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Abteilung Verarbeitungstechnik des Instituts für Kunststofftechnik (IKT) der Universität Stuttgart;

jochen.kettemann@ikt.uni-stuttgart.de
Univ. Prof. Dr.-Ing. Christian Bonten leitet seit 2010 das IKT

Rebecca Wolff, M.Sc., ist seit 2019 wissenschaftliche Mitarbeiterin in der Gruppe Compoundieren und Extrudieren am Kunststoff-Zentrum (SKZ) in Würzburg
Dipl.-Ing. Johannes Rudloff leitet seit 2016 die Gruppe Compoundieren und Extrudieren am SKZ

Dr.-Ing. Marieluise Lang leitet seit 2015 des Bereich Materialien, Compoundieren, Extrudieren am SKZ

Dr. rer. nat. Thomas Hochrein ist seit 2017 Geschäftsführer der Forschung und Weiterbildung des SKZ

Prof. Dr.-Ing. Martin Bastian ist seit 2006 Institutsdirektor des SKZ

Dank

Das IGF-Vorhaben N der Forschungsvereinigung FSKZ wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages vom 1.8.2016 bis 31.1.2019 gefördert. Wir bedanken uns für die finanzielle Unterstützung. Weiterer Dank gilt der Buss AG, Pratteln/Schweiz, und der X-Compound GmbH, Kaisten/Schweiz, für die Unterstützung und Bereitstellung der Geometrien.

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

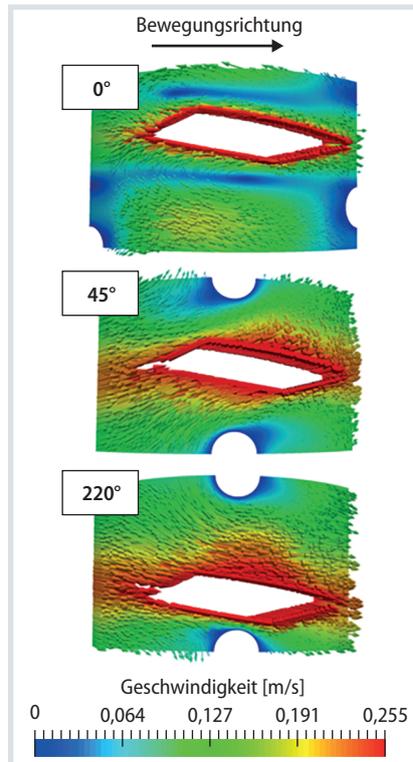


Bild 4. Geschwindigkeitsprofile von charakteristischen Flügelpositionen eines vierflügeligen Ko-Kneters (Geometrie 3, KL-Element). Das Strömungsprofil wurde radial geschnitten, eine Farbskala zeigt den Betrag der Geschwindigkeit, Pfeile zeigen ihre Richtung

Quelle: IKT, Grafik: © Hanser

der Maschine analysiert werden können. Dabei zeigte sich eine Zunahme des Füllgrads bei steigendem Durchsatz und sinkender Drehzahl. Knetelemente vom Typ KL weisen generell den höchsten Füllgrad auf. Dieser beeinflusst schließlich sowohl die Verweilzeit als auch die Leistung des Extruders. Die Verweilzeiten wurden mithilfe eines Titandioxid-Tracers und einem Schmelze-Farb-Sensors am Extruderende bestimmt, um damit die entwickelten Modelle zu überprüfen (siehe unten).

Modellierung

Im Folgenden werden die erarbeiteten analytischen und numerischen Berechnungsmodelle des Ko-Kneters vorgestellt. Anhand numerischer Strömungssimulationen lassen sich Strömungsgrößen wie Strömungsrichtung und Schergeschwindigkeit auflösen, die experimentell nicht erfasst werden können. Zudem kann durch eine dreidimensionale Betrachtungsweise ein Extruder im Detail untersucht werden [7]. Analytische

Berechnungsmodelle liefern wichtige Prozessgrößen wie Leistung und Temperatur entlang des Extruders, mit denen er effizient und auf die Anwendung optimiert ausgelegt werden kann [7]. Nachfolgend wird das Vorgehen für beide Ansätze kurz erläutert; für eine genaue Herleitung der Modelle siehe Lang et al. [8].

Numerische Modellierung

Um den Knetter anhand konventioneller Simulationsmethoden modellieren zu können, wurden Modellannahmen getroffen [9]. **Bild 2** zeigt das vereinfachte Strömungsgebiet einer Knetflügelposition. Da die Modelle zunächst stationär gerechnet werden, müssen für jede charakteristische Knetflügelposition Ausschnitte erstellt und simuliert werden. Um zudem der überlagerten Bewegung Rechnung zu tragen, wird für jede Flügelposition neben einer konstanten Drehzahl auch die überlagerte oszillierende Schneckenbewegung in axialer Richtung berücksichtigt. Zur übergreifenden Betrachtung einer Knetter-Konfiguration wurden die berechneten Strömungsgrößen über die einzelnen Ausschnitte hinweg gemittelt und ausgewertet.

Mithilfe der Simulationsumgebung OpenFoam wurden jeweils zwei unterschiedliche Knetelemente zweier Maschinentypen simuliert (**Bild 3**). Es wurden die stationären, isothermen Simulationen bezüglich der resultierenden Geschwindigkeitsfelder und der gemittelten Schergeschwindigkeiten pro Maschinentyp und Konfiguration verglichen.

Analytische Modellierung

Zur analytischen Modellierung des Ko-Kneters wurde ein für Einschnecken-, Doppelschnecken und Planetwalzenextruder bewährtes Vorgehen angewandt [6, 7, 10, 11]. Dazu wird die Geometrie in kurze Abschnitte gleicher Geometrie zerlegt, die dann mit ca. zehn Geometrieparametern wie Schneckenkanalanzahl, -höhe und -breite, Pinanzahl und Breite der Durchbrüche in den Knetflügeln beschrieben werden. Die Geometrieparameter lassen sich gemeinsam mit Materialdaten nutzen, um Prozessgrößen zu berechnen. Dabei werden einzelne Prozessschritte, wie Schmelzeförderung und Temperaturentwicklung, zunächst separat betrachtet und anschließend in einem Berechnungsprogramm über einen itera-

tiven Berechnungsprozess gekoppelt. Dabei wird z.B. zur Beschreibung der Schmelzeförderung angenommen, dass sie sich durch eine Überlagerung von Schlepp- und Druckströmung mittels dimensionsloser Kennzahlen beschreiben lässt. Zur energetischen Betrachtung erfolgt eine Bilanz der Energie-, Masse- und Leistungsströme des Extruders.

Ergebnisse und Bewertung der Berechnungsmodelle

Die wichtigsten Ergebnisse innerhalb der analytischen und numerischen Berechnungsmodelle werden im Folgenden vorgestellt und bewertet. Dabei liegt der Fokus in der numerischen Simulation auf einem Vergleich der Schergeschwindigkeiten in den schmelzdominierten, vollgefüllten Zonen des Ko-Kneters. Das analytische Modell hingegen betrachtet mehrere zur Auslegung relevante Größen, wie bspw. Verweilzeit, Massetemperatur, Füllgrad, Leistungseintrag und Druck über die gesamte Extruderlänge.

Ausgewertet wurden die numerischen Simulationen sowohl qualitativ an-

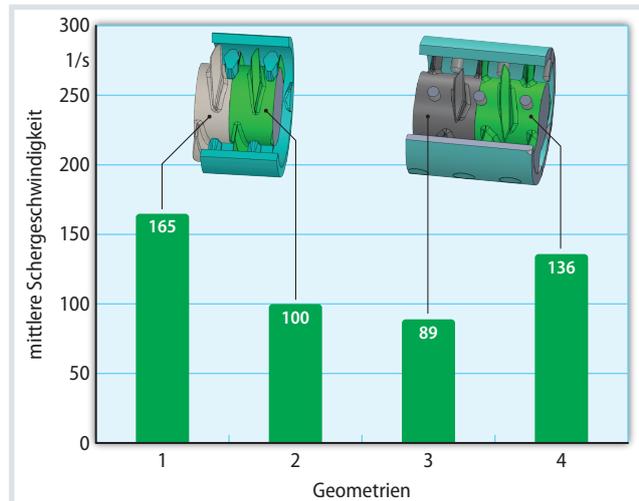


Bild 5. Vergleich der mittleren Schergeschwindigkeit für Geometrien 1 bis 4

Quelle: IKT, Grafik: © Hanser

hand des Geschwindigkeitsfelds als auch quantitativ durch Berechnung der mittleren Schergeschwindigkeit. Anhand der Geschwindigkeitsprofile für drei charakteristische Flügelpositionen (beispielhaft in **Bild 4** dargestellt) ist zu erkennen, dass eine 220°-Stellung teilweise zu einer Rückströmung führt, die zudem die Schergeschwindigkeit beeinflusst. Obwohl die getroffenen Annahmen den rea-

len Ko-Knet-Prozess stark vereinfachen, spiegeln die gemittelten Schergeschwindigkeiten (**Bild 5**) die Praxiserfahrungen wider, dass ein breiterer Flügel die Schergeschwindigkeit erhöht (vgl. Geometrie 3, KL-Element, und Geometrie 4, KN-Element) und ein dünnerer Flügel diese verringert (vgl. Geometrie 1 und 2). Folglich können dadurch mit reduziertem Aufwand bereits erste Tendenzen an- ➤

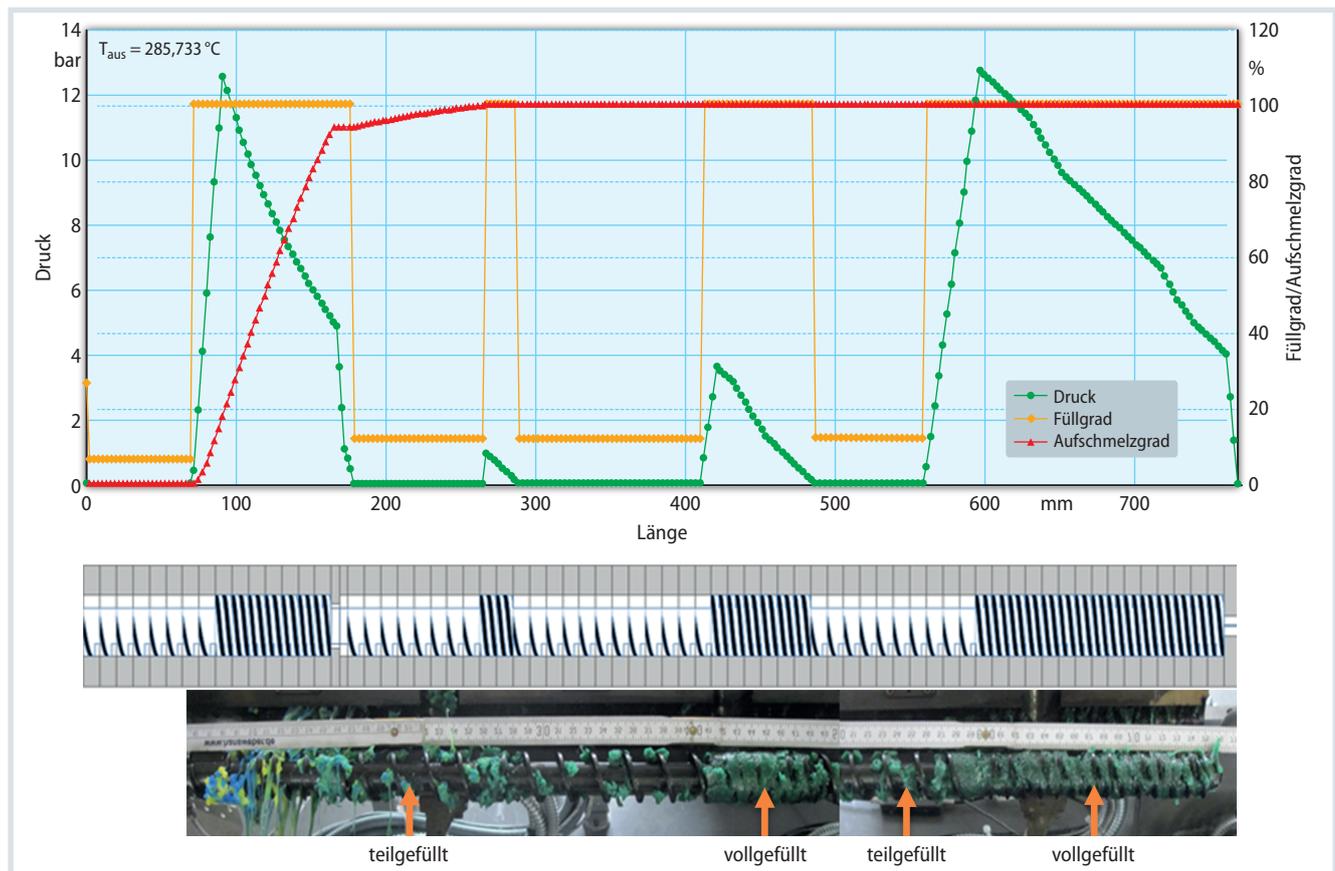


Bild 6. Gegenüberstellung von simulierten Drücken, Füllgraden und Aufschmelzgraden von PE. Fördererelemente sind in der Schneckenzeichnung unterbrochen und Knetelemente voll dargestellt. Quelle: SKZ, Grafik: © Hanser

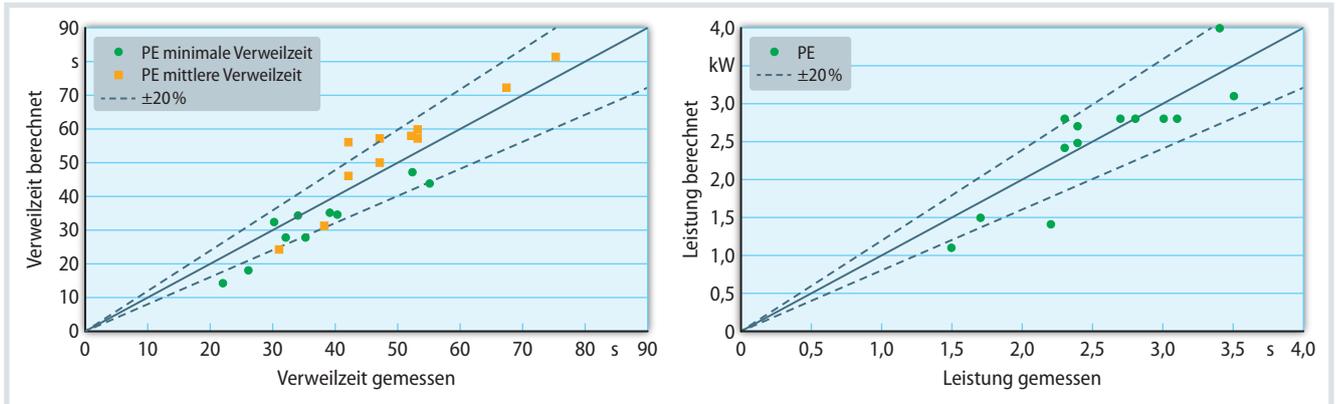


Bild 7. Gegenüberstellung von simulierten und gemessenen Werten: Links die kumulierten minimalen bzw. mittleren Verweilzeiten, rechts die Leistungen, jeweils für verschiedene Betriebspunkte mit PE als Matrixmaterial. Quelle: SKZ, Grafik: © Hanser

hand quantitativer Daten vorhergesagt werden. Des Weiteren wurde in einer simulativen Parameterstudie festgestellt, dass die Schergeschwindigkeit von den rheologischen Eigenschaften abhängt. So ist die resultierende mittlere Schergeschwindigkeit umso höher, je strukturviskoser die Kunststoffschmelze ist.

Für die analytische Berechnung wurde das Simulationstool SimKo entwickelt, das über Visual Basic Applications (VBA) in MS Excel integriert ist. Das Tool ermöglicht es unter Eingabe von Material-, Geometrie- und Prozessparametern 1D-Simulationen mit den entwickelten Ko-Knetermodellen durchzuführen. Die Validierung der Modelle erfolgte über einen Vergleich der berechneten mit experimentellen Ergebnissen. In **Bild 6** sind die berechneten Verläufe von Druck, Füllgrad und Aufschmelzgrad exemplarisch für einen Versuchspunkt mit PE dem Foto eines Dead-Stop-Versuchs gegenübergestellt. Die Knetelemente sind sowohl in der Berechnung als auch im Experiment

vollgefüllt. Dies ist auch für die unmittelbar davorliegenden Fördererlemente der Fall, wodurch der Druck zum Überfahren der Knetelemente aufgebaut wird. Auch der Aufschmelzbeginn und das Aufschmelzende, die nicht im Fokus der hier vorgestellten Arbeiten lagen, werden gut von der Berechnung wiedergegeben [12; DFG Projekt: BA 1841/30–1].

Im Folgenden ist die Modellgenauigkeit für eine Variation der Betriebsparameter und Schneckenkonfiguration am Beispiel von PE gezeigt. In **Bild 7 links** sind gemessene und simulierte kumulierte Verweilzeiten dargestellt. Die minimale Verweilzeit liegt in einem Bereich von 20–60s, wobei die errechnete mittlere Verweilzeit mit 30–80s ca. 30% größer war. Der Fehler in der Vorhersagegenauigkeit liegt dabei unter 20%.

Auch der in **Bild 7 rechts** gezeigte Abgleich der Ergebnisse hinsichtlich der Leistung und Massetemperatur an unterschiedlichen axialen Positionen weist Abweichungen in derselben Größenordnung auf. Unter Berücksichtigung der getroffenen Vereinfachungen für die Modellierung, stellt dies eine gute Übereinstimmung zwischen Berechnung und Experiment dar.

Fazit und Ausblick

Die systematischen experimentellen und theoretischen Prozessuntersuchungen tragen zum tiefergehenden Verständnis über die verfahrenstechnischen Vorgänge innerhalb des Ko-Kneters bei. Die Experimente ermöglichen die Identifizierung der signifikanten Verfahrensparameter und damit die Klärung der im Extruder auftretenden Wechselwirkungen

zwischen Maschinenkonfiguration, Prozessparameter und eingesetztem Material. Innerhalb der numerischen Simulationen ließ sich durch Annahmen die Komplexität soweit reduzieren, dass der instationäre Ko-Knet-Prozess stationär simuliert werden konnte. Die vereinfachten Rechenmodelle liefern bereits vielversprechende Ergebnisse und können erste Tendenzen bei Variation von Geometrie und Einflussfaktoren abbilden. In weiterführenden Arbeiten gilt es die reale Schneckenbewegung anhand bewegter Simulationen umzusetzen. Eine sehr vielversprechende Methode ist dabei die Immersed-Boundary-Surface-Methode, mit der sich beliebig komplexe Schneckenbewegungen simulieren lassen. **Bild 8** zeigt beispielhaft erste Ergebnisse einer solchen Simulation.

Durch analytische Modelle und die Implementierung in ein Simulationstool können erstmals wichtige Prozessgrößen im Ko-Kneter in wenigen Sekunden vorhergesagt werden. Dabei werden eine große Bandbreite an Verfahrenskonfiguration und Materialsysteme im Modell abgebildet. Die Arbeiten verringern somit die Lücke hinsichtlich Prozessverständnis und Simulationsmöglichkeiten des Ko-Kneters im Vergleich zum Stand der Technik für Ein- und Doppelschneckenextruder signifikant. Obwohl die Simulationen bisher nur für den eingesetzten Kneter MX-30 und zwei Materialsysteme validiert sind, ermöglichen die Ergebnisse dennoch bereits den begleitenden Einsatz von Simulationen bei der Auslegung von Ko-Kneter-Prozessen und bieten eine Ausgangsbasis für weitere industriennahe Forschungs- und Entwicklungsarbeiten auf diesem Gebiet. ■

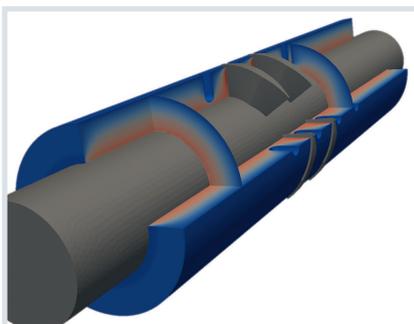


Bild 8. Geschwindigkeitsfeld einer dreidimensionalen Ko-Kneter-Simulation (vierflügeliger Kneter, Geometrie 3) in OpenFoam mit realer Schneckenbewegung unter Verwendung der Immersed-Boundary-Surface-Methode © IKT