

Berger/Kiefer (Hrsg.)

DICHTUNGS TECHNIK

JAHRBUCH 2018

ISGATEC®

Simulationsunterstützte Produktentwicklung für neuartige LSR-Anwendungen

Im Spritzgussverfahren hergestellte optische Bauteile unterliegen besonderen Anforderungen und stellen die Verarbeiter vor zahlreiche Herausforderungen. Probleme im Herstellungsprozess haben im Normalfall direkte Auswirkungen auf die optischen Eigenschaften des Bauteils. Um eine Beeinträchtigung der optischen Eigenschaften und den damit einhergehenden Ausschuss zu vermeiden, ist die Ermittlung des idealen Prozessfensters unerlässlich. Dies gilt insbesondere für Bauteile aus hochtransparentem Flüssigsilikonkautschuk (Liquid Silicone Rubber = LSR), wobei letzterer aufgrund seiner besonderen Materialeigenschaften üblicherweise nur in einem definierten Prozessfenster verarbeitet werden kann. Optische Anwendungen stellen jedoch auch besondere Anforderungen an das Werkzeugkonzept. Nur mit optischen Einsätzen, die eine perfekte optische Beschaffenheit garantieren und exakt im Werkzeug positioniert sind, lässt sich das Bauteil in gewünschter Qualität produzieren.

Gerade bei neuartigen Anwendungen, für die nicht auf Erfahrungen aus anderen Werkzeugen und Prozessen zurückgegriffen werden kann, ist die Simulation ein wertvolles Hilfsmittel bei der Auslegung von Bauteil, Werkzeug und Prozess. Durch den konsequenten und entwicklungsbegleitenden Einsatz von integrativen Simulationslösungen können diese Anwendungen kostengünstig am Computer ausgelegt werden, ohne Ressourcen in langwierigen Trial-and-Error-Versuchen zu verschwenden.

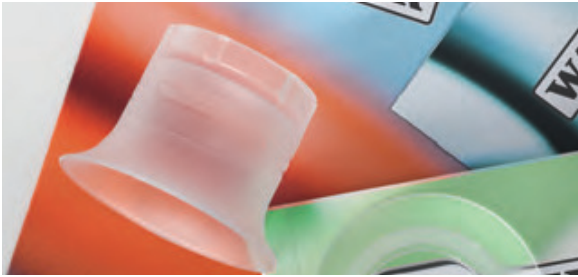
Praxisbeispiel: Lupe aus hochtransparentem LSR

Zu Demonstrationszwecken sollte auf einer Messe eine Lupe aus einem hochtransparenten LSR gefertigt werden >>1. Besonders im Bereich der Vergrößerungslinse bedingt die Gewährleistung der Funktion eine perfekte Bauteilqualität, denn Bauteilfehler wären in diesem Bereich sofort sichtbar und würden die

Von Vanessa Frekers¹, Engineering & Manager Marketing, Dr. Thomas Frese², Leiter technisches Marketing im Business Team „Rubber Solutions“ und Ing. Joachim Kruder³, Vertrieb,

¹ SIGMA Engineering GmbH | www.sigmasoft.de, ²Wacker Chemie AG | www.wacker.com,

³ Rico Elastomere Projecting GmbH | www.rico.at



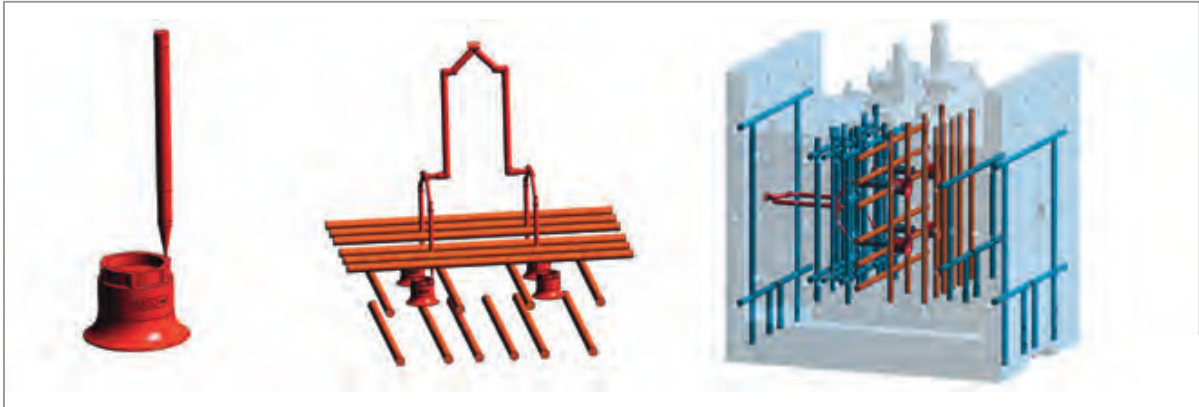
>>1: Lupe aus hochtransparentem LSR

(Bild: Wacker Chemie AG)

optische Funktion beeinträchtigen. Neben der glasklaren optischen Linse der Lupe wurden vom Material vor allem kurze Prozesszeiten gefordert. Die Wahl fiel deshalb auf das Material LUMISIL® LR 7601, das sich nicht nur durch optische Transparenz, sondern auch durch eine vergleichsweise hohe Vernetzungsgeschwindigkeit auszeich-

net. Gleichzeitig ist es bei Berücksichtigung seines rheologischen Eigenschaftsprofils im Spritzgießprozess gut verarbeitbar. Aufgrund seiner geringen flüchtigen Bestandteile entfällt für viele Anwendungen zudem eine Nachbehandlung, was die Zeit zum fertigen Bauteil ebenfalls verkürzt. Ein weiterer Vorteil des Materials, der besonders bei der Verwendung von optischen oder sichtbar verbauten Bauteilen von Bedeutung ist, liegt darin, dass es auch bei Dauerbelastung glasklar bleibt und darüber hinaus deutlich weniger als hochtransparente Alternativmaterialien wie Polycarbonate (PC) oder Polymethylmethacrylate (PMMA) altert. Bei LUMISIL® LR 7601 kommen außerdem die klassischen Vorteile von Siliconen zum Tragen; seine exzellente Temperatur- und UV-Beständigkeit bedingt minimale Vergilbung oder Versprödung.

Wie auch bei klassischen Flüssigsiliconen stellt auch bei diesem LSR die hohe Vernetzungsgeschwindigkeit den Verarbeiter vor große Herausforderungen, da sie das mögliche Prozessfenster einschränkt. So darf die Bauteilfüllung nicht zu langsam erfolgen, da es bei hohen Temperaturen sonst schon zu frühzeitigem Anvernetzen kommen kann, was zu einer Beeinträchtigung der optischen Eigenschaften führen könnte. Um das mögliche Prozessfenster bestmöglich zu nutzen und für die Produktion abzustecken, ist eine sorgfältige Auslegung des Prozesses unerlässlich. Am einfachsten gelingt dies durch ein strukturiertes Vorgehen, bei dem die Produkt- und Werkzeugentwicklung von Beginn an durch die Simulation unterstützt wird. Dazu wird das Simulationsmodell nach und nach erweitert, um die Antworten auf die typischen Fragestellungen jedes Entwicklungsschrittes zu finden [1]. Dieser entwicklungsbegleitende Einsatz der Simulation führt zu einer sicheren Auslegung des Prozesses und des Werkzeugs, der Festlegung eines idealen Prozessfensters sowie dazu, dass die Produktion ohne Werkzeugkorrekturen und ohne die Verschwendung von Material in Trial-and-Error-Versuchen anlaufen kann. Wie dieser kontinuierliche Einsatz aussehen kann und welche Fragestellungen so beantwortet werden, wird im Folgenden aufgezeigt.



>>2: Unterschiedliche Simulationsmodelle für unterschiedliche Fragestellungen – von der Bauteilsimulation (links) über ein erweitertes Modell zur ersten thermischen Auslegung (Mitte) bis zur Berücksichtigung des kompletten Werkzeugs über mehrere Zyklen in der SIGMASOFT® Virtual Molding Technologie (rechts) (Bild: SIGMA Engineering GmbH)

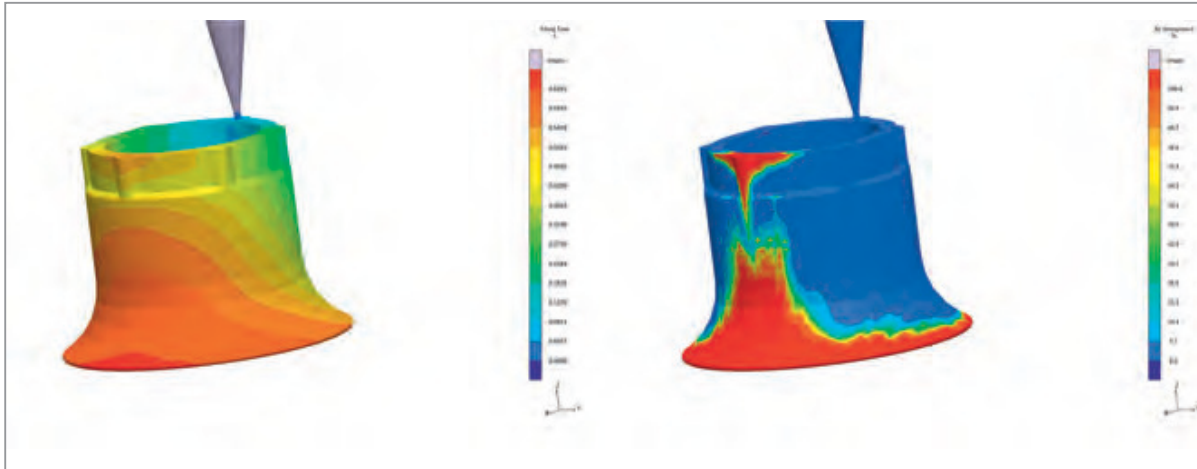
Bauteilsimulation & erste thermische Auslegung

Wie zu Beginn jedes neuen Produktes stellen sich auch bei der Lupe zunächst einige grundlegende Fragen, die mittels einer Füllsimulation beantwortet werden sollen:

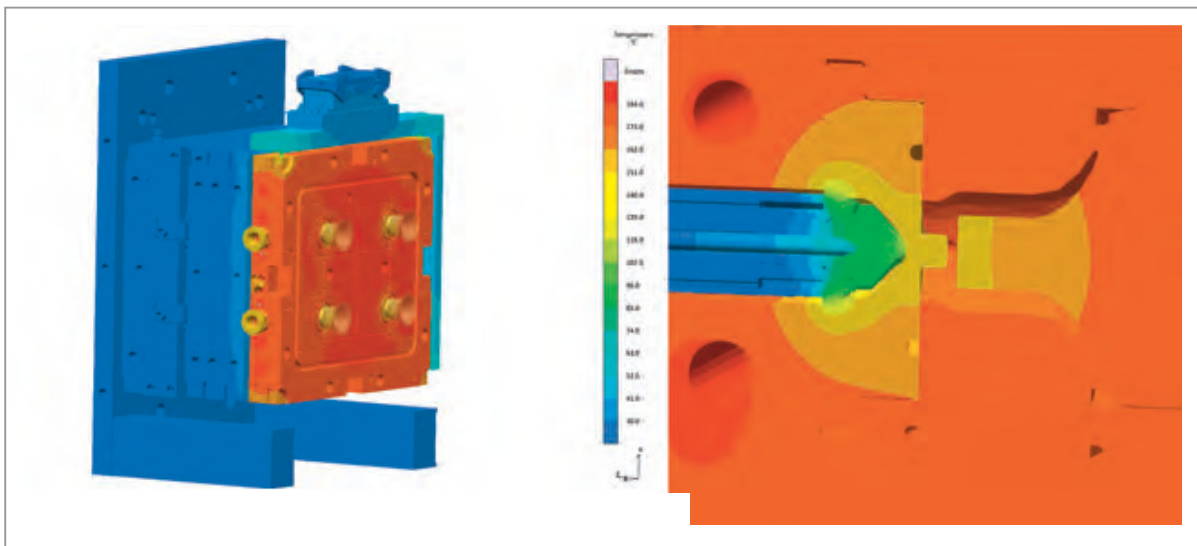
- Wie verläuft die Bauteilfüllung und wo befindet sich das Fließwegende?
- Was ist der ideale Anspritzpunkt?
- Gibt es die Gefahr von Bindenähten oder Lufteinschlüssen, insbesondere in den Bereichen mit optischer Funktion?
- Wo muss eine Entlüftung vorgesehen werden, um diese zu vermeiden oder zu verringern?

Dazu wird zunächst die Füllung von nur einer Kavität unter der Annahme einer homogenen Werkzeugtemperatur betrachtet >>2 links. Mit diesem aus der klassischen Spritzgießsimulation bekannten Ansatz lassen sich bereits die meisten Antworten auf die vorhergehenden Fragen finden. So kann, bei der richtigen Kombination aus Anspritzpunkt und Entlüftung, die Linse ohne Bindenähte produziert werden >>3 links. Um Lufteinschlüsse zu vermeiden, sollte jedoch für das Werkzeug ein entsprechendes Entlüftungskonzept vorgesehen werden >>3 rechts [2].

Als nächstes wird das Simulationsmodell erweitert, um weitere Erkenntnisse für das spätere Werkzeugkonzept abzuleiten. Neben allen Kavitäten und dem kompletten Angusssystem werden auch die Heizpatronen in die Betrachtung mit einbezogen >>2 Mitte. Diese erste thermische Abschätzung hilft nicht nur dabei, die Balanciertheit der Kavitäten sowie die Gefahr einer frühzeitigen Anvernet-



>>3: Auswertung der Bauteilfüllung: eingeschlossene Luft (rechts) und Füllzeiten (links), letztere zeigen, dass die Lupe ohne Bindenähte produziert werden kann (Bild: SIGMA Engineering GmbH)



>>4: Werkzeugtemperaturen im eingeschwungenen Zustand: für die gesamte feste Hälfte des Werkzeugs (links) und als Detailansicht für eine Kavität (rechts), der kältere Kaltkanalverteiler ist deutlich erkennbar (Bild: SIGMA Engineering GmbH)

zung (Scorch) während des Füllens zu beurteilen. Sie ermöglicht auch einen ersten Eindruck zur Wirksamkeit des Heizkonzepts und insbesondere zu seinem Einfluss auf die Vernetzungsreaktion innerhalb der Kavitäten. Darüber hinaus liefert dieses Simulationsmodell durch die Berücksichtigung der Heizpatronen im Werkzeugblock sowie die Berechnung der Aufheizung des Werkzeugs auch eine erste grobe Temperaturverteilung im kavitätsnahen Bereich. Es erlaubt so eine erste Einschätzung zur Gleichmäßigkeit der Temperierung und liefert erste Hinweise auf mögliche Cold oder Hot Spots im späteren Werkzeug.

Vom ersten Konzept zum fertigen Werkzeug

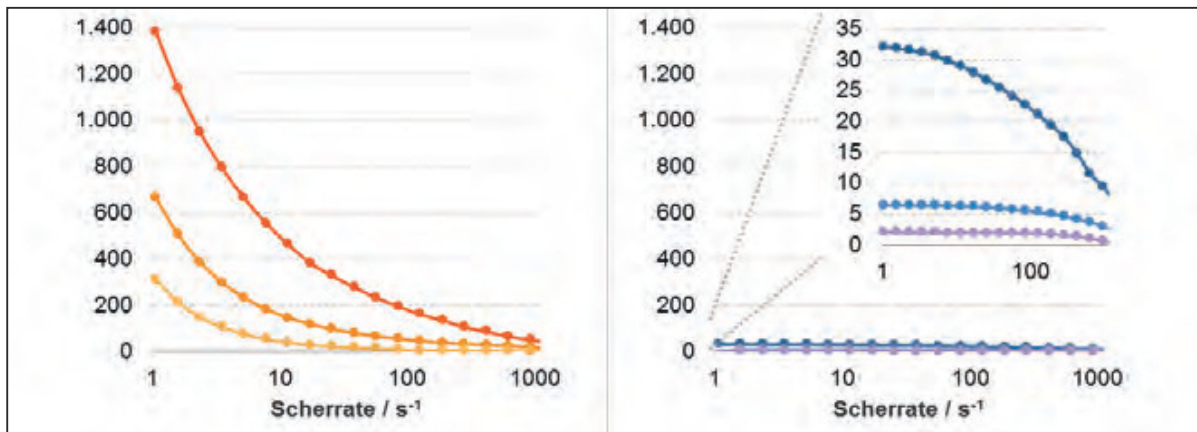
Wenn schließlich die ersten wichtigen Fragestellungen für Werkzeug und Prozess geklärt sind, kann das Werkzeug mit Hilfe dieser Informationen konstruiert werden. Anschließend wird auch dieses fertige Werkzeugkonzept simulativ überprüft, um eventuelle Schwierigkeiten aufzudecken und das spätere Prozessfenster zu definieren.

Dafür wird auch in der Berechnung das komplette Werkzeug zunächst aufgeheizt und dann über mehrere Produktionszyklen eingefahren, um einen thermisch stabilen Zustand zu erreichen. Bei der eingesetzten Virtual Molding Technologie werden dafür in der Berechnung alle Werkzeugelemente mit ihren jeweiligen charakteristischen thermischen Eigenschaften berücksichtigt **>>2 rechts**. So erhält der Anwender nicht nur eine genaue Temperaturverteilung im Werkzeug unter Produktionsbedingungen, sondern kann auch nachvollziehen, wie diese Verteilung die Bauteilfüllung und Vernetzungsreaktion beeinflusst. Beim Lupenwerkzeug treten im eingeschwungenen Zustand innerhalb der Kavität Temperaturunterschiede von über 20 °C auf **>>4 rechts**. Die Füllung und Vernetzungsreaktion des Bauteils wird deshalb noch einmal unter diesen Randbedingungen analysiert, um spätere Produktionsprobleme auszuschließen.

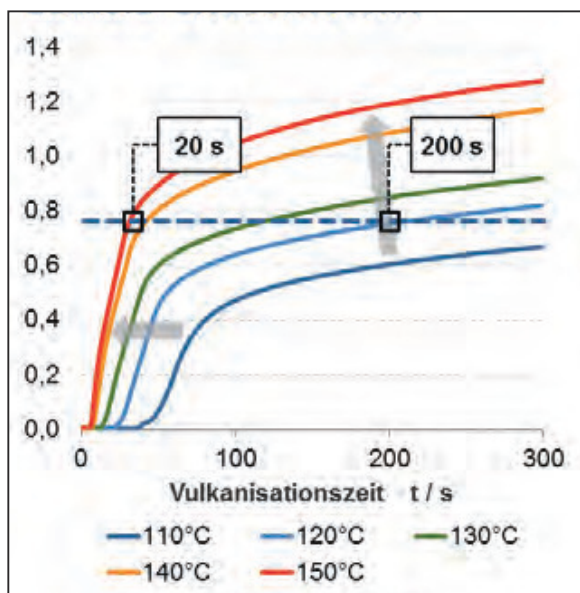
Hier zeigt sich, warum die Berechnung des eingeschwungenen Zustands nicht nur für die Prozessauslegung, sondern auch für die Berechnung der Bauteilfüllung wichtig ist. Bei einer einfachen Bauteilsimulation wird von einer homogenen Werkzeugtemperatur ausgegangen. Eine Beeinflussung der Bauteilfüllung und der Zykluszeit durch große Temperaturunterschiede im Werkzeug würde bei dieser Herangehensweise nicht beachtet und später an der Maschine zu Problemen führen.

Die Bedeutung gründlicher Materialcharakterisierung

Die Ergebnisse der Werkzeugberechnung machen außerdem deutlich, warum eine gründliche Materialcharakterisierung für die realitätsnahe Berechnung des LSR-Spritzgießprozesses so entscheidend ist. Gerade bei Hochleistungsmaterialien wie dem verwendeten Material können die Wechselwirkungen zwischen Werkzeug und Bauteil – und im Besonderen dessen Vernetzungsreaktion – nur mit Hilfe gemessener Daten genau vorhergesagt werden. Zum einen zeigt der Flüssigsilikonkautschuk aufgrund seiner vergleichsweise niedrigen Viskosität ein anderes Füllverhalten als nicht hochtransparente Standard-LSR-Materialien, wie sie üblicherweise am Markt verfügbar sind **>>5**. Zum anderen ändert sich die



>>5: Viskosität von LUMISIL® LR 7601/70 (rechts) im Vergleich zu einem nicht hochtransparenten Standard-LSR mit gleicher Shore-Härte (links) (Bild: Wacker Chemie AG)



>>6: Vernetzungsreaktion von LUMISIL® LR 7601 bei unterschiedlichen Temperaturen: eine Temperaturdifferenz von 20 °C kann die Vernetzungsdauer um den Faktor 10 verlängern (Bild: Wacker Chemie AG)

Geschwindigkeit der Vernetzungsreaktion schon bei geringen Temperaturunterschieden bereits deutlich. >>6 zeigt, dass schon geringe Differenzen die Vernetzungsdauer erheblich ändern und so eine ungleichmäßige Vernetzung und damit letztlich längere Zykluszeiten verursachen können [3]. Im schlimmsten Fall führt eine geringfügig höhere Bauteiltemperatur zum frühzeitigen Anvernetzen des Materials während der Füllung und damit zu Beeinträchtigungen der Bauteilqualität.

Derartige Effekte lassen sich in der Berechnung nur aufzeigen, wenn zur Charakterisierung des Materials die Scherviskositäten und die Vernetzungskinetik in ausreichender Genauigkeit gemessen werden. Dabei müssen die Messungen „entkoppelt“ durchgeführt werden, d.h. dass die Scherratenabhängigkeit der Viskosität, über die das Fließverhalten des Materials im Werkzeug beschrieben werden kann, unabhängig von der Vernetzung betrachtet wird. Die Viskositäten werden z.B. mithilfe eines Kegel-Platte-Rheometers in Abhängigkeit der Scherrate von bis zu 1.000 reziproken Sekunden bei mindestens drei Temperaturen bestimmt. Wichtig ist, dass bei dieser Messung die Vernet-

zungskinetik in ausreichender Genauigkeit gemessen werden. Dabei müssen die Messungen „entkoppelt“ durchgeführt werden, d.h. dass die Scherratenabhängigkeit der Viskosität, über die das Fließverhalten des Materials im Werkzeug beschrieben werden kann, unabhängig von der Vernetzung betrachtet wird. Die Viskositäten werden z.B. mithilfe eines Kegel-Platte-Rheometers in Abhängigkeit der Scherrate von bis zu 1.000 reziproken Sekunden bei mindestens drei Temperaturen bestimmt. Wichtig ist, dass bei dieser Messung die Vernet-

zung des gemischten A-/B-Systems (Mischungsverhältnis 1:1) ausgeschaltet werden muss, was durch einen messtechnischen Trick erfolgt. Andernfalls würde der bei erhöhten Temperaturen eintretende Vernetzungsprozess mit einhergehender Viskositätserhöhung das Ergebnis verfälschen. Dies ist zwingend erforderlich, weil für eine genaue Simulation eine separate Betrachtung von Vernetzung und Fließverhalten notwendig ist. Das Vernetzungsverhalten wird hingegen mit Hilfe eines klassischen Vulkameters bei wenigstens drei verschiedenen Temperaturen im Verarbeitungsbereich gemessen. Es beschreibt in ausreichendem Umfang den Übergang vom plastisch verformbaren in den formstabilen gummielastischen Zustand [3].

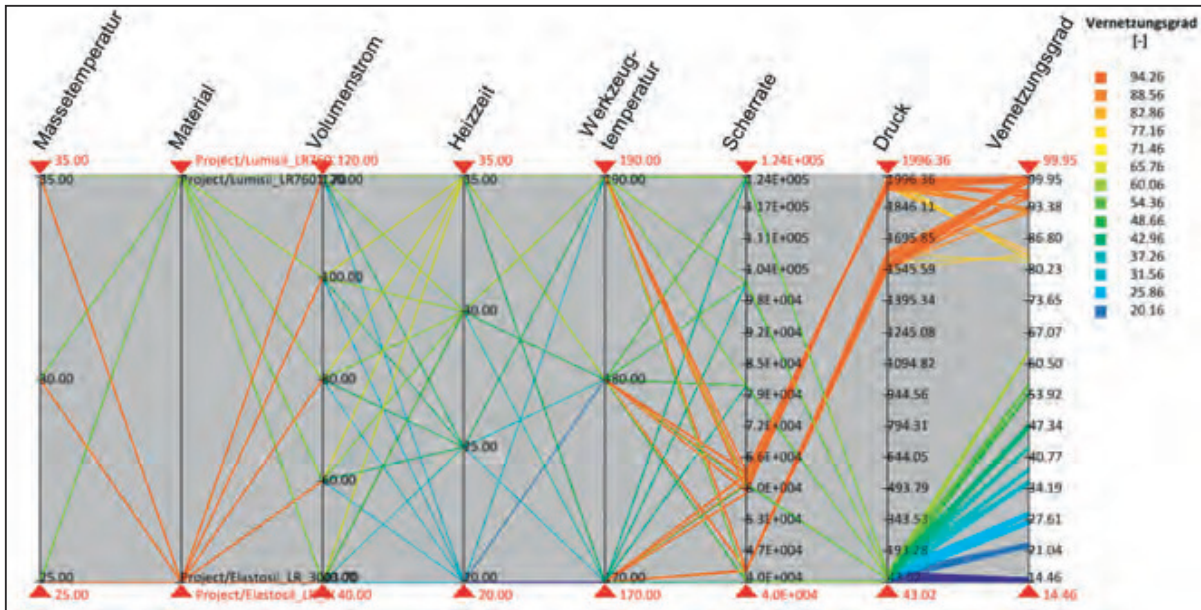
Integrative Simulation: Spritzgießsimulation & FEM

Die Simulation der Lupe unter Prozessbedingungen liefert außerdem wichtige Informationen für die weitere Auslegung des Bauteils mittels Finite Elemente Berechnung. Die Materialdaten des Bauteils sowie der am Zyklusende erreichte Vernetzungsgrad sind wertvolle Daten, um z.B. die notwendigen Entformungskräfte zu bestimmen. So kann zudem schon vor den ersten Prüfungen realer Bauteile abgeschätzt werden, ob diese bei der Entformung mit dem geplanten Konzept beschädigt würden [2]. Die Entwicklung und optimale Auslegung des Entformungskonzeptes erfolgt so mit einem integrativen Einsatz verschiedener Simulationslösungen unkompliziert am Computer. Spätere Änderungsmaße für das Entformungssystem am realen Werkzeug können so vermieden werden.

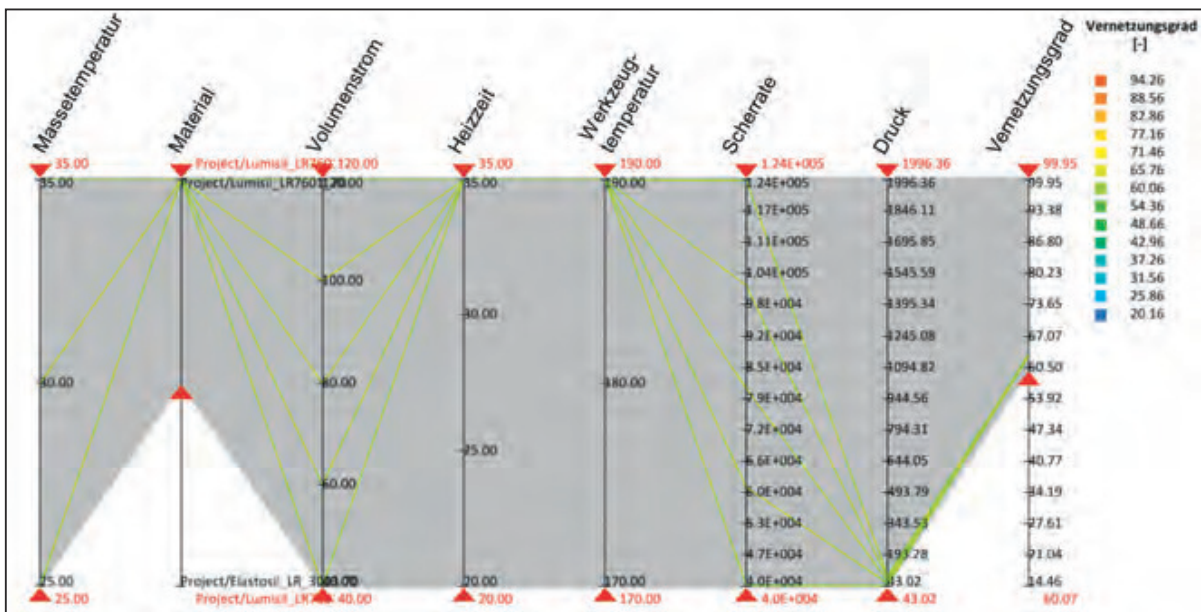
Virtuelle Festlegung des Prozessfensters

Bis zu diesem Punkt wurden zwar bereits immer mehr Informationen in die Simulation einbezogen, bisher wurden jedoch alle Betrachtungen immer nur für einen bestimmten Prozesspunkt innerhalb eines möglichen Prozessfensters durchgeführt. In der Produktion gibt es jedoch immer gewisse Schwankungen, sei es durch Änderungen der Randbedingungen oder Chargenschwankungen im Material. Für eine stabile Produktion ist deshalb auch im LSR-Spritzguss die Festlegung eines Prozessfensters wünschenswert, innerhalb dessen Anpassungen vorgenommen werden können, um solche Schwankungen auszugleichen.

Wollte man das mögliche Prozessfenster allein mit den bisher vorgestellten Simulationsmodellen ermitteln, nähme auch das virtuelle Aufsetzen und Berechnen aller möglichen Prozesspunkte viel Zeit in Anspruch. Einfacher ist es, das Prozessfenster mit Hilfe eines virtuellen Design of Experiments (DoE) zu ermit-



>>7: Ergebnis der virtuellen DoE: Variablen und Zielgrößen für die Verwendung von zwei ähnlichen Materialien (Bild: SIGMA Engineering GmbH)



>>8: Ergebnis derselben virtuellen DoE bei der Beschränkung auf LUMISIL® LR 7601 und einen minimalen Vernetzungsgrad von 45% (Bild: SIGMA Engineering GmbH)

tern. Dazu werden nicht nur die möglichen Variablen wie der Volumenstrom, die Zieltemperatur des Werkzeugs, das Material und sogar unterschiedliche Heizkonzepte vorgegeben, sondern auch Zielgrößen, die für die Bestimmung des idealen Prozessfensters besonders wichtig sind. Für die Lupe als Demonstrations-

bauteil war hier nicht nur ein ausreichender Vernetzungsgrad eine wichtige Zielgröße, sondern es wurde auch eine möglichst kurze Zykluszeit angestrebt.

>>7 zeigt das Ergebnis einer solchen virtuellen DoE. Senkrecht ist jeweils eine Variable oder Zielgröße aufgetragen, die bunten Linien verbinden jeweils die zusammengehörigen Werte für einen abgefahrenen Prozesspunkt. Sie stellen das gesamte potentielle Prozessfenster dar. Werden die tatsächlich möglichen Prozesspunkte jedoch durch die Auswahl des Materials (zweite senkrechte Linie von links) und einen minimal zur Entformung benötigten Vernetzungsgrad von 45% (erste senkrechte Linie von rechts) eingeschränkt, ergibt sich die Darstellung in >>8. Das Prozessfenster für eine stabile Produktion ist besonders hinsichtlich Heizzeit und Werkzeugtemperatur nur begrenzt. Für die Produktion der Lupe ist das eine wertvolle Information, um den Ausschuss so gering wie möglich zu halten.

Fazit

Durch die Nutzung des Potenzials simulativer Lösungen konnte nicht nur das Werkzeugkonzept für die Lupe ohne Versuche an einer Maschine entwickelt werden, auch das mögliche Prozessfenster wurde ermittelt, bevor überhaupt das Werkzeug gebaut wurde. Die Simulation lieferte dabei für die Werkzeugentwicklung die Grundlage für fundierte Entscheidungen hinsichtlich Entlüftungs-, Heiz- und Entformungskonzept. Dabei spielen jedoch korrekt berücksichtigte Materialeigenschaften eine entscheidende Rolle, da nur mit Kenntnis der tatsächlichen Vernetzungsreaktion und des tatsächlichen Fließverhaltens die Realität korrekt abgebildet werden kann. Sind diese gegeben ermöglicht der entwicklungsbegleitende Einsatz von Virtual Molding, FEM und virtueller DoE den Anwendern ein risikofreies Testen von Konzepten für neuartige Anwendungen und innovative Materialien.

Literatur

[1] Gebauer, Timo; Vortrag „Virtual Molding: Transparenz im LSR Spritzgussprozess“, bei SKZ-Fachtagung „Siliconelastomere“, Würzburg, 22.-23. März 2017

[2] Kruder, Joachim; Vortrag „Mit neuen Materialien effizient zum Werkzeugkonzept“, bei SKZ-Fachtagung „Siliconelastomere“, Würzburg, 22.-23. März 2017

[3] Frese, Dr. Thomas; Vortrag „LUMISIL® LR 7601 – Hochtransparente Silicone für den Spritzguss / Charakterisierung prozessrelevanter Eigenschaften“, bei SKZ-Fachtagung „Siliconelastomere“, Würzburg, 22.-23. März 2017